

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 20

2019

№ 7

Издается с 2000 года

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН
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, Турция
GROUMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI B. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАШЕНКО 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

- Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 2. Цифровые сервисы 387
- Воротников В. И. К задаче устойчивости по части переменных функционально-дифференциальных систем с последействием 398
- Щербатов И. А. Формализация неопределенности внешней среды при эксплуатации энергетического оборудования 405

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A. The Use of Integral Adaptation Principle to Synthesize Robust Control of Electric Vehicle Wheel Slip 412
- Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде 417
- Брискин Е. С., Платонов В. Н. О математическом моделировании управления движением твердого тела с избыточным числом тросовых движителей 422
- Толстошеев А. К., Татаринцев В. А. Проектирование статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой 428

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Матвеев В. В., Кисловский Е. Ю., Мильченко Д. Н., Распопов В. Я., Телухин С. В., Погорелов М. Г., Лихошерст В. В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах 437
- Солдаткин В. М., Ефремова Е. С. Особенности построения и анализ статической точности вихревой системы воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата 443

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. 20
2019
No. 7

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

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, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

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

- Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O.** Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital Services 387
- Vorotnikov V. I.** On Problem of Partial Stability for Functional Differential Systems with Holdover 398
- Shcherbatov I. A.** Formalization of the External Environment Uncertainty in the Power Equipment Operating 405

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A.** The Use of Integral Adaptation Principle to Synthesize Robust Control of Electric Vehicle Wheel Slip 412
- Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N.** Dynamic Processes in Vacuum Contact Devices of Robots for Vertical Motion in the Water Environment 417
- Briskin E. S., Platonov V. N.** On Math Modeling of Solid Body's Motion Control with an Excess Number of Rope Propulsion Devices 422
- Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A.** Designing Statically Determinable Mechanisms of Technological Mechatronic Machines with Parallel Kinematics 428

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Matveev V. V., Kislovsky E. Yu., Milchenko D. N., Raspopov V. Ya., Telukhin S. V., Pogorelov M. G., Likhosherst V. V.** Tracking System of Moving Objects on MEMS-gyroscopes 437
- Soldatkin V. M., Efremova E. S.** Features of Construction and Analysis of Static Accuracy of the Vortex Air Data System of Subsonic Aircraft 443

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

В. И. Городецкий, д-р техн. наук проф., vladim.gorodetsky@gmail.com,

Институт проблем управления РАН, г. Москва,

В. Б. Ларюхин, аспирант, vl@kg.ru,

Самарский государственный технический университет, г. Самара,

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., petr.skobelev@gmail.com,

Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара,

Научно-производственная компания "Разумные решения", г. Самара

Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием¹ Часть 2. Цифровые сервисы²

Предлагается концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления производственными предприятиями в приближающуюся эпоху Industry 5.0, для которой будет характерно видение любого бизнеса, включая производство как сложной адаптивной системы управления, построенной на принципах самоорганизации и эволюции при тесном взаимодействии систем искусственного интеллекта и людей. В первой части рассмотрены принципы построения цифровой платформы, способной обеспечить поддержку функционирования предприятия этапа Industry 5.0 как цифровой экосистемы умных сервисов. В данной части статьи предлагается типизация сервисов цифровой платформы, перечисляется минимальный состав сервисов каждого типа и приводится описание их функционалов. Обосновывается ведущая роль мультиагентных систем как базовой архитектуры программного продукта и технологии разработки приложений цифровой платформы. Даются примеры разрабатываемых цифровых платформ и экосистем для управления грузовыми перевозками РЖД на принципах "юберизации", жизненным циклом сложных технических изделий, а также предприятиями отрасли растениеводства. Показывается, что результаты работы применимы для современных производственных корпораций и предприятий сельского хозяйства, проектных, консалтинговых и сервисных организаций.

Ключевые слова: кибер-физическое управление, самоорганизация, цифровая платформа, цифровая экосистема, мультиагентные технологии, сети агентов, системные сервисы, прикладные сервисы, внешние сервисы

Введение

Как было отмечено в первой части данной работы [1], практически уже около десятилетия основные глобальные тренды развития бизнеса, в частности в области производственных систем, определяются концепцией Industry 4.0, суть которой состоит в использовании цифровых методов и средств для интегрированного управления всеми компонентами предпри-

ятия. Но уже в ближайшей перспективе можно прогнозировать появление нового уклада, называемого Industry 5.0, более ориентированного на внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) и кооперации роботов и людей в практику производства [2].

Суть концепции Industry 5.0 по сравнению с концепцией Industry 4.0, как это видится в сообществе ИТ-специалистов, состоит в переходе от "цифровой вещи" к "умной вещи" и "автономной вещи".

Как отмечалось в первой части данной работы, в настоящее время совершается переход от отдельных приложений (англ. *Stand-Alone Application*) и решений масштаба предприятий (англ. *Enterprise-Ready Solutions*) к цифровым платформам будущего (англ. *Digital Platforms*). При этом целью цифровых платформ нового поколения (ЦП НП) становятся, прежде всего, эволюционное формирование и поддержка

¹ Статья подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках госбюджетной темы ИПУСС РАН "Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами".

² Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2019, Т. 20, № 6.

функционирования цифровых экосистем умных сервисов, построенных как автономные интеллектуальные системы (АИС) кибер-физического управления объектами реального мира, которые интегрируют в себе различные датчики и исполнительные механизмы, вычислительные и сетевые компоненты [3, 4].

В соответствии с развиваемой концепцией экосистемы умных сервисов в принципах построения такого рода систем разного масштаба — от отдельного предприятия до системы отраслевого или национального масштаба — не должно быть принципиальных различий. И это должно быть справедливо, идет ли речь об управлении структурой подразделений аэрокосмического предприятия или его отдельными сотрудниками, об управлении поездом и станцией в целом, локомотивом и вагоном в процессе грузоперевозок РЖД, об управлении агрономами и механизаторами и беспилотными роботами-комбайнами в сельском хозяйстве и т. п.

Главным отличием ЦП НП и управляемой ею экосистемы становится ориентация на взаимодействие, включая как кооперацию, так и конкуренцию указанных автономных вещей и предлагаемых ими сервисов, снабженных интеллектом для анализа ситуаций в реальном мире и в реальном времени, интеллектом для принятия решений и выработки планов, а также их согласования путем переговоров для разрешения конфликтов с себе подобными и людьми.

Целью работы в целом является описание предлагаемой концептуальной модели, базовых функций и сервисов ЦП НП предприятий этапа Industry 5.0. В первой части [1] введено понятие цифровой производственной экосистемы и описаны ее свойства, и на основании этого понятия сформулированы требования к ЦП НП, поддерживающей ее работу. Далее в данной работе вводятся понятия системных, прикладных и внешних сервисов ЦП НП в концепции Industry 5.0. В основе ее системных сервисов предлагается использовать сервисы абстрактной модели агентской платформы FIPA, однако модифицированных с учетом имеющегося многолетнего опыта их использования. Приводится описание состава и функций прикладных сервисов платформы, предназначенных для алгоритмической поддержки производственной экосистемы как адаптивной системы управления ресурсами в реальном времени, а также дается описание внешних сервисов и ресурсов. Приводятся примеры цифровых экосистем, которые в настоящее время находятся в процессе разработки. В частности, в числе таких примеров

рассматривается экосистема, предназначенная для управления жизненным циклом сложных технических изделий, система для управления грузовыми перевозками РЖД на принципах "юберизации", экосистема управления предприятиями отрасли растениеводства. Показывается, что результаты разработки применимы для современных производственных корпораций и предприятий сельского хозяйства, проектных, консалтинговых и сервисных организаций. В заключение резюмируются основные результаты работы.

Стандартные системные сервисы цифровой платформы

Стандартными системными сервисами будем называть сервисы ЦП, которые поддерживают связность абстрактной сети автономных объектов (отношение соседства на множестве всех пар ее узлов, представленных на сетевом уровне программными агентами), информацию об именах (иногда — и о адресах) узлов (агентов) сети и информацию о сервисах, которыми они обладают. Заметим, что это обычные функции системы, основанной на сервисах, однако их реализация может существенно зависеть от используемой технологии концептуализации, средств разработки и программной реализации.

Далее предполагается, что в качестве модели концептуализации и технологии разработки и программной реализации системы управления и ЦП предприятия будет использоваться модель и технология мультиагентных систем (МАС), поэтому имеет смысл использовать соответствующий задел из области абстрактной архитектуры агентской платформы МАС и МАС-технологий. Проанализируем стандартные функции (сервисы) платформы агентов, которая совместима с абстрактной архитектурой, предложенной FIPA [5, 6], рассматривая их как сервисы разрабатываемой ЦП.

Абстрактная архитектура FIPA реализует шесть базовых сервисов, описываемых ниже, которые практически без изменения можно рассматривать как сервисы, реализуемые ЦП НП предприятия.

1. *Сервис белых страниц.* Он включает в себя *директорий агентов* и *механизм поиска* агентов. Директорий агентов называют также *белыми страницами* агентской платформы. Он каждому агенту МАС ставит в соответствие его имя и адрес.

2. *Сервис желтых страниц.* Он также включает в себя два компонента, а именно *директорий сервисов*, доступных в МАС (*желтые страни-*

цы), он каждому сервису ставит в соответствие имя сервиса и список агентов, которые в состоянии его поставлять, а также *механизм поиска*, который реализует поиск сервисов и агентов, ими владеющих, по желтым страницам.

3. *Поддержка жизненного цикла агентов и сервисов.* Директории агентов и сервисов должны поддерживать ссылочную модель, которая фиксирует *создание* агента с соответствующими сервисами, его *регистрацию* (именование), *размещение*, *миграцию* и *уничтожение*, фиксацию информации о *доступности его сервисов*. Иначе говоря, эти компоненты фиксируют все элементы *жизненного цикла агентов* MAC и доступных в ней сервисов.

4. *Язык коммуникаций, поддерживаемый платформой.* Язык коммуникаций агентов должен предоставлять им средства для формального описания и интерпретации сообщений. В качестве стандартного языка в настоящее время принят язык ACL (от англ. *Agent Communication Language*), являющийся одной из основных составляющих стандарта FIPA. Могут использоваться также и другие языки, поскольку функции платформы строятся так, что они отделены от конкретной реализации языка коммуникаций.

5. *Транспорт сообщений.* Этот компонент ответственен за доставку сообщений, содержанием которых может быть, например, запрос на поиск сервисов и агентов, сервис, запрошенный агентом, компоненты сообщений, выполняющих функции координации поведения агентов MAC. К последним, например, относятся сообщения протоколов, управляющих исполнением *сценариев коллективного поведения агентов* и др. Описание компонента, ответственного за транспорт сообщений, должно даваться на таком уровне абстракции, который исключает описание особенностей, связанных с конкретными транспортными протоколами.

В спецификации абстрактной архитектуры платформы [5] перечисляются также те ее аспекты, которые в настоящее время не рассматриваются в абстрактной архитектуре FIPA, но должны быть в программной реализации конкретной платформы. К ним относятся:

6. *Аспекты, которые не могут быть описаны абстрактно*, например, некоторые компоненты жизненного цикла агента типа *старт*, *остановка*, *рестарт* и т. п., которые в различных программных системах и средах реализуются по-разному. То же самое относится и к обеспечению *безопасности агента*, к поддержке его мобильности и др.

7. *Аспекты, которые пока еще не готовы к стандартизации*, поскольку недостаточно понятны или недостаточно разработаны. Их

предполагается стандартизировать и разрабатывать их реализации по мере готовности.

8. *Аспекты, которые являются очень специфическими* и потому пока не нуждаются в стандартизации. К ним относятся обычно предметно-зависимые сервисы.

Заметим, что системные сервисы (функции) платформы, указанные в пунктах 6—8, должны быть проработаны более детально применительно к ЦП предприятия нового поколения.

Отметим также, что в FIPA-спецификации агентской платформы дано детальное описание функций компонентов абстрактной архитектуры, отношений между ними и другой информации, которая определяет все аспекты платформы. Описание этих функций дано в объектно-ориентированном стиле в терминах языка UML с использованием шаблонов проектирования, описанных, например, в работе [7], что делает процесс конкретной реализации этой архитектуры достаточно однозначным и понятным.

Недостатки существующих реализаций агентской платформы

В настоящее время индустриальная технология MAC, несмотря на активные исследования в период с начала 2000-х годов, переживает определенный кризис, возникший при попытках ее быстрого вывода из лабораторий для применения в промышленности и проявляющийся в выявленной высокой сложности и трудоемкости таких разработок для решения практических задач (на сегодня в промышленности известно о внедрении около трехсот таких систем). Можно утверждать, что сдвиг ИТ-парадигмы в область самоорганизации и эволюции не только ломает сложившиеся шаблоны разработки традиционно централизованных, иерархических, монолитных, жестких и последовательных ИТ-систем, но в ряде случаев напрямую противоречит существующим подходам, канонам и стандартам. Вместе с тем выявлен и ряд проблемных вопросов в применении первых промышленных MAC, связанных с феноменологией сложных адаптивных систем (порядок и хаос, неустойчивые равновесия, осцилляции, катастрофы и другие нелинейные эффекты) и др.

В этой связи в области MAC в настоящее время идет "перегруппировка", в рамках которой ряд базовых концепций MAC будет пересмотрен, что, прежде всего, касается существующих программных реализаций мультиагентных платформ. Этот факт нужно принимать во внимание при адаптации агентских

технологий и реализации системных и других сервисов ЦП НП производственной экосистемы, которые предлагаются в работе.

Остановимся кратко на упомянутых выше недостатках, акцентируя их влияние на агентскую реализацию ЦП.

Анализ недостатков агентских технологий, которые в настоящее время существенно сдерживают их широкое практическое применение, выполнен в работе [8]. Далее, следуя материалам этой работы, кратко характеризуются недостатки только тех аспектов технологии MAC, которые могут повлиять на технологию программной реализации ЦП НП предприятия.

1. *Отсутствие общепринятого понимания ключевых понятий MAC.* На это, например, указано в работе [9]. Отсутствие четких определений и соглашений по основным понятиям в области MAC сильно затрудняет взаимопонимание между исследователями и разработчиками. Специалисты в области MAC имеют различное понимание таких базовых понятий, как *агент, роль, переговоры, план, возможность*, и др. При этом реальная задача состоит в том, чтобы уточнить содержание этих базовых понятий и согласовать их взаимоотношения со сходными концепциями объектно-ориентированного программирования, которые используются для программирования агентов и MAC. Одним из путей решения данной проблемы является разработка базовых онтологий для предметно-независимых понятий, используемых в MAC.

2. *Отсутствие общепринятой нотации для представления моделей MAC* и их компонентов. Поскольку еще не существует общепринятых определений базовых агентских понятий и их взаимосвязей [9], то отсутствие общей нотации для их описания и описания отношений на их множестве затрудняет исследование и сравнение различных моделей MAC на практике. Необходимо разработать стандартизацию описания моделей агентов и MAC.

3. *Стандарты FIPA.* Вопрос о стандартах в технологии MAC стал темой исследований и разработок еще в середине 1990-х годов, когда была создана общественная организация FIPA, предназначенная для научного обоснования стандартов MAC-технологий. Но руководство FIPA продвигало в практику логическую модель *BDI*-агента и MAC, а потому эта же модель рассматривалась FIPA и в качестве базовой модели MAC при разработке стандартов. Например, стандартный язык коммуникации агентов *ACL* для описания содержания сообщений, которыми обмениваются агенты, использует весьма сложные языковые конструкции. Базисом для них послужил

логический язык *KQML*, который начали разрабатывать еще в 1970-е годы, когда он позиционировался как язык представления знаний в системах ИИ с исчислением предикатов в своей основе. Современная *ACL*-версия этого языка представляет собой достаточно мощный и выразительный язык интерпретирующего типа, манипулирующий понятиями онтологии и способный представлять содержание весьма сложных семантически насыщенных сообщений, которыми обмениваются агенты. Но он привносит в стандарт все черты логической модели *BDI*-агента со всеми вытекающими отсюда последствиями из-за проблем вычислительной сложности и большой загрузки каналов связи. Кроме того, он труден для понимания и использования разработчиками приложений, а свобода, которую язык *ACL* вроде бы предоставляет разработчикам в модификации компонентов синтаксической оболочки этого языка (так называемых перформативов), используется, главным образом, в исследовательском сообществе специалистов MAC.

На практике же в большинстве случаев оказывается возможным обойтись значительно более простыми специализированными языками. Примером такого специализированного языка является язык обмена сообщениями, принятый в сервере RoboCup [10]. Он использует только средства общения агентов, необходимые и достаточные для приложения, и поэтому весьма эффективен в реальном времени.

Совсем другой, тоже простой и прагматичный язык используется в модели MAC, предложенной сначала в инструментах компании *Magenta*, а затем развитый (теми же авторами) в инструментах Группы компаний "*Генезис знаний*" и НПК "*Разумные решения*" [11, 12]. В нем для представления текущих знаний используется онтологическая модель знаний и данных с моделью поиска в ней по схеме "снизу-вверх", т. е. от экземпляров понятий, описывающих ресурсы и потребности производственной системы. Эта схема оказывается хорошо приспособленной и для планирования использования ресурсов производства, и для управления ими в реальном времени совместно с агентской моделью реализации принципов самоорганизации на основе концепции сети потребностей и возможностей (ПВ-сети, [11]), и для реализации эффективных механизмов поиска ответов на запросы в различных случаях использования.

Еще одна модель обмена сообщениями, которая не следует стандартам FIPA, используется в программном инструментарии *Cougaar* [13], который разработан в США по проекту DARPA для использования агентских моделей и технологий в военных приложениях. В нем

обмен сообщениями поддерживается стандартной архитектурой доски объявлений, на которой агенты предлагают свои сервисы (доступные другим агентам как подключаемые модули) и ищут необходимые им сервисы по мере появления необходимости в них. При этом доска объявлений заметно расширяет множество доступных сервисов за счет веб-сервисов и *UDDI*-протокола. Эта возможность реализуется специальным компонентом доски объявлений, который называется *сервлет*. Он поддерживает коммуникации с объектами Интернет по *http*-протоколу, причем этот сервис доступен для использования всем подключаемым модулям узла.

Важно подчеркнуть, что модели агентов и *MAC*, предложенные в инструментах компании "Генезис знаний" и *НПК "Разумные решения"* в нашей стране и *Cougaar* за рубежом, оказались наиболее успешными в части промышленных разработок, хотя они и не используют стандартную платформу *FIPA* и язык *ACL*. Это говорит о том, что опыт *MAC* в построении агентской платформы, хотя и является достаточно ценным, но для его эффективного использования в ЦП производственной системы он требует существенного пересмотра и, возможно, модификации стандартов *FIPA*.

Заметим также, что *FIPA*-стандарты не рассматривают проблемы *параллельного программирования*, хотя этот аспект очень важен для *MAC*. Важен он и для ЦП предприятия, и эти вопросы придется решать при программной реализации.

4. *Недостаточная зрелость математических моделей и методов самоорганизации* для сложных объектов сетевой структуры. Это одна из существенных причин, затрудняющих разработку *MAC*-приложений. Модели самоорганизации и их реализация средствами *MAC* начали активно изучаться в научном сообществе лишь в самое последнее время [14–16].

Эти недостатки современных концептуальных и формальных аспектов *MAC*-технологий позволяют сделать вывод о том, что описанные выше сервисы стандартной агентской платформы, в частности, реализованные в модели платформы *JADE*, в любом случае нуждаются в новой формальной основе и в другой модели их программной реализации.

Некоторый опыт изучения возможных путей решения перечисленных проблем показывает, что одним из вариантов реализации сервисов ЦП может быть, например, использование языка *Scala* и его библиотек типа *Akka* [17], обеспечивающих большое число легких параллельных процессов для постоянно "вспыхивающих" переговоров агентов по разрешению конфликтов.

Прикладные и внешние сервисы цифровой платформы

Перечень прикладных сервисов ЦП производственной системы будет существенно зависеть от состава компонентов и архитектуры конкретного предприятия, а также от множества задач, которые в ней решаются. Тем не менее, можно выделить некоторые типовые прикладные сервисы, которые потребуются в большинстве прикладных систем в концепции цифровой экосистемы умных сервисов:

1. *Сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных*. Цифровая экономика в концепции *Industry 4.0*, как уже отмечалось, базируется на принципах, аналогичных тем, которые заложены в концепции Интернет вещей. Однако в концепции *Industry 5.0* становится ведущей роль *ИИ*, который, по всей видимости, начнет внедряться как "дополненный интеллект" (англ. *Augmented Intelligence*) — по аналогии с входящей сегодня в жизнь дополненной реальностью (англ. *Augmented Reality*). Такой *ИИ*, скорее всего, будет строиться как "эмержентный интеллект" агентов, представляющих физические вещи и абстрактные понятия, а также людей и документы в виртуальном мире программ. Но такой *ИИ* невозможен без глубокой формализации знаний предметных областей, их стандартизации и развития механизмов здравого смысла в логике принятия решений агентами, иначе им будут приниматься слишком "сомнительные" решения. И такая задача уже поставлена Минобороны США на 3 млрд долларов уже в следующем году [18].

В связи с этим выскажем гипотезу о том, что "здравый смысл" будет состоять в достижении баланса интересов агентов (консенсуса), вовлеченных в каждую проблемную ситуацию и по различным критериям, в решение сложных задач через самоорганизацию агентов и формирование результата как не улучшаемого "конкурентного равновесия" ("устойчивое неравновесие" или "неустойчивое равновесие") [19].

Вместе с тем предприятие цифровой экономики является частным случаем кибер-физической системы (*КФС*), а все приложения *КФС* объединяет то, что несмотря на многообразие компонентов каждой ее прикладной версии и большое число таких компонентов в каждой версии (до десятков тысяч и даже более), они совместно решают множество задач, которое может со временем эволюционировать, например, за счет наращивания ее функционала. И как уже отмечалось выше, ЦП *КФС*, как и ЦП цифровой экосистемы предприятия, будет той программно-коммуникационной сре-

дой, которая интегрирует все ее компоненты в единую систему, способную решать заданное множество задач. По этой причине первый и, возможно, самый главный сервис такой ЦП НП — это *интеграция знаний и данных* системы в единое, не просто информационное, но и семантическое пространство знаний и данных с обеспечением единства понимания (интерпретации) в текущий момент времени всей используемой к ней терминологии, с поддержкой многоаспектности и целостности данных и знаний, к которым обращаются пользователи или программы.

Интересно, что осознание важности проблематики "семантизации" знаний и данных уже идет, причем именно там, где больше всего неопределенности, разнородности и т. д. В качестве примера можно привести европейский проект Synchronicity [20], в котором восемь крупных городов Европы пытаются построить общее семантическое пространство и приложения, работающие с данными на единой семантической основе, например, по транспорту или освещению улиц, вне зависимости от того, в каких структурах эти данные хранятся в каждом конкретном городе.

Можно уверенно утверждать, что *сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных* является одним из ключевых для ЦП НП производственного предприятия.

Отметим, что требования к этому сервису ЦП НП производственного предприятия во многом могут отличаться от современных требований к онтологии данных и знаний в части поддержки целостности и многоаспектности онтологии знаний и данных, открытости информационного пространства к расширению его новыми знаниями и данными, например, о новых технологиях и потребных ресурсах, о новых компонентах организационной структуры предприятия и ее цифрового двойника и т. п.

По-видимому, отличия будут касаться также механизмов доступа к знаниям и данным в контексте разных аспектов и случаев использования. Например, в задачах планирования производственных ресурсов предприятия удачным оказывается вариант механизма поиска знаний и данных, который используется в платформе ПВ-сетей компании "Разумные решения". В этой платформе механизмы поиска организованы по схеме снизу вверх, т. е. от экземпляров "потребностей" (они формируют запрос на ресурсы) к экземплярам возможностей (экземплярам ресурсов, соответствующих запросам "потребностей"). Но в случае, когда предприятие реализует сборочное производство, для

него главными являются такие задачи, как поставка комплектующих на сборочные участки, оптимизация запасов деталей по номенклатуре и количеству, выбор поставщиков, логистика доставки комплектующих изделий в цепях поставок. В этой задаче важен механизм поиска по атрибутам деталей и сборочных единиц, что потребует иного метода поиска данных. Другой механизм поиска данных и знаний может оказаться наилучшим для задач финансового менеджмента предприятия и т. д.

По этой причине сервис использования знаний и данных единого информационного пространства в принципе следует рассматривать как отдельный прикладной сервис в общем множестве сервисов поддержки единого информационного пространства знаний и данных предприятия, который позволяет выбирать и формировать механизм поиска ответов на запросы в терминах понятий, атрибутов и примеров онтологии для различных случаев использования знаний и данных.

В этом же контексте можно рассматривать и сервисы, которые поддерживают основные компоненты процесса инжиниринга и модификации онтологий, сервис формирования и сервис использования единого информационного пространства знаний и данных. Однако эти непростые сервисы пока недостаточно проработаны в алгоритмическом отношении и требуют больших исследовательских усилий.

2. *Сервис виртуального рынка.* Еще одной особенностью ЦП НП предприятия по сравнению с платформой МАС является то, что в ЦП практически всегда параллельно решается множество разнообразных задач, которым нужно использовать одни и те же ресурсы и сервисы, которым требуются данные от одной и той же сенсорной сети, которым подходят одни и те же транспортные средства для поддержки различных технологических процессов и т. д. и т. п. Естественно, что в такой системе будут постоянно возникать конфликты в борьбе за ресурсы, всегда ограниченные. Но отличительной особенностью цифрового производства является тот факт, что в большинстве случаев все доступные в нем ресурсы являются *ресурсами общего пользования*, т. е. у этих ресурсов нет владельцев, а потому стандартной задачей ЦП НП производственного предприятия будет решение задачи планирования и распределения ресурсов на множестве потенциальных потребителей, причем, как правило, в реальном времени.

Практика показывает, что в производственных системах реальной сложности решение этой задачи возможно только с привлечением принципов самоорганизации на основе

концепции виртуального рынка и МАС. Более того, необходимость решения задач такого типа в процессе работы производственной системы возникает на постоянной основе. Это означает, что ЦП НП производственной системы должна *предоставлять сервис виртуального рынка*. Так же, как и сервис создания и поддержки единого семантического пространства знаний и данных, сервис виртуального рынка относится к числу типовых сервисов ЦП НП предприятия и представляется ее обязательным компонентом.

Известно, что один и тот же метод виртуального рынка не может быть подходящим для всех случаев. Например, есть своя специфика в транспортных задачах и в цепях поставок комплектирующих деталей для сборочного производства. Другие задачи могут потребовать использования, например, вариантов протоколов контрактных сетей или различных видов аукционов. Для распределения задач и ресурсов в задачах группового управления мобильными роботами, которые, например, реализуют полностью роботизированное сборочное производство, потребуется свой, еще более сложный механизм реализации виртуального рынка.

Один из вариантов такого виртуального рынка предложен и реализован в программной платформе компании "Разумные решения", где для поиска равновесий реализован метод сопряженных взаимодействий с предоставлением агентами друг другу компенсаций при ухудшении своего положения, что регулируется функциями удовлетворенности и бонусов-штрафов, определяющих индивидуальные интересы и характеристические особенности каждого экземпляра агента. Этот подход со специализированным механизмом поиска ответов за запросы демонстрирует один из возможных вариантов алгоритмизации сервиса виртуального рынка.

Хорошие возможности в развитии виртуального рынка предоставляет модель ПВ-сети, где каждая связь "потребность—возможность" фиксирует контракт в виртуальной валюте. В этом варианте виртуального рынка перспективным является использование технологий блокчейна, что особенно актуально в случае, если ресурсы принадлежат различным предприятиям. Совместное использование МАС-технологий и технологий блокчейна позволит создавать качественно новые инструменты экономики программных роботов (робономики [21]), например, в части развития принципов солидарной экономики, как это будет показано ниже на примерах разрабатываемых платформ.

Таким образом, на практике нужно иметь возможность использовать различные моде-

ли алгоритмизации виртуального рынка в зависимости от решаемых задач. И платформа должна их поддерживать как различные версии одного и того же типа сервисов.

3. *Сервис поддержки новых протоколов*. Практически все задачи цифрового производства в концепции Industry 5.0 решаются на основе взаимодействия его компонентов. В настоящий момент трудно предвидеть все разнообразие таких задач. Однако понятно, что в распределенной системе основным способом вычислений будут вычисления на основе взаимодействий, реализуемые автономными программными агентами по тем или иным протоколам. Поэтому представляется очень важной способностью ЦП НП предприятия к расширению множества протоколов, которые по отдельности или в некоторых комбинациях будут формировать новые сервисы ЦП НП. Можно говорить также о расширяемых библиотеках протоколов (распределенных алгоритмов), из которых пользователь сможет формировать сложные сценарии взаимодействия агентов для реализации специальных случаев использования ЦП НП.

4. *Сервис логирования процессов функционирования экосистемы для накопления данных о ее работе и сервис обработки накопленных данных для обнаружения новых знаний*. Как уже отмечалось выше, производственная система в концепции Industry 5.0 должна представлять собой цифровую экосистему, которая функционирует как распределенная адаптивная социотехническая "система систем" сетевой организации, обладающая свойствами самоорганизации, масштабируемости и устойчивого развития.

Основу ее информационного наполнения должны составлять знания, доступные всем компонентам производства через единое информационное пространство. База знаний и данных такой системы должна постоянно пополняться новыми знаниями, и средства решения этой задачи также должны быть в числе базовых прикладных сервисов ЦП НП. Новые знания должны не только вноситься пользователями, но и автоматически формироваться на основе опыта работы платформы.

В соответствии с современной концепцией накопления и обновления знаний в сложных системах основным источником новых знаний могут быть данные логов о процессах работы различных компонентов, подсистем и конкретных объектов производственной системы. Это утверждение следует из того, что реальная производственная система слишком сложна, чтобы можно было получить о ней достоверные, а тем более полные знания экспертным путем. Информация о взаимосвязях параметров управления и значений атрибутов

отдельных объектов с многочисленными показателями качества функционирования отдельных подсистем производства и производства в целом может быть получена только на основе машинного обучения с использованием данных, полученных экспериментально. И важность этих знаний очевидна, поскольку при их отсутствии представляется невозможным эффективно управлять совместно, например, технологическими и экономическими показателями производства.

Современная технология обработки больших данных имеет целью обнаружение в них указанных выше зависимостей. Эта задача должна решаться на постоянной основе в любой производственной системе концепции Industry 5.0, и ее поддержка — это задача комплекса сервисов ЦП НП, обеспечивающих создание подсистем логирования данных, их хранения, а также механизмов обнаружения закономерностей в накопленных больших данных с помощью сервисов машинного обучения и их использования для улучшения механизмов принятия решений.

5. *Подключение внешних сервисов и ресурсов.* Цифровая экосистема обязательно должна иметь доступ к богатым источникам сервисов и ресурсов, которые в настоящее время доступны благодаря облачным технологиями и технологиям Интернета вещей. В настоящее время имеются и практически используются различные программные инструменты доступа к облачным ресурсам и сервисам, которые должны быть интегрированы в ЦП НП и таким образом стать неотъемлемой частью ресурсов и сервисов, которые находятся в распоряжении предприятия.

То же самое относится и к внешним источникам онлайн-информации, которая собирается на постоянной основе внешними (по отношению к производственной системе) сенсорными сетями. Задача доступа к этой информации в настоящее время успешно решается с помощью программно-аппаратных интерфейсов, и в большей своей части эти интерфейсы стандартизированы. Сервисы ЦП НП должны обеспечить прозрачный доступ любого компонента производственной системы к этим данным наравне с доступом к облачным сервисам и ресурсам.

Другие требования к сервисам платформ, которые она должна поддерживать, будут определяться множеством случаев ее использования. Заметим, что число этих случаев использования может постоянно увеличиваться, и потому рассматриваемая ЦП должна будет фактически поддерживать расширяющееся множество протоколов реализации различных

случаев ее использования. К ним относятся, например, сервисы платежей и расчетов, сервисы обеспечения безопасности, сервисы восстановления системы при сбоях и в исключительных ситуациях — сервисы управления нагрузкой и ряд других.

Примеры применений

Рассмотрим кратко текущие применения разработанной концепции ЦП НП для разработок прикладных цифровых платформ различных назначений, проводимых при участии авторов данной работы.

1. *Цифровая платформа для управления грузоперевозками РЖД.* Одним из важных шагов в интеллектуализации управления в РЖД рассматривается реализация юбер-подобной технологии сквозного управления грузовыми перевозками. Целью этой разработки является построение открытой цифровой экосистемы, состоящей из набора АИС для распределенного управления полигонами, станциями, портами, поездами, локомотивами и бригадами машинистов, а также другими критически важными ресурсами инфраструктуры перевозок.

Архитектура проектируемой экосистемы, поддерживаемой цифровой платформой нового поколения, представлена на рисунке (см. вторую сторону обложки). Здесь желтым цветом выделены ключевые системные сервисы уровня ЦП НП, зеленым — прикладные сервисы цифровой экосистемы, а голубым — расширения сервисов ИИ. В этой архитектуре укрупненный план строится на основе анализа мощностей и пропускной способности, а оперативный — до уровня планирования конкретных экземпляров ресурсов. Между этими уровнями поддерживаются как вертикальные, так и горизонтальные переговоры для согласования принимаемых решений.

Предлагаемая сеть АИС совместного киберфизического управления указанными объектами, участвующими в выполнении грузовых перевозок, ориентирована на замену единой централизованной модели общего плана движения РЖД распределенным планом, состоящим из множества самосинхронизируемых по событиям планов отдельных подразделений РЖД, до уровня каждого локомотива и вагона и других ресурсов.

Предполагается также подключение интеллектуальных систем крупных заказчиков, например, угольных компаний, которые смогут динамически договариваться не только с РЖД, но и между собой о совместном использовании пустых вагонов с применением блокчейн-тех-

нологии, которая сможет гарантировать справедливость автоматически заключаемых по ситуации контрактов между агентами-участниками, чтобы, в частности, исключить движение пустых вагонов навстречу друг другу и повысить эффективность грузоперевозок.

Ожидаемый результат — рост клиенто-ориентированности РЖД, снижение расходов, повышение эффективности использования имеющейся инфраструктуры и т. д.

Учитывая тот факт, что в настоящее время РЖД выполняет значительную часть грузовых перевозок в стране, разрабатываемая система имеет перспективу масштабирования на уровень ЦП НП национальной мультимодальной транспортной системы грузовых перевозок.

2. Цифровая платформа нового поколения для управления разработками проектов НИОКР. Наряду с ЦП НП отраслевого и даже национального масштаба не менее важное значение приобретают ЦП НП для управления и одним предприятием, где цифровая экосистема может состоять из умных сервисов, реализующих управление бизнес-центрами и центрами знаний.

В этих целях на основе интеллектуальной системы Smart Projects [22] для поддержки принятия решений по управлению проектами НИОКР создается новая платформа по типу "проектного юбера" для управления сотрудниками подразделений с элементами виртуального рынка, где сотрудники подразделений "охотятся" за наиболее дорогостоящими задачами, а задачи "охотятся" за лучшими сотрудниками.

Сетецентрическая архитектура разрабатываемой системы, сходная с представленной на рисунке, но с заменой умных сервисов для управления инфраструктурой РЖД укрупненного и оперативного уровня на умные сервисы управления указанными выше центрами предприятия, между которыми также должны поддерживаться вертикальные и горизонтальные переговоры на основе протоколов r2r-взаимодействий. Создаваемая платформа имеет целью повысить оперативность, гибкость и эффективность выполнения задач проектов в общем пуле ресурсов предприятия.

В качестве перспективы рассматривается возможность масштабирования создаваемой платформы для работы по всему жизненному циклу сложных технических изделий, включая подключение смежников и умных сервисов для управления производством и цепочками поставок, а также эксплуатации создаваемых объектов.

3. Цифровая платформа для управления отраслью растениеводства. В этой разработке ведется разработка цифровой платформы для отрасли растениеводства, включающей АИС управле-

ния предприятиями растениеводства, к планам которых получают индивидуальный доступ АИС производителей удобрений и АИС поставщиков средств защиты растений, АИС транспортных компаний, АИС банковых и страховых компаний, АИС дронов и беспилотных комбайнов и других участников рынка растениеводства.

Несмотря на значительное отличие в предметной области, предлагаемая ЦП НП обладает той же сетецентрической архитектурой "системы систем" с вертикальными и горизонтальными r2r-взаимодействиями и близким набором системных и прикладных сервисов.

Заключение

В работе обоснована необходимость создания и сформулирована постановка задачи разработки ЦП НП, представлена общая концепция и состав базовых сервисов ЦП как основы цифровой экосистемы для управления предприятиями в приближающуюся эпоху Industry 5.0, которая фокусируется на использовании формализованных знаний как информационной основы процессов управления и применении методов искусственного интеллекта для принятия решений.

Структура таких систем включает в себя разнообразные, относительно автономные компоненты предприятия, объединенные в единую производственную систему сетевой структуры с горизонтальными и вертикальными взаимодействиями компонентов. Эти системы должны функционировать в едином информационном пространстве знаний и данных, обладать способностью обмениваться информацией, сервисами и ресурсами. В работе описано базовое множество системных сервисов, которые в состоянии поддержать такой стиль функционирования производственной системы. В основу системных сервисов предлагается положить аналогичные сервисы абстрактной архитектуры FIPA.

Предложены базовые прикладные сервисы, которые должны обеспечить:

- создание единого информационного пространства знаний и данных производственной системы и механизмы его непротиворечивого использования всеми ее компонентами;
- эффективные механизмы планирования использования ресурсов производственной системы и оперативного управления ими в реальном времени на основе сервисов виртуального рынка;
- поддержку расширяемой библиотеки протоколов и механизмов формирования сценариев различных встроенных механизмов об-

нарушения закономерностей в накопленных данных и машинного обучения механизмов принятия решений;

- поддержку сервисов логирования работы компонент системы, накопления и анализа данных, а также сервисов встроенных механизмов обнаружения закономерностей в накопленных данных и машинного обучения механизмов принятия решений;
- подключение внешних сервисов и ресурсов, в частности, облачных сервисов и источников онлайн-информации типа сенсорных сетей.

Материалы данной работы в целом рассматриваются ее авторами как концептуальная модель базовой отечественной цифровой платформы для создания цифровых экосистем производственных предприятий, предприятий сельского хозяйства, проектных, сервисных и других типов предприятий, заинтересованных в развитии и внедрении продуктов и технологий Industry 5.0.

Список литературы

1. Городецкий В. И., Ларюхин В. Б., Скобелев П. О. Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 323–332.
2. Yes, Industry 5.0 is Already on the Horizon / MachineDesign. URL: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (дата обращения 20.01.2019).
3. Leitão P., Colombo A., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // Computers in Industry. 2016. Vol. 81. P. 11–25.
4. Leitão P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems // Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104, N. 5. P. 1086–1101.
5. FIPA Abstract Architecture Specification / FIPA. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (дата обращения 21.01.2019).

6. FIPA P2P NA WG6. Functional Architecture Specification Draft 0.12 / FIPA. URL: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc> (дата обращения 21.01.2019).
7. Gamma E., Helm R., Johnson J., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, 1995. 383 p.
8. Городецкий В. И., Бухвалов О. Л., Скобелев П. О., Майоров И. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // Управление большими системами. 2017. Вып. 66. С. 94–157.
9. DeLoach S. A. Moving multi-agent systems from research to practice // International Journal Agent-Oriented Software Engineering. 2009. Vol. 3, N. 4. P. 378–382.
10. RoboCup Soccer Server. URL: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (дата обращения 23.01.2019).
11. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
12. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. WIT Press. London—Boston: WIT Press, 2014. 202 p.
13. Cougaar Agent Architecture / Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (дата обращения 27.01.2019).
14. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 92–120.
15. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 102–123.
16. Ye D., Zhang M., Vasilakos A. Survey of Self-organization Mechanisms in Multi-Agent Systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2016. Vol. 47, N. 3. P.1–21.
17. Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Концептуальная модель и архитектура инфраструктурной компоненты системы группового управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1(14). P. 33–44.
18. Waters R. US Military seeks computers with common sense // Financial Times (дата обращения 14.06.2018).
19. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
20. EU project "Synchronicity" // SYNCHRONICITY. URL: <https://synchronicity-iot.eu/> (дата обращения 20.12.2018).
21. Autonomous Intelligent Robot Agent // AIRA. URL: <https://aira.life/ru/> (дата обращения 21.12.2018).
22. Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E. Smart Projects: Multi-Agent Solution for Aerospace Applications // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. WIT Press. 2017. Vol. 12, Iss. 4. P. 492–504.

Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital Services

V. I. Gorodetsky, vladim.gorodetsky@gmail.com,

Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

V. B. Laryukhin, vl@kg.ru,

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

P. O. Skobelev, petr.skobelev@gmail.com,

Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, Russian Federation

SEC "Smart Solutions", Samara, Russian Federation

Corresponding author: Skobelev Petr O., D.Sc. in engineering, Professor,
Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, SEC "Smart Solutions", Samara,
Russian Federation, e-mail: petr.skobelev@gmail.com

Abstract

The paper proposes conceptual model of a digital platform for cyber-physical management of manufacturing enterprises in the upcoming era of Industry 5.0, characterized by the vision of any business, including industrial production or logistics, as a complex adaptive system built on fundamental principles of self-organization and evolution, as well as interaction of artificial intelligence systems and people. The first part discusses principles of building a digital platform that can support operation of an enterprise within Industry 5.0 as a digital ecosystem of smart services. This part of the paper proposes typing of basic platform services, lists the minimum set of services of each type, and gives description of their functionality. It also substantiates the leading role of multi-agent systems as a basic software architecture and technology for developing applications of the digital eco-systems. The paper provides examples of digital platforms and ecosystems of smart services for management of cargo transportation of the Russian Railways on the principles of "uberisation", life cycle of complex technical products, as well as enterprises of the plant-growing industry. It is shown that results are applicable to modern industrial corporations and enterprises in industry and agriculture, logistics, design, consulting and service.

Keywords: cyber-physical management, self-organization, digital platform, digital ecosystem, multi-agent technologies, agent networks, system services, application services, external services.

Acknowledgements: The paper has been prepared based on the materials of scientific research within the subsidized state theme of the Institute for Control of Complex Systems of the Russian Academy of Sciences for research and development on the topic: "Research and development of methods and tools of analytical design, computer-based knowledge representation, computational algorithms and multi-agent technology in problems of optimizing management processes in complex systems".

For citation:

Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O. Conceptual Model of a Digital Platform for Cyber-Physical Management of a Modern Enterprises. Part 2. Digital services, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 387–397.

DOI: 10.17587/mau.20.387-397

References

1. **Gorodetsky V. I., Laryukhin V. B., Skobelev P. O.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 323–332 (in Russian).
2. **Yes**, Industry 5.0 is Already on the Horizon / Machine-Design, available at: <https://www.machinedesign.com/industrial-automation/yes-industry-50-already-horizon> (date of access: 20.01.2019).
3. **Leitão P., Colombo A., Karnouskos S.** Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges, *Computers in Industry*, 2016, vol. 81, pp. 11–25.
4. **Leitão P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A.** Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems, *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, no. 5, pp. 1086–1101.
5. **FIPA Abstract Architecture Specification / FIPA**, available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (date of access: 21.01.2019).
6. **FIPA P2P NA WG6.** Functional Architecture Specification Draft 0.12 / FIPA. available at: <http://www.fipa.org/subgroups/P2PNA-WG-docs/P2PNA-Spec-Draft0.12.doc> (date of access: 21.01.2019).
7. **Gamma E., Helm R., Johnson J., Vlissides J.** Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software, Addison-Wesley, 1995, 383 p.
8. **Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L., Skobelev P. O., Mayorov I. V.** *Upravlenie Bol'shimi Sistemami*, 2017, iss. 66, pp. 94–157 (in Russian).
9. **DeLoach S. A.** Moving multi-agent systems from research to practice, *International Journal Agent-Oriented Software Engineering*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 378–382.
10. **RoboCup Soccer Server**, available at: <http://swarm.cs.virginia.edu/robocup/documentation/manual.pdf> (date of access: 23.01.2019).
11. **Vittikh V. A., Skobelev P. O.** *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (in Russian).
12. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing complexity, WIT Press, London-Boston, WIT Press, 2014, 202 p.
13. **Cougaar** Agent Architecture / Wikipedia, available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cougaar> (date of access: 27.01.2019).
14. **Gorodetsky V. I.** *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2012, no. 2, pp. 92–120 (in Russian).
15. **Gorodetsky V. I.** *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2012, no. 3, pp. 102–123 (in Russian).
16. **Ye D., Zhang M., Vasilakos A.** Survey of Self-organization Mechanisms in Multi-Agent Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2016, vol. 47, no. 3, pp. 1–21.
17. **Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L.** *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2017, no. 1 (14), pp. 33–44 (in Russian).
18. **Waters R.** US Military seeks computers with common sense, *Financial Times* (14.06.2018).
19. **Nicolis G., Prigogine I.** Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations, Moscow, Mir, 1979, 512 p. (in Russian).
20. **EU project "Synchronicity"**, SYNCHRONICITY, available at: <https://synchronicity-iot.eu/> (date of access 20.12.2018)
21. **Autonomous Intelligent Robot Agent, AIRA**, available at: <https://aira.life/ru/> (21.12.2018).
22. **Skobelev P., Kozhevnikov S., Mayorov I., Poludov D., Simonova E.** Smart Projects: Multi-Agent Solution for Aerospace Applications, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. WIT Press, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 492–504.

В. И. Воротников, д-р физ.-мат. наук, проф., vorotnikov-vi@rambler.ru,
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

К задаче устойчивости по части переменных функционально-дифференциальных систем с последействием

Развитие теории и качественных методов исследования нелинейных систем функционально-дифференциальных уравнений с последействием (запаздыванием) представляет значительный интерес для современной нелинейной теории управления и многочисленных приложений. Важной в теоретическом и прикладном плане является задача исследования устойчивости процессов, описываемых системами уравнений данного класса.

В данной статье для нелинейной нестационарной системы функционально-дифференциальных уравнений с последействием общего вида рассматривается задача устойчивости нулевого положения равновесия по отношению не ко всем переменным, определяющим состояние указанной системы, а только по отношению к их некоторой части. Формально-математическая трактовка такой устойчивости восходит к работам А. М. Ляпунова и В. В. Румянцева с соответствующим уточнением применительно к рассматриваемому классу систем. Данная постановка задачи естественным образом возникает в приложениях как исходя из требований нормального функционирования, так и при оценке возможностей проектируемой системы, и позволяет лучше понять процессы, протекающие в сложных управляемых системах. Находятся условия на структурную форму рассматриваемой системы, при которых устойчивость по заданной части переменных нулевого положения равновесия означает его устойчивость по отношению к другой — большей части переменных, включающих некоторую дополнительную группу переменных. Указанные условия включают в себя условие равномерной асимптотической устойчивости нулевого положения равновесия подсистемы, "приведенной" по дополнительной группе переменных, а также ограничение на связь "приведенной" подсистемы с другими частями изучаемой системы. Дается приложение к задаче стабилизации по отношению к части переменных управляемых систем.

Ключевые слова: нелинейная система функционально-дифференциальных уравнений с последействием, устойчивость по части переменных

Введение

Теория систем функционально-дифференциальных уравнений с последействием (запаздыванием) является бурно развивающимся разделом современной математики, который находит применение при проектировании сложных систем автоматического управления, а также в процессе анализа различных математических моделей. При этом важной в теоретическом и прикладном плане является задача устойчивости процессов, описываемых системами уравнений данного класса [1–8].

Подчеркнем, что в большинстве работ устойчивость анализируется по всем переменным, определяющим состояние системы. Однако для многих важных в приложениях случаев представляют интерес более общие задачи: об устойчивости не по всем, а только по заданной части фазовых переменных [3, 9–14], а также по отношению к некоторой заданной функции ("по выходу" системы) [15–17]. Основополагающими для данного направления являются публикации В. В. Румянцева [18] (для систем обыкновенных дифференциальных уравнений), а также А. Халаная [19] и К. Кордуняну [20] для систем функционально-дифференциальных уравнений.

В контексте этих исследований небезынтересно проанализировать структуру изучаемой системы функционально-дифференциальных уравнений, в которой устойчивость по части переменных нулевого положения равновесия означает его устойчивость по отношению к другой — большей части переменных, включающих некоторую дополнительную группу переменных. Указанная задача рассматривается далее в данной статье.

1. Постановка задачи

Пусть $\tau > 0$ — заданное действительное число, R^n — линейное действительное пространство n -мерных векторов x с нормой $|x| = \max |x_i|$ (x_i — i -я компонента вектора x), C — банахово пространство непрерывных функций $\varphi: [-\tau, 0] \rightarrow R^n$ с стандартной супремум-нормой $\|\varphi\| = \sup |\varphi(\theta)|$ ($\theta \in [-\tau, 0]$), $R_+ = [0, +\infty)$. Если $t_0, \beta \in R_+, \beta > t_0$, то для непрерывной функции $x(t): [t_0 - \tau, \beta] \rightarrow R^n$ определим функцию $x_t \in C$ соотношением $x_t = x(t + \theta)$ ($\theta \in [-\tau, 0]$); под $x'(t)$ будем понимать правостороннюю производную.

Сделаем разбиение $x = (y^T, z^T)^T$ (T — знак транспонирования), где $y \in R^m, z \in R^{n-m}$ ($1 \leq m \leq n$).

В соответствии с этим разбиением положим $C = C^y \times C^z$, где C^y и C^z — банаховы пространства непрерывных функций $\varphi_y: [-\tau, 0] \rightarrow R^m$ и $\varphi_z: [-\tau, 0] \rightarrow R^{n-m}$ с нормами $\|\varphi_y\| = \sup|\varphi_y(\theta)|$ и $\|\varphi_z\| = \sup|\varphi_z(\theta)|$ ($\theta \in [-\tau, 0]$). Для $\varphi \in C$ имеем $\varphi = (\varphi_y^T, \varphi_z^T)^T$ и $\|\varphi\| = \max(\|\varphi_y\|, \|\varphi_z\|)$.

Рассмотрим нелинейную нестационарную систему функционально-дифференциальных уравнений с последействием (запаздыванием)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{X}(t, \mathbf{x}_t), \quad \mathbf{X}(t, \mathbf{0}) \equiv \mathbf{0}. \quad (1)$$

Допустим, что оператор $\mathbf{X}: R_+ \times C \rightarrow R^n$, определяющий правую часть системы (1), вполне непрерывен в области

$$G = R_+ \times S = \{t \geq 0, \|\varphi_y\| < h, \|\varphi_z\| < \infty\} \quad (2)$$

(h — достаточно малое положительное число) и на каждом компактном подмножестве K из области (2) выполняется условие Коши—Липшица: существует постоянная $l = l(K) > 0$ такая, что для любых $(t, \varphi_1), (t, \varphi_2) \in K$ имеет место неравенство

$$|\mathbf{X}(t, \varphi_2) - \mathbf{X}(t, \varphi_1)| \leq l\|\varphi_2 - \varphi_1\|.$$

Тогда [2] для каждой точки t_0, φ из области (2) существует единственное решение $\mathbf{x}(t_0, \varphi)$ системы (1), продолжимое до границы области S и непрерывно зависящее от t_0, φ .

Следуя работе [3], обозначим $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t, t_0, \varphi)$ значение $\mathbf{x}(t_0, \varphi)$ в момент времени t и введем предположение о $\mathbf{z}$ -продолжимости решений [3,9]: решения системы (1) определены при тех $t \geq t_0$, при которых $|\mathbf{y}(t, t_0, \varphi)| < h$.

Учитывая специфику рассматриваемой далее задачи устойчивости по части переменных, сделаем разбиение $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T)^T$, так что $\mathbf{x} = (\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \mathbf{z}^T)^T$. Соответственно, компоненту φ_y вектор-функции φ также разобьем на две части $\varphi_y = (\varphi_{y1}^T, \varphi_{y2}^T)^T$, так что $\varphi = (\varphi_{y1}^T, \varphi_{y2}^T, \varphi_z^T)^T$.

Определения [9]. Положение равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1):

1) *равномерно $\mathbf{y}$ -устойчиво* ($\mathbf{y}_1$ -устойчиво), если для каждого $t_0 \geq 0$, а также для произвольного числа $\varepsilon > 0$, как бы мало оно ни было, найдется число $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что из $\|\varphi\| < \delta$ следует неравенство $|\mathbf{y}(t, t_0, \varphi)| < \varepsilon$ ($|\mathbf{y}_1(t, t_0, \varphi)| < \varepsilon$) при всех $t \geq t_0$;

2) *равномерно асимптотически $\mathbf{y}$ -устойчиво* ($\mathbf{y}_1$ -устой-

чиво) равномерно по t_0 и найдется число $\Delta > 0$ такое, что произвольное решение $\mathbf{x}(t_0, \varphi)$ системы (1) с $\|\varphi\| < \Delta$ равномерно по t_0, φ из области $t_0 \geq 0, \|\varphi\| < \Delta$ удовлетворяет предельному соотношению $\lim |\mathbf{y}(t, t_0, \varphi)| = 0, t \rightarrow \infty$ ($\lim |\mathbf{y}_1(t, t_0, \varphi)| = 0, t \rightarrow \infty$).

Задача. Требуется указать структурную форму нелинейной системы (1), для которой равномерная $\mathbf{y}_1$ -устойчивость (равномерная асимптотическая $\mathbf{y}_1$ -устойчивость) положения равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ означает его равномерную $\mathbf{y}$ -устойчивость (равномерную асимптотическую $\mathbf{y}$ -устойчивость).

2. Условия устойчивости по части переменных

В соответствии со сделанным разбиением $\mathbf{x} = (\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \mathbf{z}^T)^T$ представим первую группу уравнений системы (1) в виде двух групп уравнений

$$\dot{\mathbf{y}}_1(t) = \mathbf{Y}_1(t, \mathbf{y}_{1t}, \mathbf{y}_{2t}, \mathbf{z}_t), \quad \dot{\mathbf{y}}_2(t) = \mathbf{Y}_2(t, \mathbf{y}_{1t}, \mathbf{y}_{2t}, \mathbf{z}_t),$$

а оператор $\mathbf{Y}_2(t, \varphi)$ представим следующим образом

$$\mathbf{Y}_2(t, \varphi) = \mathbf{Y}_2^0(t, \varphi_{y2}) + \mathbf{R}(t, \varphi_{y1}, \varphi_{y2}, \varphi_z)$$

$$(\mathbf{R}(t, \varphi) = \mathbf{Y}_2(t, \varphi) - \mathbf{Y}_2^0(t, \varphi_{y2})),$$

$$\mathbf{R}(t, \mathbf{0}, \varphi_{y2}, \mathbf{0}) \equiv \mathbf{R}(t, \mathbf{0}, \varphi_{y2}, \mathbf{0}) \equiv \mathbf{0}.$$

Система функционально-дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{y}}_2(t) = \mathbf{Y}_2^0(t, \mathbf{y}_{2t}) \quad (3)$$

будет "приведенной" (по переменным $\mathbf{y}_2$) подсистемой системы (1).

Допустим, что оператор $\mathbf{Y}_2^0(t, \varphi_{y2})$ вполне непрерывен в области $t \geq 0, \|\varphi_{y2}\| < h$ и на каждом компактном подмножестве из этой области удовлетворяет условию Коши—Липшица.

Теорема 1. Пусть выполняются условия:

1) найдется вполне непрерывный оператор $\mathbf{Y}_2^*(\varphi_{y1}, \varphi_{y2}), \mathbf{Y}_2^*(\mathbf{0}, \varphi_{y2}) \equiv \mathbf{Y}_2^*(\mathbf{0}, \mathbf{0}) \equiv \mathbf{0}$ такой, что в области (2) имеет место неравенство

$$|\mathbf{R}(t, \varphi_{y1}, \varphi_{y2}, \varphi_z)| \leq |\mathbf{Y}_2^*(\varphi_{y1}, \varphi_{y2})|; \quad (4)$$

2) положение равновесия $\mathbf{y}_2 = \mathbf{0}$ "приведенной" подсистемы (3) равномерно асимптотически устойчиво по всем переменным.

Тогда, если положение равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) $\mathbf{y}_1$ -устойчиво равномерно по t_0 , то оно $\mathbf{y}$ -устойчиво равномерно по t_0 .

Доказательство. При выполнении условий теоремы для системы (3) найдется [1] функционал $V(t, \Phi_{y2})$, определенный и непрерывный в области $t \geq 0$, $\|\Phi_{y2}\| < h$ и удовлетворяющий условию ($k = \text{const} > 0$)

$$|V(t, \Phi_{y2}) - V(t, \Phi'_{y2})| \leq k \|\Phi_{y2} - \Phi'_{y2}\|, \quad (5)$$

для которого

$$a_1(\|\Phi_{y2}\|) \leq V(t, \Phi_{y2}) \leq a_2(\|\Phi_{y2}\|), \quad (6)$$

$$V'_{(3)}(t, \Phi_{y2}) \leq -a_3(\|\Phi_{y2}\|), \quad (7)$$

где $a_i(r)$, $a_i(0) = 0$ — непрерывные, монотонно возрастающие при $r \in R_+$ функции (функции типа Хана).

Под производной V' функционала V понимается величина [1, 2]

$$V' = \overline{\lim}_{\delta} \frac{1}{\delta} \{V[t + \delta, \mathbf{y}_{2t+\delta}] - V[t, \mathbf{y}_{2t}]\}, \delta \rightarrow 0^+,$$

и при сделанных предположениях относительно функционала V указанный предел определяется единственным образом.

Кроме того, при сделанных предположениях относительно функционала V аналогично [1] можно показать, что производные функционала V в силу систем (1) и (3) связаны соотношением

$$V'_{(1)}(t, \Phi_{y2}) \leq V'_{(3)}(t, \Phi_{y2}) + k|\mathbf{R}(t, \Phi_{y1}, \Phi_{y2}, \Phi_z)|. \quad (8)$$

Учитывая неравенства (4), (5)–(7), заключаем, что соотношение (8) принимает следующий вид:

$$V'_{(1)}(t, \Phi_{y2}) \leq -a_3(a_2^{-1}(V(t, \Phi_{y2}))) + k|Y_2^*(\Phi_{y1}, \Phi_{y2})|. \quad (9)$$

(Нижний индекс под знаком V' означает номер системы, в силу которой вычисляется производная V -функционала.)

Если положение равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) $\mathbf{y}_1$ -устойчиво равномерно по t_0 , то для каждого $t_0 \geq 0$, произвольного числа $\varepsilon > 0$, как бы мало оно ни было, найдется число $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что из $\|\Phi\| < \delta$ следует $\|\mathbf{y}_{1t}\| < \varepsilon$ при всех $t \geq t_0$.

Положим $\delta_1(\varepsilon) = b(\varepsilon)/k$, $b(\varepsilon) = a_3(a_2^{-1}(a_1(\varepsilon)))$. Можно указать $\delta_2(\varepsilon) > 0$ такое, что из условия

$\|\Phi_{y1}\| < \delta_2$ следует $|Y_2^*(\Phi_{y1}, \Phi_{y2})| < \delta_1$ для $\|\Phi_{y2}\| < \varepsilon$. Вместе с тем, в силу равномерной $\mathbf{y}_1$ -устойчивости положения равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) имеем $\|\mathbf{y}_{1t}\| < \delta_2(\varepsilon)$ при всех $t \geq t_0$, если $\|\Phi\| < \delta$ и $\delta = \delta[\delta_2(\varepsilon)]$. Поскольку в области $t \geq 0$, $\|\Phi_{y2}\| < \varepsilon$ при $\|\Phi\| < \delta$, где $\delta = \delta[\delta_2(\varepsilon)]$, выполнено условие $|Y_2^*(\mathbf{y}_{1t}, \Phi_{y2})| < \delta_1$, то из неравенства (9) следует, что

$$V'_{(1)}(t, \mathbf{y}_{2t}) < 0 \text{ при } V(t, \mathbf{y}_{2t}) = a_1(\varepsilon). \quad (10)$$

Пусть $\delta^*(\varepsilon) = \min\{\delta(\varepsilon), \delta[\delta_2(\varepsilon)], \delta_3(\varepsilon)\}$, $\delta_3(\varepsilon) = a_2^{-1}(a_1(\varepsilon))$. Рассмотрим произвольное решение $\mathbf{x}(t_0, \Phi)$ системы (1) с $t_0 \geq 0$, $\|\Phi\| < \delta$, где $\delta = \delta^*(\varepsilon)$. В силу условий (6) в данном случае имеем $V(t_0, \Phi_{y2}) \leq a_2(\delta_3(\varepsilon))$ и, следовательно, $V(t_0, \Phi_{y2}) \leq a_1(\varepsilon)$. Покажем, что

$$V(t, \mathbf{y}_{2t}) < a_1(\varepsilon) \text{ для всех } t \geq t_0. \quad (11)$$

Предположим противное, что $V(t, \mathbf{y}_{2t}) < a_1(\varepsilon)$ при $t \in [t_0, t_1]$, но $V(t, \mathbf{y}_{2t}) = a_1(\varepsilon)$ при $t = t_1$. Тогда имеет место неравенство $V'_{(1)}(t, \mathbf{y}_{2t}) \geq 0$, которое противоречит условию (10). Значит неравенство (11) справедливо для всех $t \geq t_0$ и на основании условия $V(t, \Phi_{y2}) \geq a_1(\|\Phi_{y2}\|)$ заключаем, что $\|\mathbf{y}_{2t}\| < \varepsilon$ для всех $t \geq t_0$, если $\|\Phi\| < \delta$ и $\delta = \delta^*(\varepsilon)$. Теорема доказана.

Теорема 2. Пусть выполняются условия 1), 2) теоремы 1. Тогда, если положение равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) равномерно асимптотически $\mathbf{y}_1$ -устойчиво, то оно равномерно асимптотически $\mathbf{y}$ -устойчиво.

Доказательство. Равномерная $\mathbf{y}_2$ -устойчивость положения равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) следует из теоремы 1: для каждого $t_0 \geq 0$, а также для произвольного числа $\varepsilon > 0$, как бы мало оно ни было, найдется число $\delta^*(\varepsilon) > 0$ такое, что из условия $\|\Phi\| < \delta$, где $\delta = \delta^*(\varepsilon)$, следует $\|\mathbf{y}_{2t}\| < \varepsilon$ при всех $t \geq t_0$. Покажем, что положение равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1) является также равномерно $\mathbf{y}_2$ -притягивающим. Это значит, что при заданном $\delta^*(\varepsilon) > 0$ для любого $\eta \in (0, \delta^*)$ существует число $T(\eta) > 0$ такое, что из $t_0 \geq 0$, $\|\Phi\| < \delta$, где $\delta = \delta^*(\varepsilon)$, следует $\|\mathbf{y}_{2t}\| < \varepsilon$ при всех $t \geq t_0 + T(\eta)$.

В рассматриваемом случае предельное соотношение

$$|\mathbf{R}(t, \mathbf{y}_{1t}, \Phi_{y2}, \Phi_z)| \rightarrow 0, t \rightarrow \infty \quad (12)$$

будет выполняться равномерно по $t_0 \geq 0$ и $\|\Phi\| < \Delta$ ($\Delta < \delta^*$), если $\Delta > 0$ определяет область

равномерного $\mathbf{y}_1$ -притяжения нулевого положения равновесия $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ системы (1).

Положим $\eta \in (0, \Delta)$; в этом случае $\eta < \delta^*(\varepsilon) < a_2^{-1}(a_1(\varepsilon)) < \varepsilon$. В силу условий (8), (9) при $a_2^{-1}(a_1(\eta)) \leq \|\Phi_{\mathbf{y}_2}\| < \varepsilon$ и $\|\Phi\| < \Delta$ ($\Delta < \delta^*$) найдется такое $T_1(\eta) > 0$, что для всех $t \geq T_1(\eta)$ выполняется неравенство

$$V'_{(1)}(t, \mathbf{y}_{2t}) \leq -\frac{1}{2}b(\eta). \quad (13)$$

Следовательно, при $t \geq T_1(\eta)$ имеем

$$V'_{(1)}(t, \mathbf{y}_{2t}) < 0 \text{ при } V(t, \mathbf{y}_{2t}) = a_1(\eta). \quad (14)$$

Положим

$$t_{0*} = \max[t_0, T_1(\eta)], \quad T_2(\eta) = \frac{2a_2(\eta) - a_1(\eta)}{b(\eta)}.$$

Покажем, что на отрезке $[t_{0*}, t_{0*} + T_2(\eta)]$ существует момент времени t_* , для которого

$$V(t, \mathbf{y}_{2t}) < a_1(\eta) \text{ при } t = t_*. \quad (15)$$

Допустим противное, что $V(t, \mathbf{y}_{2t}) \geq a_1(\eta)$ для всех $t \in [t_{0*}, t_{0*} + T_2(\eta)]$. Тогда на этом интервале времени $\|\mathbf{y}_{2t}\| \geq a_2^{-1}(a_1(\eta))$, и справедливо соотношение (13), что приводит к противоречивым неравенствам

$$\begin{aligned} 0 < a_1(\eta) &\leq V(t_{0*} + T_2(\eta), \mathbf{y}_{2(t_{0*} + T_2(\eta))}) = \\ &= V(t_{0*}, \mathbf{y}_{2(t_{0*})}) + \int_{t_{0*}}^{t_{0*} + T_2(\eta)} V'_{(1)}(s, \mathbf{y}_{2s}) ds \leq \\ &\leq a_2(\eta) - \frac{1}{2}b(\eta)T_2(\eta) = \frac{1}{2}a_1(\eta). \end{aligned}$$

Из условий (14), (15) заключаем, что неравенство $V(t, \mathbf{y}_{2t}) < a_1(\eta)$ имеет место для всех $t \geq t_*$. Действительно, допустим противное, что $V(t, \mathbf{y}_{2t}) < a_1(\eta)$ имеет место при $t \in [t_*, t^*)$, но $V(t, \mathbf{y}_{2t}) = a_1(\eta)$ при $t = t^*$. Тогда $V'_{(1)}(t, \mathbf{y}_{2t}) \geq 0$ при $t = t^*$, что противоречит условию (15). Поэтому неравенство $\|\mathbf{y}_{2t}\| < \eta$ выполняется для всех $t \geq t_*$ на основании условия $V(t, \Phi_{\mathbf{y}_2}) \geq a_1(\|\Phi_{\mathbf{y}_2}\|)$. Следовательно, имеем $\|\mathbf{y}_{2t}\| < \eta$ для любого $t \geq t_0 + T(\eta)$, где $T = T_1(\eta) + T_2(\eta)$, если $\|\Phi\| < \Delta$ ($\Delta < \delta^*$). Теорема доказана.

Замечания. 1. Теоремы 1, 2 являются развитием соответствующих результатов А. Халаяна [19], а также результатов [21].

В отличие от работы [19], где указаны условия, при которых из устойчивости по части

переменных нулевого положения равновесия системы (1) следует устойчивость по всем переменным, изучаются более общие задачи устойчивости по части переменных. Такие задачи рассмотрены ранее в работе [21], но без учета эффекта последствия в изучаемой системе.

2. При выполнении условия (4) динамика решений $\mathbf{x}(t_0, \Phi)$ системы (1), для которых $\mathbf{y}_{1t} \equiv \mathbf{0}$ (нуль-динамика по отношению к "измеримому выходу" $\mathbf{y}_1$, следуя терминологии работ [22, 23]), определяется подсистемой

$$\mathbf{y}'_2(t) = \mathbf{Y}_2^0(t, \mathbf{y}_{2t}), \quad \mathbf{z}'(t) = \mathbf{Z}(t, 0, \mathbf{y}_{2t}, \mathbf{z}_t),$$

которая включает "приведенную" подсистему (4). При этом "приведенная" подсистема (4) определяет *частичную* нуль-динамику системы (1) по отношению к "измеримым" переменным $\mathbf{y}_1$: динамику $\mathbf{y}$ -компоненты решений $\mathbf{x}(t_0, \Phi)$, для которых $\mathbf{y}_{1t} \equiv \mathbf{0}$.

Поэтому при выполнении условий 1), 2) теоремы 1 система (1) обладает следующим свойством обнаруживаемости (детектируемости): если $\mathbf{y}_{1t} \equiv \mathbf{0}$, то найдется $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{y}(t, t_0, \Phi)\| = 0$, $t \rightarrow \infty$ при $\|\Phi\| < \delta$ и всех $t \geq t_0$. Это свойство, следуя терминологии работы [24], определяет *частичную* детектируемость системы (1).

3. Неравенство (4) легко проверяется, если из тех или иных соображений известна заранее равномерная (по t_0, Φ) $\mathbf{z}$ -ограниченность решений системы (1), начинающихся при $\|\Phi\| < \delta$.

4. Анализ задач частичной (по части переменных) устойчивости и стабилизации, в том числе для систем функционально-дифференциальных уравнений, и обзор результатов можно найти в работах [3, 9, 12, 15, 25–28].

Пример. Пусть система (1) состоит из уравнений

$$\begin{aligned} y'_1(t) &= -2y_1(t) + y_1(t - \tau) + y_1^2(t) + \\ &+ y_2^2(t - \tau)z_1(t - \tau); \\ y'_2(t) &= [-1 + y_1(t) \sin z_2(t - \tau)]y_2(t); \\ z'_1(t) &= [1 - 2y_1(t) \sin z_2(t - \tau)]z_1(t); \\ z'_2(t) &= e^t y_1(t - \tau)z_2(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Введением переменной $\mu_1 = y_2^2 z_1$ из системы (16) выделим подсистему

$$\begin{aligned} y'_1(t) &= -2y_1(t) + y_1(t - \tau) + \mu_1(t - \tau) + y_1^2(t); \\ \mu'_1(t) &= -\mu_1(t), \end{aligned}$$

нулевое положение равновесия $y_1 = \mu_1 = 0$ которой равномерно асимптотически устойчиво на основании теоремы об устойчивости по линейному приближению [1]. Поэтому положение равновесия $y_1 = y_2 = z_1 = z_2 = 0$ системы (16) равномерно асимптотически y_1 -устойчиво.

"Приведенная" подсистема (3) в данном случае имеет вид

$$y_2'(t) = -y_2(t),$$

и ее нулевое положение равновесия $y_2 = 0$ равномерно асимптотически устойчиво. Кроме того, в данном случае выполнено неравенство (4), в котором $|Y_2^*| = |\Phi_{y_1}(0)|\Phi_{y_2}(0)|$.

На основании теоремы 2 заключаем, что положение равновесия $y_1 = y_2 = z_1 = z_2 = 0$ системы (16) равномерно асимптотически (y_1, y_2) -устойчиво.

4. Приложение к нелинейным управляемым системам

Пусть система функционально-дифференциальных уравнений (1), в которой $\mathbf{x} = (y_1^T, y_2^T, z^T)^T$ описывает возмущенное движение объекта управления с учетом позиционных управлений $\mathbf{u}$, формируемых по принципу обратной связи с задержками (запаздыванием) в каналах управления.

Считаем, что переменные, входящие в векторы y_1, z , измеряются и используются для формирования управлений $\mathbf{u}$ вида $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t, y_1, z)$, $\mathbf{u}(t, 0, 0) \equiv 0$, а переменные, входящие в вектор y_2 , не измеряются. Пусть формируемые управления таковы, что замкнутая система (1) удовлетворяет общим требованиям, указанным в разделе 2, и положение равновесия $\mathbf{x} = 0$ этой системы равномерно асимптотически y_1 -устойчиво.

Поскольку при $y_1 = 0, z = 0$ управления нулевые, то динамика "приведенной" подсистемы (3) не зависит от формируемых управлений, а определяется только структурой и параметрами объекта. Считаем их выбранными так, что нулевое положение равновесия "приведенной" подсистемы (3) равномерно асимптотически устойчиво по всем переменным.

В результате при выбранной структуре и параметрах объекта достигнутая за счет выбора управлений равномерная асимптотическая y_1 -устойчивость положения равновесия $\mathbf{x} = 0$

системы (1) означает равномерную асимптотическую y -устойчивость этого положения равновесия.

Заключение

Указаны легко интерпретируемые условия на структурную форму нелинейной системы функционально-дифференциальных уравнений, для которой устойчивость по части переменных нулевого положения равновесия означает его устойчивость по отношению к другой — большей части переменных. Дано приложение к задаче частичной стабилизации управляемых систем. Указана связь полученных условий с условиями частичной детектируемости рассматриваемой нелинейной системы; введено понятие частичной нуль-динамики изучаемой системы.

Имеются другие подходы [9, 29, 30] к задаче частичной (по заданной части переменных) стабилизации, также основанные на предварительном анализе устойчивости по меньшей части заданных переменных.

Список литературы

1. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматлит, 1959.
2. Хейл Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1984. 421 с.
3. Burton T. A. Stability and Periodic Solutions of Ordinary and Functional Differential Equations. Academic Press, Orlando, 1985. 342 p.
4. Андреев А. С. Устойчивость неавтономных функционально-дифференциальных уравнений. Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2005. 328 с.
5. Kharitonov V. L. Time-Delay Systems. Lyapunov Functionals and Matrices. Basel: Birkhauser, 2013. 311 p.
6. Fridman E. Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control. Boston: Birkhauser, 2014. 362 p.
7. Liu T., Jiang Z. P., Hill D. J. Nonlinear Control of Dynamic Networks. Orlando: CRC Press, 2014. 345 p.
8. Corduneanu C., Li Y. Z., Mahdavi M. Functional Differential Equations: Advances and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 368 p.
9. Vorotnikov V. I. Partial Stability and Control. Boston: Birkhauser, 1998. 448 p.
10. Воротников В. И. Два класса задач частичной устойчивости: к унификации понятий и единым условиям разрешимости // Докл. РАН. 2002. Т. 384, № 1. С. 47—51.
11. Bernfeld S. R., Corduneanu C., Ignatyev A. O. On the Stability of Invariant Sets of Functional Differential Equations // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. 2003. Vol. 55, N. 4—6. P. 641—656.
12. Воротников В. И. Частичная устойчивость и управление: состояние проблемы и перспективы развития // Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 3—59.
13. Воротников В. И., Мартыщенко Ю. Г. Об устойчивости по части переменных "частичных" положений равно-

весия систем с последствием // Математические заметки. 2014. Т. 96, № 4. С. 496—503.

14. **Aleksandrov A., Aleksandrova E., Zhabko A., Chen Y. Z.** Partial Stability Analysis of Some Classes of Nonlinear Systems // Acta Mathematica Scientia. 2017. Vol. 37, N. 2. P. 329—341.

15. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

16. **Karafyllis I., Pepe P., Jiang Z. P.** Global Output Stability for Systems Described by Retarded Functional Differential Equations // European J. Control. 2008. Vol. 14. P. 516—536.

17. **Kankamalage H. G., Lin Y., Wang Y.** On Lyapunov — Krasovskii Characterizations of Input-to-Output Stability // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2017. Vol. 50, N. 1. P. 14362—14367.

18. **Румянцев В. В.** Об устойчивости движения по отношению к части переменных // Вестн. МГУ. Сер. математики, механики, физики, астрономии, химии. 1957. № 4. С. 9—16.

19. **Halanay A.** Differential Equations: Stability, Oscillations, Time Lags. New York: Acad. Press, 1966. 528 p.

20. **Corduneanu C.** On Partial Stability for Delay Systems // Annal. Polon. Math. 1975. Vol. 4, N. 29. P. 357—362.

21. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К задаче частичной детектируемости нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. 2009. № 1. С. 25—38.

22. **Byrnes C. I., Isidori A., Willems J. C.** Passivity, Feedback Equivalence, and the Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems // IEEE Trans. Autom. Control. 1991. Vol. 36, N. 11. P. 1228—1240.

23. **Isidori A.** The Zero Dynamics of a Nonlinear System: From the Origin to the Latest Progresses of a Long Successful Story // European J. Control. 2013. Vol. 19, N. 5. P. 369—378.

24. **Ingalls B. P., Sontag E. D., Wang Y.** Measurement to Error Stability: a Notion of Partial Detectability for Nonlinear Systems // Proc. 41th IEEE Conf. on Decision and Control. Las Vegas, Nevada. 2002. P. 3946—3951.

25. **Румянцев В. В., Озиранер А. С.** Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных. М.: Наука, 1987.

26. **Jammazi C.** Backstepping and Partial Asymptotic Stabilization // Intern. J. Control, Autom., Syst. 2008. Vol. 6, N. 6. P. 859—872.

27. **Binazadeh T., Yazdanpanah M. J.** Partial Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems // ISA Trans. 2012. Vol. 51, N. 2. P. 298—303.

28. **L'Afflitto A., Haddad W. M., Bakolas E.** Partial-State Stabilization and Optimal Feedback Control // Int. J. Robust Nonlinear Control. 2016. Vol. 26, N. 5. P. 1026—1050.

29. **Воротников В. И.** Об управлении угловым движением твердого тела. Игровой подход // Прикл. матем. и механика. 1994. Т. 58, Вып. 3. С. 82—103.

30. **Воротников В. И.** О синтезе ограниченных управлений в игровой задаче переориентации асимметричного твердого тела // Докл. РАН. Т. 343, № 5. С. 630—634.

31. **Hu W. H., Wang J., Li X. M.** An Approach of Partial Control Design for System Control and Synchronization, Chaos // Solitons & Fractals. 2009. Vol. 39, N. 3. P. 1410—1417.

On Problem of Partial Stability for Functional Differential Systems with Holdover

V. I. Vorotnikov, vorotnikov-vi@rambler.ru,
Ural Federal University, Ekaterinburg

Corresponding author: **Vorotnikov Vladimir I.,** D. Sc. (Phys. & Math.), Professor,
Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,
e-mail: vorotnikov-vi@rambler.ru

Accepted on March 25, 2019

Abstract

The theory of systems of functional differential equations is a significant and rapidly developing sphere of modern mathematics which finds extensive application in complex systems of automatic control and also in economic, modern technical, ecological, and biological models. Naturally, the problems arises of stability and partial stability of the processes described by the class of the equation. The article studies the problem of partial stability which arise in applications either from the requirement of proper performance of a system or in assessing system capability. Also very effective is the approach to the problem of stability with respect to all variables based on preliminary analysis of partial stability. We suppose that the system have the zero equilibrium position. A conditions are obtained under which the uniform stability (uniform asymptotic stability) of the zero equilibrium position with respect to the part of the variables implies the uniform stability (uniform asymptotic stability) of this equilibrium position with respect to the other, larger part of the variables, which include an additional group of coordinates of the phase vector. These conditions include: 1) the condition for uniform asymptotic stability of the zero equilibrium position of the "reduced" subsystem of the original system with respect to the additional group of variables; 2) the restriction on the coupling between the "reduced" subsystem and the rest parts of the system. Application of the obtained results to a problem of stabilization with respect to a part of the variables for nonlinear controlled systems is discussed.

Keywords: nonlinear functional-differential system with holdover, partial stability

For citation:

Vorotnikov V. I. On Problem of Partial Stability for Functional Differential Systems with Holdover, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 398—404.

DOI: 10.17587/mau.20.398-404

References

1. **Krasovskii N. N.** Stability of Motion, Stanford, Stanford Univ. Press, 1963, 194 p.
2. **Hale J. K.** Theory of Functional Differential Equations, New York, Springer-Verlag, 1977, 365 p.

3. **Burton T. A.** Stability and Periodic Solutions of Ordinary and Functional Differential Equations, Orlando, Academic Press, 1985, 342 p.
4. **Andreev A. S.** Stability of Nonautonomous Functional Differential Equations, Ul'yanovsk, Publishing house of UIGU, 2005, 328 p.
5. **Kharitonov V. L.** Time-Delay Systems. Lyapunov Functionals and Matrices, Basel, Birkhauser, 2013, 311 p.
6. **Fridman E.** Introduction to Time-Delay Systems: Analysis and Control, Boston, Birkhauser, 2014, 362 p.
7. **Liu T., Jiang Z. P., Hill D. J.** Nonlinear Control of Dynamic Networks, Orlando, CRC Press, 2014, 345 p.
8. **Corduneanu C., Li Y. Z., Mahdavi M.** Functional Differential Equations: Advances and Applications, Hoboken, John Wiley & Sons, 2016, 368 p.
9. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control, Boston: Birkhauser, 1998. 448 p.
10. **Vorotnikov V. I.** Two Classes of Partial Stability Problems: Unification of the Notions and Common Conditions of Solvability, *Doklady Physics*, 2002, vol. 47, no. 5, pp. 377–381.
11. **Bernfeld S. R., Corduneanu C., Ignatyev A. O.** *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2003, vol. 55, no. 4–6, pp. 641–656.
12. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control: the State of the Art and Developing Prospects, *Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 4, pp. 511–561.
13. **Vorotnikov V. I., Martyshenko Yu. G.** Stability in a Part of Variables of "Partial" Equilibria of Systems with Aftereffect, *Math. Notes*, 2014, vol. 96, no. 4, pp. 477–483.
14. **Aleksandrov A., Aleksandrova E., Zhabko A., Chen Y. Z.** *Acta Mathematica Scientia*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 329–341.
15. **Fradkov A. L., Miroshnik I. V., Nikiforov V. O.** Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1999, 528 p.
16. **Karafyllis I., Pepe P., Jiang Z. P.** *European J. Control*, 2008, vol. 14, no. 6, pp. 516–536.
17. **Kankanamalage H. G., Lin Y., Wang Y.** *IFAC Proceedings Volumes*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 14362–14367.
18. **Rumyantsev V. V.** *Vestn. MGU. Ser. matematiki, mekhaniki, fiziki, astronomii, himii — Gerald of Moscow State University. Ser. Math., Mech., Phys., Astron., Chem.*, 1957, no. 4, pp. 9–16.
19. **Halanay A.** Differential Equations: Stability, Oscillations, Time Lags., New York, Acad. Press, 1966, 528 p.
20. **Corduneanu C.**, *Annal. Polon. Math.*, 1975, vol. 4, no. 29, pp. 357–362.
21. **Vorotnikov V. I., Martyshenko Yu. G.** On Partial Detectability of the Nonlinear Dynamic Systems, *Autom. Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 1, pp. 20–32.
22. **Byrnes C. I., Isidori A., Willems J. C.** *IEEE Trans. Autom. Control*, 1991, vol. 36, no. 11, pp. 1228–1240.
23. **Isidori A.** *European J. Control*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 369–378.
24. **Ingalls B. P., Sontag E. D., Wang Y.** *Proc. 41th IEEE Conf. on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, 2002, pp. 3946–3951.
25. **Rumyantsev V. V., Oziraner A. S.** Stability and Stabilization of Motion with Respect to a Part of the Variables, Moscow, Nauka, 1987, 287 p.
26. **Jammazi C.** *Intern. J. Control, Autom., Syst.*, 2008, vol. 6, no. 6, pp. 859–872.
27. **Binazadeh T., Yazdanpanah M. J.** *ISA Trans.*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 298–303.
28. **L'Afflitto A., Haddad W. M., Bakolas E.** *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 2016, vol. 26, no. 5, pp. 1026–1050.
29. **Vorotnikov V. I.** The Control of the Angular Motion of a Solid with Interference. A Game-Theoretic Approach, *J. Appl. Math. Mech.*, 1994, vol. 58, no. 3, pp. 457–476.
30. **Vorotnikov V. I.** On Bounded Control Synthesis in a Game Theory Problem of Reorientation of an Asymmetric Solid // *Physics-Doklady*, 1995, vol. 40, no. 8, pp. 421–425.
31. **Hu W. H., Wang J., Li X. M.** *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, vol. 39, no. 3, pp. 1410–1417.

С 30 сентября по 3 октября 2019 года в Самаре в АО "РКЦ ПРОГРЕСС" состоится VI Всероссийская научно-техническая конференция

VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**
(«VI КОЗЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»)

30 сентября - 3 октября 2019 г.

И. А. Щербатов, канд. техн. наук, shcherbatovia@mpei.ru,
Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт"

Формализация неопределенности внешней среды при эксплуатации энергетического оборудования

Условия эксплуатации оборудования объектов энергетики оказывают влияние на его техническое состояние. Эти условия определяются состоянием внешней (окружающей) среды. Отклонения параметров окружающей среды от требуемых (нормативных) значений могут ускорять негативные тенденции, приводящие к отказам, авариям и, соответственно, экономическому ущербу от простоя и восстановления надлежащего технического состояния энергетического оборудования. Поэтому учет состояния внешней среды является важным аспектом решения задач мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния, а также задач управления и поддержки принятия решений при эксплуатации оборудования объектов энергетики. Внешняя среда характеризуется наличием различных видов неопределенности. Отличающиеся неопределенности внешней среды определяют необходимость выбора или коррекции способа достижения цели управления или принятия решения. Поэтому в работе предложено формализованное описание неопределенностей внешней среды. Синтезированы операции для формализации состояний, отличающихся от "типовых", получаемых, например, на этапе проектирования системы диагностики или управления энергетическим оборудованием. На основе этого реализован способ оперативной оценки состояний внешней среды без опроса экспертов и ЛПР на основе синтеза ускоренной процедуры. В качестве математического аппарата формализации знаний о неопределенностях различных видов и субъективизма, присущего мнениям экспертов предметной области, обоснован выбор теории нечетких множеств. Формализовано понятие состояния внешней среды и предложены операции для определения ее типовых состояний. Для учета различных видов неопределенности при описании текущего состояния внешней среды предложен механизм модификаторов. Модификаторы позволяют существенно упростить расчеты при формализации состояний внешней среды для применения в системах диагностики и управления энергетическим оборудованием. Рассмотренные расчетные примеры показывают основные возможности предложенного подхода. Результаты применения разработанного подхода позволяют говорить о целесообразности его применения для решения задачи формализации состояния внешней среды при эксплуатации энергетического оборудования в условиях неопределенности.

Ключевые слова: неопределенность, внешняя среда, энергетика, оборудование энергетики, теория нечетких множеств

Введение

Внешняя (окружающая) среда оказывает влияние на процесс эксплуатации энергетического оборудования и, как следствие, на его техническое состояние. В качестве основных факторов, влияющих на условия функционирования оборудования энергетики, можно выделить климатические (температура, влажность, запыленность), человеческие (ошибки при монтаже, некачественный осмотр, нарушение правил эксплуатации), механические (удары, вибрация). Эксплуатация оборудования должна проводиться в строгом соответствии с установленными правилами, требованиями ГОСТ, СНИП и другой нормативно-технической документации [1]. Однако не всегда происходит следование этому требованию. Например, в отчете [2] указано, что наблюдается увеличение аварий и отказов (по объектам электроэнергетики) из-за неустранения дефектов, выявленных при осмотрах, а также невыполнения необходимых объемов проверок, при этом причинами около 5 % всех аварий являются ошибочные или не-

правильные действия оперативного персонала. Неблагоприятные погодные условия также являются существенным фактором изменения технического состояния энергетического оборудования. Поэтому необходимо знать состояние внешней среды в конкретный момент времени, что позволит выбрать и реализовать управляющее воздействие, направленное на компенсацию негативного влияния. Задача описания состояния внешней среды является крайне сложной. Вместе с тем влияние внешней среды на техническое состояние энергетического оборудования проявляется через определенные негативные воздействия [3]. Поэтому необходимо формализовать знания о негативных факторах внешней среды, оказывающих влияние на техническое состояние и надежность энергетического оборудования.

Существует значительное число работ, в которых предложены различающиеся подходы к описанию влияния, которое оказывает внешняя среда на функционирующее энергетическое оборудование и которое приводит к изменению его технического состояния. В основ-

ном все работы посвящены оценке влияния или учета при принятии решения конкретных негативных факторов (воздействий).

Например, в работе [4] предлагается оценивать функциональную уязвимость как условную вероятность потери системой способности выполнять отдельные функции (наличие дефекта, снижающего эффективность функционирования единицы энергетического оборудования). Этот подход позволяет формировать дерево сценариев отказов системы и оценивать уязвимости технической системы, возникающие в результате внешних (инициирующих) воздействий. В целом достаточно часто при проведении технической диагностики в системах противоаварийной защиты используются методы построения деревьев принятия решений [5]. Оценка влияния температуры окружающей среды и условий эксплуатации на производительность газотурбинной электростанции приводится в статье [6]. Учет внешних условий функционирования как фактора, оказывающего влияние на преждевременное старение и износ, а также увеличение интенсивности отказов оборудования, реализован в работе [7]. Внешние факторы выявляются из ретроспективных данных на основе методов обработки больших данных и составления правил, реализующих механизм накопления влияния с течением времени. Воздействие внешней среды можно фиксировать опосредованно с использованием систем мониторинга и диагностики состояния оборудования, например, для сетей Smart Grid существует двухэтапная процедура, заключающаяся в сборе информации и анализе стратегий обслуживания оборудования и модуле обнаружения дрейфов режимов [8]. Важность оценивания состояния внешней среды и условий функционирования турбин отмечена в работе [9], трансформаторов — в работе [10] и т. д.

Внешняя среда посредством воздействий, оказываемых на оборудование энергетики, влияет на его техническое состояние. Учет состояния важен при принятии решений, направленных на поддержание оборудования в надлежащем техническом состоянии, а также на снижение рисков отказов и аварий. При этом внешняя среда является источником существенной неопределенности. Нередко отсутствует возможность оценки состояния внешней среды с использованием традиционных методов. Однако для этой цели могут быть при-

влечены эксперты предметной области, знания которых позволяют снизить неопределенность и, например, установить набор "типовых" состояний внешней среды, в которой функционирует энергетическая система. Иначе говоря, эксперты могут выделить те типы неопределенности внешней среды, которые являются существенными с точки зрения негативного влияния, оказываемого ими на конкретную единицу оборудования. При этом для формирования знаний экспертов наиболее подходящим математическим аппаратом является теория нечетких множеств [11]. Необходимо отметить, что помимо формализации типов неопределенности внешней среды следует поставить им в соответствие конкретные способы управления, обеспечивающие снижение негативного влияния и обеспечение требуемого режима работы энергетического оборудования.

Особенности задачи формализации неопределенностей внешней среды

Энергетическое оборудование функционирует во внешней среде при наличии неопределенностей различных видов, например, температуры окружающей среды. Обозначим $\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_m\}$ — множество неопределенностей внешней среды, сопровождающих процессы управления или принятия решений в энергетической системе. Наличие различных неопределенностей влияет на выбор способа достижения цели управления или на принятие решения (способа управления единицей энергетического оборудования). Обозначим множество способов управления единицей оборудования $\Gamma = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k\}$. Под состоянием внешней среды будем понимать присутствующий набор неопределенности из Ξ в конкретный момент времени.

Тогда для решения задачи выбора способа управления единицей энергетического оборудования в условиях неопределенности внешней среды необходимо решить ряд взаимосвязанных подзадач:

- предложить формализованное описание состояния внешней среды, обладающей неопределенностями различных видов, принадлежащих множеству Ξ ;
- на основании описания состояния внешней среды синтезировать операции для получения состояний, отличающихся от "типовых" состояний, получаемых, например, на этапе

проектирования системы управления энергетическим оборудованием;

- с использованием синтезированных операций получения не типовых состояний и формализованного описания неопределенностей внешней среды предложить способ оперативной оценки состояний без опроса экспертов и ЛПР на основе синтеза ускоренной процедуры;
- предложить способ определения требуемого управляющего воздействия с учетом сформированной оценки текущего состояния внешней среды.

Учет субъективности мнений экспертов при формализации состояний внешней среды

Опытный эксперт предметной области обладает знаниями, позволяющими ему эффективно действовать в условиях наличия негативных факторов внешней среды. Эти знания формализуются с использованием теории нечетких множеств. Однако в этом случае возникает дополнительная неопределенность, обусловленная субъективностью знаний конкретного эксперта, их информированностью, опытом, эмоциональным состоянием и пр. и "размытостью" теории нечетких множеств как математического аппарата, что сказывается на близости оценок реальному состоянию внешней среды. Поэтому при задании элементов множества Ξ следует учесть данный аспект.

Пусть A — нечеткое подмножество множества X с функцией принадлежности $\mu_A(x)$, $d(A)$ — мера нечеткости A , и существует ряд требований к d (аксиомы Де Луки-Термини) [12]:

(Т.1) $d(A) = 0$, тогда и только тогда, когда A — четкое подмножество, т. е. $\mu_A(x) = 0$ или $\mu_A(x) = 1$, $\forall x \in X$;

(Т.2) $d(A)$ достигает максимального значения тогда и только тогда, когда $\mu_A(x) = 0,5$, $\forall x \in X$;

(Т.3) $d(A) \geq d(A^*)$: $\begin{cases} \mu_{A^*}(x) \geq \mu_A(x), \mu_A(x) \geq 0,5; \\ \mu_{A^*}(x) \leq \mu_A(x), \mu_A(x) \leq 0,5; \end{cases}$

(Т.4) $d(A) = d(\bar{A})$, где $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ ($\bar{A}$ — дополнение к A).

Мера $d(\cdot)$ является количественным показателем, который позволяет определить состояние внешней среды, описываемое нечетким подмножеством, наиболее близкое к реальному. Например, сравнивая два нечетких множества с использованием меры $d(\cdot)$, можно выбрать то, которое является более предпочтительным с

учетом субъективности мнений экспертов, знания которых использовались для оценки текущего состояния внешней среды. В работе [13] обосновано применение меры Коско для вычисления $d(\cdot)$ [14]:

$$d_{KS}(A) = \frac{|A \cap \bar{A}|}{|A \cup \bar{A}|}, \quad (1)$$

где $|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x)$ — сумма значений функций принадлежности.

Формализация неопределенностей внешней среды

Внешняя среда, в которой функционирует энергетическая система, является источником существенной неопределенности. Все свойства внешней среды, информация о которых не доступна, не поддается измерению или может быть оценена (измерена) только частично, относятся к множеству неопределенностей Ξ .

Определение 1. Состояние внешней среды $S_E(t^*)$ в момент времени t^* в полной мере характеризуется подмножеством $\Xi^* \in \Xi$ в этот момент времени, т. е. имеет место соответствие E_S : $S_E \rightarrow \Xi$, где E_S — декартово произведение $S_E \times \Xi$.

Тогда по определению нечеткое подмножество $\hat{\Xi}_1$ множества Ξ характеризуется функцией принадлежности $\mu_{\Xi}: \Xi \rightarrow [0; 1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу Ξ число $\mu_{\Xi}(\xi)$ из интервала $[0; 1]$, характеризующее степень принадлежности элемента ξ подмножеству $\hat{\Xi}_1$ [15]. Напомним, что множеством α -уровня нечеткого множества $\hat{\Xi}_1$ является множество $\hat{\Xi}_{\alpha,1}$: $\hat{\Xi}_{\alpha,1} = \{\xi | \mu_{\Xi}(\xi) \geq \alpha\}$ [15].

Определение 2. Нечеткое дискретное подмножество $\bar{\Xi}^* = \{\xi_1 / \mu_{\Xi^*}(\xi_1); \dots; \xi_k / \mu_{\Xi^*}(\xi_k)\} \in \Xi$ будем называть состоянием неопределенности внешней среды.

Типовые операции над формализованными неопределенностями внешней среды

В случае, если существует возможность задать несколько "типовых" состояний внешней среды $\Xi_T \subset \Xi$ (характеризующихся наличием конкретного набора неопределенностей), то, используя операции над нечеткими множествами, можно порождать более сложные со-

стояния внешней среды на основе "простых" ситуаций из Ξ_T (для дискретного задания нечетких множеств состояний неопределенности внешней среды): дополнение $\bar{\Xi}_1; \mu_{\bar{\Xi}} = 1 - \mu_{\Xi}$ (позволяет сформировать состояние, противоположное текущему, соответствует термину "НЕ"); объединение $(\Xi_1 \cup \Xi_2); \mu_{\Xi_1 + \Xi_2} = \max(\mu_{\Xi_1}; \mu_{\Xi_2})$ (позволяет получить состояние среды, которое объединяет два типовых состояния).

Учитывая определения из теории нечетких множеств, сформулируем ряд утверждений, которые являются прямым следствием определения 2.

Определение 3. Состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_1$ включается в состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_2$ (обозначим это $\hat{\Xi}_1 \subseteq \hat{\Xi}_2$), если $\forall \xi \mu_{\hat{\Xi}_1}(\xi) \leq \mu_{\hat{\Xi}_2}(\xi)$.

Определение 4. Состояние неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_1$ равно состоянию неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_2$ (обозначим это $\hat{\Xi}_1 = \hat{\Xi}_2$), если $\forall \xi \mu_{\hat{\Xi}_1}(\xi) = \mu_{\hat{\Xi}_2}(\xi)$.

Поскольку обычно элементами множества неопределенностей Ξ являются лингвистические (вербальные, на ограниченном множестве естественного языка) описания, то для удобства обозначим их целыми числами, которые соответствуют порядковому номеру элемента в множестве, а функции принадлежности приравняем к единице, т. е. сформируем обыкновенное (четкое) подмножество. Таким образом, в общем виде $\hat{\Xi}' = \{1/\mu_1; \dots; k/\mu_k\}$, $\mu_1 = \dots = \mu_k = 1$, $|\Xi^*| = k$, $k \in N$. Получим "условные" функции принадлежности μ_i , $i = \overline{1, k}$ (необходимые для упорядочивания элементов по μ_i) следующим образом: $\mu_i = 1/i$, $i = \overline{1, k}$, тогда $\Xi' = \{1/1; \dots; k/1/k\}$.

Определение 5. α -состояние неопределенности внешней среды — четкое множество α -уровня нечеткого подмножества $\hat{\Xi}^*$, такое что $\hat{\Xi}_\alpha = \{\xi | \mu_{\hat{\Xi}^*}(\xi) \geq \alpha\}$.

По определению α -уровня нечеткого множества $\hat{\Xi}_\alpha^*$ — нечеткое подмножество, для которого выполнено условие $\forall \xi_\alpha^* \mu_{\hat{\Xi}_\alpha^*}(\xi_\alpha^*) = 1$. Условимся, что число α -уровней конечно, т. е. $\alpha \in \{\alpha_1; \dots; \alpha_k\}$. Для $\hat{\Xi}' = \{1/1; \dots; k/1/k\}$ $\alpha_i = 1/i$, $i = \overline{1, k}$.

Определение 6. Любое α -состояние неопределенности среды будем называть типовым состоянием неопределенности среды: $\Xi_T = \Xi_\alpha^* \forall \alpha > 0$.

Следствие 1. Подмножество Ξ_T раскладывается по множествам уровня $\alpha > 0$: $\Xi_T = \sum_{\alpha} \alpha \Xi_\alpha^*$.

Следствие 2. Общее число типовых состояний неопределенности внешней среды равно числу элементов конечного подмножества Ξ^* , т. е. $|\Xi^*| = k$.

Следствие 3. Для типовых состояний неопределенности внешней среды справедливо $\Xi_{T,1} \cup \dots \cup \Xi_{T,k} = \Xi$.

Задавая функции принадлежности для элементов различных типовых состояний, получаем различные виды неопределенности внешней среды, в которых решается задача достижения цели. Для любого нечеткого подмножества $\Xi' \in \Xi$, определенного на элементах подмножества типовых состояний $\Xi_{T,i}$, будет справедливо $\Xi' \subseteq \Xi_{T,i}$.

Условимся, что исходное множество неопределенностей внешней среды упорядочено требуемым образом, тогда полное множество типовых состояний неопределенности можно получить, определив все сочетания для $\Xi (C_i^k$ — сочетание из Ξ по i элементов), число которых равно $\sum_{i=1}^k |C_i^k|$.

Модификаторы типовых состояний неопределенности внешней среды

Информация о наличии или отсутствии конкретного вида неопределенности может существенным образом сократить вычислительные ресурсы и время, затрачиваемое на оценку. Поэтому если такая информация может быть получена, то существует возможность применения ряда модификаторов типовых состояний внешней среды, обеспечивающих упрощение проводимых вычислений.

Определение 7. Модификатором типового состояния внешней среды называется множество $M = \{m_i\}$, $i = \overline{1, k}$, элементами которого являются бинарные оценки присутствия ($m_i = 1$) или отсутствия ($m_i = 0$) соответствующего вида неопределенности из $\Xi = \{\xi_i\}$, $i = \overline{1, k}$, для текущего состояния неопределенности внешней среды Ξ^* .

Определение 8. Нечетким модификатором типового состояния внешней среды $M = \{\xi_i; \mu_i = m_i\}$, $i = \overline{1, k}$, является нечеткое множество, элементами которого являются виды неопределенности из Ξ , а в качестве функций принадлежности выступают значения m_i .

Следствие 4. Множества $M = \{m_i\}$, $i = \overline{1, k}$, и $\Xi = \{\xi_i\}$, $i = \overline{1, k}$, являются равномошными, т. е. для них справедливо равенство $|M| = |\Xi_{\alpha_{\max}}^*| = k$.

Утверждение. Любое типовое состояние внешней среды $\Xi_T \in \Xi$ может быть получено из $\Xi_{\alpha_{\max}}^*$ с использованием соответствующего модификатора $M' \subset M$.

Доказательство. $\Xi_T \subseteq \Xi_{\alpha_{\max}}^*$ (в смысле определения 3) и $\Xi_{\alpha_{\max}}^* = \Xi$ (в смысле определения 4), где $\alpha_{\max} = \max(\alpha_1; \dots; \alpha_k)$, то $\Xi_{T, \max} = \Xi_{\alpha_{\max}}^*$ (в силу определения 6).

Исходя из определения функции принадлежности $\mu = 0$, эксперт уверен в том, что конкретный элемент ξ_i множества всех видов неопределенности внешней среды Ξ не принадлежит нечеткому подмножеству, характеризующему типовое состояние неопределенности внешней среды ($\mu = 1$ в противном случае). Для $\Xi_{\alpha_{\max}}^*$ по определению 7 может быть получен модификатор $M' = \{m_i\}$, для которого выполнено следствие 4.

Перейдем к нечеткому множеству $\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* = \{\xi_i / \mu(\xi_i)\}$ и получим нечеткий модификатор типового состояния внешней среды $M' = \{\xi_i; m'_i\}$.

Найдем произведение нечетких множеств $\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^*$ и $\hat{M}'$:

$$\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* \hat{M}' = \begin{cases} \mu(\xi_i), & \text{если } m_i = 1; \\ 0, & \text{если } m_i = 0; \end{cases}$$

$$|\hat{\Xi}_{\alpha_{\max}}^* \hat{M}'| = k - \sum (m = 0).$$

Таким образом, в $\Xi_{\alpha_{\max}}^* M'$ останутся элементы ξ_i , для которых на месте i в множестве модификаторов $M' \subset M$ $\mu(\xi_i) \neq 0$, т. е. только виды неопределенности, которые присутствуют во внешней среде. Утверждение доказано.

Следует отметить, что для нечетких множеств $\hat{\Xi}$ и $\hat{M}$ мощности их будут не равны, т. е. $\sum \text{Count}(\hat{\Xi}) \neq \sum \text{Count}(\hat{M})$, так как по определению $\sum \text{Count}(\hat{A}) \overset{\Delta}{=} \sum_{x \in X} \mu_A(\hat{X})$, где $\overset{\Delta}{=}$ — операция алгебраического суммирования и последующего округления до ближайшего целого [15].

Следствие 5. Нечеткий модификатор применим к состоянию неопределенности внешней среды, полученному с использованием арифметических операций над нечеткими множествами.

Необходимо отметить, что выбор конкретного способа управления $\gamma' \in \Gamma$ в зависимости от неопределенностей внешней среды может быть задан, например, нечетким от-

ношением $\hat{R}2$, представляющим собой подмножество декартова произведения $\Gamma \times \Xi$, характеризующееся функцией принадлежности $\mu_{\hat{R}2}(\gamma, \xi): \Gamma \times \Xi \rightarrow [0, 1]$ (мера уверенности выполнения отношения $\hat{\gamma}_1 \hat{R}2 \xi$).

Расчетные примеры

Рассмотрим примеры для эксплуатации энергетического оборудования в условиях неопределенности внешней среды. Когда состояние среды может быть оценено косвенно, с использованием субъективных суждений ЛПР или экспертов предметной области.

Пример 1. Пусть во внешней среде, в которой функционирует энергетическое оборудование, присутствуют следующие неопределенности: ξ_1 — нагрузка; ξ_2 — температурный режим; ξ_3 — влажность; ξ_4 — запыленность. Пусть заданы нечеткие подмножества $\hat{\Xi}_{T1} = \{\xi_1/0,9; \xi_2/0,4; \xi_3/0,1; \xi_4/0,2\}$ ("возможно изменение нагрузки при нормальных климатических условиях") и $\hat{\Xi}_{T2} = \{\xi_1/0,2; \xi_2/0,1; \xi_3/0,9; \xi_4/0,3\}$ ("высокая влажность воздуха", при фактическом отсутствии других неопределенностей), выражающие экспертное мнение о текущих условиях эксплуатации конкретной единицы оборудования. С использованием формулы (1) рассчитаем нечеткую энтропию $d_{KS1}(\Xi) = 0,250$, $d_{KS2}(\Xi) = 0,212$, т. е. Ξ_2 более предпочтительно, поскольку $d_{KS2}(\Xi) < d_{KS1}(\Xi)$, чем ближе к 0, тем более определено, в силу требования (Т.1).

Пример 2. Пусть типовые состояния среды заданы следующим образом: $\hat{\Xi}_{T1} = \{\xi_3/0,9\}$ (высокая влажность воздуха) и $\hat{\Xi}_{T2} = \{\xi_4/0,8\}$ (высокая запыленность помещения). Тогда с использованием типовых операций, описанных выше, получим:

- $\bar{\Xi}_{T3} = \{\xi_3/0,1\}$ — состояние "невысокая влажность воздуха";
- $\bar{\Xi}_{T1} \cup \bar{\Xi}_{T2} = \{\xi_3/0,9; \xi_4/0,8\}$ — состояние "высокая влажность воздуха и высокая запыленность помещения".

Пример 3. Используем исходные данные из примера 1. Преобразуем $\hat{\Xi}_{T1}$ в множество $\{1/1; 2/0,5; 3/0,33; 4/0,25\}$ (сформируем условные функции принадлежности) и, соответственно, $\alpha \in \{1; 0,5; 0,33; 0,25\}$, тогда получим типовые состояния неопределенности внеш-

ней среды $\Xi_{T,1} = \{1\}$; $\Xi_{T,2} = \{1; 2\}$; $\Xi_{T,3} = \{1; 2; 3\}$; $\Xi_{T,4} = \{1; 2; 3; 4\}$ (легко заметить, что следствие 3 выполнено).

Приведем интерпретацию полученных результатов. Для типового состояния неопределенности внешней среды $\hat{\Xi}_{T1}$ имеем, что формализации в определенном виде может быть подвержена только неопределенность, связанная с изменением нагрузки. Тогда, например, для типового состояния $\hat{\Xi}_{T3}$ доступны для формализации три вида неопределенности внешней среды.

Пример 4. Для исходных данных из примера 1 имеем четыре вида неопределенности $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$ и по следствию 2 число типовых состояний неопределенности внешней среды равно 4, т. е. $\{\xi_1\}$; $\{\xi_1; \xi_2\}$; $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$; $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$. Если множество будет упорядочено другим способом, например, $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3; \xi_4\}$, то в смысле определения 6 к типовым будут отнесены следующие состояния: $\{\xi_2\}$, $\{\xi_2; \xi_1\}$, $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3\}$ и $\{\xi_2; \xi_1; \xi_3; \xi_4\}$. Это приведет к необходимости нового задания отношения $\hat{R}_2$, поэтому следует изменить алгоритм расчета, что не допустимо. Однако теоретически возможно, что, например, одновременно могут существовать не только множество $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$, но и $\{\xi_3\}$, а также $\{\xi_2\}$.

Пример 5. Для исходных данных из примера 1 имеем $\{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$, тогда возможные сочетания элементов будут: $C_1^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$; $C_2^4 - \{\xi_1; \xi_2\}$, $\{\xi_1; \xi_3\}$, $\{\xi_1; \xi_4\}$, $\{\xi_2; \xi_3\}$, $\{\xi_2; \xi_4\}$, $\{\xi_3; \xi_4\}$; $C_3^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3\}$, $\{\xi_1; \xi_2; \xi_4\}$, $\{\xi_1; \xi_3; \xi_4\}$, $\{\xi_2; \xi_3; \xi_4\}$; $C_4^4 - \{\xi_1; \xi_2; \xi_3; \xi_4\}$. Число типовых состояний неопределенности Ξ_T равно $|C_1^4| + |C_2^4| + |C_3^4| + |C_4^4| = 4 + 6 + 4 + 1 = 15$.

Пример 6. Для исходных данных из примера 1 имеем $\hat{\Xi} = \{\xi_1/0,9; \xi_2/0,4; \xi_3/0,1; \xi_4/0,2\}$. Выберем модификатор типового состояния внешней среды в виде $\{1; 1; 1; 0\}$ и получим нечеткий модификатор $\hat{M} = \{\xi_1/1; \xi_2/1; \xi_3/1; \xi_4/0\}$, следовательно, $\hat{\Xi} \hat{M} = \{\xi_1/0,9; \xi_2/0,4; \xi_3/0,1\}$.

Выберем модификатор типового состояния внешней среды в виде $\{1; 0; 0; 1\}$ и получим нечеткий модификатор $\hat{M} = \{\xi_1/1; \xi_2/0; \xi_3/0; \xi_4/1\}$, следовательно, $\hat{\Xi} \hat{M} = \{\xi_1/0,9; \xi_4/0,2\}$, $\sum Count(\hat{\Xi}) = 2, \sum Count(\hat{M}) = 3$.

Заключение

Описание неопределенностей внешней среды с использованием теории нечетких множеств

позволяет формализовать знания экспертов в этой области. Перечень основных типовых состояний внешней среды с учетом характерных неопределенностей различных типов формируется на этапе проектирования. Это обеспечивает возможность реализации управления функционированием энергетического оборудования с учетом рассматриваемого аспекта. Модификаторы состояний являются простым способом быстрой оценки состояния внешней среды в автоматизированном режиме без привлечения экспертов предметной области. Оперативный персонал (ЛПР), не обладая достаточной квалификацией, может проводить учет неопределенностей внешней среды при управлении оборудованием. В качестве дальнейшего направления работы следует отметить необходимость синтеза процедуры оценки состояния внешней среды, когда присутствуют вероятности возникновения определенных событий во внешней среде, способных оказывать влияния на эксплуатацию энергетического оборудования.

Список литературы

1. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2017. 504 с.
2. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2015 году / Под ред. заместителя министра энергетики Российской Федерации А. В. Черезова. М., 2016. 72 с.
3. Махутов Н. А., Резников Д. О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска // Проблемы анализа риска. 2008. № 3. С. 72–85.
4. Sum R. Influence of environmental factors on component/equipment reliability // Indian Journal of Engineering & Material Sciences. 1998. Vol. 5. P. 121–123.
5. Liu C., Rather Z. H., Chen Z., Bak C. L. An overview of decision tree applied to power systems // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2013. Vol. 2, N. 3. P. 413–419.
6. Rahman M. M., Thamir K., Kadirgama K., Mamat R., Bakar R. A. Influence of Operation Conditions and Ambient Temperature on Performance of Gas Turbine Power Plant // Advance Material Research. 2011. P. 3007–3013.
7. Cliteur G. J., Wetzer J. M. Condition assessment of power transmission and distribution components. 2001. URL: http://www.cired.net/publications/cired2001/1_26.pdf (дата обращения: 27.02.2019).
8. Khalil S. S., Abu-Rub H. Smart Grid Condition Assessment: Concepts, Benefits, and Developments // Power Electronics and Drives. 2016. Vol. 1, N. 2. P. 147–163.
9. Peng S., Jian L., Yuanhong W., Yonglong Y., Tianyan J. Condition assessment of wind turbine generators based on cloud model // Proceedings of the IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). 2013. P. 146–151.
10. Wang M., Vandermaar A. J. Review of condition assessment of power transformers in service // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. Vol. 18, N. 5. P. 8–17.
11. Щербатов И. А. Управление сложными слабоформализуемыми многокомпонентными системами. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. 268 с.

12. **De Luca A., Termini S.** A definition of nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory // *Information and Control*. № 20(4). 1972. P. 301–312.

13. **Щербатов И. А.** Глобальная цель сложной слабоформализуемой технической системы. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. 100 с.

14. **Kosko B.** Fuzzy Entropy and Conditioning // *Information Sciences*. 1986. N. 40. P. 165–174.

15. **Заде Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

16. **Zadeh L.** Fuzzy Probabilities // *Information Processing & Management*. 1984. Vol. 20, N. 3. P. 363–372.

Formalization of the External Environment Uncertainty in the Power Equipment Operating

I. A. Shcherbatov, shcherbatovia@mpei.ru,

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding authors: **Shcherbatov Ivan A.**, Associate Professor of the Department "Automated control systems of thermal processes", Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: shcherbatovia@mpei.ru

Accepted on March 25, 2019

Abstract

Operating conditions of the power facilities equipment have an impact on its technical condition. These conditions are determined by the state of the external (environment) environment. Deviations of environmental parameters from the required (normative) values can accelerate negative trends leading to failures, accidents and, accordingly, economic damage from downtime and restoration of the proper technical condition of power equipment. Therefore, taking into account the state of the environment is an important aspect of solving the problems of monitoring, diagnosis and forecasting of technical condition, as well as solving the problems of management and decision support in the operation of energy facilities. The external environment is characterized by different types of uncertainty. The different uncertainties of the external environment determine the need to choose or correct the way to achieve the goal of management or decision-making. Therefore, the paper proposes a formalized description of the environment state, which has uncertainties of different types. Synthesized operations to obtain states different from the "typical" obtained, for example, at the design stage of the diagnostic system or control of power equipment. On the basis of this implemented a method of rapid assessment of the external environment without a survey of experts based on the synthesis of the accelerated procedure. The choice of fuzzy set theory is justified as a mathematical tool for formalizing uncertainties of different types and subjectivism inherent in the opinions of domain experts. The concept of the environment state is formalized and typical operations for determining its typical states are proposed. To take into account the different types of uncertainty in the description of the current state of the environment, a modifier mechanism is proposed. Modifiers can significantly simplify calculations in the formalization of environmental conditions for use in diagnostic systems and control of power equipment. The considered computational examples show the main features of the proposed approach. The results of the application of the developed approach suggest the feasibility of its application to solve the problem of formalization of the environment in the operation of power equipment under uncertainty.

Keywords: uncertainty, external environment, energy equipment, fuzzy set theory

For citation

Shcherbatov I. A. Formalization of the External Environment Uncertainty in the Power Equipment Operating, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 405–411.

DOI: 10.17587/mau.20.405-411

References

1. **Jashhura A. I.** Power equipment maintenance and repair system. Guide, Moscow, Publishing house of the NC ENAS, 2017. 504 p. (in Russian).

2. **The main** results of the operation of electric power facilities in 2015, Under the ed. of the Deputy Minister of energy of the Russian Federation, Moscow, 2016, 72 p. (in Russian).

3. **Mahutov N. A., Reznikov D. O.** *Problems of Risk Analysis*, 2008, no. 3, pp. 72–85 (in Russian).

4. **Sum R.** *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, 1998, vol. 5, pp. 121–123.

5. **Liu C., Rather Z. H., Chen Z., Bak C. L.** *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 413–419.

6. **Rahman M. M., Thamir K., Kadirgama K., Mamat R., Bakar R. A.** *Advance Material Research*, 2011, pp. 3007–3013.

7. **Cliteur G. J., Wetzter J. M.** Condition assessment of power transmission and distribution components. 2001, available

at: http://www.cired.net/publications/cired2001/1_26.pdf (date of access: 27.02.2019).

8. **Khalil S. S., Abu-Rub H.** *Power Electronics and Drives*, 2016, vol. 1, no. 2. pp. 147–163.

9. **Peng S., Jian L., Yuanhong W., Yonglong Y., Tianyan J.** Condition assessment of wind turbine generators based on cloud model, *Proceedings of the IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, 2013, pp. 146–151.

10. **Wang M., Vandermaer A. J.** *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, vol. 18, no. 5, pp. 8–17.

11. **Shcherbatov I. A.** Control of complex poorly formalized multicomponent systems. Rostov n/D, Publishing House of SSC RAS, 2015, 268 p. (in Russian).

12. **De Luca A., Termini S.** *Information and Control*, 1972, no. 20(4), pp. 301–312.

13. **Shcherbatov I. A.** The global goal of a complex poorly formalized technical system. Astrakhan, Publishing House of ASTU, 2017, 100 p. (in Russian).

14. **Kosko B.** *Information Sciences*, 1986, no. 40, pp. 165–174.

15. **Zadeh L. A.** The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision-making, Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).

16. **Zadeh L.** *Information Processing & Management*, 1984, vol. 20, no. 3, pp. 363–372.

The Use of Integral Adaptation Principle to Synthesize Robust Control of Electric Vehicle Wheel Slip

A. A. Kolesnikov, ankolesnikov@sfedu.ru, **A. A. Kuz'menko**, aakuzmenko@sfedu.ru,
Southern Federal University, Taganrog city, Russian Federation

Corresponding author: **A. A. Kuz'menko**, Assistant Professor,
Southern Federal University, Taganrog city, Russian Federation,
e-mail: aakuzmenko@sfedu.ru

Accepted on February 18, 2019

Abstract

The usage of "motor-wheel" systems requires the electric vehicle control system improvement by using the characteristics of the wheel adhesion to the road surface. One of the aspects of such improvement is the enhancement of the algorithms for the functioning of the antilock braking system (ABS). In developing the ABS control algorithms, various approaches and methods of modern control theory are used, including methods based on the estimation of wheel slip, traction force, wheel friction coefficient using linear and nonlinear estimation methods, linear and nonlinear regulators. This work illustrates the application of the principle of high order integral adaptation (PIA) of Synergetic Control Theory (SCT) for constructing a robust control law for an electric vehicle wheel slip. The main features of the SCT contain: firstly, a fundamental change in the goals of the behavior of the synthesized systems; secondly, direct consideration of the natural properties of nonlinear objects; thirdly, the formation of an analytical mechanism for generating feedbacks, i.e. control laws. PIA consists in introducing nonlinear integrators into the control law that compensate for disturbances without their immediate estimation. The obtained in this work control law has a fairly simple structure, is focused on using physically accessible state variables of the braking system, and its implementation does not require immediate estimation of disturbances or building a complex neural network to calculate disturbances. The results of computer simulations of the synthesized robust control law for ABS indicate its effectiveness in functioning under conditions of external environment uncertainty.

Keywords: electric vehicle, wheel slip, nonlinear control systems, robust control, synergetic control theory, invariant, ADAR method, principle of high order integral adaptation

Acknowledgment. The work was supported by Russian Foundation for Basic Research — project #18-08-00924.

For citation:

Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A. The Use of Integral Adaptation Principle to Synthesize Robust Control of Electric Vehicle Wheel Slip, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 412—416.

DOI: 10.17587/mau.20.412-416

УДК 681.5

DOI: 10.17587/mau.20.412-416

А. А. Колесников, д-р техн. наук, проф., ankolesnikov@sfedu.ru,
А. А. Кузьменко, канд. техн. наук, доц., aakuzmenko@sfedu.ru,
Южный федеральный университет, г. Таганрог

Использование принципа интегральной адаптации для построения робастного управления проскальзыванием колеса электромобиля¹

Использование систем "мотор-колесо" требует совершенствования системы управления электротранспортным средством, используя характеристики сцепления колеса с поверхностью дороги. Одним из аспектов такого совершенствования является улучшение алгоритмов функционирования антиблокировочной тормозной системы (АБС).

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — проект № 18-08-00924.

При разработке алгоритмов управления АБС используются различные подходы и методы современной теории управления, включая методы, базирующиеся на оценивании скольжения колеса, силы сцепления, коэффициента трения колеса посредством линейных и нелинейных методов оценивания, линейных и нелинейных регуляторов. Данная работа иллюстрирует применение принципа интегральной адаптации (ПИА) высокого порядка синергетической теории управления (СТУ) для построения робастного закона управления проскальзыванием колеса электромобиля. Основные особенности СТУ состоят: во-первых, в принципиальном изменении целей поведения синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете естественных свойств нелинейных объектов; в-третьих, в формировании аналитического механизма генерации обратных связей, т.е. законов управления. ПИА заключается во введении в закон управления нелинейных интеграторов, компенсирующих возмущения без их оперативной оценки.

Полученный в данной работе закон управления имеет достаточно простую структуру, ориентирован на использование физически доступных переменных состояния тормозной системы и для его реализации не требуется оперативной оценки возмущений или построения сложной нейросети для вычисления возмущений.

Результаты компьютерного моделирования синтезированного робастного закона управления для АБС свидетельствуют о его эффективности при функционировании в условиях неопределенности действия внешней среды.

Ключевые слова: *электромобель, проскальзывание колеса, нелинейные системы управления, робастное управление, синергетическая теория управления, инвариант, метод АКАР, принцип интегральной адаптации высокого порядка*

Introduction. The current increase of environmental problems and the gradual expansion of the use of "green" energy have also affected the automobile industry — electric cars are being developed and put into operation, and the transition to cars with a "motor-wheel" system is being carried out everywhere. However, in practice, the usage of "motor-wheel" systems requires the electric vehicle control system improvement by using the characteristics of the wheel adhesion to the road surface. One of the aspects of such improvement is the enhancement of the algorithms for the functioning of the dynamic stabilization system (road holding ability), whose components are the antilock braking system (ABS), the system of distribution of braking forces, anti-slip control, etc. [1]. Thus, in order to increase the driving safety of an ABS, an electric vehicle should control the sliding of each wheel in order to prevent its blocking and ensure the greatest degree of road adherence, i. e. ABS control law should provide robustness in relation to the rapidly changing properties of the roadbed and the characteristics of the tire [1–3].

In developing the ABS control algorithms, various approaches and methods of modern control theory are used, including methods based on the estimation of wheel slip, traction force, wheel friction coefficient using linear methods (LQR, LQRC, Kalman filter, advanced Kalman filter) and nonlinear estimation methods (estimation with sliding mode, nonlinear observers, neural network observers), linear (PID-control) and nonlinear regulators (Lyapunov function method, robust control methods, fuzzy and neural network control), etc. [3–11].

Synergetic Control Theory (SCT), which has found extensive application in various fields of modern science and technology, is considered to be

a fundamentally different direction of nonlinear control of technical systems [12–19]. The main features of the SCT, related to the problem of synthesizing the nonlinear technique of controlling complex technical objects, consist of: firstly, a fundamental change in the goals of the behavior of the synthesized systems; secondly, direct consideration of the natural properties of nonlinear objects; thirdly, the formation of an analytical mechanism for generating feedbacks, i.e. control laws.

Earlier it was noted that in the SCT there are two ways to ensure the adaptability of the nonlinear system to external and parametric disturbances. The first way is to use the principle of integral adaptation of the SCT [15–17], which consists in introducing nonlinear integrators into the control law that compensate for disturbances without their immediate estimation. At the same time, minimal information about the disturbances is necessary — its class (piecewise constant, polynomial, harmonic, etc.), which can be represented by a dynamic model in the form of a system of differential equations. The second method is to construct nonlinear observers of parametric and/or external disturbances [18, 19]. In this case, the synthesized nonlinear control laws are complemented by the observation subsystem, which dynamically estimates unmeasured disturbances and compensates them. Both methods are fairly formalized and are based on the main SCT method — method of analytical design of aggregated regulators (ADAR) [12].

This paper illustrates the first method as applied to the problem of adaptive control of an electric vehicle wheel slip. A detailed description of the principle of integral adaptation is omitted, because the given problem can be found in the references works [15–17].

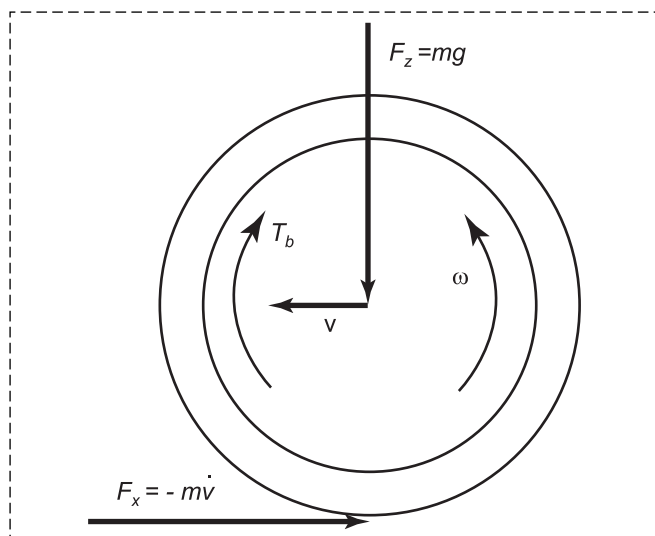


Fig. 1. Forces and torques of the braking system

1. Control problem. Fig. 1 shows a diagram of the interaction forces of the braking system of a wheel attached to a mass m . When the wheel rotates in the direction of the longitudinal (horizontal) velocity v , the traction force (resistance) of the tire F_x is created by friction between the tire surface and the road surface. This force will create a moment that generates a rotating movement of the wheel, creating an angular velocity ω . The braking torque applied to the wheel will act against the rotation of the wheel, creating a negative angular acceleration.

The equations of motion of the braking system wheels in the braking mode have the form [2, 3, 10]

$$\begin{aligned} m\dot{v}(t) &= -F_x; \\ J\dot{\omega}(t) &= rF_x - T_b \text{sign}(\omega), \end{aligned} \quad (1)$$

where $F_x = F_z \mu(\lambda, \mu_H, \alpha)$; $F_z = mg$ — vertical force; μ — friction coefficient, which is a nonlinear function of the following arguments: λ — longitudinal slip of the tire; μ_H — coefficient of adhesion between the tire and the road; α — wheel slip angle; T_b — braking torque (control); r — wheel radius; J — wheel inertia.

Longitudinal slip is determined by the equation:

$$\lambda = \frac{v - r\omega}{v}. \quad (2)$$

The coefficient λ (2) describes the normalized difference between the horizontal velocity of the car v and the velocity of rotation of the wheel $r\omega$. The value of this coefficient $\lambda = 0$ corresponds to the free movement of the wheel, when the adhesion force F_x has no effect. If a slip reaches a value $\lambda = 1$, the wheel is blocked, which means it stops [3].

There are different approaches for calculating the adhesion force, so in [2], [11] the following relations are considered:

$$\begin{aligned} F_x &= F_z \mu(\lambda, \omega) = F_z \text{sign}(\lambda) \frac{\frac{\sigma_0}{L_0} g(\omega, \lambda, \theta) \frac{\lambda}{1-\lambda}}{\frac{\sigma_0}{L_0} \frac{\lambda}{1-\lambda} + g(\omega, \lambda, \theta)}; \\ g(\omega, \lambda, \theta) &= \theta \left(\mu_c + (\mu_s - \mu_c) e^{-\frac{|r\omega\lambda|}{|1-\lambda|v_s}} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

where μ_c , μ_s are the coefficients of static and Coulomb friction; v_s — Stribek velocity; σ_0 — normalized longitudinal stiffness; L_0 — the length of the contact surface of the tire; θ — parameter characterizing the properties of the surface.

In the attached to references paper [3] it is noted that the adhesion force can also be determined as

$$F_x(\lambda) = D \sin(C \arctan(B\lambda - E(B\lambda - \arctan(B\lambda))))$$

or

$$F_x = F_z \mu(\lambda, \omega) = (C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda) e^{-C_4\lambda v},$$

where B , C , D , E — empirical coefficients; C_1 , C_2 , C_3 — constant tire adhesion coefficients depending on the condition (circumstances) of the road; $C_4 = 0,2 \div 0,04$ — a constant coefficient reflecting the relationship of the horizontal wheel speed and tire grip to the road surface.

From equations (2), (3) it can be seen that, when $v \rightarrow 0$, the dynamics of an open-loop system becomes infinitely fast with an infinite boost factor. This leads to a loss of controllability, and the slip regulator at low v must be turned off.

According to [10], the control task is to control the value of the longitudinal slip λ in a given value. The slip regulator must be robust with respect to uncertainties in tire performance and changes in road surface conditions.

So, the purpose of controlling the system (1) is to brake the wheel at the required value of the slip coefficient $\lambda = \lambda^0 = \text{const}$. In this case, the value λ^0 is either a constant or is determined by a top-level control system, for example, from a system of road-holding ability.

Thus, according to (2) we have the synergetic technological invariant

$$\lambda - \lambda^0 = v - r\omega - v\lambda^0 = 0. \quad (4)$$

When constructing the law of robust control in model (1) the uncertainty due to force F_x , will be con-

sidered as a parametric perturbation, for which, according to the principle of integral adaptation of the SCT, it is necessary to construct a dynamic model. As such a model, we consider a dynamic model in the form of three successively included integrators [15–17]:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \eta(v - r\omega - v\lambda^0),\end{aligned}\quad (5)$$

where z_i — dynamic variables of the perturbation model; $z_1 = \hat{F}_x$ — a dynamic variable that performs the role of evaluator of an external *non-measurable perturbation* F_x , acting on system (1); η — some constant coefficient. In the right side of the last equation of model (5) the input technological invariant (4) is reflected.

2. Synthesis of the control law and modeling of closed-loop system. Then, in accordance with this goal and the principle of high-order integral adaptation [15–17], from (1) we can compile an extended model of synergistic synthesis with $\omega > 0$:

$$\begin{aligned}\dot{v}(t) &= -\frac{1}{m}z_1; \\ \dot{\omega}(t) &= -\frac{T_b}{J} + \frac{r}{J}z_1; \\ \dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \eta(v - r\omega - v\lambda^0).\end{aligned}\quad (6)$$

For the extended synthesis model (6) we introduce the synergetic macrovariable

$$\psi = v - r\omega - v\lambda^0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3. \quad (7)$$

Following the procedure of synthesis of the method of ADAR [12–19], from the joint solution (7), the functional equation of SCT

$$\dot{\psi}(t) + \beta\psi = 0 \quad (8)$$

and the extended model (6) we find the expression for the control law:

$$\begin{aligned}T_b &= \left(\frac{J}{rm} (1 - \lambda^0) + r \right) z_1 - \\ &- \frac{J}{r} \gamma_1 z_2 - \frac{J}{r} \gamma_2 z_3 - \frac{J}{r} \gamma_3 \eta (v - r\omega - v\lambda^0) - \\ &- \frac{J\beta}{r} (v - r\omega - v\lambda^0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3).\end{aligned}\quad (9)$$

The control law (9) is dynamic, since its structure includes dynamic variables of the system (5).

We also note that the condition for asymptotic stability (8) is the condition $\beta > 0$. When diversity $\psi = 0$ is achieved, the dynamics of system (6) is described by the following linear decomposed system:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \eta(-\gamma_1 z_1 - \gamma_2 z_2 - \gamma_3 z_3).\end{aligned}\quad (10)$$

To find the unknown coefficients that ensure the stability of system (10), we use the modal control method. We write the state matrix of the system (10) and find its characteristic equation:

$$A(s) = \det(s\mathbf{E} - \mathbf{A}) = s^3 + \eta\gamma_3 s^2 + \eta\gamma_2 s + \eta\gamma_1 = 0.$$

The desired characteristic equation with a given location of the roots is represented as

$$A_0(s) = (s - s_0)^3 = s^3 - 3s_0 s^2 + 3s_0^2 s - s_0^3 = 0,$$

in which $s_0 < 0$ is the desired root. Equating the coefficients of these equations with equal powers of s , we find

$$\gamma_1 = -p_0^3 / \eta, \gamma_2 = 3p_0^2 / \eta, \gamma_3 = -3p_0 / \eta. \quad (11)$$

Thus, the choice of the coefficient $\beta > 0$ and the definition γ_i according to (11) will ensure the asymptotic stability of the system (6) with the synthesized control law (9).

Let's perform simulation of the system (1), in which the force F_x is given by expression (3), with the synthesized control law (9). The following object parameters are set [11]: $\sigma_0 = 200$; $L_0 = 0,25$; $\mu_c = 0,5$; $\mu_s = 0,9$; $v_s = 12,5$; $r = 0,3$; $m = 200$; $J = 0,23$; and regulator parameters $\lambda^0 = 0,1$; $\eta = 100$; $\beta = 100$; $p_0 = -500$. The simulation results are presented in Fig. 2–5. In the simulation, it was assumed that the coefficient of adhesion with the

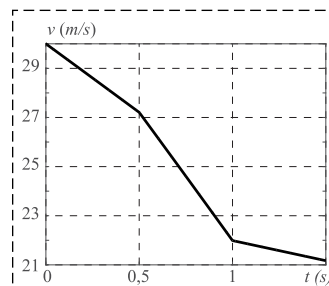


Fig. 2. Linear velocity variance graph

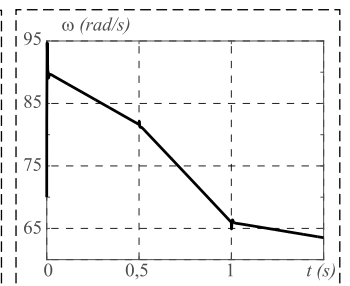


Fig. 3. Angular velocity variance graph

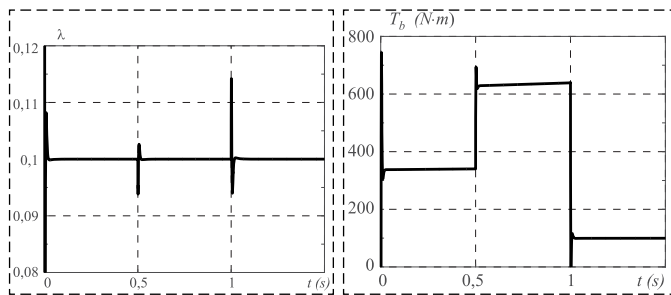


Fig. 4. Slip variance graph

Fig. 5. Control variance graph

surface θ varies with time in accordance with the dependence:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0.7 & \text{for } t < 0.5; \\ 1.3 & \text{for } 0.5 \leq t < 1; \\ 0.2 & \text{for } t \geq 1. \end{cases} \quad (12)$$

It is seen from Fig. 4 that at different values of the coefficient of adhesion with the surface θ , the technological invariant (4) is satisfied. Thus, the results of computer simulations of the synthesized robust control law for ABS indicate its effectiveness in functioning under conditions of external environment uncertainty.

Conclusion. In [11] an adaptive ABS control law was proposed, including in its structure a function $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$, defined according to (3). It is assumed that on the basis of this function it is possible with the help of an observer to evaluate the characteristics of the roadway, in particular the parameter θ . Such an assumption seems practically ineffective, since in real conditions, the characteristics of the roadbed can vary significantly. Of course, in specialized ideal conditions, when much is known in advance about a function $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$ and its parameters, and almost no current physical measurements are required, this approach may be quite justified. Such conditions arise, for example, when conducting computer experiments, etc.

The robust control law (9), synthesized by the ADAR method, providing the required properties of an ABS in conditions of considerable uncertainty, is much simpler than the adaptive control law synthesized in [11]: indeed, the control law (9) is linear in structure to the state variables of the system (6), and its implementation does not require both an immediate estimation of the parameters of a function $F_x(F_z, v, \omega, \theta)$, and a complex neural network for its calculation.

The results obtained in this paper will be distributed to all-wheel drive electric vehicle and electric vehicle with two-wheel drive.

References

1. Hamersma H. A., Els P. S. ABS performance evaluation taking braking, stability and steerability into account, *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, 2017, vol. 12, iss. 3–4, pp. 262–283.
2. Canudas de Wit C., Tsiotras P. Dynamic tire models for vehicle traction control, *Proceedings of the 38th IEEE Control and Decision Conf.*, 1999.
3. Petersen I. Wheel Slip Control in ABS Brakes using Gain Scheduled Optimal Control with Constraints: PhD thesis, Dept. of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2003.
4. Choi S. B. Antilock Brake System with a Continuous Wheel Slip Control to Maximize the Braking Performance and the Ride Quality, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, vol. 16, no. 5, pp. 996–1003.
5. Cho W., Yoon J., Yim S. and et al. Estimation of Tire Forces for Application to Vehicle Stability Control, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 638–649.
6. Rajamani R., Piyabongkarn D., Lew J. Y. et al. Algorithms for real-time estimation on individual wheel tire-road friction coefficients, *Proceedings of American Control Conference*, 2006, pp. 4682–4687.
7. Patel N., Edwards C., Spurgeon S. K. A sliding mode observer for tyre friction estimation during braking, *Proceedings of American Control Conference*, 2006, pp. 5867–5872.
8. Zareian A., Azadi S., Kazemi R. Estimation of road friction coefficient using extended Kalman filter, recursive least square, and neural network, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2016, vol. 230, iss. 1, pp. 52–68.
9. Mitić D., Antić D., Perić S. et al. Fuzzy sliding mode control for anti-lock braking systems, *Proceedings of 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2012, pp. 217–222.
10. Petersen I., Johansen T., Kalkkuhl J. and et al. Wheel slip control using gain-scheduled LQ–LPV/LMI analysis and experimental results, *Proceedings of IEEE European Control Conference*, 2003, pp. 880–885.
11. Tyukin I., Prokhorov D., Leeuwen van C. A new method for adaptive brake control, *Proceedings American Control Conf.*, 2005, vol. 3, pp. 2194–2199.
12. Kolesnikov A. A. Introduction of synergetic control, *Proceedings of the American Control Conference*, 2014, pp. 3013–3016.
13. Kolesnikov A., Veselov G., Kuzmenko A. et al. Synergetic approach to the modeling of power electronic systems, *Proceedings 7th IEEE Workshop on Computers in Power Electronics*, 2000, pp. 259–262.
14. Santi E., Monti A., Li D. et al. Synergetic control for power electronics applications: A comparison with the sliding mode approach, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 737–760.
15. Kuz'menko A. A., Synitsin A. S., Zyryanova A. A. The use of integral adaptation principle to increase the reliability of synchronous generator nonlinear excitation system, *Proceedings of 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*, 2015, vol. 2015-January, iss. January, pp. 415–420.
16. Kuz'menko A. A., Synitsin A. S., Mushenko A. S. The use of integral adaptation principle to increase the reliability of 'DFIG-Wind turbine' power system, *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications*, 2017.
17. Kuz'menko A. A., Kolesnikov A. A., Kolesnitchenko D. A. Novel Robust Control of Hydrogenerator: the synergetic approach, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 451–456.
18. Kuz'menko A. A. Nonlinear adaptive control of a turbo-generator, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 1, pp. 103–110.
19. Kuz'menko A. A. Nonlinear adaptive control of a ship-board power plant turbine, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 4, pp. 512–525.

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,
М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ipm_labrobotics@mail.ru,

Е. А. Семенов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., sim1165@mail.ru,

А. Н. Суханов, мл. науч. сотр., sukhonov-artiom@yandex.ru,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), г. Москва

Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде¹

Обсуждаются результаты исследований условий движения пневматических роботов по вертикальным поверхностям под водой. Выявляются особенности движения вакуумных устройств для разработки уточненной математической модели устройства контакта с поверхностями в водной среде. Выполненные экспериментальные исследования позволили получить дополнительные данные по динамике, построить циклограммы работы и скорректировать полученные ранее результаты. Для аналитического исследования динамических процессов, происходящих в системе вакуумных контактных устройств, с учетом сложности описания нелинейностей были разработаны линеаризованные упрощенные модели системы "воздушный эжектор — устройство контакта — водная среда". Вакуумные контактные устройства предназначены для осуществления гарантированного контакта с вертикально, наклонно или горизонтально расположенными поверхностями, по которым совершает движение подводный робот вертикального перемещения, выполняющий предписанные технологические задачи, например, в бассейнах выдержки атомных электростанций, на поверхностях корпусов кораблей, на поверхностях подводных сооружений. В моделях учитывались силы сцепления с поверхностями, находящимися под водой, — силы, возникающие в результате перепада давлений, силы трения, контактного и вакуумного взаимодействия, упругости стенок полости переменного объема подвижного элемента конструкции устройства. В результате решения модельной задачи получены в явном виде значения механических параметров, а также вакуума и расхода в полости переменного объема как функций изменения зазора между торцом гофрированной мембраны и поверхностями. В результате исследования динамических процессов, происходящих в упрощенных моделях вакуумных контактных устройств "воздушный эжектор — поверхность контакта — водная среда", получены переходные характеристики изменения действующих сил и давлений во времени, а также зависимости нормальной и тангенциальной составляющих сил от глубины погружения в воду. Исследованы варианты конструкций вакуумных устройств контакта с поверхностями, находящимися в водной среде, и проведена модернизация лабораторного стенда для испытаний вакуумных контактных устройств под водой.

Ключевые слова: устройство контакта, робот вертикального перемещения, водная среда, особенности движения, динамические характеристики, математические модели, экспериментальные исследования

Введение

В работе [1] авторов данной статьи рассмотрена математическая модель системы "воздушный эжектор — устройство контакта — водная среда" и получены расчетные соотношения для нахождения вакуума в камере вакуумного контактного устройства, соединенной с вакуумирующей струей эжектора.

Исследование функционирования вакуумных контактных устройств и движений по вертикальным и наклонным поверхностям в водной среде роботов, снабженных такими устройствами, обусловлено тем, что возникает возрастающий интерес к выполнению технологических операций на поверхностях [2—4], расположенных в водной среде, например, в бассейнах выдержки атомных электростанций, на поверхностях корпусов кораблей, на поверх-

ностях подводных сооружений, которые могут проводиться с помощью пневматических роботов вертикального перемещения. К таким операциям относится очистка поверхностей, оценка их качества, техническая диагностика и неразрушающий контроль, сварка, окраска [5—7].

Контактное взаимодействие с поверхностями и удержание на вертикальных поверхностях осуществляется посредством вакуумных устройств. В целях эффективного проведения технологических операций под водой, обоснования выбора конструктивных параметров и структуры управления робототехническими системами вертикального перемещения с возможностью движения в изменяющихся условиях окружающей среды необходимо выявить особенности движения и динамические процессы, происходящие в вакуумных контактных устройствах (ВКУ). В статье рассматривается комплексный подход к разработке моделей движения, учитывающих влияние как гидродинамических, так и механических параметров.

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 18-08-00357.

Особенности условий движения ВКУ в водной среде

Дальнейшее изучение динамики, построение математических моделей необходимы в будущем для построения цифрового управления в водной среде. Расчет вакуумного контактного устройства при фиксации на поверхностях в водной среде должен учитывать, что определяющими силами являются силы трения, адгезии, упругости, проскальзывания, возникающие переменные усилия от давления водяного столба в зависимости от высоты погружения в воду и действия вакуумирования.

Динамические процессы, происходящие при изменении состояния в моменты фиксации устройств контакта на поверхности, нелинейны, достаточно сложны и поэтому рассматриваются при сделанных допущениях относительно процессов гидродинамики.

Рассматриваются динамические характеристики вакуумных контактных устройств (ВКУ), которые во многом зависят от начального положения устройства относительно поверхности, к которой робот должен надежно закрепляться (рис. 1). Предполагается, что формирование вакуума в ВКУ осуществляется посредством эжектора, и в случае действия под водой воздушная струя отсасывает воду из полости ВКУ, контактирующей с вертикальной поверхностью.

ВКУ содержит (рис. 1) гофрированную мембрану 1; плоскую опору 2, соединенную со штоком 7 пневмопривода 5; камеру 3, из которой под действием вакуума откачивается воздух и смесь воздуха с водой; генератор вакуума — эжектор 4; датчик вакуума 6.

Соответственно P_0 , P_2 , P_{01} , P_{02} — давление на входе сопла эжектора, давление вакуума, давление на входе и на выходе камер пневмопривода.

Возможны два начальных положения хода ВКУ к контактирующей поверхности: первое — когда зазор между ВКУ и поверхностью равен нулю, и второе — когда зазор не нулевой, а значение абсолютных давлений изменяются в зависимости от эжекции и высоты водяного столба при погружении в воду.

Если эжектор выполняет откачивание воды из емкости ВКУ при нулевом начальном зазоре $x = 0$, то процесс истечения жидкости из емкости будет происходить по кривой обратной экспоненты до величины P_{2m} от началь-

ного давления P_a (рис. 2), равного атмосферному давлению с корректировкой по водяному столбу, когда при глубине погружения 10 м атмосферное давление возрастает примерно на 10^5 Па. При отключении давления питания P_0 эжектора давление в емкости сравнивается с давлением окружающей среды по близкому к экспоненциальному закону (рис. 3) и образуется

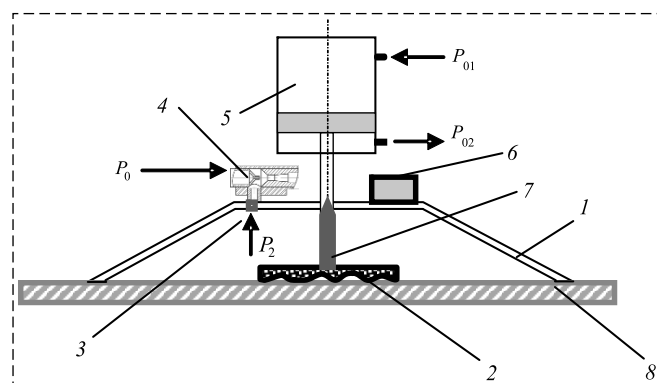


Рис. 1. Принципиальная схема

Fig. 1. Schematic diagram

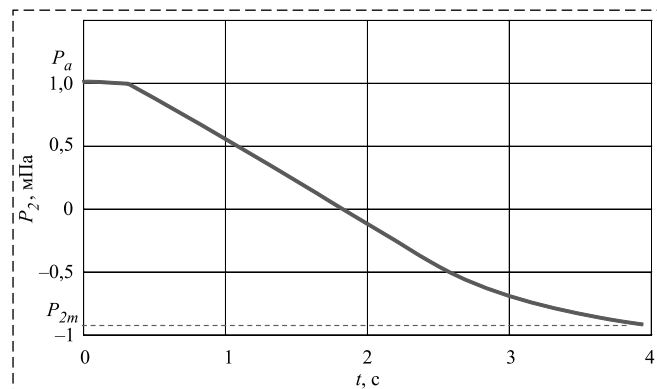


Рис. 2. Изменение давления P_2 в камере 3 ВКУ при создании вакуума при зазоре $x = 0$ (при глубине погружения 10 м)

Fig. 2. Pressure P_2 transient process inside vacuum chamber 3 of vacuum contact device with gap $x = 0$ (10 meters under water)

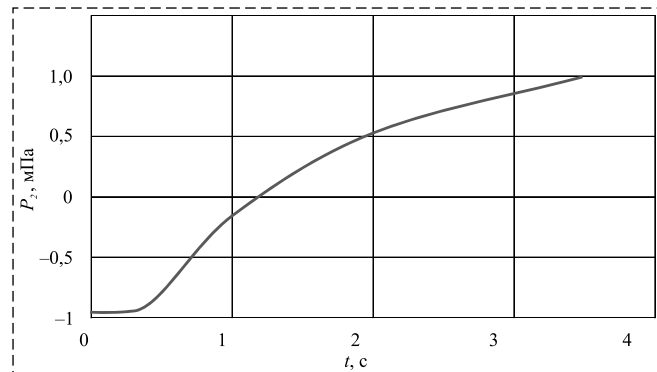


Рис. 3. Изменение давления P_2 в камере 3 ВКУ при отключении эжектора (при глубине погружения 10 м)

Fig. 3. Pressure P_2 transient process inside vacuum chamber 3 of vacuum contact device after ejector deactivation (10 meters under water)

минимальный зазор $x = x_{кр}$, при котором происходит полное заполнение камеры.

Если эжектор откачивает воду из емкости ВКУ при зазоре $x \neq 0$, то в процессе создания вакуума, соответствующего переменному давлению P_{2m} , могут возникать случайные колебания, обусловленные неравномерностью откачки вследствие дополнительного поступления воды через зазор.

Влияние гидродинамических и механических параметров

Определим значение зазора $x_{кр}$, при котором происходит полное заполнение камеры при допущениях о том, что средняя плотность ρ среды в камере не меняется, перемещение торца ВКУ при действии вакуума происходит по линейному закону, упругость стенок с коэффициентом упругости с пропорциональна перемещению, а площадь поперечного сечения мембраны равна эффективной площади. Для этого определим, что приращение объема воздушной смеси в камере мембраны равно произведению площади поршневого действия на перемещение x торца мембраны относительно поверхности перемещения. Тогда масса среды, находящейся в камере мембраны, будет равна $m = V_0\rho + x(1 - c)f\rho$. Здесь V_0 — начальный объем; ρ — усредненная плотность; f — эффективная площадь мембраны; c — коэффициент упругости стенок мембраны.

Дифференцируя по времени выражение для m при допущении о постоянстве ρ , получим выражение для массового расхода:

$$\frac{dm}{dt} = G = (1 - c)f\rho \frac{dx}{dt}, \text{ т. е. } \frac{dx}{dt} = \frac{G}{(1 - c)f\rho},$$

откуда получаем, что $x = \int_{t_0}^{t_k} \frac{G}{f\rho} dt$ и при $t_0 = 0$ $x_k = \frac{G}{(1 - c)f\rho} t_k$.

Схемы силового нагружения ВКУ приведены на рис. 4 (см. вторую сторону обложки), где показано действие силы прижатия F_2 (рис. 4, а), действие нормальной и касательной составляющих силы прижатия (рис. 4, б) и действие силы отрыва от поверхности в общем случае (рис. 4, в).

Сила прижатия F_2 к поверхности возникает в результате генерирования вакуума эжектором и равна $F_2 = P_2 f = [(P_a + \rho gh) - |P_v|] f$, где

f — эффективная площадь мембраны вакуумного контактного устройства, $f = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$; D — усредненный диаметр мембраны; d — диаметр штока; P_a — атмосферное давление; P_v — давление в вакуумируемой полости; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; h — глубина погружения или высота столба воды.

Рабочая циклограмма переходных процессов, происходящих в ВКУ при работе в водной среде, приведена на рис. 5. Циклограмма иллюстрирует, как давление, силы и перемещения изменяются в зависимости от времени при изменении входного воздействия — давления питания эжектора и последующего изменения вакуума. На циклограмме обозначено: P_v — давление вакуума; F_v — сила, возникающая в результате генерации вакуума; x — расстояние от торца ВКУ до поверхности. Моменты времени $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ соответствуют переключению действия сил и давлений при подаче и снятии давления питания P_0 эжектора. Глубина погружения h равна 1 м.

Из анализа циклограммы следует, что при погружении ВКУ на глубину 1 м быстродействие всех систем уменьшается в три раза, по сравнению с проведенными ранее экспериментами в воздушной среде [8].

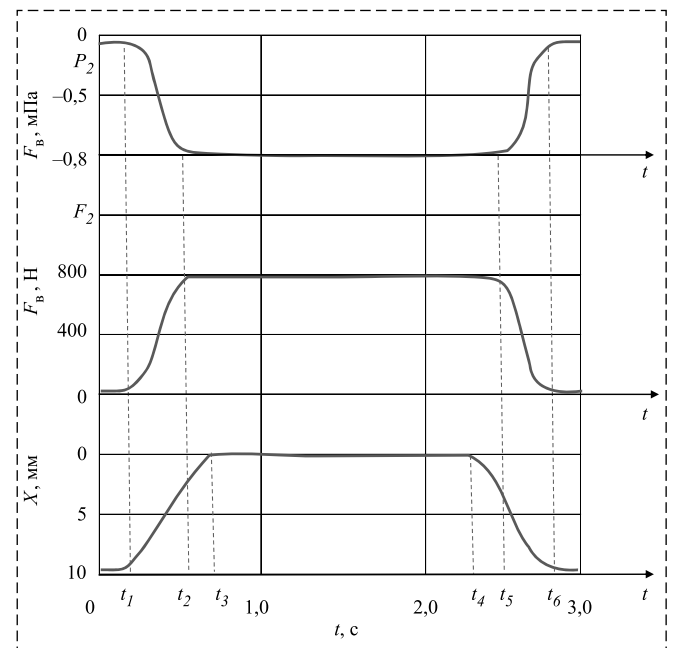


Рис. 5. Циклограмма переходных процессов, происходящих в ВКУ при работе в водной среде

Fig. 5. Transient processes inside suction chamber of vacuum contact device while operating in water environment

Закключение

Выявлены особенности динамики вакуумных контактных устройств в водной среде, состоящие в замедлении протекания переходных процессов, изменении давлений вакуума, действующих сил и скоростей переключения с увеличением глубины погружения на каждый метр в три раза, а также в наложении колебаний на характеристику переключения вследствие образующейся смеси воздуха и воды в моменты переключения.

Получены величины механических параметров — перемещений и сил — в зависимости от гидродинамических значений давления, вакуума и расхода.

Список литературы

1. Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E., Chashchukhin V., Kryukova A. Possibility of Using Wall Climbing Robots for Underwater Application // Proceed. of CLAWAR-2017

Intern. Conference. Human-Centric Robotics, Porto, Portugal, Sept. 2017. P. 239–246.

2. Haferkamp H., Bach Fr.-W., Ogawa Y., Rachkov M. Climbing Robot for Underwater Cutting // Proc. International Conf. on Oceans Engineering, OCEANS. 1994. Vol. 1. P. 602–607.

3. Haferkamp H., Bach Fr.-W., Rachkov M., Seevers J. Climbing Robot for Underwater Cleaning // Proc. 5th International Offshore and Polar-Engineering Conf., Hague. 1995. Vol. 2. P. 305–311.

4. Kitowski Z., Garus J. Control of Motion of Underwater Robot Under Condition of External Disturbances // Proc. 7th International Conf. on Advanced Robotics, ICAR'95, Sant Feliu de Guixols, September 1995. Vol. 1. P. 278–282.

5. Rachkov M. Testing of the WCRs' Grippers by the Simulation Systems // Proc. of the Radio Conf., Moscow. 1990. Vol. 2. P. 22–24.

6. Robotics in Nuclear Facilities, 1991 // Special Issue for Exhibitions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 11). Tokyo. August 1991. P. 25–28.

7. Yamafuji K., Gradetsky V., Rachkov M., Semenov E. Mechatronic Drive for Intelligent Mobile Wall Climbing Robots // Robotics and Mechatronics. 1993. Vol. 5, N. 2. P. 164–171.

8. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 3. С. 172–177.

Dynamic Processes in Vacuum Contact Devices of Robots for Vertical Motion in the Water Environment

V. G. Gradetsky, gradet@ipmnet.ru, M. M. Knyazkov, ipm_labrobotics@mail.ru, E. A. Semenov, sim1165@mail.ru, A. N. Sukhanov, sukhonov-artyom@yandex.ru, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Knyazkov Maksim M., Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Accepted on March 19, 2019

Abstract

The results of experimental investigation intended to improve movement conditions for pneumatic robots on vertical surfaces under water are discussed. Features of the movement of vacuum contact devices for the simulation of mathematical model of the vacuum contact device with surfaces under water are presented. The experimental studies made it possible to obtain additional data on the dynamics of attachment, to obtain transient processes for air-water flow through ejector and to correct the results obtained earlier. For the purpose of analytical study of dynamic processes occurring in the system of vacuum contact devices, and taking into account the complexity of the description of nonlinearities, linearized simplified models of the system "air ejector — contact device — water environment" were developed. Vacuum contact devices are designed to provide guaranteed contact with vertical surfaces, plane slopes or horizontal surfaces on which the underwater robot performs its movement, carrying out the prescribed technological tasks, for example, in dry wells of nuclear power plants, on the surfaces of ship hulls, on the surfaces of underwater structures. The models took into account the forces of adhesion to the surfaces under water — the forces from the pressure drop, the friction force, the contact and vacuum interaction, the elasticity of suction caps. As a result of the solution of the model problem, the values of mechanical parameters, as well as the values of vacuum and flow in the cavity of variable volume as functions of changing the gap between the end of the corrugated membrane and the surfaces are obtained explicitly. As a result of the study of dynamic processes occurring in simplified models of vacuum contact devices "air ejector — contact surface — water environment", the transient characteristics of the change in the operating forces and pressures over time, as well as the dependence of the normal and tangential components of the forces on the depth of immersion in water were obtained. The variants of the designs of vacuum contact devices with surfaces in the water environment are investigated, and the modernization of the laboratory test bench for testing vacuum contact devices under water is carried out.

Keywords: contact device, vertical movement robot, water environment, motion features, dynamic characteristics, mathematical models, experimental studies

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-08-00357.

For citation:

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N. Dynamic Processes in Vacuum Contact Devices of Robots for Vertical Motion in the Water Environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 417–421.

DOI: 10.17587/mau.20.417-421

References

1. **Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E., Chashchukhin V., Kryukova A.** 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.

2. **Haferkamp H., Bach Fr.-W., Ogawa Y., Rachkov M.** Climbing Robot for Underwater Cutting, *Proc. International Conf. on Oceans Engineering, OCEANS*, 1994, Brest, vol. 1, pp. 602–607.

3. **Haferkamp, H., Bach Fr.-W., Rachkov, M., Seevers J.** Climbing Robot for Underwater Cleaning, *Proc. 5th International Offshore and Polar-Engineering Conf.*, Hague, 1995, vol. 2, pp. 305–311.

4. **Kitowski Z., Garus J.** Control of Motion of Underwater Robot Under Condition of External Disturbances, *Proc. 7th International Conf. on Advanced Robotics, ICAR'95*, Sant Feliu de Guixols, September 1995, vol. 1, pp. 278–282.

5. **Rachkov M.** Testing of the WCRs' Grippers by the Simulation Systems. *Proc. of the Radio Conf.*, Moscow, 1990, vol. 2, pp. 22–24.

6. **Robotics in Nuclear Facilities**, 1991, Special Issue for Exhibitions of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 11), Tokyo August 1991, pp. 25–28.

7. **Yamafuji K., Gradetsky V., Rachkov M., Semenov E.** Mechatronic Drive for Intelligent Mobile Wall Climbing Robots, *Robotics and Mechatronics*, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 164–171.

8. **Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 172–177 (in Russian).

12-я Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ—2019)

23—28 сентября 2019 г., с. Дивноморское, Геленджик, Краснодарский край

СОСТАВ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

Мультиконференция включает четыре локальные научно-технические конференции:

МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ (ИУ—2019)

Направления работы

1. Интеллектуализация систем:

- Автоматизация и оптимизация планирования действий автономных систем
- Машинное обучение и методы дооснащения в условиях неопределенности
- Интеллектуальный анализ данных, классификация, распознавание и диагностика
- Компьютерная лингвистика и онтологии
- Семантический поиск и управление знаниями
- Невербальные модели
- Когнитивный анализ, биологические сети и целеполагание
- Логический вывод и автоматизация рассуждений
- Методы и технологии «мягких вычислений»

- Обучающие и экспертные системы
- Верификация знаний
- Прикладные интеллектуальные системы управления
- **2. Эргатические проблемы человеко-машинных систем:**
- Интеллектуальная поддержка антропоцентрических систем и профессиональной деятельности человека (оператора, исследователя, инженера, ЛПР и т.п.)
- Проблемы человеко-машинного интерфейса
- Обучающие и тренажерные комплексы эргатических систем управления движением
- Анализ семантических отказов в оперативно-советующих системах
- Прикладные эргатические системы управления

УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (УАКС-2019)

Направления работы

- Управление летательными аппаратами: требования, функции, алгоритмы.
- Моделирование динамики полета, управления движением ЛА
- Интеллектуальные системы управления в авиационно-космической технике
- Методы обработки и представления информации в авиационно-космических системах (АКС) Человеко-машинный интерфейс, технологии VR и AR

- Управление техническим состоянием и самодиагностика АКС
- Архитектура бортовых комплексов, информационное обеспечение, элементы и агрегаты. Управление техническим состоянием и самодиагностика АКС
- Архитектура бортовых комплексов, информационное обеспечение, элементы и агрегаты.

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА (РИМ-2019)

Направления работы

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое управление роботов

- Безэкипажные машины и автономные наземные роботы
- Беспилотные летательные аппараты
- Роботы для ликвидации ЧС Роботизация в топливно-энергетическом комплексе
- Роботизация в сельскохозяйственном производстве
- Прикладные аспекты проектирования и применения роботов и мехатронных систем

Е. С. Брискин, д-р физ.-мат. наук, проф., dtm@vstu.ru, В. Н. Платонов, аспирант, Platonov.Vitaliy@yandex.ru, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

О математическом моделировании управления движением твердого тела с избыточным числом тросовых движителей¹

Предложена расчетная схема и математическая модель динамики поступательного движения твердого тела, которые имитируют передвижение подводной платформы с помощью якорно-тросовых движителей, а также указаны примеры применения таких платформ при проведении работ по добыче и разведке новых месторождений углеводородов на континентальном шельфе. Представлена схема подводной платформы с якорно-тросовыми движителями, а также способ ее перемещения. Особенность математической модели процесса движения платформы с таким типом движителей заключается в зависимости развиваемых усилий от положения тросов относительно перемещаемого тела и превышения числа управляющих воздействий над числом степеней свободы механической системы. Математическая модель, описывающая перемещение платформы, основана на геометрических уравнениях при одновременной работе электроприводов движителя, с одной стороны, и на уравнении динамики поступательного движения тела — с другой. Показано, что задачей системы управления при этом процессе является обеспечение необходимого соотношения сил в тросах, идущих к якорю движителя. В качестве приводов рассмотрены двигатели постоянного тока и шаговые двигатели ввиду их способности работать от автономного источника питания, такого как аккумуляторные батареи. Установлены особенности управления двигателями постоянного тока и шаговыми двигателями в составе приводов якорно-тросовых движителей. Для разрешения динамической неопределенности доказана необходимость введения в математическую модель дополнительного уравнения. В соответствии с разработанной математической моделью получены законы изменения во времени управляющих воздействий, в частности, напряжения, подаваемого на якоря электродвигателей постоянного тока, и частот коммутации обмоток при использовании шаговых двигателей. Разработан метод управления движением твердого тела, находящегося под воздействием двух приводов, который может быть использован при изучении поступательного перемещения подводной платформы с якорно-тросовыми движителями. Рассмотрены особенности управления двигателями постоянного тока и шаговыми двигателями для изменения длины тросовых движителей по заданному закону.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, якорно-тросовый движитель, система управления, моделирование, стенд

Введение

Освоение новых месторождений углеводородов на континентальном шельфе требует внедрения перспективных технологий для их добычи и разведки. Установлено [1], что применение тяжелых самоподъемных оснований подводных буровых комплексов при значительном числе точек бурения (более сотни) экономически нецелесообразно, а легкие самоподъемные основания характеризуются недостаточной безопасностью. Процесс бурения с самоходного судна также сопряжен с трудностями, основными из которых являются качка и дрейф.

В настоящее время существуют различные дистанционно управляемые автономные подводные аппараты, передвигающиеся по дну, например, подводные бульдозеры Hitachi, Komatsu, Sumimoto, экскаваторы Menzi Muck, кабелеукладчики Tyco Resolute, добычные агрегаты De Beers Marine, Nautilus Minerals и

др. [2, 3]. Среди таких подводных дистанционно управляемых аппаратов следует отметить аппараты с шагающими движителями [4, 5].

К одной из перспективных технологий добычи и разведки новых месторождений углеводородов на континентальном шельфе можно отнести применение автономного подводного робототехнического комплекса с якорно-тросовыми движителями.

Якорно-тросовый движитель может быть использован для перемещения автономного подводного или надводного робототехнического комплекса за счет тяги, возникающей вследствие натяжения тросов, идущих к якорю [6—8].

Кинематическая схема и принцип работы якорно-тросового движителя представлены на рис. 1.

Движителем является якорь, двумя тросами 2 и 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами маховиками приводов. В исходном положении трос 3 прослаблен, якорь при отсутствии течения занимает положение на одной вертикали с маховиком 5. При вращении маховика трос 2 натягивается,

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-01-00675.

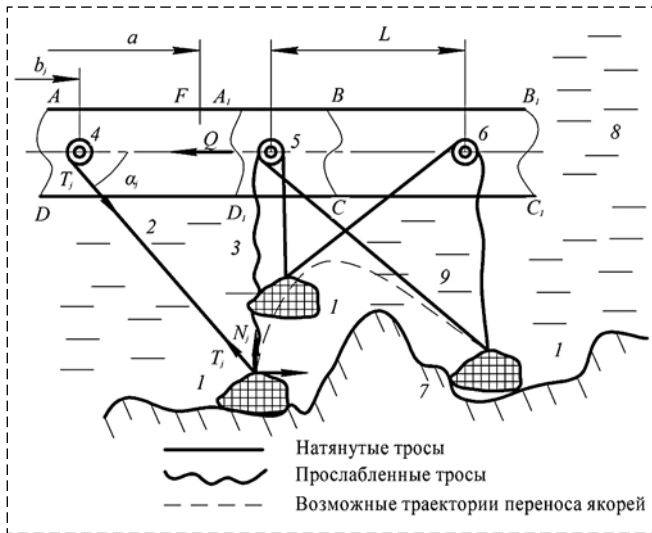


Рис. 1. Кинематическая схема и принцип работы якорно-тросового движителя мобильного робота с положительной плавучестью:

$ABCD$, $A_1B_1C_1D_1$ — соответственно исходное и последующее положение фрагмента робота; 1 — якорь; 2, 3 — тросы; 4–6 — управляемые маховики; 7 — профиль дна; 8 — водная среда; 9 — траектория переноса якоря

Fig. 1. Kinematic scheme and principle of operation of the anchor-rope propulsion of a mobile robot with positive buoyancy:

$ABCD$, $A_1B_1C_1D_1$ — initial and subsequent position of the robot fragment; 1 — anchor; 2, 3 — cables; 4–6 — controlled flywheels; 7 — bottom profile; 8 — water environment; 9 — anchor transfer trajectory

и при отсутствии проскальзывания якоря по дну мобильный робот перемещается. На рис. 1 показан фрагмент робота $ABCD$, который перемещается в положение $A_1B_1C_1D_1$ таким образом, чтобы ось маховика 4 в новом положении совпадала с осью маховика 5 в исходном. Ось маховика 5 перемещается в положение 6. Затем путем совместного согласованного управления маховиками происходит перемещение якоря в новое положение. Его подъем облегчается тем, что трос, осуществляющий подъем, занимает близкое к вертикальному положение. Затем цикл повторяется. Работа такого движителя подобна работе шагающего, а отличие состоит в том, что робот не опирается на него, а цепляется с его помощью за опорную поверхность [7].

Особенностью таких робототехнических систем является применение избыточного с точки зрения обеспечения задаваемого движения платформы робота числа движителей, что объясняется необходимостью надежного взаимодействия якорей с трудно прогнозируемым рельефом дна и его физико-механическими свойствами.

Действительно, если для однозначного описания движения абсолютно твердого тела не-

обходимо минимум шесть управляющих воздействий (для платформы робота — шесть якорно-тросовых движителей), то в случае отсутствия надежного взаимодействия хотя бы одного якоря с грунтом движение робота становится непредсказуемым. Поэтому в силу превышения числа управляющих воздействий над числом обобщенных координат имеет место динамическая неопределенность.

Однако в решении технической задачи эта неопределенность является полезной. Она позволяет накладывать дополнительные условия на управляющие воздействия, оптимальные в том или ином смысле.

Постановка модельной задачи

Исследование и анализ особенностей динамики движения рассматриваемых систем удобно осуществлять на простейшей механической системе с одной степенью свободы, представленной на рис. 2.

Для перемещения груза вдоль вертикальной направляющей (рис. 2) достаточно одного привода. При использовании двух приводов задачей системы управления является реализация заданного распределения усилий между этими приводами, а также обеспечение требуемого закона поступательного перемещения груза.

Управление сводится к поиску управляющих воздействий на электродвигатели, в частности, к определению напряжения, подаваемого на обмотки якоря двигателя постоянного тока, для обеспечения требуемых моментов или частоты коммутации обмоток для шаговых двигателей.

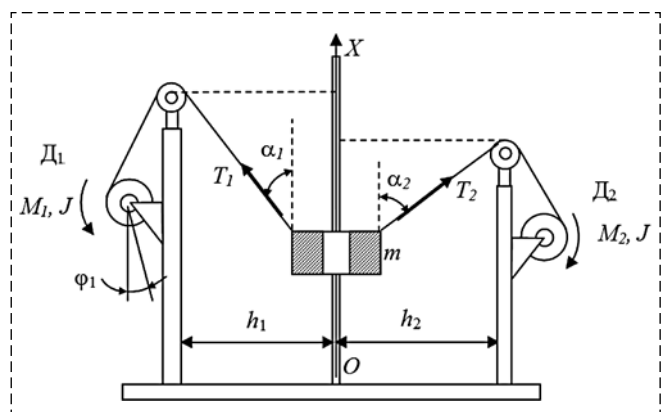


Рис. 2. Расчетная схема исследования режимов движения
Fig. 2. The settlement scheme providing studies of the motion modes

Для исследования системы управления якорно-тросовыми движителями при поступательном движении подводной платформы рассматривается расчетная схема, которая представлена на рис. 2, где D_1, D_2 — электродвигатели; M_1, M_2 — моменты, развиваемые этими электродвигателями; α_1, α_2 — углы, образованные тросами с горизонтальной осью; φ_1, φ_2 — углы поворота маховиков электродвигателей; T_1, T_2 — силы натяжения в тросах; J — момент инерции одинаковых маховиков приводов; h_1, h_2 — расстояния от центра массы груза до осей маховиков; m — масса перемещаемого груза; $x(t)$ — перемещение груза.

Математическая модель

Математическая модель, описывающая перемещение груза, основана на геометрических уравнениях при одновременной работе электродвигателей D_1 и D_2 , с одной стороны, и на уравнении динамики поступательного движения груза — с другой. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x = l_{10} \cos \alpha_{10} - l_1 \cos \alpha_1; \\ x = l_{20} \cos \alpha_{20} - l_2 \cos \alpha_2; \\ m\ddot{x} = T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 - mg, \end{cases} \quad (1)$$

где $l_{10}, l_{20}, \alpha_{10}, \alpha_{20}$ — длины тросов и углы их отклонения в начальный момент времени.

Принимая во внимание тот факт, что

$$\sin \alpha_j = \frac{h_j}{l_j} \quad (j = 1, 2), \quad (2)$$

можно установить связь между перемещением груза x и длиной каждого из тросов:

$$l_j = \sqrt{(l_{j0} \cos \alpha_{j0} - x)^2 + h_j^2}. \quad (3)$$

Уравнения (1)—(3) дополняются уравнениями вращательного движения маховиков:

$$\begin{aligned} J\ddot{\varphi}_1 &= M_1 - T_1 R; \\ J\ddot{\varphi}_2 &= M_2 - T_2 R, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_1, φ_2 — углы поворота маховиков приводных электродвигателей радиуса R , определяемые выражением

$$\varphi_j = \frac{l_{j0} - l_j}{R} = -\frac{\sqrt{(l_{j0} \cos \alpha_{j0} - x)^2 + h_j^2} + l_j}{R}. \quad (5)$$

Если используются одинаковые двигатели постоянного тока, то в соответствии с уравнением механической характеристики (для двигателей с независимым возбуждением)

$$\dot{\varphi}_j = \omega_d = \frac{1}{C} U_j - \frac{R_{\text{я}}}{C^2} M_j; \quad (6)$$

моменты M_j ($j = 1, 2$) на валу этих двигателей удобно представить в следующей форме:

$$M_j = k U_j - \mu \dot{\varphi}_j, \quad (7)$$

где $k = \frac{C}{R_{\text{я}}}$, $\mu = \frac{C^2}{R_{\text{я}}}$, $C = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}}$ — известные характеристики двигателей; U_j — напряжение, подводимое к обмотке якоря двигателя.

Если используются одинаковые шаговые двигатели, то угловое положение ротора каждого из двигателей определяется числом поданных импульсов n для коммутации его обмоток:

$$\varphi_j(n) = \frac{360}{N} n, \quad (8)$$

где N — число шагов шагового двигателя за один оборот.

Тогда закон вращательного движения маховиков будет зависеть от частоты коммутации обмоток p (частоты шагов) каждого шагового двигателя:

$$\varphi_j(t) = \frac{360}{N} \frac{n}{t} = \frac{360}{N} p, \quad (9)$$

откуда получаем

$$\dot{\varphi}(\omega) = \frac{\omega N}{360}. \quad (10)$$

Тогда с учетом уравнения (8) левые части в уравнениях (4) становятся известными.

В случае использования шаговых двигателей управление осуществляется именно скоростью вращения ротора (а не моментом на нем, как в случае применения двигателей постоянного тока) путем изменения частоты коммутации обмоток p_j , а получаемые моменты M_j при известных силах T_1 и T_2 требуют лишь проверки на реализуемость:

$$M_j \leq [M], \quad (11)$$

где $[M]$ — максимальный момент удержания шагового двигателя.

В развернутом виде (11) имеет вид

$$J \left[\frac{\partial \varphi}{\partial p_j^2} \dot{p}_j^2 + \frac{\partial \varphi_j}{\partial p_j} \ddot{p}_j \right] + T_j R \leq [M]. \quad (12)$$

Метод решения

Особенность решения полученных уравнений состоит в необходимости субъективного введения дополнительного уравнения, причем как в случае применения двигателей постоянного тока, так и в случае использования шаговых двигателей.

Действительно, для определения сил натяжения следует решить систему уравнений, состоящую из третьего уравнения (1) и дополнительно введенного уравнения $\Psi(T_1, T_2) = 0$:

$$\begin{cases} T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 = mg + m\ddot{x}; \\ \Psi(T_1, T_2) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

В этих уравнениях закон движения $x(t)$ задается, а α_1 и α_2 определяются как функции времени из уравнений (2), (3).

В случае использования двигателей постоянного тока из уравнений (4) определяются моменты на валу двигателей, а затем из уравнений (6) — подаваемые напряжения U_j для обеспечения программного движения.

В случае использования шаговых двигателей из уравнений (5) определяется закон вращательного движения двигателей, а из уравнений (9) — частоты шагов p_j каждого из двигателей как функции времени, обеспечивающие программное движение груза $x = x_3(t)$.

Из уравнений (4) после решения уравнений (13) определяются моменты на двигателях M_1 и M_2 , и проверяется условие их реализации (11).

Анализ результатов

Математическое моделирование проводили для проектируемого экспериментального макета со следующими параметрами:

- расстояния от электродвигателей до оси перемещения груза $h_1 = h_2 = 16$ см;
- начальные длины тросов $l_{10} = 45$ см, $l_{20} = 34$ см;
- радиус маховиков электродвигателей $R = 27$ мм;
- масса груза $m = 240$ г.

В случае применения одинаковых двигателей постоянного тока для моделирования были взяты данные редукторного электродвигателя ZGA37RG 24V со следующими характеристиками: $U_{\text{ном}} = 24$ В; $P_{\text{ном}} = 2$ Вт; $\eta_{\text{ном}} = 0,9$. Тогда $C = 0,073$; $k = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $\mu = 4,06 \cdot 10^{-4}$.

При применении шаговых двигателей для моделирования были взяты данные шагового двигателя с редуктором 28BY-48-5V. Функция (10) в этом случае имеет вид

$$p(\omega) = \frac{4096}{360} \omega. \quad (14)$$

В качестве программного движения рассматривалось движение с постоянной скоростью:

$$x(t) = v_0 t. \quad (15)$$

Дополнительно вводимую функцию $\Psi(T_1, T_2)$ задавали в виде

$$T_1 - \gamma T_2 = 0, \gamma = 2. \quad (16)$$

Характерные зависимости изучаемого движения представлены на рис. 3—7.

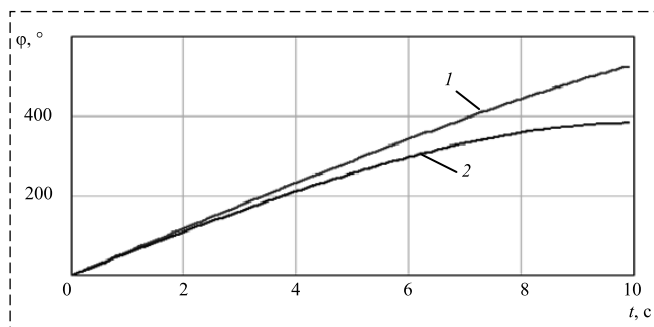


Рис. 3. Изменение углов поворота маховиков электродвигателей:

1 — для электродвигателя 1; 2 — для электродвигателя 2

Fig. 3. Changing the rotation angles of electric motors flywheels:

1 — for the motor 1; 2 — for the motor 2

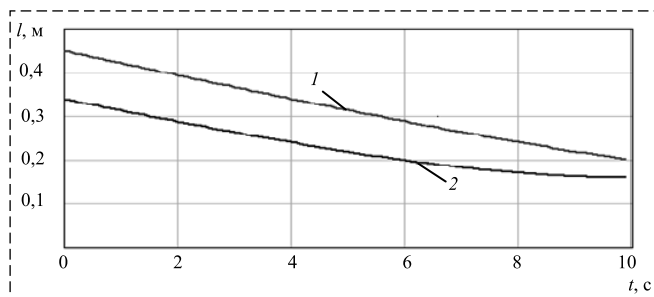


Рис. 4. Изменение длин тросов:

1 — для электродвигателя 1; 2 — для электродвигателя 2

Fig. 4. Changing cable lengths:

1 — the 1st motor; 2 — the 2nd motor

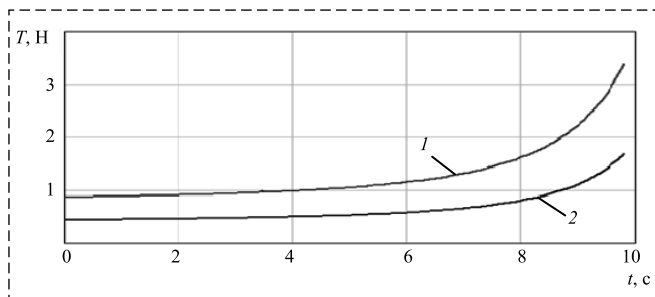


Рис. 5. Изменение усилий в тросах:
1 — для электродвигателя 1; 2 — для электродвигателя 2
Fig. 5. Changing the forces in the cables:
1 — the 1st motor; 2 — the 2nd motor

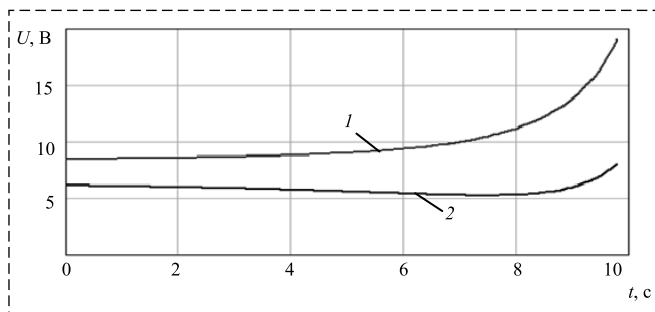


Рис. 6. Изменение напряжений в обмотках якоря для электродвигателей постоянного тока U, B :
1 — для электродвигателя 1; 2 — для электродвигателя 2
Fig. 6. Changing the voltage in the armature windings for DC motors:
1 — the 1st motor; 2 — the 2nd motor

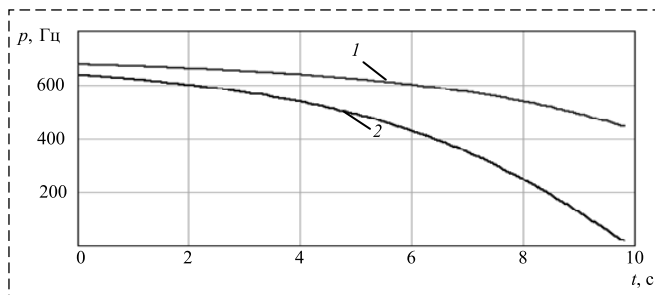


Рис. 7. Изменение частоты коммутации обмоток шаговых двигателей:
1 — для электродвигателя 1; 2 — для электродвигателя 2
Fig. 7. Changing the switching frequency of the windings of stepper motors:
1 — the 1st motor; 2 — the 2nd motor

В соответствии с полученными графиками прослеживается пропорциональная зависимость усилий в тросах якоря управляющего воздействия от напряжения, поданного на обмотки якоря двигателей постоянного тока. В данном случае это объясняется связью усилий в тросах с моментами на маховиках, определяемыми, в свою очередь, напряжением на обмотках двигателя.

В случае применения шаговых двигателей управляющим воздействием является частота коммутации обмоток. Полученное изменение ее значений представлено на рис. 7.

Заключение

Разработана математическая модель управления движением твердого тела, находящегося под воздействием двух приводов, которые могут быть использованы при изучении поступательного перемещения подводной платформы с якорно-тросовыми движителями.

Рассмотрены особенности управления двигателями постоянного тока и шаговыми двигателями для изменения длины тросовых движителей по заданному закону.

Список литературы

1. Серов В. А., Ковшов И. В., Устинов С. А. Задачи технологических роботизированных шагающих платформ при освоении подводных (подледных) месторождений полезных ископаемых // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 9 (194). С. 181–191.
2. Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min, Sup Hong. Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II // Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin, Poland, September 22–26, 2013. P. 269–273.
3. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean — 7 & Deep-Sea Minerals and Mining — 4: abstracts of International Conference. VNII Okeangeologia. St. Petersburg, 2014. P. 126–138.
4. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1 (1). С. 6–14.
5. Чернышев В. В., Арыканцев В. В. МАК-1 — подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2. С. 45–50.
6. Брискин Е. С., Пеньшин И. С., Смирная Л. Д., Шаронов Н. Г. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Волгоград. 2017. № 14 (209). С. 87–90.
7. Брискин Е. С., Серов В. А., Шаронов Н. Г., Пеньшин И. С. Об особенностях управления движением мобильных роботов с движителями якорно-тросового типа // Экстремальная робототехника. Труды Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ИПЦ ООО "Политехника-принт", 2017. С. 337–343.
8. Шаронов Н. Г., Пеньшин И. С., Платонов В. Н. Управление движением подводной платформы с движителями якорно-тросового типа = Underwater platform motion control with anchor-rope propulsion devices // XXIX Международная конференция "Машиноведение и инновации. Конференция молодых ученых и студентов" (МИКМУС — 2017) (г. Москва, 6–8 декабря 2017 г.). 2018. С. 353–355.
9. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

On Math Modeling of Solid Body's Motion Control with an Excess Number of Rope Propulsion Devices

E. S. Briskin, dtm@vstu.ru, V. N. Platonov, Postgraduate, Platonov.Vitaliy@yandex.ru,
Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation

Corresponding author: **Platonov Vitaliy N.**, Postgraduate,
Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation,
e-mail: Platonov.Vitaliy@yandex.ru

Accepted on March 25, 2019

Abstract

A design scheme and a mathematical model of the dynamics of the translational motion of a solid body, which simulate the movement of an underwater platform using anchor-cable propulsion devices, are proposed, and examples of the use of such platforms during the mining and exploration of new hydrocarbon deposits on the continental shelf are given. A diagram of the underwater platform with anchor-cable propulsion devices, as well as the method of its movement. The peculiarity of the mathematical model of the process of moving a platform with this type of propulsion devices is in the dependence of the developed efforts on the position of the cables relative to the moving body and the excess of the number of control actions over the number of degrees of freedom of the mechanical system. The mathematical model describing the movement of the platform is based on geometric equations with simultaneous operation of propulsion drives on the one hand, and on the equation of the dynamics of the translational motion of the body on the other. It is shown that the task of the control system in this process is to provide the necessary balance of forces in the cables going to the propulsion anchor. As drives, DC motors and stepper motors are considered due to their ability to operate from an independent power source, such as batteries. The features of control of DC motors and stepper motors as part of anchor-cable drives are established. To resolve dynamic uncertainty, the necessity of introducing an additional equation into a mathematical model has been proved. In accordance with the developed mathematical model, the laws of changes in time of control actions are obtained, in particular, such as the voltage applied to the armatures of DC motors and the switching frequency of the windings when using stepping motors. A method for controlling the movement of a solid body under the influence of two drives has been developed. It can be used to study the translational movement of an underwater platform with anchor-cable propulsion devices. The features of control of DC motors and stepper motors are considered to change the length of cable drives according to a given law.

Keywords: robotic complex, anchor-rope propulsion device, control system, math modeling, stand.

Acknowledgements: This article was prepared with financial support of Russian Foundation for Basic Research (17-01-00675).

For citation:

Briskin E. S., Platonov V. N. On Math Modeling of Solid Body's Motion Control with an Excess Number of Rope Propulsion Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 422—427.

DOI: 10.17587/mau.20.422-427

References

1. Serov V. A., Kovshov I. V., Ustinov S. A. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2107, no. 9 (194), pp. 181—191 (in Russian)
2. Jin-Ho Kim, Tae-Kyeong Yeu, Suk-Min Yoon, Hyung-Woo Kim, Jong-Su Choi, Cheon-Hong Min, Sup Hong. Electric-Electronic System of Pilot Mining Robot, MineRo-II, *Proceedings of the Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium Szczecin*, 2013, pp. 269—273.

3. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Proceedings of the International Conf. VNII Okeangeologia*, 2014, pp. 126—138.

4. Briskin E. S., Chernyshev V. V., Maloletov A. V., Sharonov N. G. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2013, no. 1 (1), pp. 6—14 (in Russian)

5. Chernyshev V. V., Arykancev V. V. *Robototekhnika i Tekhnicheskaya Kibernetika*, 2015, no. 2, pp. 45—50 (in Russian)

6. Briskin E. S., Penshin I. S., Smirnaya L. D., Sharonov N. G. *Izvestiya VolgGTU. Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemah*, 2017, no. 14 (209), pp. 87—90 (in Russian)

7. Briskin E. S., Serov V. A., Sharonov N. G., Penshin I. S. *Ehkstremalnaya Robototekhnika*, 2017, pp. 337—343 (in Russian)

8. Sharonov N. G., Penshin I. S., Platonov V. N. *Proceedings of the International conf. MIKMUS*, 2017, pp. 353—355 (in Russian)

9. Kenio T. *Stepper motors and their microprocessor control systems: Trans. from English*, Moscow, Energoatmizdat, 1987, 200 p.

А. К. Толстошеев, канд. техн. наук, доц., andrei.tolstosheev@yandex.ru,

В. А. Татаринцев, канд. техн. наук, доц., v_a_t52@mail.ru,

Брянский государственный технический университет

Проектирование статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой

Работа посвящена повышению надежности и технологичности конструкций мехатронных машин с параллельной кинематикой путем замены статически неопределимых манипуляторов статически определимыми механизмами. Предлагается методика, в которой проектирование статически определимых манипуляторов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой выполняется путем модификации структуры прототипов и включает три этапа: выявление и анализ избыточных связей, устранение избыточных связей, проверка правильности исключения избыточных связей. Для определения числа степеней свободы механизма, выявления избыточных связей и проверки решения используется предложенная авторами методика структурного анализа механизмов параллельной структуры. При структурном анализе манипулятор представляется иерархической структурой и рассматривается как параллельное соединение элементарных механизмов с незамкнутой кинематической цепью; как кинематическая цепь, состоящая из ведущей и ведомой частей; как совокупность звеньев и кинематических пар; как кинематическое соединение выходного звена и стойки. В статье реализованы следующие приемы устранения избыточных связей: увеличение подвижностей в кинематических парах; введение в кинематическую цепь разрузочных звеньев и пассивных кинематических пар; исключение из кинематической цепи лишних звеньев и пар; увеличение подвижностей в одних кинематических парах одновременно с исключением ставших лишними других кинематических пар. Разработано несколько вариантов структурных схем самоустанавливающихся манипуляторов на базе механизма Ортоглайд, сохраняющих основные функциональные свойства прототипа. Для увеличения числа схем самоустанавливающихся механизмов используется перераспределение подвижностей и связей в пределах соединительной кинематической цепи и между соединительными кинематическими цепями. Предложенная методика позволяет определять число степеней свободы механизма, число и вид избыточных связей, устранять избыточные связи и на альтернативной основе строить структурные схемы статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой.

Ключевые слова: технологические мехатронные машины, параллельная кинематика, избыточные связи, статически определимые манипуляторы

Введение

Технологические мехатронные машины с параллельной кинематикой, получившие распространение в последние годы [1, 2], снабжены манипуляторами параллельной структуры с замкнутой кинематической цепью и несколькими степенями свободы. Замкнутая кинематическая цепь и параллельная кинематика обеспечивают этим механизмам по сравнению с традиционными манипуляторами с последовательной кинематикой большую жесткость, грузоподъемность и точность, а также улучшение динамики вследствие уменьшения масс подвижных звеньев. Однако в замкнутой кинематической цепи могут присутствовать контурные избыточные связи, отсутствующие в незамкнутой цепи.

Избыточными связями называют повторяющиеся связи, устранение которых не увеличивает подвижность механизма [3]. Механизмы без избыточных связей являются статически определимыми. Для статически определимых механизмов число неизвестных реакций связей равно числу уравнений равновесия (кинетостатики),

содержащих эту реакцию. Для статически неопределимых механизмов реакции связей нельзя определить из уравнений кинетостатики, так как число неизвестных больше числа уравнений. Каждая избыточная связь увеличивает статическую неопределимость механизма на единицу.

В статически неопределимом механизме с избыточными связями вследствие внешних температурных и силовых воздействий, а также погрешностей при изготовлении и сборке ранее одинаковые связи становятся разными. Вместо избыточных связей в механизме появляются лишние связи, которые затрудняют монтаж и демонтаж механизма, вызывают деформации звеньев при сборке и движении механизма, а также неравномерное распределение нагрузки, повышенное трение и износ в сопряжениях, приводят к существенному увеличению времени обкатки и снижению долговечности. Поэтому к механизмам с избыточными связями предъявляют повышенные требования по точности изготовления и монтажа звеньев и их соединений. Замена статически неопределимых механизмов статически определимыми (самоустанавливающимися) меха-

низмами позволяет существенно повысить надежность и технологичность конструкций машин различного назначения [3–7].

Проектирование механизмов с параллельной кинематикой выполняют, как правило, по критериям обеспечения заданного числа степеней свободы, требуемого вида движения выходного звена, полной или частичной кинематической развязки приводов [7–15]. Критерий отсутствия избыточных связей используется только в некоторых задачах синтеза, поэтому избыточные связи могут присутствовать в механизмах технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой, а обнаружить их можно в процессе структурного анализа. В то же время для анализа структуры манипуляторов с параллельной кинематикой часто используют методики, в которых избыточные связи не входят явно в математические модели и не определяются [8–11, 16]. Задача исключения избыточных связей из замкнутых кинематических цепей механизмов параллельной структуры не решена в полном объеме и сводится к расчету числа избыточных связей [7, 12, 13] и устранению избыточных связей в замкнутых контурах плоских механизмов [8, 9].

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методики проектирования статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой. При разработке методики учитываем опыт проектирования самоустанавливающихся механизмов как мехатронных, так и немехатронных машин. Понятийный аппарат и общая структура методики приняты по аналогии с работами Л. Н. Решетова [3, 4], внесшего значительный вклад в теорию и практику проектирования самоустанавливающихся механизмов машин различного назначения. Для расчета числа степеней свободы механизма, выявления и классификации избыточных связей применяем предложенную авторами методику структурного анализа манипуляторов с параллельной кинематикой [17, 18]. Для исключения избыточных связей из кинематических цепей пространственных механизмов параллельной структуры с несколькими степенями свободы используем приемы, в том числе отработанные на плоских механизмах с одной степенью свободы [3–9, 19].

Методика проектирования статически определимых механизмов

Проектирование статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой в предлагаемой методике выполняется путем анализа структуры прототипа и внесения в нее необходимых изменений и включает три вида действий: *подготовительные* — выявление, анализ и классификация избыточных связей, *основные* — устранение избыточных связей и *проверочные*.

1. Выявление, анализ и классификация избыточных связей

Для известной конструкции манипулятора технологической мехатронной машины в три этапа выполняется структурный анализ с использованием предложенной авторами методики [17, 18]. При этом система (манипулятор) представляется иерархической структурой, описываемой несколькими структурными моделями, которые отражают разные взгляды на строение механизма. Использование нескольких моделей позволяет выбрать из их числа структуры, наиболее подходящие для анализа строения рассматриваемого механизма, дает возможность более полно описать структуру системы, локализовать избыточные связи и проверить решение.

На первом этапе определяется число степеней свободы механизма и вид движения выходного звена. Механизм представляется состоящим из нескольких элементарных механизмов, каждый из которых обладает самостоятельными свойствами и незамкнутой кинематической цепью. При жестком параллельном соединении выходные звенья элементарных механизмов сливаются в одно звено — платформу, которая является выходным звеном составного механизма параллельной структуры с замкнутой кинематической цепью.

Множество D независимых возможных перемещений платформы механизма параллельной структуры является пересечением множеств D_i ($i = 1, 2, \dots, m$) независимых возможных перемещений платформы в m элементарных механизмах

$$D = D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_m. \quad (1)$$

Число степеней свободы платформы есть мощность множества D

$$W = |D|. \quad (2)$$

Следует учитывать, что по формулам (1) и (2) подсчитывается число степеней свободы платформы в рассматриваемом положении механизма, которое может включать в себя мгновенную степень свободы, появляющуюся при образовании мгновенной избыточной связи.

Для значительного числа манипуляторов мехатронных машин с параллельной кинематикой число степеней свободы удобнее и проще определять, используя другую структурную модель, в которой кинематическая цепь механизма разделяется на ведущую и ведомую части, обладающие разными кинематическими и структурными свойствами. Ведущая часть является незамкнутой кинематической цепью, включает стойку и начальные звенья, которым приписывают обобщенные координаты. Ведомая часть является замкнутой кинематической цепью, состоит из структурных групп. Число структурных групп ограничено, структура наиболее часто встречающихся групп известна, в том числе известно число избыточных связей и местных подвижностей. Мысленно отсоединяя от кинематической цепи известные структурные группы, определяют ее ведущую часть. Число степеней свободы и число избыточных связей механизма определяют суммированием соответствующих параметров в ведущей и ведомой частях кинематической цепи.

На втором этапе определяется число и вид избыточных связей в кинематической цепи механизма. При этом используется структурная модель, в которой манипулятор рассматривается как кинематическая цепь, элементами которой являются кинематические пары и звенья. Число избыточных связей q механизма подсчитывается по следующей структурной формуле:

$$q = W - 6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3, \quad (3)$$

где n — число подвижных звеньев; p_1, p_2, p_3 — соответственно число одноподвижных, двухподвижных и трехподвижных кинематических пар; W — число степеней свободы механизма.

В поверхностных механизмах (плоских и сферических) избыточные связи, как и любые другие, разделяем на тангенциальные, ограничивающие движения изображений звеньев на

поверхности, и нормальные, ограничивающие перемещения, перпендикулярные к поверхности. Для выявления тангенциальных избыточных связей в плоских или сферических механизмах используется, соответственно, плоская или сферическая структурная схема, в которой изображаются проекции звеньев и кинематических пар.

Число тангенциальных избыточных связей в плоской схеме плоского механизма q_{π} подсчитывается по структурной формуле:

$$q_{\pi} = W_{\pi} - 3n + 2p_{1\pi}, \quad (4)$$

где W_{π} — число степеней свободы механизма в его плоской схеме; $p_{1\pi}$ — число одноподвижных кинематических пар в плоской схеме механизма.

Формула (4) используется также для подсчета числа тангенциальных избыточных связей сферического механизма.

Разделяем контурные избыточные связи по месту действия на связи, ограничивающие движение выходного звена, и связи в кинематических цепях, соединяющие платформу и стойку.

На третьем этапе для выявления избыточных связей, наложенных на движение выходного звена, анализируются множества независимых возможных перемещений платформы D_i , определяются и суммируются связи со стороны каждой кинематической цепи, соединяющей платформу и стойку. Механизм параллельной структуры рассматривается при этом как кинематическое соединение выходного звена и стойки, конструктивно заменяющее кинематическую пару.

2. Исключение избыточных связей

Исключение одной из двух одинаковых связей возможно либо устранением этой связи из кинематической цепи, либо введением в кинематическую цепь дополнительной подвижности для этой связи. Способы устранения избыточных связей: замена одних кинематических пар на другие с большим числом подвижностей; введение в кинематическую цепь разгрузочных звеньев и пассивных кинематических пар; исключение из кинематической цепи лишних звеньев и кинематических пар; увеличение подвижностей в кинематических парах одновременно с исключением ставших лишними других кинематических пар. При этом подсчитывается баланс степеней свободы

и связей, учитывается, что одно звено вносит в кинематическую цепь шесть степеней свободы, а каждая кинематическая пара — соответствующее ее классу число связей.

Модификация кинематической цепи приводит к появлению у механизма новых свойств, некоторые из которых могут улучшить его качество. Для увеличения числа схем самоустанавливающихся механизмов используется перераспределение подвижностей и связей в пределах соединительной кинематической цепи и между соединительными кинематическими цепями. Для выбора наиболее подходящего варианта структурной схемы следует использовать дополнительные критерии, которые в работе не рассматриваются.

3. Проверка правильности исключения избыточных связей

Удаление из кинематической цепи обычной связи вместо избыточной, как и неправильное введение дополнительной подвижности, ведет к появлению в механизме вредной лишней подвижности при сохранении избыточной связи. Кроме этого, необходимо учитывать, что изменение структуры механизма неизбежно ведет к изменению его свойств. Самоустанавливающийся механизм должен сохранять число степеней свободы и вид движения исполнительного органа, параллельную кинематику и кинематическую развязку движений. Для проверки выполняется структурный анализ [17, 18].

Применение методики

В качестве примера рассмотрим известный [12] поступательно направляющий механизм Ортоглайд (рис. 1). Манипуляторы, обеспечивающие поступательное перемещение выходного звена, широко применяются при сборке и металлообработке [2]. Кинематическая цепь механизма включает платформу 7 (выходное звено), стойку 1 и три соединяющие их одинаковые по составу кинематические цепи, содержащие шарнирные параллелограммы и ползуны: 2, 12, 13. Ползуны образуют приводные поступательные пары с неподвижными направляющими, ориентированными вдоль осей прямоугольной декартовой системы координат.

Определим число степеней свободы механизма и вид движения выходного звена, рассматривая манипулятор как параллельное со-

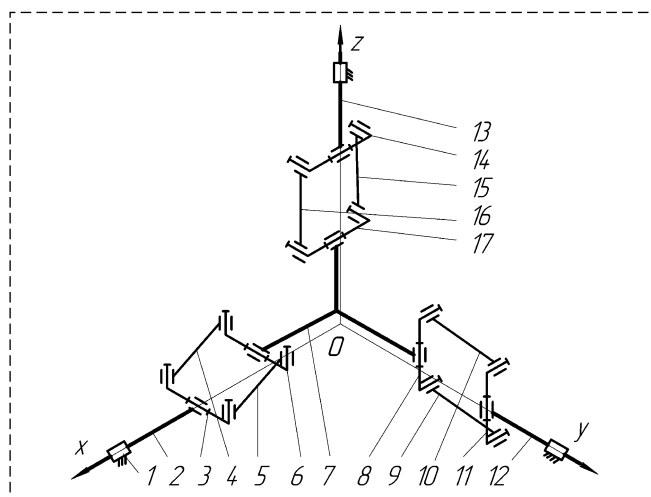


Рис. 1. Структурная схема механизма Ортоглайд
Fig. 1. Structural diagram of the Orthoglide mechanism

единение трех элементарных механизмов X , Y , Z с незамкнутой кинематической цепью, включающей стойку, ползун, шарнирный параллелограмм и платформу. В механизме X возможные перемещения δx , δy , δz платформы вдоль координатных осей обеспечиваются соответственно подвижностями в поступательной паре, образованной звеньями 1 и 2, шарнирном параллелограмме из звеньев 3, 4, 5, 6 и вращательной паре, образованной звеньями 2 и 3. Вращательная пара, образованная звеньями 6 и 7, обеспечивает элементарный поворот $\delta \varphi_y$ платформы вокруг оси Oy . Тогда множество независимых возможных перемещений платформы в механизме X имеет вид

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y\}.$$

Аналогично имеем для механизма Y , состоящего из звеньев 1, 7–12, и механизма Z , состоящего из звеньев 1, 7, 13–17, соответственно

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_z\}, D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x\}.$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы составного механизма по формуле (1):

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Число степеней свободы платформы найдем по формуле (2):

$$W = |D| = 3.$$

Число избыточных связей в кинематической цепи механизма найдем по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 16 + 5 \cdot 21 = 12.$$

Из них девять избыточных связей являются нормальными, находятся в трех замкнутых контурах плоских механизмов шарнирных параллелограммов. Это следует из расчета общего числа избыточных связей в замкнутом контуре одного плоского шарнирного параллелограмма при $n = 3$, $p_1 = 4$, $W = 1$ по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 1 - 6 \cdot 3 + 5 \cdot 4 = 3,$$

а также расчета числа тангенциальных избыточных связей в его плоской схеме по формуле (4):

$$q_{\Pi} = W_{\Pi} - 3n + 2p_{1\Pi} = 1 - 3 \cdot 3 + 2 \cdot 4 = 0.$$

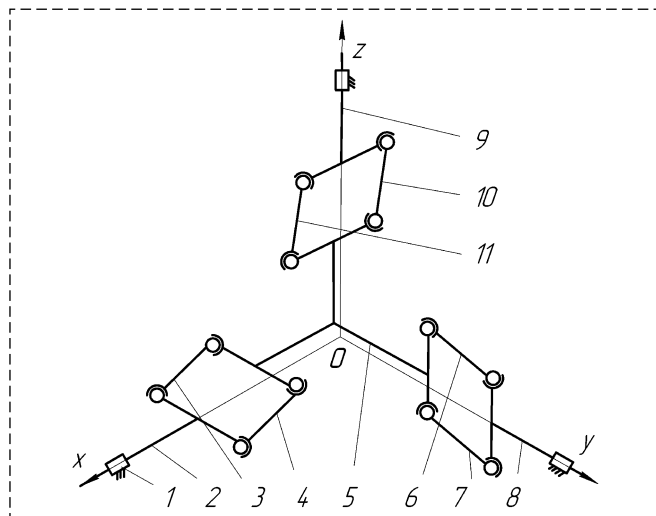


Рис. 2. Самоустанавливающийся механизм с разгрузочными звеньями

Fig. 2. Self-aligning mechanism with unloading links

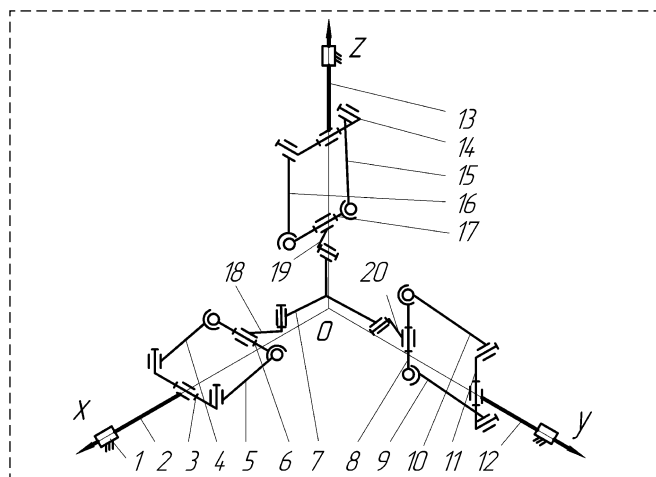


Рис. 3. Самоустанавливающийся механизм дельтапод

Fig. 3. Self-aligning deltapod mechanism

Для выявления трех других избыточных связей представим манипулятор как кинематическое соединение платформы со стойкой. Из сравнения элементов множеств D_1 , D_2 , и D_3 следует, что каждая соединительная кинематическая цепь запрещает два элементарных вращательных движения платформы относительно стойки, соответственно $\delta\varphi_x$ и $\delta\varphi_z$; $\delta\varphi_x$ и $\delta\varphi_y$; $\delta\varphi_y$ и $\delta\varphi_z$. Три соединительные цепи накладывают на движение платформы шесть связей, из которых три — избыточные, запрещающие элементарные вращательные движения платформы: $\delta\varphi_x$, $\delta\varphi_y$, $\delta\varphi_z$.

Для устранения всех избыточных связей в кинематической цепи механизма Ортоглайд введем в каждую соединительную цепь дополнительное разгрузочное звено и вращательную пару, а в плоских шарнирных параллелограммах заменим две вращательные пары на сферические трехподвижные пары (рис. 2).

Проверим решение. Для аналогичных элементарных механизмов

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta\varphi_y, \delta\varphi_z\},$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta\varphi_x, \delta\varphi_z\},$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta\varphi_x, \delta\varphi_y\}.$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы механизма параллельной структуры по формуле (1):

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Самоустанавливающийся манипулятор является поступательно направляющим механизмом с числом степеней свободы платформы $W = |D| = 3$.

С учетом местных подвижностей в плоских параллелограммах число степеней свободы механизма $W = 6$. Проверим по формуле (3):

$$q = 6 - 6 \cdot 19 + 5 \cdot 18 + 3 \cdot 6 = 0.$$

Заменим в каждом шарнирном параллелограмме механизма Ортоглайд все вращательные пары сферическими, одновременно исключив ставшие при этом лишними звенья и пары, и получим новый самоустанавливающийся механизм — поступательно направляющий дельтапод (рис. 3). Проверим решение. В состав кинематической цепи входят стойка 1, три начальных звена 2, 8, 9 и статически определяя

структурная группа с шестью поводками, обладающая шестью местными подвижностями [17]. Поэтому число степеней свободы механизма $W = 9$, число степеней свободы платформы $W = 3$, число избыточных связей $q = 0$. Проверка по формуле (3):

$$q = 9 - 6 \cdot 10 + 5 \cdot 3 + 3 \cdot 12 = 0.$$

Для определения вида движения выходного звена найдем множества независимых возможных перемещений платформы в элементарных механизмах, учитывая подвижности в кинематических парах:

$$\begin{aligned} D_1 &= \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\}, \\ D_2 &= \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\}, \\ D_3 &= \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\}. \end{aligned}$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы составного механизма по формуле (1):

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Еще одну схему самоустанавливающегося механизма получим (рис. 4), исключив из каждой соединительной цепи механизма Ортоглайд по одному лишнему звену с двумя вращательными парами, что равносильно удалению из кинематической цепи механизма 12 связей. Получим параллельный самоустанавливающийся механизм с карданными (универсальными) шарнирами, для которого

$$\begin{aligned} D_1 &= \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\}, \\ D_2 &= \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\}, \\ D_3 &= \{\delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta x, \delta y, \delta z\}, \\ D &= \{\delta x, \delta y, \delta z\}, W = 3. \end{aligned}$$

Проверим по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Если далее заменить универсальные шарниры, соединяющие звенья 4, 8, 12 с платформой 6 и ползунами, на сферические пары и сдвинуть три шарнира в точку K (центр платформы), то получим самоустанавливающийся механизм (рис. 5). В этом механизме платформа отсутствует, а исполнительный орган раз-

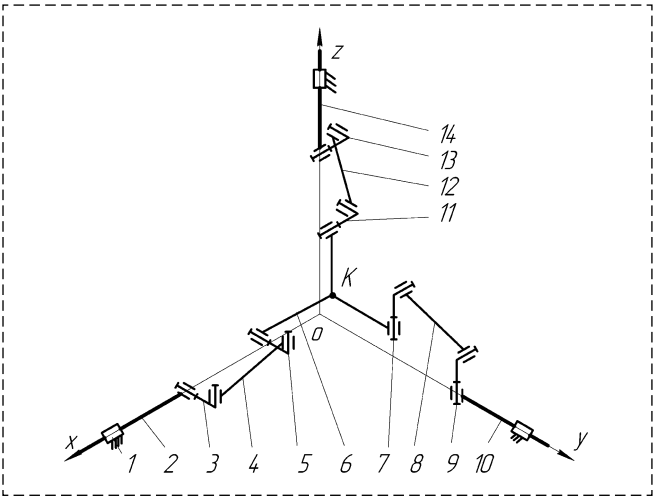


Рис. 4. Самоустанавливающийся механизм с карданными шарнирами
Fig. 4. Self-aligning mechanism with cardan joints

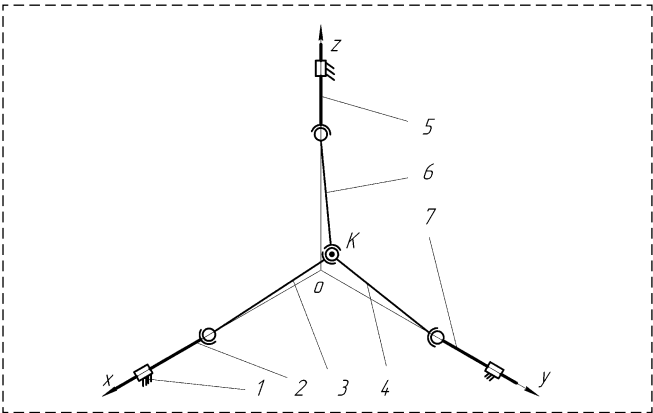


Рис. 5. Самоустанавливающийся механизм без платформы
Fig. 5. Self-aligning mechanism without platform

мещается в точке K . Кинематическая схема, построенная на основе данной структуры, является кинематической моделью для расчета механизмов типа Ортоглайд [20]. Для проверки выполним структурный анализ механизма, расчленив его кинематическую цепь на ведущую и ведомую части. Ведущая незамкнутая цепь состоит из стойки 1, двух подвижных звеньев 2 и 3, двух кинематических пар $p_3 = 1$, $p_1 = 1$, имеет $q = 0$,

$$W = p_1 + 3p_3 = 4.$$

Ведомая часть состоит из двух одинаковых структурных групп, для каждой из которых $n = 2$, $p_1 = 1$, $p_3 = 2$, $q = 0$, $W = 1$. Так как избыточные связи отсутствуют в ведущей части цепи и в структурных группах, то в кинематической цепи механизма $q = 0$. Число степеней

свободы $W = 6$, так как подвижности в ведущей и ведомой частях кинематической цепи суммируются. При $n = 6$, $p_1 = 3$, $p_3 = 5$, $q = 0$ из формулы (3) также следует

$$W = 6n - 5p_1 - 3p_3 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 5 = 6.$$

Из них три степени свободы обеспечивают произвольное движение точки K (основные подвижности), а три местные подвижности обеспечивают вращение шатунов вокруг своей оси.

Рассмотрим вариант самоустанавливающегося механизма, имеющего разную структуру

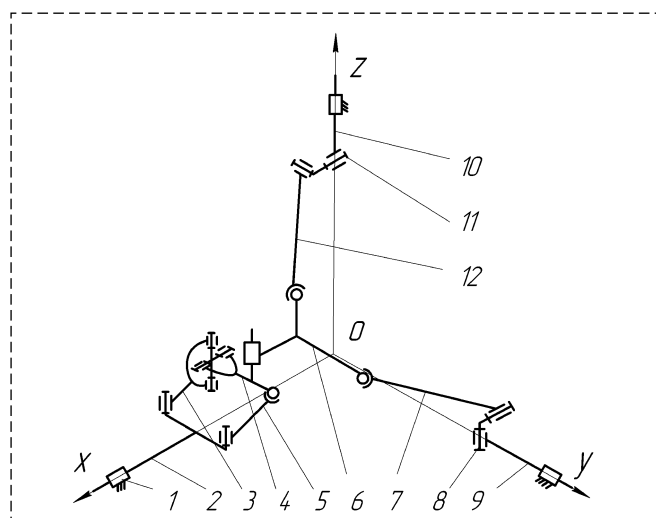


Рис. 6. Самоустанавливающийся механизм с разным составом соединительных цепей

Fig. 6. Self-aligning mechanism with different structure of connecting chains

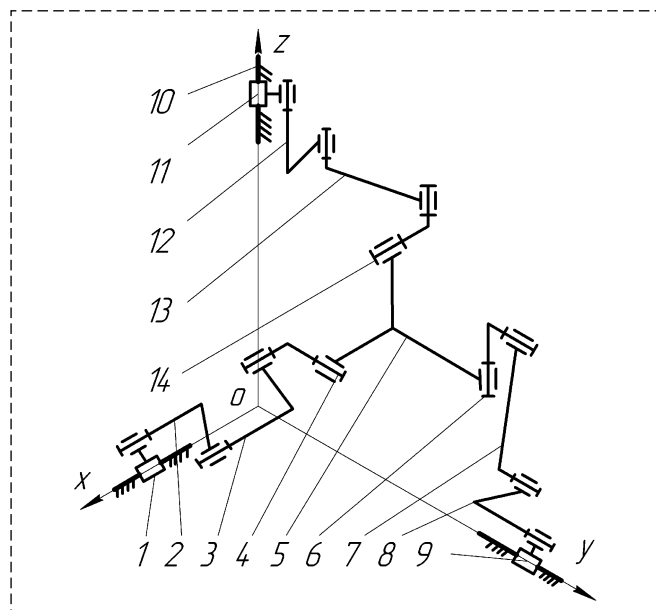


Рис. 7. Самоустанавливающийся изоморфный механизм

Fig. 7. Self-aligning isomorphic mechanism

соединительных кинематических цепей (рис. 6), для которого с учетом формул (1) и (2) имеем

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\},$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\}, D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, W = 3.$$

Проверим по формуле (3) при $n = 11$, $p_1 = 10$, $p_2 = 1$, $p_3 = 3$, $W = 3$:

$$q = 3 - 6 \cdot 11 + 5 \cdot 10 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 3 = 0.$$

Все рассмотренные ранее механизмы обеспечивают поступательное перемещение платформы и имеют по три линейных двигателя. В этих механизмах движение платформы вдоль каждой из координатных осей связано с линейными перемещениями всех трех входных звеньев.

Изменим конфигурацию осей вращательных пар в штангах манипулятора с карданными шарнирами (см. рис. 4) так, чтобы оси трех вращательных пар в каждом элементарном механизме были параллельны направляющей соответствующей поступательной пары. Тогда получим самоустанавливающийся механизм (рис. 7) с кинематической развязкой по входу-выходу, при которой три перемещения платформы по трем ортогональным направлениям могут независимо управляться тремя приводами, что существенно упрощает управление манипулятором. Данный механизм относится к семейству изоглайдов, изоморфных механизмов с линейными двигателями, у которых каждый линейный двигатель перемещает платформу по соответствующей оси декартовой системы координат с отношением скоростей входа-выхода, равным единице. Самоустанавливающийся изоглайд (рис. 7) является кинематическим аналогом Триптерона [12], но не содержит избыточных связей.

Проверим решение. Множество независимых возможных перемещений платформы в элементарных механизмах

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\},$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\},$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\}.$$

Число степеней свободы платформы в каждом из элементарных механизмов X , Y , Z по формуле (2):

$$W_1 = |D_1| = |D_2| = |D_3| = 5.$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы механизма параллельной структуры по формуле (1):

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 = \{x, y, z\}.$$

Манипулятор является поступательно направляющим механизмом с числом степеней свободы платформы

$$W = |D| = 3.$$

Проверка по формуле (3) при $n = 13$, $p_1 = 15$, $W = 3$ дает:

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Заключение

Предложенная методика проектирования статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой позволяет определять число степеней свободы, число и вид избыточных связей в кинематической цепи механизма, а также устранять выявленные избыточные связи и на альтернативной основе строить структурные схемы самоустанавливающихся механизмов с сохранением основных функциональных свойств. Применение структурных схем манипуляторов без контурных избыточных связей является одним из способов повышения надежности и технологичности конструкций мехатронных машин с параллельной кинематикой.

Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Merlet J. P. Parallel Robots. The Netherlands Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.
3. Решетов Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. М.: Машиностроение, 1972. 256 с.

4. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 288 с.
5. Дворников Л. Т., Гудимова Л. Н., Большаков Н. С. Опыт исключения избыточных связей в шестизвенных плоских механизмах // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 5. С. 29–38.
6. Егоров О. Д., Буйнов М. А. Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 17, № 4. С. 239–244.
7. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В. Л. Афонин, А. Ф. Крайнев, В. Е. Ковалев [и др.] / Под ред. В. Л. Афонина. М.: Машиностроение, 2001. 256 с.
8. Календарев А. В., Лысогорский А. Е., Глазунов В. А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы // Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 3. С. 7–10.
9. Ширинкин М. А. Структурный анализ пространственных механизмов параллельной структуры с четырьмя и шестью степенями свободы // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 2. С. 17–21.
10. Бюшгенс А. Г., Глазунов В. А., Зайчик Л. Е., Скворцов С. А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с круговой направляющей и шестью степенями свободы: Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 2. С. 13–19.
11. Носова Н. Ю., Глазунов В. А., Палочкин С. В., Терехова А. Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 5. С. 34–40.
12. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 272 p.
13. Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots, Part 1-Methodology. Dordrecht: Springer, 2008. 720 p.
14. Данилин П. О., Тывес Л. И., Глазунов В. А. Групповая кинематическая развязка двигателей в механизмах параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 3. С. 27–35.
15. Глазунов В. А., Борисов В. А. Разработка механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы и четырьмя кинематическими цепями // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 5. С. 3–12.
16. Подзоров П. В., Бушуев В. В. Структурный анализ и классификация механизмов параллельной кинематики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 10. С. 42–49.
17. Толстосеев А. К., Татаринцев В. А. Структурный анализ механизмов роботов-станков с параллельной кинематикой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1 (54). С. 33–43.
18. Толстосеев А. К., Татаринцев В. А. Методика структурного анализа параллельных манипуляторов сельскохозяйственных роботов // Научное обозрение. 2017. № 22. С. 37–42.
19. Толстосеев А. К. Теория строения механизмов: учеб. пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. 139 с.
20. Pashkevich A., Wenger P., Chablat D. Design strategies for the geometric synthesis of Orthoglide-type mechanisms // Mechanism and Machine Theory. 2005. Vol. 40, № 8. P. 907–930.

Designing Statically Determinable Mechanisms of Technological Mechatronic Machines with Parallel Kinematics

A. K. Tolstosheev, andrei.tolstosheev@yandex.ru, V. A. Tatarintsev, v_a_t52@mail.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241035, Russian Federation

Corresponding author: Tatarintsev Vyacheslav A., Cand. of Tech. Sc.,
Associate Professor of the Machine Parts Department, Bryansk State Technical University,
Bryansk, 241035, Russian Federation, e-mail: v_a_t52@mail.ru

Accepted on April 08, 2019

Abstract

The work is devoted to improving the reliability and manufacturability of mechatronic machine designs with parallel kinematics by replacing statically indeterminate manipulators with statically determinable mechanisms. A technique is proposed in which the design of statically determinable manipulators of technological mechatronic machines with parallel kinematics is performed by modifying the structure of prototypes and includes three steps: identifying and analyzing redundant links, eliminating redundant links, checking the correctness of eliminating redundant links. To determine the number of degrees of freedom of the mechanism, identify redundant links, and verify the solution, the authors use the proposed methodology for structural analysis of parallel structure mechanisms. In structural analysis, a manipulator is represented by a hierarchical structure and is considered as a parallel connection of elementary mechanisms with an open kinematic chain; as a kinematic chain consisting of leading and driven parts; as a set of links and kinematic pairs; as a kinematic connection of the output link and the rack. The article implements the following techniques for eliminating redundant links: mobility increase in kinematic pairs; introduction of unloading links and passive kinematic pairs to the kinematic chain; exclusion of extra links and pairs from the kinematic chain; increase in mobility in some kinematic pairs simultaneously with the exclusion of other kinematic pairs that have become superfluous. The authors developed several variants of structural schemes of self-aligning manipulators based on the Orthoglide mechanism, which retain the basic functional properties of the prototype. To increase the number of self-aligning mechanism diagrams, the redistribution of mobilities and links within the connecting kinematic chain and between connecting kinematic chains is used. The proposed methodics allow to determine the number of degrees of freedom of the mechanism, the number and type of redundant links, eliminate redundant links and, on an alternative basis, build structural diagrams of statically determinable mechanisms of technological mechatronic machines with parallel kinematics.

Keywords: technological mechatronic machines, parallel kinematics, redundant links, statically definable manipulators

For citation:

Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A. Designing Statically Determinable Mechanisms of Technological Mechatronic Machines with Parallel Kinematics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 428–436.

DOI: 10.17587/mau.20.428-436

References

1. **Poduraev Yu. V.** Mechatronics: basics, methods, application: educational manual for university students, Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p. (in Russian).
2. **Merlet J. P.** Parallel Robots, The Netherlands Dordrecht, Springer, 2006, 417 p.
3. **Reshetov L. N.** Designing rational mechanisms, Moscow, Mashinostroenie, 1972, 256 p. (in Russian).
4. **Reshetov L. N.** Self-aligning mechanisms. Reference book, Moscow, Mashinostroenie, 1991, 288 p. (in Russian).
5. **Dvornikov L. T., Gudimova L. N., Bol'shakov N. S.** *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2007, no 5, pp. 29–38 (in Russian).
6. **Egopov O. D., Buynov M. A.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no 4, pp. 239–244 (in Russian).
7. **Afonin V. L., Kraynev A. F., Kovalev V. E.** et al. Processing equipment of the new generation. Design concept. Moscow, Mashinostroenie, 2001, 256 p. (in Russian).
8. **Kalendarev A. V., Lysogorskiy A. E., Glazunov V. A.** *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2013, no 3, pp. 7–10 (in Russian).
9. **Shirinkin M. A.** *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2011, no 2, pp. 17–21 (in Russian).
10. **Byushgens A. G., Glazunov V. A., Zaychik L. E., Skvortsov S. A.** *Spravochnik. Inzhenernyy Zhurnal s Prilozheniem*, 2014, no 2, pp. 13–19 (in Russian).
11. **Nosova N. Yu., Glazunov V. A., Palochkin S. V., Terekhova A. N.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no 5, pp. 34–40 (in Russian).
12. **Kong X., Gosselin C.** Type Synthesis of Parallel Mechanisms, Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, 272 p.
13. **Gogu G.** Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1-Methodology, Dordrecht, Springer, 2008, 720 p.
14. **Danilin P. O., Tyves L. I., Glazunov V. A.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2010, no 3, pp. 27–35 (in Russian).
15. **Glazunov V. A., Borisov V. A.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2017, no 5, pp. 3–12 (in Russian).
16. **Podzorov P. V., Bushuev V. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no 10, pp. 42–49 (in Russian).
17. **Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A.** *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no 1(54), pp. 33–43 (in Russian).
18. **Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A.** *Nauchnoe Obozrenie*, 2017, no 22, pp. 37–42 (in Russian).
19. **Tolstosheev A. K.** Theory of mechanism construction: educational manual, Bryansk, Publishing house of BGUTU, 2001, 139 p. (in Russian).
20. **Pashkevich A., Wenger P., Chablat D.** *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, no 8, pp. 907–930.

В. В. Матвеев¹, канд. техн. наук, доц., matweew.valery@yandex.ru,

Е. Ю. Кисловский², инженер-конструктор, kislovskiy@bk.ru,

Д. Н. Мильченко², канд. техн. наук, зам. генерального директора по НИР и ОКР, dim2001@mail.ru,

В. Я. Распопов¹, д-р техн. наук, проф., tgupu@yandex.ru,

С. В. Телухин¹, канд. техн. наук, доц., tgupu@yandex.ru,

М. Г. Погорелов¹, канд. техн. наук, доц., mgpogoreloff@yandex.ru,

В. В. Лихошерст¹, канд. техн. наук, доц., lvv_01@inbox.ru,

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет", г. Тула,

² Акционерное общество "Азовский оптико-механический завод", г. Азов

Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах

Анализируется система сопровождения подвижных объектов на основе двухосного карданова подвеса с МЭМС-гироскопами в контуре управления. Рассматривается кинематика системы сопровождения в одной из плоскостей наведения. Приведена структурная схема одного канала системы сопровождения, состоящая из контуров коррекции и стабилизации. Показано, что время переходного процесса, полоса пропускания, фазовое запаздывание между угловыми скоростями сопровождаемого объекта и платформы в значительной степени определяется добротностью по скорости контура коррекции. Приведенные численные оценки дают представление о характеристиках системы сопровождаемой платформы. Поясняется возникновение синхронных погрешностей системы сопровождения на колеблющемся носителе. Показано, что влияние сил сухого трения в осях подвеса на систему сопровождения эквивалентно действию суммы гармоник с частотами, кратными частоте колебаний носителя с нечетными коэффициентами. Иллюстрируется действие момента сил вязкого трения в условиях колебаний носителя. Представлена экспериментальная спектральная характеристика макета системы сопровождения на качающемся стенде, подтверждающая теоретические выводы. Приведено аналитическое соотношение, позволяющее оценить относительную синхронную погрешность системы сопровождения.

Ключевые слова: система сопровождения, МЭМС-гироскоп, гиросtabilизированная платформа, синхронная погрешность

Введение

В настоящее время повышаются требования к системам автоматического сопровождения подвижных объектов, являющихся источниками излучения в различных диапазонах (оптическом, инфракрасном, радиолокационном). Координаторы (датчики излучения) устанавливаются на двух- или трехосные гиросtabilизированные платформы, решающие задачу пространственной развязки оси равносигнальной зоны (ОРЗ) координатора от колебаний носителя и осуществляющие непрерывное ее совмещение с направлением на сопровождаемый объект (СО). В зависимости от решаемой задачи закон движения СО описывается детерминированными функциями времени, либо имеет случайный характер с заданными характеристиками [1].

Развитие в последнее время гироскопов, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), открывает перспективу их применения в системах стабилизации и автосопровождения подвижных объектов [2]. МЭМС-гироскопы позволяют сформировать обратную связь по угловой скорости стабилизированной платформы, улучшая тем самым ее динамические характеристики.

Целью настоящей статьи является анализ системы автосопровождения подвижного объекта на базе МЭМС-гироскопа.

Кинематика системы автосопровождения

Платформа (рис. 1) имеет две степени свободы относительно носителя: вращение вместе с рамой вокруг оси Y и собственное вращение

вокруг оси Z . На платформе установлен координатор, ОРЗ которого направлена вдоль оси X_{Π} платформы, который вырабатывает сигналы, пропорциональные углам отклонения Δ_y и Δ_z от ОРЗ. На платформе смонтирован инерциальный измерительный модуль (ИИМ), включающий два МЭМС-гироскопа, измеряющих проекции вектора абсолютной угловой скорости платформы ω_y и ω_z на связанные с ней оси. Информация об угловой скорости платформы и углах рассогласования поступает в вычислительно-преобразующее устройство, формирующее сигналы управления, подаваемые на двигатели стабилизации.

Кинематика системы автосопровождения в одной из плоскостей иллюстрируется рис. 2, на котором ось OX_H — продольная ось носителя, вращающаяся в инерциальном пространстве с угловой скоростью ω_H .

ОРЗ повернута относительно продольной оси носителя OX_H на угол φ и вращается с абсолютной угловой скоростью ω_{Π} . Ось OX_{CO} , направленная на СО, вращается с угловой скоростью ω_{CO} и повернута относительно оси OX_{Π} на угол рассогласования Δ (здесь и далее индексы x и y , характеризующие принадлежность к тому или иному каналу, опущены).

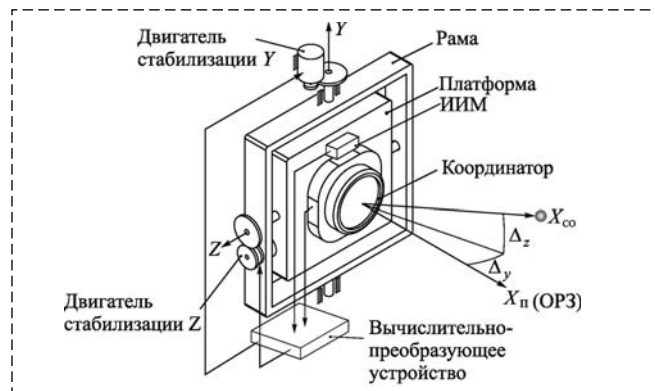


Рис. 1. Электрокинематическая схема двухосной системы сопровождения

Fig. 1. Electro-kinematic scheme of two-axis tracking system

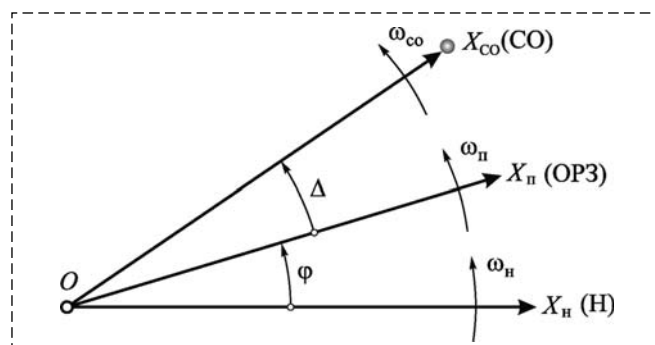


Рис. 2. Кинематика сопровождения в одной из плоскостей наведения

Fig. 2. Kinematics of support in one of the planes of guidance

Из рис. 2 следуют кинематические соотношения между угловыми скоростями:

$$\dot{\Delta} = \omega_{CO} - \omega_{\Pi}, \quad \dot{\varphi} = \omega_{\Pi} - \omega_H.$$

Математическая модель системы сопровождения по одному из каналов может быть упрощенно описана следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} J_0 \dot{\omega}_{\Pi} &= M_{упр} - M_0 \text{sign} \dot{\varphi} - d \dot{\varphi}; \\ \dot{\varphi} &= \omega_{\Pi} - \omega_H; \\ \dot{\Delta} &= \omega_{CO} - \omega_{\Pi}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где M_0 — модуль момента сил сухого трения; d — коэффициент вязкого трения [Н·м·с]; J_0 — момент инерции системы, приведенный к оси вращения платформы; $M_{упр}$ — момент управления.

В практике расчета систем стабилизации и сопровождения момент сил сухого трения при колебаниях основания рассматривают как возмущающий. Так как обычно $|\omega_{\Pi}| \ll |\omega_H|$, то имеем [3]:

$$-M_0 \text{sign} \dot{\varphi} = -M_0 \text{sign}(\omega_{\Pi} - \omega_H) \approx M_0 \text{sign} \omega_H.$$

Формируя момент управления платформой пропорционально разности заданной угловой скорости платформы ω_3 , линейно зависящей от угла рассогласования Δ , и фактической угловой скорости платформы ω_{Π} , измеренной МЭМС-гироскопом, имеем операторное представление математической модели (1):

$$\left. \begin{aligned} J_0(s+d)\omega_{\Pi}(s) &= \\ &= M_{упр}(s) - M_0 L[\text{sign} \omega_H] + d \omega_H(s); \\ M_{упр}(s) &= \\ &= W_p(s) W_{\Phi}(s) \{k_e \omega_3(s) - k_r [\omega_{\Pi}(s) + v(s)]\}; \\ \omega_3(s) &= Q \Delta(s); \\ s \Delta(s) &= \omega_{CO}(s) - \omega_{\Pi}(s), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $W_p(s)$ — передаточная функция разгрузочного устройства, включающего усилитель мощности, двигатель, редуктор; $W_{\Phi}(s)$ — передаточная функция фильтра, улучшающего динамику контура сопровождения; k_e — коэффициент передачи контура управления [В/(рад/с)]; k_r — коэффициент передачи МЭМС-гироскопа [В/(рад/с)]; Q — добротность по скорости контура управления [1/с]; $v(s)$, $L[\text{sign} \omega_H]$, $\omega_3(s)$ — изображения по Лапласу инструментальных погрешностей МЭМС-гироскопа, функции $\text{sign} \omega_H$ и заданной угловой скорости соответственно.

На рис. 3 приведена структурная схема одного канала системы сопровождения. Координатор измеряет угол рассогласования Δ между линией OX_{CO} и ОРЗ, который в вычисли-

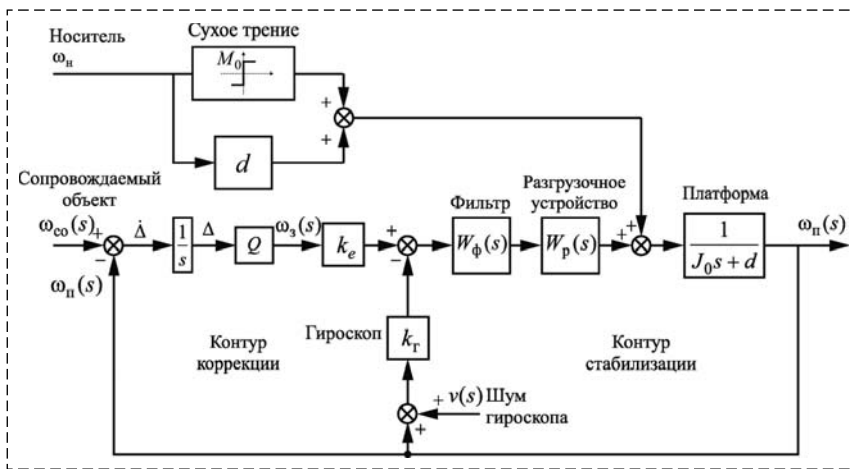


Рис. 3. Структурная схема системы сопровождения
Fig. 3. Block diagram of the tracking system

тельно-преобразующем тракте умножается на добротность контура автосопровождения Q , формируя тем самым заданную угловую скорость платформы ω_3 . Последняя преобразуется посредством коэффициента передачи k_e и сравнивается с сигналом, несущим информацию о фактической угловой скорости платформы, измеренной МЭМС-гироскопом с коэффициентом передачи k_r .

Полученная таким образом разность напряжений фильтруется и подается в разгрузочное устройство, придающее платформе с установленным на ней координатором угловую скорость ω_n . Как видно из структурной схемы, приведенной на рис. 3, система содержит два взаимосвязанных контура: коррекции, осуществляющего слежение за СО, и стабилизации, стремящегося сохранить положение платформы при действии на нее возмущающих моментов.

Передаточные функции системы сопровождения

Передаточная функция замкнутой системы сопровождения, в которой входным сигналом является угловая скорость СО, а выходным — угловая скорость платформы ω_n , в предположении $W_\phi(s) = 1$, $W_p(s) = k_p$ имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n(s)}{\omega_{CO}(s)} = \frac{Qk_e k_p}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Qk_e k_p}. \quad (2)$$

Если положить равенство коэффициентов

$$k_r = k_e, \quad (3)$$

то в установившемся режиме ($s = 0$) имеем

$$\omega_n = \omega_{CO},$$

т. е. угловая скорость ОРЗ будет равна угловой скорости оси OX_{CO} .

Корни знаменателя передаточной функции (2) с высокой степенью точности определяются следующими зависимостями:

$$s_1 \approx \frac{d + k_r k_p}{J_0}, \quad s_2 \approx Q.$$

Первый из корней описывает динамику контура стабилизации, а второй — контура коррекции, причем

$$s_1 \gg s_2. \quad (4)$$

С учетом неравенства (4) и соотношения (3) передаточная функция (2) может быть приближенно представлена в виде

$$\Phi(s) = \frac{\omega_n(s)}{\omega_{CO}(s)} \approx \frac{1}{\frac{1}{Q}s + 1}.$$

Таким образом, процесс сопровождения приближенно описывается передаточной функцией аperiодического звена первого порядка с постоянной времени $1/Q$. Реакция на постоянную входную угловую скорость ω_{CO} определяется соотношением

$$\omega_n(t) = (1 - e^{-Qt})\omega_{CO}(t),$$

из которого следует, что динамика сопровождения в значительной степени определяется добротностью Q .

Передаточная функция по углу рассогласования также может быть приближенно описана аperiодическим звеном первого порядка с передаточной функцией

$$\Phi_\Delta(s) = \frac{\Delta(s)}{\omega_{CO}(s)} \approx \frac{1/Q}{\left(\frac{1}{Q}s + 1\right)}. \quad (5)$$

Анализ соотношения (5) позволяет сделать вывод, что динамика угла рассогласования в первом приближении полностью определяется добротностью контура коррекции и при $\omega_{CO} = \text{const}$ описывается соотношением

$$\Delta(t) \approx \frac{1}{Q}(1 - e^{-Qt})\omega_{CO}.$$

В установившемся режиме угол рассогласования определяется зависимостью

$$\Delta \approx \frac{\omega_{CO}}{Q},$$

которая показывает, что в сигнале Δ содержится информация об угловой скорости оси OX_{CO} . Таким образом, если угловая скорость линии OX_{CO} составляет $50^\circ/\text{с}$, то при добротности, например, $Q = 50 \text{ с}^{-1}$ угол рассогласования будет равен 1° .

Переходный процесс у апериодического звена первого порядка заканчивается за время, примерно равное трем постоянным времени, поэтому

$$t_{п.п} \approx 3/Q.$$

Следовательно, для повышения быстродействия необходимо увеличивать добротность контура коррекции.

Полоса пропускания системы сопровождения также определяется добротностью системы и при неравномерности амплитудной частотной характеристики (АЧХ) не более 3 дБ определяется зависимостью

$$\Delta\omega \approx Q [\text{рад/с}].$$

Сдвиг фаз между угловой скоростью OX_{CO} и угловой скоростью платформы приближенно определяется соотношением

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega/Q).$$

Из полученного соотношения следует, что сдвиг фаз между угловой скоростью платформы и сопровождаемым объектом уменьшается при увеличении добротности и увеличивается с повышением частоты колебаний линии OX_{CO} . Если последняя совершает колебания, например, с частотой 3 Гц, то фазовое запаздывание составит $\approx 21^\circ$.

Передаточная функция, связывающая угловую скорость платформы $\omega_{п}$ с возмущающим моментом $M_{в}$, в предположении $W_{\phi}(s) = 1$, $W_p(s) = k_p$, $k_r = k_e$, имеет вид

$$\Phi_M(s) = \frac{\omega_{п}(s)}{M_{в}(s)} = \frac{s}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Q k_r k_p}. \quad (6)$$

Из передаточной функции (6) следует, что постоянный возмущающий момент не вызовет погрешности в угловой скорости платформы $\omega_{п}$.

Влияние шума МЭМС-гироскопа

Известно [2], что МЭМС-гироскопы являются датчиками низкого класса точности, поэтому оценка влияния их инструментальных погрешностей, в частности шума, на угловую скорость платформы является важной задачей.

Случайные погрешности МЭМС-гироскопов чаще всего описываются моделью белого шума, параметры которого задаются так называемым случайным блужданием угла (*Angle Random Walk, ARW*), имеющим размерность $\text{рад}/\sqrt{\text{с}}$. Характеристика *ARW* имеет смысл корня квадратного из спектральной плотности шума, т. е. $S_r(\omega) = ARW^2$.

Передаточная функция замкнутой системы, в которой входом является инструментальная погрешность гироскопа v , а выходом — угловая скорость платформы $\omega_{п}$, имеет вид

$$\Phi_{\omega_{п}}(s) = \frac{\omega_{п}(s)}{v(s)} = -\frac{k_r k_p s}{J_0 s^2 + (d + k_r k_p)s + Q k_e k_p}. \quad (7)$$

Из передаточной функции (7) следует, что система сопровождения является статической, поэтому среднеквадратическое отклонение (СКО) угловой скорости платформы $\omega_{п}$, вызванное шумом гироскопа, можно оценить по известному соотношению из теории случайных процессов:

$$\sigma_{\omega_{п}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{\omega_{п}}(j\omega)|^2 S_r(\omega) d\omega}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\omega_{п}}$ — СКО угловой скорости платформы; $S_r(\omega)$ — спектральная плотность шума МЭМС-гироскопа.

Вычисляя соотношение (8), имеем СКО угловой скорости платформы, вызванное шумом МЭМС-гироскопа,

$$\sigma_{\omega_{п}} = ARW \sqrt{\frac{(k_r k_p)^2}{2J_0(d + k_r k_p)}} \approx ARW \sqrt{\frac{k_r k_p}{2J_0}}.$$

Полученное соотношение позволяет оценить СКО случайных колебаний платформы, вызванных шумом гироскопа. Понятно, что с увеличением момента инерции платформы такие случайные колебания будут ослабляться. Если, например, шум МЭМС-гироскопа составляет $ARW = 0,01^\circ/\sqrt{\text{с}}$, а параметры системы такие, что $J_0 = 0,001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $k_p = 4 \text{ Н}\cdot\text{м/В}$, $k_r = 0,6 \text{ В/рад/с}$, то СКО угловой скорости платформы составит $\sigma_{\omega_{п}} \approx 0,3^\circ/\text{с}$.

Аналогично может быть оценено влияние шума гироскопа на угол рассогласования системы сопровождения:

$$\sigma_{\Delta} \approx ARW \sqrt{\frac{1}{2Q}}.$$

При таком же уровне шума МЭМС-гироскопа и добротности 50 с^{-1} СКО угла рассогласования составит $0,06^\circ$.

Под действием всевозможных периодических возмущений носитель совершает угловые колебания вокруг своего центра масс, которые приводят к появлению так называемых синхронных погрешностей (ошибок) системы сопровождения [4]. Воздействие синхронной погрешности в контуре стабилизации носителя эквивалентно действию дополнительной положительной обратной связи по угловой скорости носителя. Эта обратная связь снижает демпфирование контура управления носителем, а в некоторых случаях может привести к его неустойчивости [5], поэтому определение синхронных погрешностей систем сопровождения является немаловажной задачей. В работе предложен спектральный подход для исследования таких погрешностей.

Возникновение синхронных погрешностей связано с тем, что в процессе колебаний носителя имеет место "захват" платформы моментами сил сухого и вязкого трения, в результате чего в определенные моменты времени платформа движется как единое целое с колеблющимся носителем. Для примера на рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены графики угловой скорости платформы макетного образца системы сопровождения на качающемся основании с амплитудой 100 °/с и частотой 2,44 Гц.

В сигнале угловой скорости платформы хорошо наблюдаются моменты "захвата" платформы силами трения в моменты перехода угловой скорости стенда через ноль, что соответствует его максимальному ускорению.

Таким образом, если носитель совершает колебания по закону $\omega_n = A \sin(\omega t)$ (A , ω — амплитуда и круговая частота угловой скорости колебаний носителя соответственно), то из-за вязкого трения на платформу будет действовать гармонический возмущающий момент $Ad \sin(\omega t)$.

Что касается момента сил сухого трения, то при описании его функцией $\text{sign}(\cdot)$ гармонические колебания носителя приведут к возмущающему моменту в форме прямоугольной волны (рис. 5, см. третью сторону обложки).

При разложении прямоугольной волны $M_0 \text{sign}(\sin(\omega t))$ в ряд Фурье получим сумму гармоник с амплитудами и частотами, приведенными на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Из рис. 6 следует, что действие сил сухого трения при колебаниях основания эквивалентно сумме гармоник с частотами, кратными частоте колебаний носителя с коэффициентами 3, 5, 7, На рис. 6 приведена также единственная гармоника на частоте колебаний носителя ω , вызванная моментом сил вязкого трения. Таким образом, если следовать опре-

делению синхронной погрешности [4], т. е. погрешности, изменяющейся синхронно с колебаниями носителя, то она вызывается моментом вязкого трения и первой гармоникой от момента сил сухого трения и пропорциональна величине $Ad + \frac{4M_0}{\pi}$.

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) приведена спектральная характеристика макетного образца системы сопровождения с МЭМС-гироскопом, полученная при колебаниях стенда с частотой 2 Гц и амплитудой 200 °/с. На рис. 7 четко прослеживается гармоника на частоте колебаний стенда и кратные ей гармоники с коэффициентами 3, 5, 7, 9. Анализ данных гармоник позволяет оценить значения моментов сил вязкого и сухого трения, действующих в осях карданова подвеса, а следовательно, оценить относительную синхронную погрешность системы сопровождения $\Delta\omega_{\text{синхр}}$, которая определяется как отношение амплитуды угловой скорости платформы к угловой скорости носителя (стенда).

Теоретически относительную синхронную погрешность можно определить из передаточной функции (6):

$$\Delta\omega_{\text{синхр}} = \frac{\omega \left(d + \frac{4M_0}{\pi A} \right)}{\sqrt{(d + k_{\Gamma}k_p)^2 \omega^2 + (Qk_{\Gamma}k_p - J_0 \omega^2)^2}}. \quad (9)$$

Из данного соотношения следует, что для снижения синхронной погрешности необходимо уменьшать моменты сил сухого и вязкого трений, а также увеличивать добротность и произведение $k_{\Gamma}k_p$.

Для малых частот колебаний носителя, при $\omega^2 \ll \frac{Qk_{\Gamma}k_p}{J_0}$ и выполнении условия

$$\omega \ll \frac{Qk_{\Gamma}k_p}{d + k_{\Gamma}k_p} \approx Q \quad (10)$$

относительная синхронная погрешность приближенно может быть найдена по формуле

$$\Delta\omega_{\text{синхр}} \approx \frac{\omega (\pi Ad + 4M_0)}{\pi A Q k_{\Gamma} k_p}. \quad (11)$$

Положим коэффициент вязкого трения $d = 0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$, а модуль момента сил сухого трения $M_0 = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тогда для приведенных выше параметров системы сопровождения, на частоте колебаний основания 2 Гц с амплитудой 100 °/с, относительная синхронная погрешность составит $\approx 5 \cdot 10^{-4}$. Следует отметить, что для диапазона частот (10) синхронная погрешность увеличивается с возраста-

нием частоты колебаний носителя. Соотношение (11) также показывает, что синхронная погрешность зависит не только от сил вязкого (скоростного) трения, как это отмечается в работе [4], но и определяется модулем момента сил сухого трения.

Заключение

Приведенные аналитические соотношения в рамках одноканального подхода позволяют прогнозировать характеристики проектируемой системы сопровождения. Показано, что ключевым параметром системы является добротность по скорости, от которой зависит установившееся значение угла рассогласования между осью следящей платформы и направлением на сопровождаемый объект. Кроме того, добротность в значительной степени определяет время переходного процесса и полосу пропускания системы сопровождения.

Получено соотношение для СКО угловой скорости платформы, вызванное шумом МЭМС-гироскопа. Установлено, что синхронные погрешности системы сопровождения определяются моментами сил как вязкого, так и сухого трения. Приведенная приближенная формула позволяет оценить синхронные погрешности разрабатываемой системы.

Список литературы

1. Журавлев Л. Д., Фабрикант Е. А. Динамика систем сопровождения на подвижном основании. М.: Изд-во ЦНИИ "Румб", 1983. 90 с.
2. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 225 с.
3. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. II. Гироскопические стабилизаторы / Под ред. Д. С. Пельпора: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1977. 223 с.
4. Неусыпин А. К. Гироскопические приводы. М.: Машиностроение, 1978. 192 с.
5. Кринецкий Е. И. Системы самонаведения. М.: Машиностроение, 1970. 236 с.

Tracking System of Moving Objects on MEMS-Gyroscopes

V. V. Matveev, matweew.valery@yandex.ru, E. Yu. Kislovsky, kislovskiy@bk.ru,
D. N. Milchenko, dim2001@mail.ru, V. Ya. Raspopov, tgupu@yandex.ru, S. V. Telukhin, tgpu@yandex.ru,
M. G. Pogorelov, mzhpogoreloff@yandex.ru, V. V. Likhosherst, lvv_01@inbox.ru
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education,
Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation

Corresponding author: Matveev Valery V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education, Tula, 300012,
Tula Branch, Russian Federation, e-mail: tgupu@yandex.ru, matweew.valery@yandex.ru

Abstract

The tracking system of moving objects is analyzed on the basis of a biaxial cardan suspension with MEMS gyroscopes in the control loop. The kinematics of the tracking system in one of the guidance planes is considered. A block diagram of one channel of the tracking system, consisting of correction and stabilization circuits, is given. It is shown that the time of the transition process, the bandwidth, the phase delay between the angular velocity of the accompanied object and the platform is largely determined by the quality factor of the correction circuit speed. The given numerical estimates give an idea of the characteristics of the tracking system. Relations are given that make it possible to estimate the influence of the noise of a MEMS gyroscope on the angular velocity of a stabilized platform. The occurrence of synchronous errors of the tracking system on an oscillating carrier is explained. It is shown that the influence of dry friction forces in the axes of suspension on the tracking system is equivalent to the action of the sum of harmonics with frequencies multiple to the oscillation frequency of the carrier with odd coefficients. The effect of the moment of viscous friction forces in conditions of carrier oscillations is illustrated. An experimental spectral characteristic of the tracking system model on a swinging stand is presented, confirming the theoretical conclusions. An analytical relation is given to estimate the relative synchronous error of the tracking system.

Keywords: tracking system, MEMS gyroscope, gyro-stabilized platform, synchronous error

For citation:

Matveev V. V., Kislovsky E. Yu., Milchenko D. N., Raspopov V. Ya., Telukhin S. V., Pogorelov M. G., Likhosherst V. V. Tracking System of Moving Objects on MEMS-gyroscopes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 437–442.

DOI: 10.17587/mau.20.437-442

References

1. Zhuravlev L. D., Fabricant E. A. Dynamics of tracking systems on a rolling basis, Central Research Institute "Rumb", 1983, 90 p. (in Russian).

2. Matveev V. V., Raspopov V. Ya. Instruments and systems for orientation, stabilization and navigation on MEMS sensors, Tula, Publishing House of TSU, 2017, 225 p. (in Russian).
3. Pelpore D. S. Gyroscopic systems. Designing gyroscopic systems. Part II. Gyroscopic stabilizers. Training Allowance for universities, Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 223 p. (in Russian).
4. Neusypin A. K. Gyroscopic drives, Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 192 p. (in Russian).
5. Krinetsky E. I. Systems homing, Moscow, Mashinostroyeniye, 1970, 236 p. (in Russian).

В. М. Солдаткин, д-р техн. наук, зав. каф., w-soldatkin@mail.ru, **Е. С. Ефремова**, ассистент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (КАИ)

Особенности построения и анализ статической точности вихревой системы воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата¹

Отмечается важность информации и указываются недостатки традиционных систем воздушных сигналов, реализующих аэрометрический, аэродинамический и флюгерный методы с помощью разнесенных по фюзеляжу приемников воздушных давлений, приемников температуры торможения, датчиков аэрометрических углов атаки и скольжения.

Рассматриваются особенности построения и достоинства оригинальной вихревой системы воздушных сигналов с одним неподвижным приемником первичной информации и частотно-временными первичными информативными сигналами, построенной на основе оригинального вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с отверстием-приемником статического давления на его обтекаемой поверхности, связанного с датчиком абсолютного давления с частотным выходом.

Отмечается, что по результатам расчетов инструментальные статические погрешности измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов близки к инструментальным погрешностям традиционных систем воздушных сигналов.

Рассмотрены причины, получены математические модели и расчетные значения методических статических погрешностей измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов, которые свидетельствуют о перспективах применения системы на дозвуковых летательных аппаратах.

Ключевые слова: летательный аппарат, воздушные сигналы, измерение, вихревая система, неподвижный приемник, частотно-временные информативные сигналы, особенности построения, методические статические погрешности, модели, расчет

Введение

Полеты большого класса летательных аппаратов (ЛА), в том числе малоразмерных, беспилотных и дистанционно-пилотируемых, происходят в пределах атмосферы, и для управления ими, обеспечения их безопасности, эффективного решения полетных задач необходима информация о барометрической высоте, приборной и истинной воздушной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, о других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику движения ЛА относительно окружающей воздушной среды [1]. Современные средства измерения воздушных сигналов реализуют аэрометрический, аэродинамический и флюгерный методы и построены на основе приемников воздушных давлений, приемников температуры торможения и датчиков аэродинамических углов атаки и скольжения, распределенных на фюзеляже и вынесенных в набегающий воздушный поток за пределы пограничного слоя летательного аппарата [2, 3]. Это приводит к усложнению и увеличению массы построенной на их основе системы, нарушению аэродинамики ЛА, особенно при маневрировании. При этом восприятие, выделение, передача и преобразование первичных амплитудных информативных сиг-

налов — давлений, перепадов давлений, углов поворота, сопротивлений и напряжений — в измерительных каналах системы связано с аддитивными и мультипликативными погрешностями измерения воздушных сигналов [2, 4].

Особенности вихревой системы воздушных сигналов

Возможности достижения меньших потерь информации при восприятии, выделении, преобразовании, передаче и обработке частотно-временных информативных сигналов, формируемых одним неподвижным многофункциональным приемником, получения выходных сигналов в цифровой форме определяют перспективность работ по разработке системы воздушных сигналов, построенной на основе вихревого метода [5].

Основным конструктивным элементом вихревой системы (см. рисунок) является оригинальный вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости [6, 7], который содержит два клиновидных тела I , расположенных ортогонально друг к другу своими основаниями и встречно набегающему воздушному потоку, вектор скорости $V = -V_v$ которого равен по величине и обратен по знаку вектору V_v истинной воздушной скорости ЛА.

¹ Работа выполнена по гранту РФФИ №18-38-00094.

На тыльных поверхностях клиновидных тел расположены приемники 2 пульсаций давлений, выходы которых подключены к устройствам 3 регистрации частот f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами. Выходы устройств 3 регистрации частот вихреобразования подключены ко входу устройства обработки 4.

Для расширения функциональных возможностей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости и обеспечения измерения барометрической высоты H , температуры T_H наружного воздуха на высоте полета H , плотности воздуха ρ_H на высоте полета H , приборной скорости $V_{пр}$, числа Маха M и других связанных с ними параметров предложено [8] на верхней или нижней поверхности одного струевыпрямителя 5, например верхнего, установить отверстие-приемник 6 статического давления P_H набегающего воздушного потока, который через пневмопровод 7 связан со входом датчика 8 абсолютного давления преимущественно с частотным выходным сигналом [9]. Выход датчика 9 в виде частоты f_{PH} , пропорциональной статическому давлению P_H набегающего воздушного потока, подключен ко входу устройства обработки 4. Устройство обработки 4 выполнено в виде вычислителя, реализующего разработанные алгоритмы определения всех высотно-скорост-

ных параметров движения ЛА относительно окружающей воздушной среды.

По сравнению с традиционными вихревая система воздушных сигналов имеет следующие достоинства:

- одновременно осуществляет измерение всех воздушных сигналов, определяющих движение ЛА относительно окружающей среды;
- воздушные сигналы измеряются с помощью одного неподвижного малогабаритного приемника без искажения аэродинамики ЛА;
- измерение воздушных сигналов обеспечивается без существенного усложнения вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, без заметного повышения себестоимости вихревой системы;
- частотно-временные первичные информативные сигналы позволяют снизить погрешности из-за дрейфа нуля и изменения чувствительности элементов цепи восприятия, преобразования, передачи и обработки информации всех измерительных каналов системы;
- выходная информация по воздушным сигналам ЛА выдается в цифровой форме, что упрощает ее использование в современных бортовых системах.

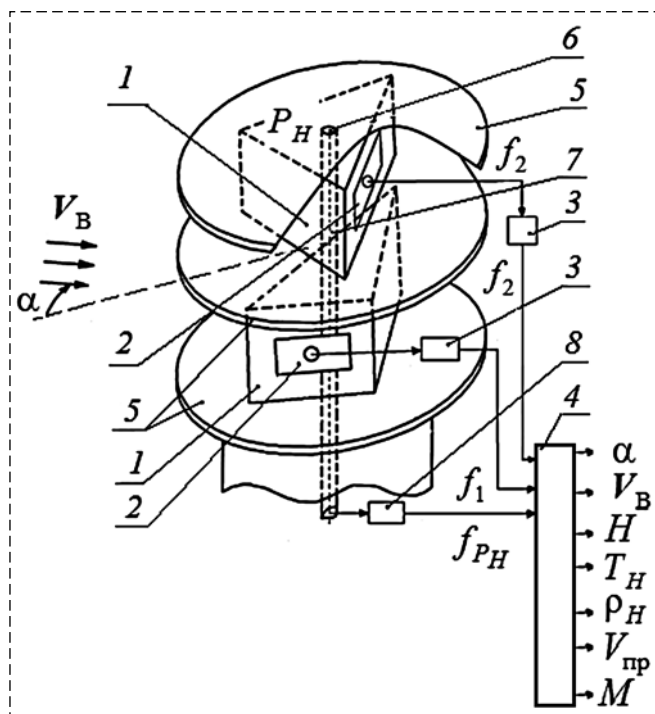
Модели и расчет статических погрешностей измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов

При анализе погрешностей измерения воздушных сигналов системы на основе вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления необходимо учитывать методические и инструментальные статические погрешности.

Как показали исследования [10], причины и расчетные значения инструментальных статических погрешностей измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов в диапазоне дозвуковых скоростей практически соответствуют инструментальным погрешностям традиционных систем воздушных сигналов.

При исследовании статической точности вихревой системы воздушных сигналов дозвукового ЛА особый интерес представляют методические статические погрешности, связанные с особенностями восприятия первичной информации вихревым датчиком и новыми алгоритмами вычисления воздушных сигналов.

Одна группа методических погрешностей вихревой системы, как и традиционных си-



Конструктивно-функциональная схема вихревой системы воздушных сигналов летательного аппарата
Structural and functional scheme of the vortex system aircraft air signals

стем [4], обусловлена аэродинамическими искажениями набегающего воздушного потока в месте установки вихревого датчика.

Из-за возмущений, вносимых движением ЛА, давление P_m в месте расположения отверстия-приемника на скользящей поверхности струевыпрямителя вихревого датчика отличается от статического давления P_H невозмущенного набегающего воздушного потока на величину аэродинамического искажения ΔP_a , т. е.

$$P_m = P_H + \Delta P_a = P_H + K_p q, \quad (1)$$

где $K_p = \overline{P_m}$ — безразмерный коэффициент местного статического давления, определяемый при летных испытаниях системы на конкретном типе ЛА для конкретного места установки вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, для всех характерных режимов полета; $q = \rho_H V_B^2 / 2$ — скоростной напор; ρ_H — плотность воздуха на высоте полета H .

Поэтому барометрическая высота H_m , определяемая в каналах вихревой системы по давлению P_m в соответствии со стандартной зависимостью [2, 4], в диапазоне высот до 11 000 м будет иметь вид

$$\begin{aligned} H_m &= \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_m}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \\ &= \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] + \left(\frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = H + \Delta H_a; \quad (2) \\ \Delta H_a &= \left(\frac{T_0}{\tau} \frac{\Delta P_a}{P_0} \right)^{\tau R} = \left(\frac{T_0}{\tau} \frac{K_p \rho_H V_B^2}{2 P_0} \right)^{\tau R}, \end{aligned}$$

где $T_0 = 288,15$ К и $P_0 = 101325$ Па — абсолютные температура и давление воздуха на высоте H , равной нулю; $\tau = 0,0065$ К/м и $R = 29,27$ м/К — температурный градиент и газовая постоянная окружающий воздушной среды; $\Delta H_a = H_m - H$ — методическая аэродинамическая статическая погрешность определения барометрической высоты из-за искажения статического давления, воспринимаемого на скользящей поверхности струевыпрямителя вихревого датчика.

Как показали расчеты, при изменении коэффициента местного статического давления K_p от 0,05 до 0,2 методическая аэродинамическая статическая погрешность ΔH_a канала барометрической высоты в диапазоне высот от 0 до 11 000 м и дозвуковых скоростей полета изменяется от $\Delta H_{a \min} = 0,75 \dots 2,5$ м, до $\Delta H_{a \max} = 4 \dots 5,2$ м.

Отклонение местного статического давления P_m , воспринимаемого на скользящей поверхности струевыпрямителя вихревого датчика, от статического давления P_H невозмущенного набегающего воздушного потока является причиной и методической аэродинамической статической погрешности канала приборной скорости вихревой системы воздушных сигналов.

Приборная скорость, вычисляемая по местному статическому давлению P_m в каналах вихревой системы воздушных сигналов самолета, будет равна

$$\begin{aligned} V_{пр}^{P_m} &= \sqrt{2gRT_0 \left(\frac{k}{k-1} \right) \times} \\ &\times \left[\left(\frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2 T_H} V_B^2 (P_H + \Delta P_a) + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \\ &= \sqrt{2gRT_0 \left(\frac{k}{k-1} \right) \times} \\ &\times \left[\left(\frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} (1 + K_p) V_B^2 + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (3) \end{aligned}$$

Тогда методическая аэродинамическая статическая погрешность $\Delta V_{пр}^{P_m}$ определения приборной скорости в месте установки вихревого датчика будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \Delta V_{пр}^{P_m} &= V_{пр}^{P_m} - V_{пр} = \\ &= \sqrt{2gRT_0 \left(\frac{k}{k-1} \right) \times} \\ &\times \left[\left(\frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} (1 + K_p) V_B^2 + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] - \\ &- \sqrt{2gRT_0 \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{\rho_0 T_0}{4P_0^2 T_H} V_B^2 + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (4) \end{aligned}$$

Как показали расчеты, значения методической аэродинамической статической погрешности $\Delta V_{пр}^{P_m}$ канала приборной скорости, обусловленной отличием местного статического давления P_m от статического давления P_H невозмущенного набегающего воздушного потока при регламентируемом значении $K_p = 0,05$ в диапазоне высот от 0 до 11 000 м и скорости полета от 50 до 1200 км/ч, изменяются от 0,35 м/с (1,26 км/ч) до 9,65 м/с (34 км/ч), т. е. составляет около 2,5...2,8 % от значения при-

борной воздушной скорости. При увеличении (уменьшении) K_p расчетные значения методической аэродинамической статической погрешности $\Delta V_{пр}^{P_M}$ пропорционально увеличиваются (уменьшаются).

Другой причиной методических аэродинамических статических погрешностей вихревой системы воздушных сигналов самолета является отличие истинной воздушной скорости, измеренной вихревым датчиком аэродинамического угла и истинной воздушной скорости в месте его установки на фюзеляже, от скорости набегающего воздушного потока.

Искажения невозмущенного воздушного потока вблизи фюзеляжа, вносимое движением ЛА, приводит к увеличению местной истинной воздушной скорости $V_{в.м}$ в месте установки вихревого датчика. Это увеличение можно оценить через увеличение скоростного напора

$P_{дин}^M = \frac{\rho_H V_{в.м}^2}{2}$ в месте расположения вихревого датчика, определяемого как $P_{дин}^M = (1 + K_V) P_{дин}$, где $P_{дин}$ — расчетное значение скоростного напора невозмущенного набегающего потока; K_V — безразмерный коэффициент, который зависит от параметров полета и определяется при летных испытаниях для характерных режимов полета ЛА [1].

Тогда формулу для определения местной истинной воздушной скорости $V_{в.м}$ можно представить в виде

$$V_{в.м} = \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \times \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} (1 + K_V) V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (5)$$

Методическую аэродинамическую статическую погрешность $\Delta V_{в.а}$ измерения истинной воздушной скорости в месте установки вихревого датчика можно оценить выражением

$$\Delta V_{в.а} = \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(1 + \frac{(1 + K_V) \rho_0 T_0}{2P_0 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} - \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (6)$$

Как показали расчеты, значения методической аэродинамической статической погреш-

ности $\Delta V_{в.а}$ канала истинной воздушной скорости для значения $K_V = 0,05$ в диапазоне высот от 0 до 11000 м при изменении скорости полета от 50 до 1200 км/ч изменяются от 0,34 м/с (1,2 км/ч) до 6,25 м/с (22,5 км/ч), при значении $K_V = 0,02$ — изменяется от 0,14 м/с (0,5 км/ч) до 2,53 м/с (9,1 км/ч), при значении $K_V = 0,01$ — изменяются от 0,07 м/с (0,25 км/ч) до 1,27 м/с (4,6 км/ч).

Температура наружного воздуха T_{H_M} , определяемая по значению истинной воздушной скорости $V_{в.м}$, измеренной вихревым датчиком, равна

$$T_{H_M} = \frac{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \times \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} (1 + K_V) V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{2gR \left(\frac{k}{k-1} \right) \times \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} (1 + K_V) V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} = T_H. \quad (7)$$

Следовательно, методическая аэродинамическая статическая погрешность измерения температуры наружного воздуха в каналах вихревой системы воздушных сигналов дозвукового самолета отсутствует.

Аналогично приборная скорость полета и число Маха также вычисляются по истинной воздушной скорости $V_{в.м}$, измеренной вихревым датчиком, с методическими аэродинамическими статическими погрешностями

$$\Delta V_{пр.а} = \sqrt{2gRT_0 \frac{k}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} (1 + K_V) V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} - \sqrt{2gRT_0 \frac{k}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}; \quad (8)$$

$$\Delta M_a = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} (1 + K_V) V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} - \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (9)$$

где $\Delta V_{\text{пр.а}} = V_{\text{пр.м}} - V_{\text{пр}}$ и $\Delta M_a = M_m - M$ — методические аэродинамические погрешности определения приборной скорости и числа Маха по информации вихревого датчика, установленного на фюзеляже самолета.

Как показывают расчеты, методическая аэродинамическая статическая погрешность $\Delta V_{\text{пр.а}}$ канала приборной скорости зависит от высоты и скорости полета. При $K_V = 0,01$, $H = 0$ и $V_B = 50$ км/ч $\Delta V_{\text{пр.а}} = 0,07$ м/с (0,252 км/ч), при $V_B = 1200$ км/ч $\Delta V_{\text{пр.а}} = 1,27$ м/с (4,6 км/ч). При $K_V = 0,01$, $H = 11000$ м и $V_B = 50$ км/ч $\Delta V_{\text{пр.а}} = 0,1$ м/с (0,36 км/ч), при $V_B = 1200$ км/ч $\Delta V_{\text{пр.а}} = 1,41$ м/с (5,1 км/ч). При $K_V = 0,02$ и $K_V = 0,05$ в исследуемом диапазоне высот и скоростей погрешности $\Delta V_{\text{пр.а}}$ пропорционально увеличиваются.

Значения методической аэродинамической статической погрешности ΔM_a канала числа Маха, обусловленной отличием местной истинной воздушной скорости $V_{B.m}$ в месте расположения вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости от истинной воздушной скорости V_B невозмущенного набегающего потока не зависит от высоты полета и при $K_V = 0,01$ изменяется от $\Delta M_a = 0$ при $V_B = 50$ км/ч до $\Delta M_a = 0,004$ при $V_B = 1200$ км/ч. При $K_V = 0,02$ методическая аэродинамическая погрешность ΔM_a в исследуемом диапазоне скоростей изменяется от 0 до 0,008.

Таким образом, искажение невозмущенного воздушного потока вблизи фюзеляжа в месте установки вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости приводит к дополнительным методическим аэродинамическим статическим погрешностям измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов самолета, которые необходимо учитывать при тарировке.

Как показывают расчеты, методические статические погрешности измерительных каналов вихревой системы воздушных сигналов дозвукового ЛА практически соответствуют статической точности современных традиционных систем воздушных сигналов [4].

Рассмотренная методика позволяет оценить методические статические погрешности измерительных каналов системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого датчика аэродинамических углов и истинной воздушной скорости со встроенным приемни-

ком статического давления и при других исходных данных.

Заключение

Таким образом, вихревая система воздушных сигналов дозвукового ЛА обеспечивает помехоустойчивое выделение, преобразование и обработку первичных частотно-временных информативных сигналов, воспринимаемых одним неподвижным многофункциональным приемником, выдачу выходной информации с требуемой статической точностью в цифровой (кодовой) форме, удобной для использования в современных системах управления и электронной индикации. Это определяет конкурентные преимущества и перспективы применения вихревой системы воздушных сигналов на самолетах малой авиации, на малоразмерных, беспилотных и дистанционно-пилотируемых ЛА различного класса и назначения.

Список литературы

1. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технология летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.
2. Боднер В. А. Приборы первичной информации. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
3. Солдаткин В. М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
4. Ключев Г. И., Макаров Н. Н., Солдаткин В. М., Ефимов И. П. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: Учеб. пособие / Под ред. В. А. Мишина. Ульяновск: Ул ГТУ, 2005. 509 с.
5. Киясбейли А. Ш., Перельштейн М. Е. Вихревые измерительные приборы. М.: Машиностроение, 1972. 152 с.
6. Патент РФ на изобретение № 2506596, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / В. М. Солдаткин, Е. С. Солдаткина. Заяв. 16.07.2012, заявка № 2012130111/28. Оpubл. 10.02.2014. Бюл. № 4.
7. Солдаткин В. М., Солдаткина Е. С. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости // Известия вузов. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 56—59.
8. Патент РФ на изобретение № 2556760, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / В. М. Солдаткин, Е. С. Солдаткина. Заяв. 21.04.2014, заявка № 201411035/28. Оpubл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
9. Солдаткина Е. С., Солдаткин В. М. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с расширенными функциональными возможностями // Известия вузов. Авиационная техника. 2014. № 4. С. 54—56.
10. Ефремова Е. С. Теоретические основы построения вихревой системы измерения высотно-скоростных параметров дозвукового летательного аппарата // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9—2. С. 166—176.

Features of Construction and Analysis of Static Accuracy of the Vortex Air Data System of Subsonic Aircraft

V. M. Soldatkin, w-soldatkin@mail.ru, E. S. Efremova, soldatkina1991@bk.ru

Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev-KAI, Kazan, 420111, Russian Federation

Corresponding author: Soldatkin Vyacheslav M., Dr. Sci., Professor, Kazan national research technical university named after A. N. Tupolev-KAI, Kazan, 420111, Russian Federation, e-mail: w-soldatkin@mail.ru

Accepted on March 05, 2019

Abstract

The importance of information is noted and the defects of traditional air data systems are described, implementing aerometric, aerodynamic and directional methods using straddled in the fuselage of the air pressure receiver, temperature braking receivers, sensors aerodynamic angles of attack and slip. The features of construction and advantages of the original vortex air data system with one stationary receiver of primary information and frequency-time primary informative signals based on the original vortex sensor of aerodynamic angle and true air velocity with a hole-receiver of static pressure on its streamlined surface associated with the absolute pressure sensor with frequency output are considered. It is noted that according to the results of calculations, the instrumental static errors of the measuring channels of the vortex air data system are close in magnitude to the instrumental errors of traditional air data systems. The reasons are considered, mathematical models and calculated values of methodical static errors of measuring channels of vortex air data system which testify to prospects of application of system on subsonic aircraft are received.

Keywords: aircraft, air signals, measurement, vortex system, stationary receiver, frequency-time informative signals, features of construction, methodic static errors, models, calculation

Acknowledgements: Work performed under grant of the Russian Foundation for Basic Research № 18-38-00094.

For citation:

Soldatkin V. M., Efremova E. S. Features of Construction and Analysis of Static Accuracy of the Vortex Air Data System of Subsonic Aircraft, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 443–448.

DOI: 10.17587/mau.20.443-448

References

1. Harin E. G., Kopylov I. A. Technology of flight tests of onboard equipment of aircraft using a complex of onboard trajectory measurements, Moscow, Publishing house of MAI-PRINT, 2012, 360 p. (in Russian).
2. Bodner V. A. Devices of primary information, Moscow, Mashinostroenie, 1981, 344 p. (in Russian).
3. Soldatkin V. M. Methods and means of measuring the aerodynamic angles of aircraft, Kazan, Publishing house of Kazan. gos. tekhn. un-t, 2001, 448 p. (in Russian).
4. Klyuev G. I., Makarov N. N., Soldatkin V. M., Efimov I. P. Measuring instruments of aerodynamic parameters of aircraft, Ulyanovsk, UIGTU, 2005, 509 p. (in Russian).
5. Kiyasbejli A. Sh., Perelshtejn M. E. Vortex Measuring Instruments, Moscow, Mashinostroenie, 1972, 152 p. (in Russian).
6. Patent of the Russian Federation for invention № 2506596, IPC G01P 5/00. Vortex sensor of aerodynamic angle and true airspeed / Soldatkin V. M., Soldatkina E. S. Claim 07/16/2012, Application No. 2012130111/28. Publ. 02/10/2014. Bul № 4 (in Russian).
7. Soldatkin V. M., Soldatkina E. S. *Izvestiya Vuzov. Aviacionnaya Tekhnika*. 2012, no. 4, pp. 56–59 (in Russian).
8. RF patent for the invention № 2556760, IPC G01P 5/00. Vortex sensor of aerodynamic angle and true airspeed / Soldatkin V. M., Soldatkina E. S. Claim 04/21/2014, Application No. 201011035/28. Publ. 07/20/2015. Bul № 20 (in Russian).
9. Soldatkina E. S., Soldatkin V. M. *Izvestiya Vuzov. Aviacionnaya Tekhnika*. 2014, no. 4, pp. 54–56 (in Russian).
10. Efremova E. S. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*, 2017, no. 9–2, pp. 166–176 (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 Н. В. Яшина.

Сдано в набор 23.04.2019. Подписано в печать 11.06.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН719. Цена договорная.

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

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

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