

13-я МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ



**6–8 октября 2020 г.
ГНЦ РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
Санкт-Петербург**

МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ ПЯТЬ КОНФЕРЕНЦИЙ,
ОБЪЕДИНЕННЫХ ОДНОЙ ИДЕЕЙ:

- XXXII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н.Н.ОСТРЯКОВА
- «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2020)
- «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ»
(МТУИП-2020)
- «УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УАКС-2020)
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.А.МИКРИНА
 - «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2020)

МАТЕРИАЛЫ ОБЩИХ ПЛЕНАРНЫХ ЗАСЕДАНИЙ 6 ОКТЯБРЯ

Санкт-Петербург
2020

УДК 681.51

Материалы общих пленарных заседаний 13-й мультиконференции по проблемам управления.
СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. 65 с.

Сборник содержит тексты пленарных докладов, представленных на общих пленарных заседаниях 13-й мультиконференции по проблемам управления.

Тексты докладов публикуются в авторской редакции.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ» ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
- УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РАН
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А.ТРАПЕЗНИКОВА РАН
- ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВМФ «ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ АДМИРАЛА ФЛОТА СОВЕТСКОГО СОЮЗА Н.Г.КУЗНЕЦОВА»
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ («ГОСНИИАС»)
- РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ «ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П.КОРОЛЁВА
- АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»
- РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»
- ЖУРНАЛА «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА

13-Й МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
АКАДЕМИК РАН **В.Г. ПЕШЕХОНОВ**

XXXII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ Н.Н.ОСТРЯКОВА

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА
АКАДЕМИК РАН **В.Г. ПЕШЕХОНОВ**

ЗАМЕСТИТЕЛИ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **О.А. СТЕПАНОВ**
К.Т.Н. **А.В. СОКОЛОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» (МТУиП-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **Д.А. НОВИКОВ**
Д.Ф.-М.Н., ПРОФ. **Н.В. КУЗНЕЦОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **В.Н. ВАСИЛЬЕВ**
Д.Т.Н., ПРОФ. **В.Н. ШЕЛУДЬКО**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **Р.М. ЮСУПОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УАКС-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
АКАДЕМИК РАН **С.Ю. ЖЕЛТОВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **В.А. СОЛОВЬЕВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **М.В. СИЛЬНИКОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
АКАДЕМИК РАН **Е.И. ЯКУШЕНКО**
АКАДЕМИК РАН **С.Н. ВАСИЛЬЕВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **А.Ф. ЩЕРБАТЮК**

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ПЛЕНАРНЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

И.В. Бычков, С.А. Ульянов, Н.В. Нагул, А.В. Давыдов, М.Ю. Кензин, Н.Н. Максимкин Иерархическое событийное управление группой роботов в неструктурированной динамической среде	6
В.И. Городецкий, Р.М. Юсупов Искусственный интеллект – наука и информационная технология: настоящее и будущее	10
В. Рэсван Линейно-квадратичные задачи («линейные» методы в теории нелинейных систем)	22
Н.В. Кузнецов Границы глобальной устойчивости систем управления в теории и приложениях	25
А.С. Солонар Основные проблемы траекторной обработки и подходы к их решению в рамках задачи многоцелевого сопровождения	28
В.А. Соловьев Памяти Евгения Анатольевича Микрина	32
В.А. Соловьев Система управления полетами пилотируемых космических комплексов	42
В.Г. Пешехонов Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации	45
А.А. Голован Интегрированные решения «БИНС–одометр»: один из проектов лаборатории управления и навигации МГУ	48
В.В. Косьянчук, С.Ю. Желтов, Е.Ю. Зыбин Новые способы обеспечения отказоустойчивости системы управления летательного аппарата в условиях структурно-параметрической неопределенности	54
М.В. Сильников Применение технологии электровзрыва для защиты морских подвижных объектов от средств обнаружения и поражения морским оружием	59
С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов Проактивное управление информационными процессами в промышленном интернете	62

И. В. БЫЧКОВ, С. А. УЛЬЯНОВ, Н. В. НАГУЛ, А. В. ДАВЫДОВ,
М. Ю. КЕНЗИН, Н. Н. МАКСИМКИН
(Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова, Иркутск)

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ СОБЫТИЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ РОБОТОВ В НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Эффективное и автономное выполнение многоцелевых миссий с использованием группы мобильных роботов предполагает использование развитой системы управления, обычно состоящей из множества подсистем, выстроенных в иерархию. В докладе с целью унификации взаимодействия отдельных компонент предлагается основанная на событиях иерархическая система управления робота и демонстрируется ее применимость для решения ряда актуальных робототехнических задач: планирования пути, управления формациями, групповой маршрутизации и планирования действий.

Введение. Автономное выполнение многоцелевых групповых миссий в неизвестной среде возможно только при наличии у роботов развитой системы управления, которая, как правило, является многоуровневой. Большинство известных архитектур ориентированы на решение конкретных задач и имеют проблемы с масштабированием. Предлагаемый доклад посвящен разработке иерархической событийной системы управления, обеспечивающей решение широкого спектра актуальных задач: планирования пути, управления формациями, групповой маршрутизации и планирования действий. Основным компонентом системы является дискретно-событийная система (ДСС). Вопросы строгого анализа логических ДСС также затрагиваются в докладе.

Событийная система управления. Для эффективной реализации совместных операций предполагается, что каждый робот в группе имеет иерархическую систему управления, состоящую из трех уровней (рис. 1). Функция нижнего уровня – исполнение алгоритмов управления, соответствующих текущему режиму работы группы, который определяется средним (тактическим) уровнем. Планировщик на среднем уровне определяет способ выполнения текущей задачи, полученной в результате стратегического планирования на верхнем уровне. Планировщик верхнего уровня выполняет пространственно-временную декомпозицию миссии на последовательность задач (действий или заданий). Многокомпонентная ДСС обеспечивает подходящую реакцию на обнаруженные события путем анализа данных от датчиков и информации, полученной от других роботов. Изменение состояния ДСС может инициировать как пересчет управляющих воздействий на нижнем уровне, так и перепланирование пути на среднем уровне.

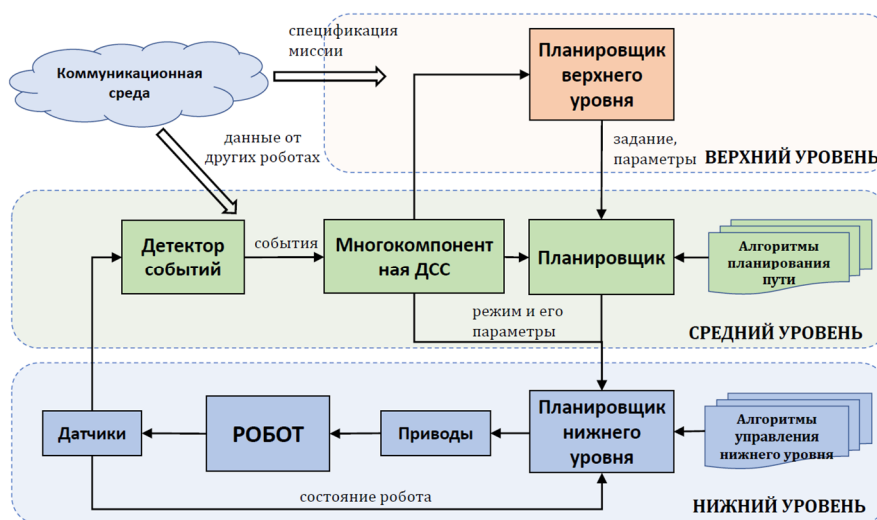


Рис. 1. Архитектура иерархической системы управления группой роботов

Исчисление позитивно-образованных формул (ПОФ) в супервизорном управлении ДСС. В конце 1980-х годов для ДСС в автоматной форме была создана теория супервизорного управления (ТСУ). ТСУ предполагает, что некоторые события могут быть запрещены устройством управления, называемым супервизором, чтобы ограничить поведение системы в соответствии с заданным набором ограничений. Подробный обзор современного состояния ТСУ можно найти в [1]. Поскольку многие вопросы ТСУ остаются открытыми, для их решения предлагается применить логический вывод в исчислении ПОФ как средство интеллектуализации алгоритмов построения и исследования ДСС. Общий вид ПОФ, представляющего некоторый конечный автомат, состоит из единственной базы, содержащей атомы, соответствующие состояниям автомата, его переходам, начальному и маркированным состояниям. Последние используются как метки завершенных системой задач.

Решающую роль в ТСУ играет понятие управляемости, поскольку только управляемые языки могут быть в точности достигнуты совместным поведением управляемой системы и супервизора. Для проверки условия управляемости строится произведение автоматов, описывающих систему и спецификацию на ее поведение, затем оценивается наличие одинаковых неуправляемых переходов в спецификации и системе. Эта идея заимствована для проверки управляемости с помощью ПОФ, причем произведение автоматов, так же как и их параллельная композиция, могут быть построены в процессе вывода соответствующей ПОФ. В случае нарушения управляемости вывод ПОФ позволяет автоматически построить наибольший управляемый подязык спецификации как новые, гарантированно выполнимые ограничения на систему. Супервизор затем реализовывается с помощью новой ПОФ, в процессе вывода которой моделируется поведение системы под действием управления. Накопление в базе ПОФ в ходе вывода фактов позволяет использовать их для автоматической модификации системы или спецификации. Дальнейшее развитие подхода к ДСС на основе ПОФ позволит эффективно решать важные задачи ТСУ, такие как построение централизованных и децентрализованных супервизоров, а также создание и исследование ДСС с частичным наблюдением.

Задача планирования пути в неизвестной среде. Успешное выполнение отдельных этапов сложной многоцелевой миссии невозможно без наделения робота способностью коррекции своего движения в режиме реального времени с целью избежания столкновений с препятствиями. В докладе исследуется постановка задачи планирования пути, в рамках которой робот должен следовать по заданной опорной траектории и обходить препятствия, обнаруживаемые локатором секторного обзора. Для решения этой задачи предложен событийный подход, центральным компонентом которого является ДСС, ответственная за выявление ситуаций, требующих изменение текущего пути. Выделены два типа действий, которые выполняются при изменении состояния ДСС: действия, обеспечивающие построение траектории обхода препятствия с помощью модификаций алгоритмов, предложенных в [2], и действия, генерирующие путь для возврата робота на опорную траекторию на основе кривых Дубинса [3]. Генерируемые пути являются гладкими и удовлетворяют кинематическим ограничениям, которые задаются минимальным радиусом поворота. Эффективность разработанного подхода подтверждается результатами численных экспериментов.

Задача управление формацией. Традиционно выполнение различных поисковых и исследовательских работ предполагает движение группы роботов вдоль заданной траектории с сохранением желаемой формации. С целью уменьшения нагрузки на каналы связи и бортовые вычислительные устройства в докладе разработан основанный на схеме лидер-ведомый децентрализованный алгоритм управления формациями роботов. Он использует механизмы, обеспечивающие установление сеансов связи между роботами и пересчет их управляющих сигналов лишь при возникновении определенных событий, условия срабатывания которых проверяются как на стороне лидера (для инициации соединения), так и на стороне ведомых (для пересчета управления). Неизвестные параметры в алгоритме для типовых формаций синтезированы по критерию минимума ошибки стабилизации ведомых с применением модификаций алгоритмов [4], основанных на векторных функциях Ляпунова, с учетом неопределенности параметров робота, ошибок измерений и насыщения управления. Проведены численные расчеты, демонстрирующие высокое качество предложенных алгоритмов.

Задача планирования групповых маршрутов. В качестве задачи планирования миссии группы роботов на верхнем уровне рассматривается задача многоатрибутной маршрутизации в оригинальной постановке. Работа группы в данном случае заключается в своевременном обследовании заданного набора целей в соответствии с установленным расписанием и при действующем наборе ограничений. В качестве требований к обследованию каждой цели могут выступать, в различном сочетании, пространственные (местоположение, размеры) и временные ограничения (допустимые временные окна, периодичность и длительность обслуживаний), а также ограничения обслуживания (требуемое количество роботов, наличие оборудования) [5].

Действующая группа состоит из параметрически и функционально разнородных роботов. На каждом периоде маршрутизации роботы начинают движение в установленной области сбора, периодически возвращаясь туда для проведения сеансов связи. Такие сеансы связи позволяют обеспечить регулярный обмен актуальными данными внутри группы и возможность распределенного планирования групповой стратегии на ближайший период маршрутизации.

Ставится задача генерации такого допустимого группового маршрута на один период маршрутизации, который обеспечивал бы своевременное обследование большинства целей, насколько это позволяет текущая конфигурация группы и действующие ограничения.

Для решения предложенной задачи предлагается использовать модификацию гибридных эволюционных алгоритмов. Применение набора специализированных эвристик, а также ряда проблемно-ориентированных процедур локального поиска и дополнительных схем по улучшению маршрутов позволяет добиться высокоэффективной генерации решений, близких к оптимальному (погрешность не более 1,3%), даже для самых сложных тестовых примеров.

Задача планирования действий. В этом разделе представляются возможности применения исчисления ПОФ для планирования действий группы роботов при коллективном выполнении заданий на примере задачи совместного передвижения блоков. ПОФ формализация данной задачи понимается как спецификация миссии для роботов, а результатом автоматического поиска вывода по этой спецификации будут последовательные планы действий.

Рассматривается некоторая рабочая среда для роботов в виде плоской платформы ограниченного размера. Задача формализуется в виде нехорновской ПОФ, состоящей из базы, которая до начала поиска вывода содержит факты о начальном положении объектов на сцене, а также вопросов-правил, отвечающих за распределение целей для группы роботов, передвижение роботов к целям и перемещение блоков к целевой области. За остановку поиска вывода отвечает целевой вопрос-правило, сравнивающий координаты целевой области с текущими координатами блоков. Для сокращения пространства поиска при логическом выводе используется эвристика, осуществляющая проверку расстояния между текущим положением робота и назначенной целью. Предполагается, что при полном построении вывода в опровергнутых базах будут накапливаться факты, отражающие последовательные изменения состояния сцены. При этом извлечь оттуда минимальные планы будет довольно легко.

Заключение. В докладе представлена общая концепция иерархической модели для событийной системы управления группой роботов при выполнении многоцелевых динамических миссий. Предложены методы и алгоритмы для реализации различных блоков и уровней представленной архитектуры. В дальнейшем планируется проведение как модельных, так и практических экспериментов для отработки сценариев с комплексным групповым взаимодействием.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00397.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wonham, W.M., Cai, K.,** Supervisory Control of Discrete-Event Systems, NY: Springer, 2019. 487 pp.
2. **Yan, Z., Li, J., Zhang, G., Wu, Y.,** A Real-time reaction obstacle avoidance algorithm for autonomous underwater vehicles in unknown environments, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2.
3. **Dubins, E.L.,** On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangent, *American Journal of Mathematics*, 1957, vol. 79, no. 3, pp. 497–516.
4. Vassilyev, S., Ulyanov S., Maksimkin N. A VLF-based technique in applications to digital control of nonlinear hybrid multirate systems, *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1798:1, p. 020170.
5. **Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimaranes, D., Riera, D., Juan, A.A.,** Rich vehicle routing problem: Survey, *ACM Computing Surveys*, 2014, vol. 47, no.2, pp. 1–28.

I.V. Bychkov, S.A. Ulyanov, N.V. Nagul, A.V. Davydov, M.Yu. Kenzin, N.N. Maksimkin (ISDCT SB RAS, Irkutsk)

HIERARCHICAL EVENT-BASED CONTROL OF MULTI-ROBOT SYSTEMS IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

The presence of the advanced control system is an essential requirement to achieve high performance and reliability in autonomous multi-robot missions. In general, such systems are assumed to be hierarchical and consist of several subsystems. To unify the interaction of individual components, an event-based control system has been developed to provide solutions to several challenging robotic problems: path planning, formation control, group routing and action planning.

В. И. ГОРОДЕЦКИЙ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург)

Р. М. ЮСУПОВ

(Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург)

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ – НАУКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Искусственный интеллект рассматривается как самостоятельная наука и как раздел информатики, в котором принятие решений основывается на знаниях, а его научное содержание определяется методологиями, методами и алгоритмами работы со знаниями. В работе проводится краткий анализ состояния исследований и разработок в области искусственного интеллекта на современном этапе и анализируются основные актуальные направления развития в этой области, которые, по мнению авторов, определяют ближайшее будущее искусственного интеллекта как науки и информационной технологии и дорожную карту исследований и прикладных разработок в этой области.

Введение. Научное направление в информатике, называемое метафорически «искусственный интеллект» (ИИ), а также интеллектуальные информационные технологии (ИТ), построенные с использованием методов и моделей ИИ, в настоящее время признаются стратегическим ресурсом, научной и технологической основой самых передовых решений в области цифровой экономики 21-го века. Рейтинговое агентство Gartner и другие аналогичные агентства неизменно включают ИИ в пятерку наиболее значимых направлений развития в области ИТ до 2025 года и далее, подчеркивая при этом его первостепенную роль в экономике и других сферах жизни общества и отдельного человека. Интеллектуальные ИТ рассматриваются в качестве базиса передовых решений в производственных системах, на транспорте, в управлении энергопотреблением, в мобильных коммуникациях, управлении развитием городов, медицине и здравоохранении, в точном земледелии и в социологии, как и во многих других направлениях. Ведущие экономики мира вкладывают огромные средства в исследования и разработки в области ИИ и интеллектуальных технологий, принимают и реализуют национальные программы его развития.

Это относится и к России – в 2019 году была принята *Национальная стратегия развития технологий в области искусственного интеллекта* (далее, для краткости, НС) [1]. В научном сообществе существуют разные мнения о ней, в частности о ее содержании и расстановке приоритетов. Однако следует признать, что в настоящее время и среди ученых и специалистов в области информатики и ИТ нет единого мнения об ИИ как науке, нет единого мнения об объекте и о структуре исследований и разработок в области ИИ, о его специфической методологической баз. Это и ведет к неоднозначному мнению о сути технологий ИИ и к разным оценкам НС.

В НС искусственный интеллект определяется как «комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека, получая результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека» [1]. Эта позиция отражает мнение авторов НС. Другие представители ИИ настаивают на «ведущей роли компьютерных наук в развитии искусственного интеллекта» и утверждают, что основная проблема разработки комплекса технологических решений, о котором идёт речь в НС, прежде всего, в архитектуре и программном обеспечении самих интеллектуальных вычислителей [2]. Существуют и другие трактовки существа ИИ, которые, как правило, отражают научные приоритеты коллективов исследователей в различных областях, связанных каким-то образом с ИИ, например в области когнитивных проблем, в области информатики мозга (англ. *Brain Informatics*) и др.

Искусственный интеллект в данной работе рассматривается как наука из кластера наук, объединяемых общим названием «Информатика». В этом контексте ИИ трактуется авторами как раздел информатики, в котором принятие решений основывается на *знаниях*, а его научное содержание определяется методологиями, методами и алгоритмами работы со знаниями, а именно методами и алгоритмами *получения*, компьютерного *представления* и практического *использования знаний* в прикладных системах принятия решений. В этом контексте «комплекс техно-

логических решений», о котором идет речь в НС, есть множество технологий работы со знаниями.

ИИ как *раздел информатики* не ставит цели воспроизведения естественного интеллекта человека с какой-то мерой аналогии и не претендует на создание альтернативы естественному интеллекту. В работе принимается предположение о том, что использование знаний является основной отличительной чертой методов принятия решений в системах ИИ. Это относится к любым методам ИИ, включая и те, которые в настоящее время трактуются как аналоги процессов принятия решений человеком. При этом алгоритмическое содержание или степень сходства процессов принятия решений с методами принятия решений человеком в ИИ играют второстепенную роль. Они могут быть совсем непохожими на методы принятия решений человеком, а могут быть и в чем-то аналогичными им. В *рамках ИТ* термин ИИ используется в качестве *метафоры*, т.е. просто в качестве имени, которое представляется общепринятым в среде специалистов и которое выделяет в информатике ту ее часть, которая работает со знаниями.

В работе приводится мотивация принятого взгляда на ИИ и анализируются его связи в контексте наук об управлении и наук биологического кластера. Целью работы является анализ содержания и структуры ИИ как науки в области информатики и ИТ на современном этапе ее развития, а также анализ основных направлений и трендов развития ИИ, которые, по мнению авторов, определяют ближайшее будущее ИИ и интеллектуальных ИТ и которые могут быть положены в основу *дорожной карты* среднесрочной перспективы развития ИИ.

Искусственный интеллект и контексте кибернетики, информатики и биологических наук. Строго очертить какое бы то ни было научное направление невозможно в принципе, и доказательством тому служат многочисленные безуспешные попытки представить иерархическую классификацию науки, встроить в нее в таком же стиле новые междисциплинарные проблемы и новые научные направления, которые появляются регулярно. Еще сложнее было бы описать как-то строго науку «Искусственный интеллект», в название которой входит такой очень неопределенный кросс-доменный термин, как «интеллект», используемый в ряде наук, причем в разных науках в различном смысле.

Важно отметить, что термин «искусственный интеллект» как название науки и начальный взгляд на его цели и содержание были сформулированы кибернетиками и как направление в кибернетике (Дартмутский семинар, 1957 г., Дж. Маккарти, М. Мински, К. Шеннон). Содержание ИИ не было связано напрямую с интеллектом человека. Действительно, согласно Дж. Маккарти, ИИ-исследователи вольны «использовать методы, которые не наблюдаются у людей, если это необходимо для решения конкретных проблем» [3]. В этой цитате самыми важными являются слова «для решения конкретных проблем». Это подчеркивает тот факт, что сам термин «искусственный интеллект» для основателей ИИ как научного направления не являлся важным, гораздо важнее было содержание, которое в него вкладывалось ими.

Автор термина ИИ Дж. Маккарти описал его как интеллект «вообще» – это «вычислительная» составляющая того, что помогает субъекту достигать заданных целей. Это значит, что для создания или развития интеллектуальных информационных технологий и систем ИИ человеку, с точки зрения Дж. Маккарти, и не надо разбираться в том, как именно работает его мозг.

Важно также отметить, что в том же 1957 году Ф. Розенблатт, специалист в области психологии и нейрофизиологии, предложил модель перцептрона как компьютерную модель восприятия информации мозгом человека. Эта модель, как оказалось, весьма далека от модели восприятия и обработки информации мозгом человека, но стала прототипом современных нейросетей и положила начало направлению в ИИ, которое позже стали называть *коннекционизмом*. Важно также отметить, что исследователи в области нейробиологии, психологии, философии сознания и других наук биологического и психологического кластеров использовали термин «интеллект» как синоним термина «человеческий интеллект», причем это имело место задолго до появления вычислительного взгляда на этот термин в контексте информатики и ИИ.

В процессе более чем 60-летних исследований и разработок в области ИИ изменялось содержание его задач и существо его методов, было создано обширное множество инструментов для исследований, претерпела сильные изменения и приоритетность разделов ИИ.

Анализ показывает, однако, что большинство противоречий в трактовке существа науки под названием Искусственный интеллект состоит в том, что каждый пытается наделить этот термин

смыслом, который он вкладывает в слово *интеллект*, хотя в составе термина *искусственный интеллект* это просто метафорическое название, которое придумали его родоначальники. Заметим, что этот термин появился в английском языке, в котором метафорические названия – это общепринятая норма в научной среде.

Причины существующего многообразия трактовок термина «искусственный интеллект» во многом обусловлены также тем местом, которое занимает эта наука в контексте других наук, большинство из которых появилось задолго до 1957 года, когда был введен этот термин. Например, на рис. 1 иллюстрируется место ИИ в контексте наук кибернетического кластера [4], а рис. 2 иллюстрирует место ИИ в контексте наук биологического кластера.

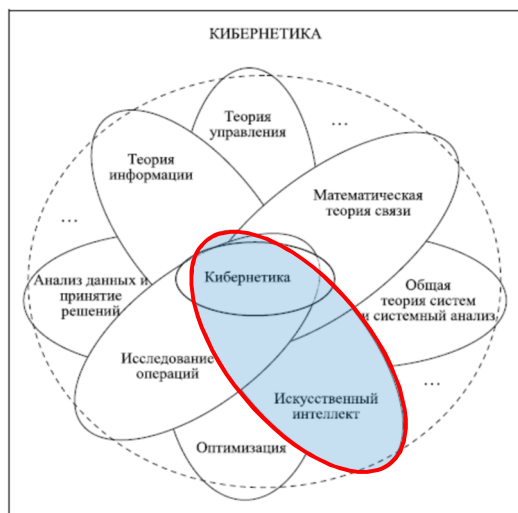


Рис. 1. Место искусственного интеллекта в контексте наук кибернетического кластера



Рис. 2. Место искусственного интеллекта в контексте наук биологического и психологического направлений.

Из этих рисунков видно, что ИИ – это междисциплинарная наука. В ней используются результаты многих наук, например практически весь спектр кибернетики, математики, статистики, компьютерных наук, коммуникаций, психологии, физиологии, биологии, нейробиологии, философии сознания, информатики мозга, социальных наук и др. С другой стороны, все эти науки в разной форме используют понятия и/или результаты ИИ, и, что важно, у этих наук и у ИИ много общих терминов, которые звучат одинаково. Однако содержание этих терминов, как правило, различно, причем наибольшие различия имеют место именно в трактовке смысла базового термина «интеллект». По этим причинам специалисты этих наук со своих позиций трактуют и суть ИИ как науки, причем необязательно в контексте информатики. В настоящее время эта неопределенность в трактовке имеет хождение и в среде специалистов, которые занимаются исследованиями и разработками ИИ и приложений в области информатики [5].

На рис. 3 образно демонстрируется связь ИИ с науками биологического кластера и вычислительного кластера. На нем вся область методологий, методов и алгоритмов, применяемых в ИИ, условно представлена эллипсом в центре рисунка, и этот эллипс разделен вертикальной линией на две части. Пусть в эллипсе «Искусственный интеллект» справа от этой линии помещены методологии и методы, заимствующие те или иные идеи из биологических наук, причем чем больше в них, условно говоря, «биологического», тем правее они в этом эллипсе размещаются. Тогда ближе к разделительной линии нужно будет разместить биоинспирированные алгоритмы оптимизации и самоорганизации, поскольку по своему существу это формальные методы случайного поиска с метаэвристиками, заимствованными у природы. В самой правой части эллипса нужно будет разместить когнитивные науки и современный коннекционизм, в частности нейросети глубокого обучения, которые, как сейчас многие считают, ближе других моделей ИИ к процессам обучения и принятия решений, которые свойственны головному мозгу человека.

Еще правее (см. рис. 3) к этим исследованиям примыкают исследования в области информатики мозга, нейробиологии и другие, которые иногда называют когнитивными науками [6], в которых также активно используются идеи коннекционизма.



Рис. 3. Место искусственного интеллекта в контексте наук биологического и психологического направлений (справа) и его связь с вычислительным интеллектом (слева)

К полярной (по отношению у наукам биологического кластера) области ИИ как научного направления в информатике следует отнести вычислительный интеллект [2], который очень далек от когнитивных моделей и который акцентирует внимание на эффективной реализации вычислительных моделей ИИ с помощью программно-аппаратных реализаций и суперкомпьютеров. На рис. 3 этот аспект ИИ позиционируется в левой части. Действительно, использование высокоскоростных компьютеров и параллельных программно-аппаратных реализаций ИИ предоставляет новые технологические возможности по сравнению с вариантами программной реализации моделей ИИ на обычных компьютерах. Хорошо известно, что победы, одержанные шахматными программами и программами игры в Го над профессионалами, были бы невозможны без использования суперкомпьютеров. А эти достижения *относят* к достижениям ИИ.

Однако основная область задач, моделей методов, алгоритмов, инструментов и технологий современного ИИ как раздела информатики находится между двумя названными выше компонентами ИИ (рис. 3). Системы ИИ, которые относятся к этой области и которые охватывают большую часть того, что принято называть методами ИИ, часто называют также системами, основанными на знаниях. В среде специалистов уже относительно давно оба эти названия отождествляют, а сам термин *знания* в литературе по ИИ используется чаще других.

Знания как объект исследований и разработок в ИИ. Знания как объект исследований, разработок и использования всегда присутствуют в прикладных системах и технологиях ИИ в отличие от систем и технологий других типов. При этом *знания* составляют ядро любой интеллектуальной системы, и именно знания (их объем, корректность, полнота и др.) и используемые методы работы с ними определяют потенциальные возможности конкретной интеллектуальной системы. С другой стороны, термин «знания» является ключевым словом и при описании интеллекта человека. В работе [7] один из ее авторов, Д.А. Поспелов, наиболее авторитетный специалист ИИ в СССР и России, в разделе «Становление информатики в России» рассматривает ИИ как раздел информатики и характеризует его как «представление знаний, вывод на знаниях, обучение, экспертные системы и т.п.» (стр. 8), а ИИ – как «технологии решения задач, опирающиеся на идею использования знаний о предметной области» (стр. 37). По существу, Д.А. Поспелов, во-первых, однозначно выделяет знания как объект исследований в ИИ и, во-вторых, различные задачи работы со знаниями – как основные направления исследований в этой науке.

Ключевая роль знаний в информационных технологиях ИИ состоит в том, что именно благодаря их использованию стало возможным эффективное решение многих вычислительных задач, которые являются задачами экспоненциальной сложности. Знания – это ключевое понятие ИИ, и работа со знаниями является отличительной чертой системы ИИ по отношению к компьютерным системам других классов. Именно *знания* являются основным *объектом исследований* в ИИ.

Анализ научной литературы в области ИИ показывает, что основные исследования и разработки в ИИ концентрируются вокруг трех проблем работы со знаниями, а именно:

- получение знаний,
- представление и преобразование знаний и
- использование знаний.

Далее обсуждается содержание и состояние исследований и разработок по этим проблемам в настоящее время.

Современное состояние исследований и разработок в ИИ. Перечисленные направления исследований в области ИИ охватывают практически все задачи ИИ. Рассмотрим кратко их научное содержание и современное состояние исследований и разработок в них.

Получение знаний. Существуют различные и разнообразные *источники знаний*, которые привлекаются при решении задач получения знаний (рис. 4). К ним в первую очередь относятся эксперты. На рис. 4 типы экспертных источников знаний отображены в нижней его части. Весьма продуктивными источниками знаний являются также данные, в особенности большие данные. На рис. 4 такие источники знаний представлены в его верхней части.

Для получения знаний из названных источников привлекаются разнообразные методы, алгоритмы и программные инструменты, известные из математики и математической статистики. Исследователями в области ИИ созданы также свои специфические методы, алгоритмы и инструменты для решения задач извлечения знаний. Методы извлечения и структурирования *знаний экспертов* обычно относят к области *инженерии знаний* [8]. Для получения знаний из данных кроме стандартных методов математической статистики разработано огромное множество подходов, алгоритмов и инструментов, которые можно разделить на несколько групп, а именно (1) обнаружение связей и зависимостей в данных без акцента на их будущее использование (англ. *Data Mining*); (2) машинное обучение (англ. *Machine Learning*), которое реализуется в контексте конкретного приложения; (3) эволюционное машинное обучение с подкреплением – класс методов управляемого случайного поиска (англ. *Reinforcement Learning*); (4) эвристические методы оптимизации с использованием биоинспирированных метаэвристик (генетические алгоритмы случайного поиска, муравьиные алгоритмы и т.п.). Если коннекционизм и нейросетевые модели принятия решений относить к направлению ИИ, то в качестве еще одного класса методов, алгоритмов, технологий и инструментов извлечения знаний из данных следует назвать (5) современные методы, структуры и технологии глубокого обучения (англ. *Deep Learning*).

Можно утверждать, что чисто технические аспекты получения знаний с использованием перечисленных источников и с применением пяти указанных классов методов к настоящему времени решены, и решены успешно. Однако главный тренд в этой области – это извлечение *семантики* знаний и технологии ее практического использования в рамках концепции семантических моделей знаний и семантических вычислений. Этот тренд формулирует новые задачи для каждой из трех базовых проблем ИИ как раздела ИТ. На этапе получения знаний важным направлением исследований становится поиск и формирование источников семантической информации.

Термины *семантические модели* и *семантика знаний* стали активно использоваться в научной литературе по ИИ примерно 30 лет тому назад, когда были опубликованы первые работы, в которых было введено понятие *онтологии* как базовой модели концептуализации и *формализации семантики* данных и знаний, предложена ее структура и уточнена роль в системах представления и обработки данных и знаний в системах ИИ [9].

Если говорить совсем кратко, то семантические модели, семантические технологии – это достаточно общие термины, которые применяют к программному обеспечению, которое имеет некоторый, иногда даже совсем минимальный уровень «человеческого» понимания смысла информации, с которой программа имеет дело. По аналогии с семантикой естественного языка в ИИ термин *понимание* неявно трактуется как аналог понимания смысла информации, данных и знаний человеком. Например, о семантической модели данных можно говорить уже в том случае, когда с поисковым запросом, в котором имеется ключевое слово *птица* программа поиска возвращает текст, содержащий слово *орел*. Можно сказать, что переход к использованию се-

математических моделей означает, что текст, представляющий, например, данные, становится не только *машиночитаемым*, но также и *машинопонимаемым*.

Рис. 4 иллюстрирует базовые источники знаний о семантике понятий и текстов, а также инструменты, которые в настоящее время доступны специалистам для решения задач инженерии знаний. Исторически первым таким источником стали онтологии и хранилища данных *семантического веба* в терминах триплетов «*субъект – предикат – объект*» [10]. Эта концепция была впервые опубликована в 1998 г. и в настоящее время она реализована в международном проекте Веб-связанных данных (англ. *Linked Data Web*) и широко используется в индустрии. Его инструменты, доступные в настоящее время для получения знаний, включают широкий спектр средств, объединенных на рис. 4 в блок *Инструменты извлечения знаний и их семантики*.

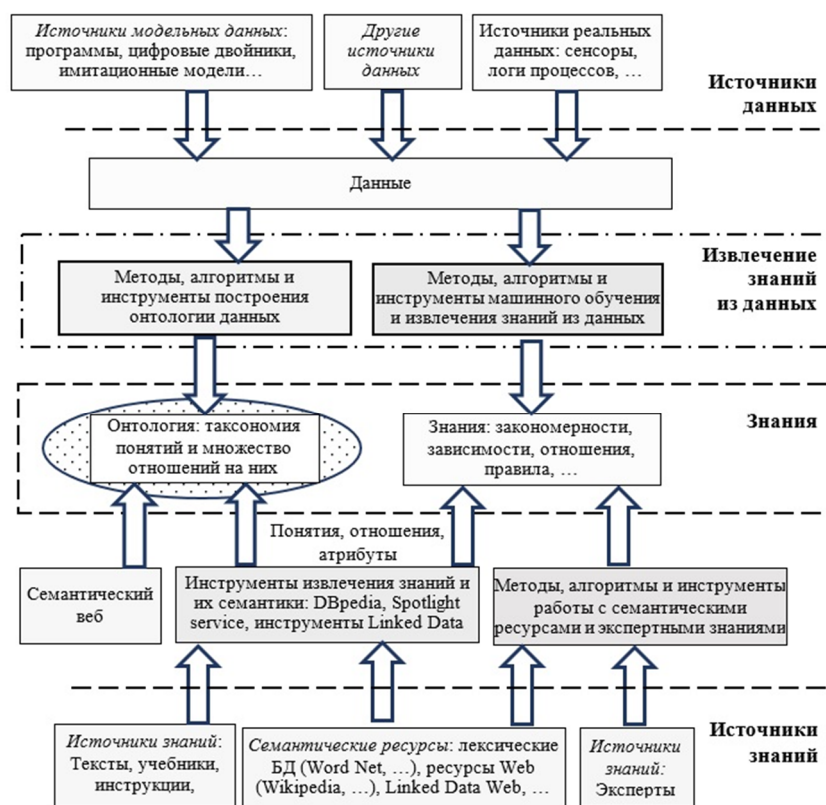


Рис. 4. Источники данных и знаний, доступные для построения онтологий и других компонент знаний, группы методов и инструментов автоматизации процессов конструирования баз знаний и данных

Представление и преобразование знаний и данных. Концептуальная модель знаний не может быть использована компьютером напрямую, поскольку машинный язык – это язык бинарных последовательностей. Описание знаний концептуального уровня на некотором формальном языке, которое может быть далее формально преобразовано в машиночитаемую форму – это и есть задача *представления знаний*. Другими словами, под представлением знаний понимается их спецификация в терминах конкретных структур, представленных на формальном языке, тексты которого могут быть транслированы автоматически в машиночитаемую форму. Несколько упрощая, можно сказать, что задача данного этапа – это преобразование знаний из формального представления, понятного человеку, в форму, понятную компьютеру. На этом этапе знания и данные, описанные, например, текстами на ЕЯ или представленные в другой форме, понятной человеку, преобразуются в машиночитаемую форму. В современной концепции семантических вычислений эта форма должна быть также машинопонимаемой.

История развития моделей представления знаний в ИИ достаточно богатая. На этом пути было предложено много моделей. Развитие начиналось с моделей семантических сетей и, пройдя примерно тридцатилетнюю историю развития, которая является историей проб и ошибок, остановилось на той же самой модели семантической сети. Сейчас ее принято называть онтологией.

Эта модель в настоящее время имеет два основных варианта структур представления. Один из них – это представление знаний и данных в хранилищах RDF-триплетов с моделью онтологии на метауровне и ее описанием на одном из языков группы RDF, RDF-Schema и OWL [10, 11]. Второй вариант представления – это структуры типа *LPG*, *Labelled Property Graph* (на русском языке – *граф разметки свойств*). *LPG*-структуры онтологии представляются в современных СУБД, которые называют *графовыми базами данных*. Таких СУБД в настоящее время насчитывается более десятка, среди которых наиболее зрелыми и мощными являются СУБД с открытым кодом Neo4j и ORIENT DB. Эти СУБД реализуют онтологии со встроенной семантикой.

В основу современного формального описания онтологии в настоящее время положен специально сконструированный разрешимый фрагмент логики предикатов первого порядка, а иногда и его расширения с помощью модальных операторов. Соответствующее семейство логических формализмов для описания знаний, представленных онтологиями, называют *дескриптивными логиками* (ДЛ) [12, 13]. В этих логиках используются только одноместные предикаты, называемые *концептами*, и двухместные предикаты, называемые *ролями*, и эти ограничения делают ДЛ разрешимыми. Содержательно концепты ставятся в соответствие понятиям онтологии, а роли – бинарным отношениям на множестве этих понятий.

База знаний, формализованная в языке ДЛ, состоит из двух компонент – *Tbox* и *Abox*. Компонента *Tbox* (терминология) называется *схемой* базы знаний (рис. 5). Она содержит множества атомарных концептов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ и атомарных ролей $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ и ряд правил стандартного синтаксиса исчисления предикатов, которые позволяют задавать другие концепты (понятия) и роли (отношения) базы знаний. Компонента *Abox* базы знаний, представленной онтологией, – это знания о множестве *экземпляров* понятий и ролей, называемых также *фактами*. Синтаксис *Abox* включает в себя утверждения двух видов: $a:A$ (« a является экземпляром понятия A ») и aRb («экземпляры понятий a и b связаны ролью R »). Базой знаний называют пару



Рис. 5. Формальная модель онтологии

$$Kb = \langle T, C \rangle, \quad (1)$$

где T – произвольный *Tbox*, C – произвольный *Abox*.

Можно утверждать, что онтологии и описанные языки и инструменты представления знаний и данных, описанные выше, отражают современный уровень представления знаний в ИИ. Отметим, что в нейросетевых моделях знания представляются в синтаксической форме в виде черного ящика активных знаний (англ. actionable knowledge), которые представлены уже готовыми структурами принятия решений

Использование знаний. Обратимся к задаче использования знаний, т.е. к *технологиям* работы со знаниями, принятым в различных прикладных интеллектуальных системах. *Использование знаний* в ИИ – это применение конкретных технологий ИИ для разработки приложений и инструментальных средств их программной поддержки. Технологии ИИ – это, например, многоагентные технологии, распределенные технологии, самоорганизующиеся технологии, технологии планирования, сетевые технологии, технологии семантического веба, технологии Интернета вещей, технологии киберфизических систем и цифровых двойников, технологии периферийных вычислений и т.д. Эти технологии обычно соотносятся с некоторыми классами приложений. Если вспомнить Национальную стратегию ИИ [1], то она сформулирована именно на этом уровне как разработка «комплекса технологических решений» для конкретного множества классов приложений, а именно множества классов задач, для которых поставлены задачи. Поэтому задачи, явно прописанные в НС в качестве «комплекса технологических решений в [1], а именно компьютерное зрение, обработка естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальная поддержка процессов принятия решений, относятся к использованию знаний.

Не менее важными, однако, являются и некоторые другие технологии, не вошедшие в список НС, в частности семантические технологии и семантические вычисления, автономная робототехника, групповое и сценарное управление, интеллектуальные цифровые двойники и киберфизические системы, технологии Интернета вещей и технологии распределенного искусственного интеллекта и т.д.

Современный уровень исследований и разработок в области использования знаний для конкретных технологий ИИ наглядно демонстрируется кривой зрелости технологий компании Gartner по состоянию на конец 2019 года. Она представлена на рис. 6.



Рис. 6. Кривая зрелости технологий ИИ по версии компании Gartner на август 2019 г.

ИИ завтра: Основные направления дорожной карты. Индустрия полна оптимизма по части индустриального использования технологий ИИ. Этот оптимизм со временем только возрастает вот уже в течение более 60 лет. Но если смотреть правде в глаза, то до настоящего времени индустриальные применения ИИ чрезвычайно редки, если вообще они существуют. Последнее утверждение четко отражается на кривой зрелости технологий компании Gartner (см. рис. 6).

Если доверять информации, представленной на этой кривой, то имеется всего 3 технологии, которые могут выйти на плато продуктивной работы (в правой части кривой) в течение ближайших двух лет (до конца 2021 года). Это речевые технологии, роботизированное программное обеспечение для автоматизации процессов (проще – массовое роботизированное исполнение рутинных операций) и универсальные интеллектуальные ускорители вычислений, построенные на основе FPGA (от англ. Field-Programmable Gate Array) – программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Всем остальным технологиям до выхода на это плато потребуется 5-8 лет, а в настоящее время они все находятся «на пути» ко «впадине разочарования».

Однако эта кривая касается прогнозов технологий. Что касается основных трендов и актуальных направлений научного плана, то они, конечно, зависят от технологических потребностей, но не всегда ими определяются. Представленная выше факторизация базовых задач ИИ на задачи получения, представления и использования знаний позволяет систематизировать актуальные научные проблемы ИИ. Эти проблемы для среднесрочной перспективы рассматриваются далее.

Получение знаний. В настоящее время новые проблемы и задачи получения знаний концентрируются вокруг проблем обработки больших данных с целью получения знаний. В этом направлении актуальны следующие научные проблемы среднесрочной перспективы:

- 1) робастные и вычислительно эффективные методы снижения размерности пространств представления больших данных, управляемые целями их обработки;
- 2) робастные и вычислительно эффективные методы обработки больших сырых данных;

- 3) методы противодействия злонамеренному воздействию на данные и на инструменты машинного обучения (англ. Adversary Learning);
- 4) развитие русскоязычных семантических ресурсов и разработка семантических методов и инструментов обнаружения закономерностей и машинного обучения;
- 5) обнаружение причинно-следственных зависимостей в данных и «объяснимый» ИИ;
- 6) автоматическая разметка данных для их последующего использования в процессах обнаружения закономерностей и машинного обучения;
- 7) моделирование данных – генерация данных с помощью компьютерных моделей;
- 8) создание и развитие семантических моделей глубокого обучения;
- 9) распределенные методы обнаружения закономерностей и машинного обучения с сохранением конфиденциальности данных в системах Интернета вещей;
- 10) новые методы сбора и обработки экспертной информации для построения самоорганизующихся цифровых двойников в биологических и других плохо формализуемых предметных областях (например, цифровые двойники развития сельскохозяйственных культур).

Существуют и другие острые проблемы, актуальные для развития ИИ в ближайшем будущем. В приведенном списке не указан обширный спектр задач обнаружения знаний в системах, функционирование которых описывается многомерными временными рядами. Это особый и очень трудный класс задач, для которых эффективные методы извлечения знаний еще предстоит создать. Задачи этого класса намного сложнее тех, с которыми работает сообщество специалистов в области получения знаний. К числу перспективных относят группу методов, которая объединяется общим названием *Модель латентных переменных для гауссовских процессов* (англ. *Gaussian Process Latent Variable Model, GPLVM*). Это направление относительно молодое – считается, что эта модель предложена около 2009 года, – и активно развивается.

Представление знаний. В области представления знаний вот уже в течение более 20 лет основной тренд определяется моделями семантического веба – представлением знаний и данных в хранилищах RDF-триплетов с моделью онтологии на мета уровне. Как было отмечено ранее, этот вариант представления знаний имеет в настоящее время сильного конкурента в форме LPG-структур, которые положены в основу современных графовых СУБД. Весьма вероятно, что уже в среднесрочной перспективе (3-6 лет) графовые базы данных вытеснят RDF-системы, которые опираются на хранилища триплетов, поскольку графовые базы данных сейчас активно развиваются, причём в концепции программного обеспечения с открытым кодом, благодаря чему их развитие происходит достаточно быстро и даже с ускорением.

Однако в соперничестве RDF-моделей семантического веба и графовых баз данных не все так однозначно в настоящее время. Использование RDF-концепции имеет ряд несомненных преимуществ, среди которых следует прежде всего упомянуть простоту самой концепции и ее понятность для сообщества разработчиков, возможность ее простой интеграции с уже существующими базами знаний и данных, описанными на языке RDF и в реляционных структурах. Кроме того, ее достоинство в том, что модель данных RDF может интегрировать в себе практически неограниченные семантические ресурсы Linked data web, которые содержат в большом количестве стандартные онтологии по огромному числу предметных областей и огромные базы данных триплетов. Однако эта модель плохо работает с развивающимися базами знаний приложения. Языки RDF, RDF-Schema и OWL не предусматривают возможность отслеживания истории изменений описаний объектов или схемы, не удовлетворяют другим требованиям современных промышленных приложений. Кроме того, использование дескриптивной логики в сложных случаях не может гарантировать не только получение результата за заданное время, но и вообще получение результата, особенно при использовании версии *OWL Full*. Если же триплеты хранятся в реляционных таблицах, например, с двумя столбцами для каждого из отношений, то реакция на SPARQL-запросы может быть чрезвычайно медленной, если шаблон запроса включает в себя несколько типов отношений [14]. В этих структурах имеются и другие проблемы, например относительно низкие выразительные возможности языков описания знаний.

Что касается аналогичной характеристики достоинств и недостатков LPG-структур (графовой модели баз данных), то по этому поводу нужно отметить следующее [14]. К числу их достоинств относятся прежде всего богатые выразительные способности благодаря возможности введения практически неограниченного числа атрибутов-свойств вершин и дуг размеченно-

го графа свойств, притом что эти атрибуты могут быть описаны практически любыми структурами данных. Структура данных, свободная от индексов, обеспечивает естественность структуры хранения и высокую скорость обработки запросов для баз данных больших объемов.

В работе [14] отмечаются и другие стороны LPG-модели сильносвязанных данных:

- задание динамики модели описания и представления знаний и данных – описание эволюционирующих свойств и отношений в динамике развития объектов системы;
- поддержка многоаспектности модели описания и представления знаний об объекте – поддержание различных точек зрения на нее со стороны приложений;
- единая графовая модель представления знаний и данных, их аспектов и свойств, в которой имплементация случаев использования знаний и данных сводится к поиску на мета-графе;
- множественность возможных таксономий объектов, заданных моделью графа знаний;
- многообразие типов и структур данных, которые могут быть представлены в графе при описании свойств объектов, представленных в системе. Они могут быть описаны атрибутами любых типов, включая слабоструктурированные (xml, json и т.п.) и неструктурированные данные, например CAD-модели, PDF-файлы, текстовые описания, изображения, ссылки на другие объекты и их свойства и т.п.
- версионность модели знаний и данных: возможность хранения истории всех изменений всех версий сущностей графовой модели знаний, которые происходили на всех этапах жизненного цикла этих сущностей.

В Gartner прогнозируют, что в ближайшие несколько лет масштаб применения графовых баз данных и соответствующих средств обработки информации будет удваиваться каждый год.

Однако в среднесрочной перспективе основная тенденция современного представления знаний и данных – это их представление в *едином семантическом пространстве*. В основу методов создания такого пространства могут быть положены идеи виртуализации знаний, которые аналогичны методам виртуализации данных [15]. Таким образом, разработка концепции, алгоритмов и программных средств реализации сервера виртуализации знаний, который обеспечит единый унифицированный взгляд на данные и знания со стороны всех приложений системы, является важнейшей задачей представления знаний в ИИ ближайшего будущего. Теоретически это вполне реализуемо и уже имеются отдельные частные случаи интеграции RDF- и LPG-структур знаний и данных в единое семантическое пространство.

Использование знаний. В части использования знаний перспективные задачи достаточно подробно перечислены на кривой зрелости технологий (рис. 6). Часть этих актуальных технологических разработок указана в НС [1]. Напомним, к ним относятся технологии компьютерного зрения, обработка естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальная поддержка процессов принятия решений. Однако большинство других задач и технологий использования знаний, которые были перечислены при характеристике современного состояния разработок, также подлежат дальнейшему развитию. Говоря кратко, задачи, которые в этом разделе упомянуты как актуальные задачи ближайшей и среднесрочной перспективы, формируют и актуальный список технологических проблем дорожной карты реализации НС.

Однако особое внимание следует обратить на развитие инфраструктурных компонент систем. Действительно, проблемы использования знаний во многом определяются новыми приложениями, в частности приложениями класса Интернета вещей и киберфизических систем. Будущее этих систем принято связывать с их реализацией с использованием экосистем умных сервисов. Центральной компонентой таких реализаций является программно-коммуникационная инфраструктура – распределенная цифровая платформа, которая играет роль системной компоненты, трансформирующей множество ее компонент, например распределенных приложений, сенсоров, облачных ресурсов и сервисов, разделяемых ресурсов и сервисов, которые реализуются цифровой платформой и т.д. в единую «систему систем».

Кратко задачи экосистемы умных сервисов, интеллектуального ядра процессов координации и управления должны состоять в том, чтобы (рис. 7):

- «погрузить» все компоненты в единое коммуникационное, информационное и семантическое пространство знаний и данных и обеспечить интерфейсы доступа к ним со стороны программ и пользователей;

- обеспечить совместимость компонент экосистемы по форматам данных и знаний при решении задач кооперации и координации поведения;
- поддерживать решение задач распределения, планирования и оперативного управления общими ресурсами экосистемы в реальном времени;
- обеспечить узлы сети компонент экосистемы онлайн-доступом к облачным ресурсам и сервисам и к внешним источникам информации;
- обеспечить накопление и хранение данных, генерируемых приложениями, для машинного обучения с целью повышения качества их работы.

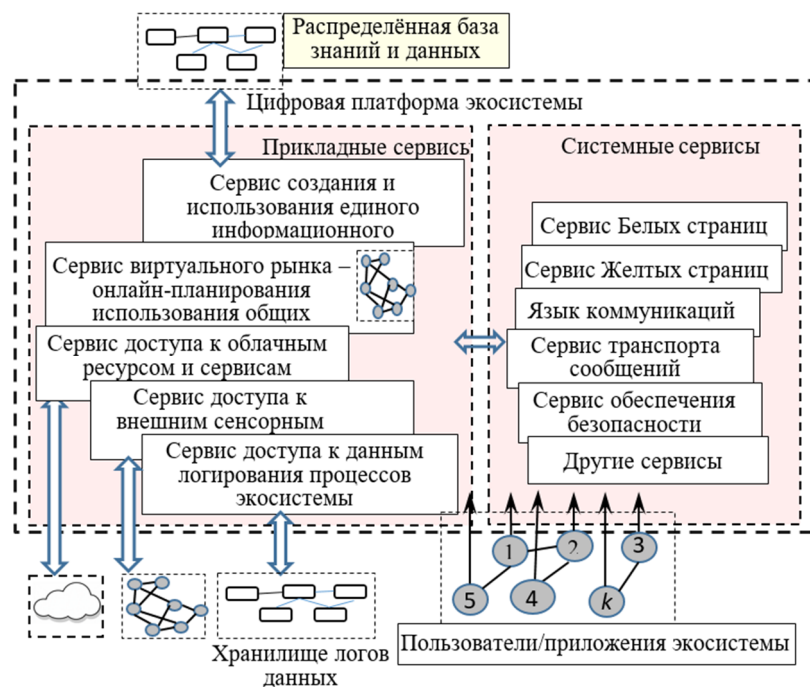


Рис. 7. Цифровая платформа экосистемы («системы систем») умных сервисов

Заключение. Искусственный интеллект в данной работе рассматривается как наука из кластера наук, объединяемых общим названием «информатика». В этом контексте ИИ трактуется авторами как раздел информатики, в котором принятие решений основывается на знаниях, а его научное содержание определяется методологиями, методами и алгоритмами работы со знаниями, а именно методами и алгоритмами получения, компьютерного представления и практического использования знаний в прикладных системах принятия решений. В работе проведен краткий анализ состояния исследований и разработок в области искусственного интеллекта на современном этапе в рамках базовых проблем в области ИИ, а именно в рамках проблем получения, компьютерного представления и практического использования знаний в прикладных системах принятия решений. Проведен также анализ основных актуальных направлений развития в этой области, которые, по мнению авторов, определяют ближайшее будущее искусственного интеллекта как науки и информационной технологии и дорожную карту исследований и прикладных разработок в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» от 10 октября 2019 г. № 490. <http://www.kremlin.ru/acts/news/61785>. (дата обращения 24.07.2020)
2. Каляев И., Заборовский В. Искусственный интеллект. От метафоры к техническим решениям // Control Engineering, Россия. Октябрь 2019. С. 78–83.
3. Искусственный интеллект // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_интеллект (дата обращения 24.07.2020)
4. Новиков Д.А. Кибернетика 2.0 // Проблемы управления. 2016. № 1. С. 73–81.
5. Юсупов Р.М. К семидесятилетию отечественной информатики // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 1. С. 5–29.
6. Станкевич Л.А. Когнитивные системы и роботы. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2019. 630 с.

7. **Очерки истории** информатики в России. Научно-издательский центр ОИГТМ СО РАН, 1998.
8. **Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.** Инженерия знаний. Модели и методы: Учебник. СПб: Издательство «Лань», 2016. 324 с.
9. **Gruber, T.R.**, A translation approach to portable ontologies, Knowledge Acquisition, Academic Press, 1993, 5(2):199–220.
10. **Среда описания** ресурса (RDF): понятия и абстрактный синтаксис. W3C Рекомендация от 10 Февраля 2004. https://www.w3.org/2007/03/rdf_concepts_ru/.
11. **OWL**, язык веб-онтологий. Руководство. Рекомендация W3C от 10 февраля 2004.
12. **Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D.L., Nardi, D., Patel-Schneider, P.F.** (Eds.), The Description Logic Handbook Theory, Implementation and Applications, 2d Edition, Cambridge University Press, 2010, 624 p.
13. **Золин Е.** Дескрипционная логика (лекции). URL: <http://lpcs.math.msu.su/~zolin/dl/>.
14. **Тушканова О.Н., Самойлов В.В.** Knowledge Net: модель и система накопления, представления и использования знаний и данных // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. №1(31). С. 117–131.
15. **Davis, J.R., Eve, R.**, Data Virtualization: Going Beyond Traditional Data Integration to Achieve Business Agility, Nine Five One Press, 2011.

V.I. Gorodetskiy (Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg),
R.M. Yusupov (Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Saint Petersburg)
ARTIFICIAL INTELLIGENCE - SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY: PRESENT AND FUTURE

Artificial intelligence is considered as an independent science and as a branch of informatics, in which decision-making is based on knowledge, and its scientific content is determined by methodologies, methods and algorithms for working with knowledge. The paper provides a brief analysis of the state of research and development in the field of artificial intelligence at the present stage and analyzes the main current trends of development in this area, which, in the authors' opinion, determine the near future of artificial intelligence as a science and information technology and a roadmap for research and applied development in this area.

В. РЭСВАН
(Крайовский университет, Румыния)

ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНЫЕ ЗАДАЧИ («ЛИНЕЙНЫЕ» МЕТОДЫ В ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ)

Под линейно-квадратичными задачами подразумеваются те задачи динамики, где появляются линейные управляемые системы вместе с некоторым квадратичным функционалом качества. «Линейные» методы – это те математические методы, которые появляются обычно в задачах о линейных системах, например методы интегральных преобразований (Лапласа, Фурье), линейный функциональный анализ, частотные методы. В данной работе рассматриваются те случаи, когда эти методы используются при изучении нелинейных систем.

Абсолютная устойчивость и смежные вопросы. Абсолютная устойчивость появилась в науке с работами Б.В. Булгакова (1942, 1946) [1, 2], однако настоящее распространение связано со статьями А.И. Лурье и В.Н. Постникова (1944) [3], в которой была введена в рассмотрение функция Ляпунова типа «квадратичная форма плюс интеграл от нелинейной функции». Отсюда начинается то, что С. Лефшец [4] назвал «допоповским периодом развития теории», то есть «советский период», когда появились «звездные» результаты прямого метода Ляпунова и публикации крупнейших специалистов века: А.И. Лурье, И.Г. Малкина, М.А. Айзермана, Н.Н. Красовского, А.М. Летова, Я.З. Цыпкина, В.А. Якубовича и др.

Абсолютная устойчивость формулируется как задача о системе с обратной связью, которая включает линейный динамический блок и нелинейный статический блок. Если информация о линейном блоке полная, то о нелинейном считается «скудной» (см. доклад [5] А.М. Летова 1956 г.). Это значит, например, что о нелинейной функции известна только ее принадлежность к сектору (k_1, k_2) , то есть выполнение неравенств

$$k_1 \sigma^2 < \varphi(\sigma) \sigma < k_2 \sigma^2, \quad (1)$$

а условие устойчивости нулевого состояния равновесия основано на двух свойствах: устойчивости в целом и устойчивости для *всех* нелинейностей, удовлетворяющих (1). Эти свойства задают не что иное, как робастность устойчивости.

В 1959 году вышла первая статья известного (в будущем) румынского инженера В.М. Попова, посвященная абсолютной устойчивости [6]. Для целей нашей статьи важна следующая информация о работе Попова: во-первых, включение свойств нелинейности типа (1) в систему с квадратичными ограничениями, заданными в виде неравенства, которые образуют квадратичный интегральный функционал; здесь из (1) получается «почти сразу» неравенство для функционала; позже Попов назвал интегральный функционал, заданный таким неравенством, *обобщенной обратной связью*. Отсюда пошли квадратичные ограничения (Якубович, 1967; Рэсван, 1983) [7, 8], дополненные Мегрецким и Ранцером (1997) [9] ограничениями в частотной области (через равенство Планшереля и Парсевалья). Во-вторых, главное неравенство для устойчивости получается из вышеупомянутого неравенства вместе с другим неравенством, полученным из свойств линейного блока с функционалом (вместе взятых), при помощи *частотного неравенства*.

Здесь функция Ляпунова не появляется, но на самом деле она «скрыта» в лемме Якубовича–Калмана–Попова. Как известно, эта лемма (называемая также большой леммой теории систем) устанавливает эквивалентность данных методов (частотного и ляпуновского). А как обстоит дело в приложениях? Иногда данные методы равносильны (для анализа устойчивости, диссипативности по Левинсону, вынужденных колебаний). В одних случаях метод Ляпунова оказывается более подходящим (неустойчивость, дихотомия, автоколебания по Якубовичу, фазовые системы и системы с неединственным состоянием равновесия); в других – частотный метод (системы с запаздыванием и/или с распределенными параметрами).

Подытоживая вышесказанное, имеется линейная динамическая система с обобщенной квадратичной обратной связью и с функцией Ляпунова типа «квадратичная форма плюс интеграл от

нелинейности» (тоже дающий квадратичный член, если нелинейность заменяется на линейную функцию, в противном случае см. (1), из которого получается квадратичное неравенство).

Линейно-квадратичная оптимизация. В рамках данной задачи предлагается рассматривать два случая: а) случай параметрического расчета, когда дается линейная динамика системы (обычно динамика регулируемого рассогласования) вместе с интегралом от вышеупомянутого рассогласования (А.А. Фельдбаум, 1957) [10] и вычисляются параметры настройки регулятора для минимизации интеграла; интеграл считается косвенной оценкой переходного процесса, т.е. работы системы регулирования; б) оптимизационный синтез управляющей обратной связи для минимизации интеграла от квадратичной формы

$$\dot{x} = Ax(t) + bu(t), \quad (2)$$

$$\eta(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} [x^*(t)Mx(t) + x^*(t)lu(t) + u^*(t)l^*x(t) + \kappa|u(t)|^2]dt.$$

Напомним, что предложение квадратичного функционала берет начало от А.А. Харкевича (1937) [11].

В параметрической оптимизации используется значение интеграла как квадратичной формы от начального состояния, а ее матрица – положительно определенное решение некоторого *матричного уравнения Ляпунова*.

Аналитический синтез регуляторов берет начало в работах Р. Калмана (1958, 1961) [12, 13] и в цикле статей А.М. Летова (1960–1962) [14] в журнале «Автоматика и телемеханика». У Калмана появляется матричное уравнение Риккати, а оптимальная стабилизация (оптимальность на бесконечном интервале времени) получается как предел при $t \rightarrow \infty$ уравнений оптимизации на конечном интервале времени. У Летова оптимизация происходит только на бесконечном интервале времени методами вариационного исчисления и принципа максимума Понтрягина, включая некоторые нелинейные случаи.

Заметив связь уравнения Риккати с разрешающими уравнениями Лурье из абсолютной устойчивости, В.М. Попов (1964) [15] сумел использовать лемму Якубовича–Калмана–Попова и факторизацию матричных многочленов для строгого математического обоснования линейно-квадратичной оптимальной стабилизации. Отсюда (или независимо) появился алгоритм решения оптимальной стабилизации, разработанный В.А. Якубовичем и его сотрудниками. В то же время выяснилась возможность использования оптимального значения квадратичного функционала (тоже квадратичная форма от начального состояния) в качестве квадратичной функции Ляпунова для оптимальной устойчивости системы (первоначальная идея принадлежит Н.Н. Красовскому (1957) [16] в рамках динамического программирования).

ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Б.В. ДАН СССР. 1942. Т. 37. № 9. С. 283–287.
2. Булгаков Б.В. ПММ. 1946. Т. 10. №3. С. 313–332.
3. Лурье А.И., Постников В.Н. ПММ. 1944. Т. 8. № 3. С. 246–248.
4. Лефшец С. Устойчивость нелинейных систем автоматического управления. М: Наука, 1967.
5. Летов А.М., Лурье А.И. Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства. Т. 2. М: Изд. АН СССР, 1957.
6. Попов, V.M., St. cerc. energ. electr., vol. IX, no. 1, pp. 119–137.
7. Якубович В.А. Автоматика и телемеханика. 1967. № 6. С. 5–30.
8. Рэсван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием. М: Наука, 1983
9. Megretski, A., Rantzer, A., IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 42, no. 6, pp. 819–830.
10. Фельдбаум А.А. Электрические системы автоматического регулирования. М: Оборонгиз, 1957.
11. Харкевич А.А. Журнал технической физики. 1937. Т. 7. № 5. С. 515.
12. Kalman, R.E., Koeperke, R.W., Transactions ASME, 1958, vol. 80, pp. 1820–1826.
13. Kalman, R.E., Bol. Soc. Matematica Mexicana, vol. 5, pp. 102–119.
14. Летов А.М. Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 4-6. С. 435–441, 561–568, 661–665; 1961. Т. 22. № 4. С. 425–435; 1962. Т. 23. №11. С. 1405–1413.
15. Попов, V.M., Rev. Roumaine Sci. Techn., Ser. Electrotechn. Energ., 1964, vol. 9, no. 4, pp.629–690.
16. Красовский Н.Н. Автоматика и телемеханика. 1957. Т. 18. № 11. С. 960–970.

V. Răsvan (University of Craiova, Romania)

LINEAR-QUADRATIC PROBLEMS ("LINEAR" METHODS IN THE THEORY OF NONLINEAR SYSTEMS)

By linear-quadratic problems we mean those problems of dynamics where linear controllable systems appear together with some quadratic quality functional. "Linear" methods are those mathematical methods that usually appear in problems of linear systems, for example, methods of integral transformations (Laplace, Fourier), linear functional analysis, frequency methods. The paper points out the cases when these methods are used in the study of nonlinear systems.

Н.В. КУЗНЕЦОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет;
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

ГРАНИЦЫ ГЛОБАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕОРИИ И ПРИЛОЖЕНИЯХ

Данный доклад посвящен задачам анализа глобальной устойчивости и поиска скрытых колебаний в системах управления, эффективным методам их решения, а также соответствующим гипотезам и контрпримерам, которые оказали заметное влияние на развитие математической теории управления.

Введение. Математическое моделирование динамики и определение устойчивости в технических системах является актуальнейшим направлением в научном и технологическом развитии любого государства, которое стремится занять лидирующие позиции в современном мире. Изучение предельных динамических режимов (аттракторов) и устойчивости необходимо в классических теоретических и в актуальных практических задачах. Знаменитая работа И.А. Вышнеградского 1877 года о регуляторе Уатта [1] стала примером математической постановки и решения таких задач и стимулировала развитие *математической теории управления*. В этой работе исследовалась замкнутая динамическая модель «паровая машина – регулятор», для которой явление самораскачивания было переформулировано на математический язык как свойство неустойчивости решения дифференциального уравнения. И.А. Вышнеградский для приближенной линеаризованной трехмерной модели без учета сухого трения определил условия устойчивости стационарного решения (тривиального аттрактора), соответствующего требуемому рабочему режиму, и, исходя из инженерных соображений, предполагал полученные условия достаточными для устойчивости стационарного режима в нелинейной системе (*гипотеза Вышнеградского*). В 1892 году А.М. Ляпуновым были опубликованы строгие математические утверждения об устойчивости по первому приближению для автономных гладких динамических систем, ставшие обоснованием процедуры линеаризации [2].

Теория глобальной устойчивости. После этих работ оставались, однако, открытыми вопросы строгого доказательства гипотезы Вышнеградского о допустимости линеаризации в разрывной модели регулятора Уатта, а также доказательство отсутствия нежелательных колебаний при больших отклонениях от стационарного режима (*задача Андронова–Вышнеградского*) [3, 4]. Ответы на эти вопросы были даны в 1944 году в работах А.А. Андронова и А.Г. Майера [4], где при помощи методов теории колебаний был не только строго обоснован локальный анализ Вышнеградского, но и показана достаточность условий линейной устойчивости Вышнеградского для отсутствия колебаний и глобальной устойчивости рабочего режима. Этот выдающийся результат (см. [5]), а также трудности применения подходов Андронова для многомерных систем общего вида привели к появлению различных гипотез о глобальной устойчивости «по первому приближению» (в том числе широко известной гипотезы Калмана [6]) и развитию теории глобальной устойчивости. Катализатором создания теории глобальной устойчивости послужили работа А.И. Лурье и В.Н. Постникова 1944 года [7], в которой была впервые предложена идея получения достаточных условий отсутствия колебаний и глобальной устойчивости при помощи построения специального класса функций Ляпунова, и опубликованная в 1949 году работа М.А. Айзермана [8] о глобальной устойчивости систем управления со скалярной нелинейностью из сектора линейной устойчивости. Строгое обоснование подхода Лурье–Постникова для решения задачи Айзермана привело в 1952 году к серии работ Н.Н. Красовского [9, 10] и других известных ученых по использованию глобальных функций Ляпунова для получения достаточных условий глобальной устойчивости. Эффективные достаточные критерии существования глобальных функций Ляпунова и глобальной устойчивости были предложены в работах В.М. Попова, В.А. Якубовича, Р.Е. Калмана в форме частотных условий на рубеже 50–60-х годов прошлого века [11].

Границы глобальной устойчивости и теория скрытых колебаний. Для практических задач анализа и синтеза многомерных систем управления часто требуется точная оценка границ глобальной устойчивости и анализ зазора между имеющимися достаточными условиями глобальной устойчивости и необходимыми (линейными) условиями устойчивости, для чего на практике часто применяется численное моделирование. Однако оказалось, что возможности стандартных численных методов часто ограничены, а их применение может существенно искажать характеристики реальной динамики и приводить к неверным качественным выводам об устойчивости и колебательных режимах. Современный этап развития теории глобальной устойчивости, теории робастного управления, теории бифуркаций и новые вычислительные технологии позволили по-новому взглянуть на такие задачи, что привело к появлению *теории скрытых колебаний* [12], ставшей современным этапом развития теории колебаний А.А. Андропова. Основой теории скрытых колебаний стала новая классификация колебаний как самовозбуждающихся или скрытых. В то время как самовозбуждение колебаний может быть эффективно исследовано численно при моделировании системы с начальными данными из окрестности неустойчивых состояний равновесия, выявление скрытых колебаний, область притяжения которых не связана с состояниями равновесия, является нетривиальной задачей и требует соединения численных и аналитических методов. Границы глобальной устойчивости в пространстве параметров системы определяются либо локальными бифуркациями в фазовом пространстве (тривиальные участки границы, для анализа которых хорошо развиты аналитические методы), либо нелокальными бифуркациями (скрытые участки границы, связанные с рождением скрытых колебаний). При этом часто важным является определение границ «практической» устойчивости, связанных с переходом от глобальной устойчивости стационарного множества к рождению в фазовом пространстве системы нетривиальных (колебательных) аттракторов. На практике переход состояния системы управления к скрытому аттрактору, вызванный внешними возмущениями, приводит к нежелательным режимам работы и часто оказывается причиной аварий и катастроф.

Заключение. Данный доклад посвящен задачам анализа глобальной устойчивости и поиска скрытых колебаний в системах управления, эффективным методам их решения, а также соответствующим гипотезам и контрпримерам, которые оказали заметное влияние на развитии *математической теории управления*. Этот доклад основан на материалах выступления на Бюро ОЭМПУ РАН 03.03.2020 [13], обзорных докладах European Control Conference 2020 [14–15] и 21st IFAC World Congress [16], приглашенных докладах IEEE/ACM 24th Int. Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications и 6th Int. Conference on Complex Dynamical Systems and Applications, а также публикациях [18–20].

*Работа выполнена при поддержке программы
Ведущие научные школы Российской Федерации (НШ-2624.2020.1).*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вышнеградский И.А.** О регуляторах прямого действия // Изв. Санкт-Петербургского технологического ин-та. 1877. Т. 1. С. 21–62.
2. **Ляпунов А.М.** Общая задача об устойчивости движения. Харьков: Типография Зильберта. Издание Харьковского математического общества, 1892.
3. **Жуковский Н.Е.** Теория регулирования хода машин. Ч. 1. М.: Типолитография Товарищества И.Н. Кушнерев и Ко., 1909.
4. **Андронов А.А., Вознесенский И.Н.** О работах Д.К. Максвелла, И.А. Вышнеградского и А. Стодоло в области регулирования машин // Максвелл Д.К., Вышнеградский И.А., Стодоло А.: Теория автоматического регулирования (Классики науки). М.: АН СССР, 1949.
5. **Академики**, избранные Общим собранием АН СССР 30 ноября 1946 года // Вестник АН СССР. 1947. Т. 1. С. 83.
6. **Kalman, R.E.**, Physical and Mathematical Mechanisms of Instability in Nonlinear Automatic Control Systems, *Transactions of ASME*, 79(3), 1957, 553–566.
7. **Лурье А.И., Постников В.Н.** К теории устойчивости регулируемых систем // ПММ. 1957. 8(3). 246–248.
8. **Айзерман М.А.** Об одной проблеме, касающейся устойчивости в больших динамических систем // УМН. 1949. Т. 4. С. 187–188.

9. **Красовский Н.Н.** Теоремы об устойчивости движений, определяемых системой двух уравнений // ПММ. 1952. 16(5). С. 547–554.
10. **Барбашин Е.А., Красовский Н.Н.** Об устойчивости движения в целом // Доклады АН СССР. 1952. 86(3). 453–459.
11. **Геллиг А.Х., Леонов Г.А., Якубович В.А.** Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. М.: Наука, 1978.
12. **Кузнецов Н.В.** Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. №5. С. 5–27 (<https://dx.doi.org/10.31857/S0002338820050091>).
13. **Кузнецов Н.В.** Скрытые колебания и устойчивость систем управления. Теория и приложения. Доклад на заседании Бюро ОЭММПУ. 03.03.2020. <http://apcyb.spbu.ru/wp-content/uploads/2020-RAN-Bureau-DEEMCP-KuznetsovNV.pdf>.
14. **Kuznetsov, N.V., Lobachev, M.Y., Yuldashev, M.V., Yuldashev, R.V., Kudryashova, E.V., Kuznetsova, O.A., Rosenwasser, E.N., Abramovich, S.M.,** The birth of the global stability theory and the theory of hidden oscillations, *Proc. of European Control Conference (ECC-2020)*, St. Petersburg, 2020, pp.769–774.
15. **Kuznetsov, N.V., Mokaev, R.N., Akimova, E.D., Boiko, I.M.,** Harmonic balance method, Tsytkin locus, and LPRS: comparison and counterexamples, *Proc. of European Control Conference (ECC-2020)*, St. Petersburg, 2020, pp. 781–786.
16. **Kuznetsov N.V., Lobachev M.Y., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V.,** Harmonic balance analysis of pull-in range and oscillatory behavior of third-order type 2 analog PLLs, *Proc. of IFAC World Congress (IFAC-PapersOnLine)*, 2020.
17. **Kuznetsov, N.V.,** Keynote lecture “Stability and hidden attractors in the simulation and theoretical study of dynamical models”, *IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*, 2020 (Czech Republic, <http://ds-rt.com/2020/keynote>).
18. **Kuznetsov, N.V., Mokaev, T.N., Kuznetsova, O.A., Kudryashova, E.V.,** The Lorenz system: hidden boundary of practical stability and the Lyapunov dimension, *Nonlinear Dynamics*, 2020 (<https://doi.org/10.1007/s11071-020-05856-4>).
19. **Kuznetsov, N.V., Yuldashev, M.V., Yuldashev, R.V.,** Analytical-numerical analysis of closed-form dynamic model of Sayano-Shushenskaya hydropower plant: stability, oscillations, and accident, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2021, vol. 93, 105530.
20. **Kuznetsov, N.V., Reitmann, V.,** Attractor Dimension Estimates for Dynamical Systems: Theory and Computation (Dedicated to Gennady Leonov), Springer, 2021. 545 p.

N.V. Kuznetsov (Saint Petersburg State University; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Saint Petersburg)

BOUNDARIES OF GLOBAL STABILITY OF CONTROL SYSTEMS IN THEORY AND APPLICATIONS

This paper is devoted to the problems of analyzing global stability and searching for latent oscillations in control systems, effective methods of their solution, as well as the corresponding hypotheses and counter-examples that had a noticeable impact on the development of mathematical control theory.

А. С. СОЛОНАР
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ И ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ В РАМКАХ ЗАДАЧИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

Рассматриваются основные проблемы траекторной обработки радиолокационной информации. В рамках задачи многоцелевого сопровождения рассматриваются основные подходы к эффективному решению задач: отождествление принятых отметок с уже сопровождаемыми траекториями, обнаружение (сброс) траекторий, траекторное измерение координат и параметров движения наблюдаемых объектов, выделение дополнительных признаков траекторий.

Введение. Траекторная (вторичная) обработка в общем случае заключается в объединении во времени результатов первичной обработки принятых сигналов: разовых оценок координат, единичных решений о наличии и классе наблюдаемых объектов в интересах обнаружения траекторий, распознавания их классов, уточнения координат и параметров движения. Объединение во времени разовых оценок координат наблюдаемых объектов снижает ошибки измерения. Объединение во времени единичных решений о наличии или отсутствии наблюдаемого объекта в том или ином элементе разрешения и его классе улучшает характеристики обнаружения и распознавания. Решение об обнаружении одного объекта с измеренными координатами и моментом времени называется отметкой. Под первичной радиолокационной информацией (РЛИ) понимается совокупность отметок с выхода устройства первичной обработки за фиксированный интервал времени (период обзора пространства). Траекторная обработка позволяет автоматизировать процесс выделения последовательностей (потоков) отметок от различных объектов во времени с одновременной оценкой их координат и параметров движения. Траекторная обработка является важным этапом обработки РЛИ и одним из самых сложных.

Проблема разработки этапов (элементов) траекторной обработки РЛИ широко освещена в отечественной и зарубежной литературе. К наиболее важным работам следует отнести публикации С. Блэкмана и Р. Пополи [1], Я. Бар-Шалом и Ли Х.-Р. [2], С.З. Кузьмина [3], А. Фарины и Ф. Студера [4], Я.Д. Ширмана [5], А.А. Коновалова [6] и др. Тем не менее сложность условий наблюдения, помеховой обстановки и множества целей не позволяют говорить об окончательном решении основных проблем траекторной обработки.

Трудность реализации траекторной обработки РЛИ для конкретного радиолокатора обусловлена необходимостью:

- наблюдения множества объектов на фоне помех искусственного и естественного происхождения;
- наблюдения группы близко расположенных объектов при условии регулярного или нерегулярного их разрешения;
- наблюдения нелокальных (протяжённых) объектов;
- наблюдения маневрирующих объектов;
- учета нелинейных преобразований над оценками вектора наблюдения;
- обнаружения объектов с различными отражающими свойствами по всей зоне обзора радиолокационной станции;
- учета ограниченности времени на принятие решений об обнаружении траектории и сбросе ее с сопровождения;
- обнаружения события выхода объекта с неизвестной эффективной отражающей поверхностью из зоны обзора радиолокационной станции.

В докладе будут обсуждены указанные проблемы траекторной обработки и представлены подходы к их решению в рамках задачи многоцелевого сопровождения.

Основная часть. Как уже было сказано выше, при реализации траекторной обработки возникает целый ряд сложностей, устранение которых осуществляется за счет современных подходов к

их решению. В их основе лежат эффективные методы отождествления разовых отметок и траекторий, траекторного измерения, межобзорной селекции, обнаружения и сброса траекторий.

К «быстрым» методам решения задачи отождествления относят аукцион и JV (по первым буквам фамилий авторов – Jonker R. и Volgenant A.) [8] с совместным вероятностным объединением данных JPDA (Joint Probability Data Associations) [1, 9] и сокращением числа гипотез при помощи алгоритмов Витерби и Мурти [1, 10]. Это позволяет существенно (на несколько порядков) сократить время решения задачи назначения по сравнению с Венгерским методом при сохранении качества ее решения.

Применение адаптивных к маневру траекторных измерителей координат и параметров движения наблюдаемых объектов IMM (Interactive Multiple Model) позволяет [14–16]: без инерции адаптироваться к модели движения объекта; не допустить роста динамической ошибки и срыва траектории с сопровождения в условиях маневрирования; снизить вероятность срыва на 90-95% по сравнению с неадаптивным траекторным измерителем; уменьшить ошибку фильтрации на 50-90% по сравнению с ошибкой разового оценивания. В многоцелевой ситуации целесообразно сочетание алгоритмов IMM и JPDA в совместном измерителе JPDA–IMM, который позволяет [11–13]: снизить длительность переходных процессов измерителя в 3-10 раз по сравнению с неадаптивным траекторным измерителем; значительно сократить число ложных траекторий при наблюдении группы периодически разрешаемых объектов.

Для решения проблемы наблюдения объектов на фоне целеподобных дискретных мешающих отражений (ДМО) хорошо себя зарекомендовали:

- методы межобзорной селекции движущихся целей (МСДЦ) на основе карт помех [17, 18, 19];
- МСДЦ с использованием траекторных признаков (как правило, модели движения) [20];
- МСДЦ с учетом распределения принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения [20, 21].

Применение МСДЦ позволяет адаптироваться к изменяющимся во времени параметрам ДМО и увеличить коэффициент подавления ДМО и ответно-имитирующих помех до 0,7-0,95.

В основе решения проблемы обнаружения траекторий лежат адаптивные к условиям наблюдения (одноцелевой и многоцелевой ситуации) алгоритмы обнаружения и сброса траектории. При обнаружении траекторий это позволяет снизить среднее число ложных траекторий в 2-4 раза и увеличить вероятность правильного обнаружения траекторий объектов с малой эффективной отражающей поверхностью на 10-35% по сравнению с неадаптивным обнаружителем. На этапе удаления траекторий это позволяет снизить среднее число ложных траекторий в 1,4-2 раза и увеличить вероятность правильного сброса траекторий объектов с малой эффективной отражающей поверхностью на 5-23% по сравнению с неадаптивным устройством сброса. На современном этапе алгоритмы обнаружения и сброса траекторий сочетаются с алгоритмами проверки физической реализуемости траектории [22]. Часть из них базируется на использовании численного метода интегрирования Монте-Карло. Проверка физической реализуемости позволяет выполнять селекцию (отбор) траекторий, удовлетворяющих требованиям к сопровождаемым объектам. В основе селекции лежит учет ошибок вектора состояния и статистическое принятие решения о соответствии траектории физически реализуемой с заданной доверительной вероятностью.

Выбор способа адаптации траекторных измерителей координат и параметров движения, обнаружителей траекторий, устройств сброса с сопровождения и момента автоматического включения (выключения) МСДЦ зависит от вероятности обнаружения ложных отметок в зоне обзора РЛС. Сложность здесь заключается в том, что вероятность обнаружения ложных отметок не равномерна по зоне обзора РЛС и меняется с течением времени. Для оценки этой вероятности необходимо использовать устройство мониторинга помеховой обстановки [23].

Заключение. В докладе рассмотрены основные проблемы траекторной обработки радиолокационной информации и подходы к их решению в рамках задачи многоцелевого сопровождения. Среди путей решения проблем траекторной обработки выделены:

- применение новых методов решения задачи отождествления (аукцион, JVC, Витерби, Мурти);
- использование адаптивных к маневру измерителей координат и параметров движения цели (алгоритмы IMM);

- использование адаптивных траекторных измерителей к многоцелевой ситуации (алгоритмы JPDA–IMM);
- использование новых методов межобзорной селекции движущихся целей на фоне ДМО (карты помех, траекторный признак – модель движения, распределение принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения);
- адаптивное сопровождение протяженных (нелокальных) объектов;
- адаптивное к условиям наблюдения обнаружение и сброс траекторий;
- поиск новых подходов к расчету траекторных признаков наблюдаемых объектов за счет использования метода Монте-Карло.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Blackman, S., Popoli, R.**, Design and analysis of modern tracking systems, Boston, London, Artech House, 1999, 1230 p.
2. **Бар-Шалом Я., Ли Х.-Р.** Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: в 2 ч. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 510 с.
3. **Кузьмин С.З.** Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВиЦ, 2000. 428 с.
4. **Фарина А., Студер Ф.** Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь. 1993. 320 с.
5. **Радиоэлектронные системы.** Основы построения и теория. Справочник. Под редакцией Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника. 2007. 510 с.
6. **Коновалов А.А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 1 СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.
7. **Солонар А.С., Михалковский А.А.** Особенности применения алгоритма аукциона для решения задачи отождествления на этапе вторичной обработки радиолокационной информации // Вестник ПГУ. 2014. Т. 1. Серия С. С. 95–102.
8. **Jonker, R., Volgenant, A.**, A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems, Computing, 1987, no.4, pp. 325–340.
9. **Bar-Shalom, Y., Blair, W.D.**, Multitarget-Multisensor Tracking, Applications and Advances, London, Artech House, 2000, vol. 3, 608 p.
10. **Murty, K.G.**, An algorithm for ranking all assignments in order of increasing costs, *Operational Research*, 1968, no. 3, pp. 682–687.
11. **Bar-Shalom, Y., Kirubarajan, T., Lin, X.**, Probabilistic data association techniques for target tracking in clutter, *Proc. Of the IEEE*, 2004, no.3, pp. 536–557.
12. **Chang, K.C., Bar-Shalom, Y.**, Joint probabilistic data association for multitarget tracking with possibly unresolved measurements and maneuvers, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1984, no.3, pp. 536–557.
13. **Blom, H.A.P., Bloem, E.A.**, Combining IMM and JPDA for tracking multiple maneuvering targets in clutter, ISIF, 2002, pp. 705–712.
14. **Li, X.R., Jilkov, V.P.**, Survey of maneuvering target tracing. Part I: dynamic models, *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364.
15. **Горшков С.А., Солонар А.С.** Сопоставление методов адаптивной дискретной фильтрации координат маневрирующих целей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. Т.4. №6. С. 14–30.
16. **Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А.** Особенности фильтрации координат и параметров движения объекта на этапе совершения установившегося разворота // Доклады БГУИР. 2013. №4 (74). С. 67–73.
17. **Солонар А.С., Горшков С.А., Хмарский П.А., Вашкевич А.М.** Межобзорная компенсация дискретных мешающих отражений с формированием карты местных помех и накоплением решений // Докл. БГУИР. 2015. № 4 (90). С. 75–80.
18. **Солонар А.С., Хмарский П.А.** Траекторная обработка в радиолокаторах обзора с предварительной межобзорной селекцией движущихся целей на основе карт помех // Навигация и управление движением. Материалы XXI конференции молодых ученых с международным участием. 2019. С. 327–329.
19. **Musicki, D., Evans, R.**, Clutter map information for data association and track initialization, *IEEE Transaction on A&ES*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 387–398.
20. **Солонар А.С., Хмарский П.А.** Синтез устройства межобзорной селекции движущихся целей для радиолокаторов кругового обзора, учитывающего распределение принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения // Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. 2015. № 2 (47). С. 134–150.
21. **Солонар А.С., Хмарский П.А.** Анализ показателей качества устройства межобзорной селекции движущихся целей, учитывающего распределение принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения // Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. 2015. № 4 (49). С. 110–130.
22. **Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А.** Методика проверки физической реализуемости траектории // Навигация и управление движением. Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием. 2018. С. 301–303.
23. **Солонар А. С., Михалковский А. А., Хмарский П. А.** Методика расчета вероятности обнаружения ложной отметки в ограниченной области пространства радиолокационного наблюдения // Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. 2019. №2 (63). С.40–45.

A.S. Solonar (Military academy of the Republic of Belarus, Minsk)

MAIN PROBLEMS OF TRAJECTOR PROCESSING AND APPROACHES TO THEIR SOLUTION WITHIN THE FRAMEWORK OF THE PROBLEM MULTITARGET TRACKING

The main problems of trajectory processing of radar information are considered. Within the framework of the task of multitarget tracking, approaches are proposed that allow to effectively solve the problems: assignment problems; detection (reset) of trajectories; trajectory measurement of coordinates and motion parameters of the observed objects; highlighting trajectory features.

В. А. СОЛОВЬЕВ
(ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ», Королев)

ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ АНАТОЛЬЕВИЧА МИКРИНА

В мае 2020 года после перенесенной болезни ушел из жизни генеральный конструктор по пилотируемым космическим системам и комплексам РФ, генеральный конструктор ПАО «РКК «Энергия», известный российский ученый в области механики и процессов управления, академик РАН Евгений Анатольевич Микрин. Ему было всего 64 года. Сколько было сделано и достигнуто за эти годы! За сухими строками биографии стоит замечательный человек: надежный, ответственный, стойкий, смелый и одновременно очень добрый и интеллигентный. Таким он и останется в моих воспоминаниях.



5 мая 2020 года после перенесенной болезни ушел из жизни генеральный конструктор по пилотируемым космическим системам и комплексам РФ, генеральный конструктор ПАО «РКК «Энергия», известный российский ученый в области механики и процессов управления, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премий Правительства РФ, премий им. Б.Н. Петрова, им. К.Э. Циолковского, им. Ф.А. Цандера РАН Евгений Анатольевич Микрин. Ему было всего 64 года.

Евгений Анатольевич Микрин родился в г. Лебедянь Липецкой области в семье инженеров Анатолия Георгиевича и Веры Яковлевны Микриных. Евгений учился в лебедянской средней школе №1, которую закончил в 1973 году с золотой медалью. Он много занимался спортом, играл в футбол и волейбол, закончил спортивную школу (секцию волейбола).



Женя Микрин, 6 лет



Женя Микрин, 14 лет



Е. Микрин среди медалистов

Лебедянцы очень гордятся своим земляком. В 2013 г., в год празднования 400-летия города, Евгений Анатольевич получил звание почетного гражданина города. А в 2015 г. по инициативе Лебедянского краеведческого музея, который сейчас располагается в здании школы №1, которую закончил Микрин, была создана космическая композиция.



Почетный гражданин г. Лебедянь Е.А. Микрин на фоне бывшей средней школы №1, в которой он учился, 2018 г.

После окончания школы Е.А. Микрин поступил МГТУ им. Н.Э. Баумана, которое закончил в 1979 году. Начиная с этого момента вся его жизнь была связана с предприятиями космической отрасли: НПО им. Лавочкина и РКК «Энергия» им. С.П. Королева.



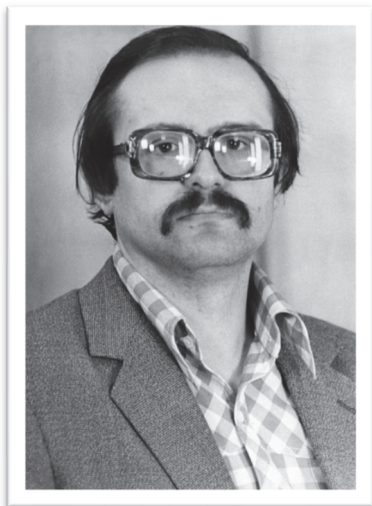
Евгений Микрин – студент МГТУ им. Н.Э. Баумана

С 1981 г. он почти 40 лет был тесно связан с РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

В период с 1983-го по 1988 г. под руководством и при непосредственном участии Е.А. Микрина было создано программное обеспечение для управления объединенной двигательной установкой многофазового орбитального корабля «Буран» универсальной ракетно-космической системы «Энергия–Буран».

Те, кто проработал в «Энергии» не один десяток лет, долгое время знали Евгения Анатольевича как Женю Микрина, который сделал объединенную двигательную установку для

«Бурана». Это дорогого стоит. На «Буране» была сложнейшая двигательная установка с мощными восьмитонными двигателями, с которыми мы до этого не работали. Пневмогидросхема этой двигательной установки имела под две сотни агрегатов: клапанов, предохранителей, редукторов... И очень важен был вопрос управления этой сложной системой: если она откажет – не сядешь на Землю. Женя создал систему автоматики этой установки, что само по себе архисложное дело, к тому же сделал ее достаточно надежной. Как говорил Юрий Павлович Семенов, нужно доводить все до звона. У Микрина получилось. И не только в тот раз.



Е.А. Микрин, годы работы над «Бураном»



Е.А. Микрин, на фоне макета ракетно-космической системы «Энергия–Буран», 2015 г.



С 1993 по 2000 г. Е.А. Микрин был одним из основных участников работ по программе Международной космической станции (МКС), принимал принципиальные решения по разработке методологии бортового комплекса управления и его программного обеспечения для российского сегмента МКС, эффективность которых подтверждена многолетним успешным функционированием МКС.

Под его руководством была разработана система управления функционального грузового блока «Заря» (1998), спроектирован уникальный бортовой комплекс управления основных модулей российского сегмента МКС, создано программное обеспечение базового блока «Звезда» (2000).



Е.А. Микрин с коллективом разработчиков ПО МДМ ФГБ РС МКС, 1997 г.

Модульная архитектура космического аппарата более-менее всем понятна, а вот в ее внутреннем наполнении – архитектуре программно-бортового обеспечения – разбираются немногие.

Евгений Анатольевич наполнял космические изделия жизнью, они становились интеллектуальными, способными принимать сложные, нестандартные решения. При этом создаваемое им программное обеспечение было открытой системой, позволяющей ее наращивать, видоизменять, усложнять. К примеру, за время эксплуатации МКС ее программное обеспечение было изменено десяток раз. Каждая новая версия – работа с почти сотней компьютеров – дает станции новые «мозги». Представляете, сколько всего надо предусмотреть! И надо признать: математика и электроника отказывают реже, чем механика.

Он был отличным технарем и хорошим руководителем, умеющим принимать решения так же стремительно, как развиваются события на космическом аппарате. Ставя задачу перед коллективом, он задавал основные идеи, отчетливо понимая, что из этой идеи получится и как ее реализовать.

Результаты научно-производственной деятельности Е.А. Микрина нашли широкий отклик в научных кругах не только России, но и в зарубежных космических агентствах (NASA, ESA) и на предприятиях авиационно-космической отрасли (Boeing, Astrium). На основе разработанной под руководством Е.А. Микрина методологии велись работы по моделированию функционирования бортовых систем американского сегмента МКС по заказу фирмы Boeing.

В 2001 году в ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова Е.А. Микрин защитил докторскую диссертацию на тему «Модели и методы проектирования информационно-управляющих систем реального времени долговременных орбитальных станций (на примере МКС)». Е.А. Микрин – продолжатель научной школы, созданной на фирме С.П. Королева академиками Б.Е. Чертоком, Б.В. Раушенбахом, В.П. Легостаевым. Становление Евгения Анатольевича как ученого проходило при тесном взаимодействии и контакте с сотрудниками ИПУ РАН. Работы Микрина имеют фундамент научных традиций, заложенных академиками Б.Н. Петровым и В.А. Трапезниковым, в вопросах, связанных с управлением, построением информационно-управляющих систем и комплексной автоматизацией.

Значительным событием в научной деятельности Е.А. Микрина стало избрание в 2006 г. в члены-корреспонденты РАН по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления. В 2007 г. Е.А. Микрину, В.В. Кульбе и Б.В. Павлову была присуждена премия им. Б.Н. Петрова РАН за цикл работ «Модели и методы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов».



Е.А. Микрин во время командировки в США



Е.А. Микрин в ИПУ РАН, 2009 г.



Е.А. Микрин с академиками РАН, членами Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления

С 2000-го по 2010 г. Е.А. Микрин руководил работами по созданию системы управления модулей российского сегмента МКС – «Пирс», «Рассвет» и «Поиск».



Запуск малого исследовательского модуля «Рассвет», США, 2010 г.



Е.А. Микрин с руководителями и коллегами из РКК «Энергия» на космодроме Куру во время запуска корабля ATV (ESA), 2008 г.



Е.А. Микрин на космодроме Куру во время запуска корабля ATV (ESA), 2008 г.

В 2008–2014 гг. Е.А. Микрин организовал эффективную работу партнеров по созданию систем управления и приборов для Европейского автоматического транспортного корабля, информационно-управляющих систем для тренажеров центров подготовки космонавтов и астронавтов в Звездном городке (Россия), Хьюстоне (США), Кельне (Германия) и Тулузе (Франция).

2011 г. стал знаменательным для Е.А. Микрина – он был избран действительным членом РАН. Высокой оценкой его научной деятельности стала премия имени К.Э. Циолковского РАН 2014 г. Она была присуждена В.П. Легостаеву и Е.А. Микрину за цикл научных работ под общим названием «Теоретические основы создания бортовых комплексов управления космических аппаратов различного назначения». Премия им. Ф.А. Цандера РАН 2017 г. присуждена Е.А. Микрину, Н.Е. Зубову, В.Н. Рябченко за книгу «Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов».



С академиком Б.Е. Чертоком, 2005 г.



С академиками Ю.П. Семеновым и В.П. Легостаевым, 2005 г.

В 2002–2020 гг. под руководством Е.А. Микрина была проведена поэтапная модернизация ТПК «Союз» и ТГК «Прогресс». Ключевым элементом этих кораблей является бортовой комплекс управления и его программное обеспечение. Разработка и использование на борту кораблей аппаратуры АСН позволила сократить время выполнения сближения кораблей с МКС. Созданная в 2012 г. «быстрая» схема сближения позволила реализовать это примерно за 6 часов. В 2017 г. была разработана двухвитковая схема, позволяющая сократить время от старта корабля до стыковки с МКС до ~3,5 часов. Впервые она была реализована при полете ТГК «Прогресс МС-09» 10 июля 2018 г.



Е.А. Микрин и В.А. Соловьев во время стыковки ТГК «Прогресс МС-09» с МКС, 10 июля 2018 г.

У нас в ЦУПе со времен Б.Е. Чертока существует такая традиция: после успешной стыковки Борис Евсеевич говорил: «Ура! Прошла такая-то стыковка! Хочу всех поздравить: очередным выговором меньше!». Потом эту традицию подхватил Виктор Павлович Легостаев. И вот уже много лет эти слова громко на весь зал произносил Евгений Анатольевич. Кто заменит его, не знаю.

В зале ЦУПа Микрин со своей командой по бортовому контуру управления находился всегда где-то на втором-третьем ряду. Он отвечал за бортовой контур управления – центральную часть наших аппаратов. Это контур, который управляет всеми бортовыми системами, в том числе и такими важными, как системы навигации, сближения, ориентации. Ситуации бывали разные, но когда я видел впереди его большую фигуру, широкие плечи волейболиста, всегда становилось спокойнее. Знал: если что-то произойдет, есть к кому подойти и спросить, что делать-то будем дальше?



Е.А. Микрин со своей командой по бортовому контуру управления, 2018 г.

Е.А. Микрин участвовал в формировании концепции создания базовых универсальных многофункциональных космических аппаратов и внедрения в производство передовых технологий при разработке приборов и систем управления, реализованных на автоматических КА нового поколения. Под его руководством созданы бортовые и наземные комплексы управления (включая ЦУП) для современных автоматических КА разного назначения (спутников связи «Ямал-100», «Ямал-200», ДЗЗ «БелКА», «E-star»), автоматических КА в интересах Министерства обороны.

Под руководством Е.А. Микрина велись работы по проектированию и разработке новых модулей РС МКС для завершения строительства российского сегмента МКС: многоцелевого лабораторного модуля, узлового модуля, научно-энергетического модуля.

ШМ

шлюзовой модуль

НЭМ

научно-энергетический
модуль

УМ «Причал»

узловой модуль

МЛМ «Наука»

многоцелевой лабораторный
модуль

ТМ

Трансформируемый модуль



Строительство и эксплуатация российского сегмента МКС

В последние годы под руководством Е.А. Микрина велась разработка перспективной транспортной системы с новым многоразовым пилотируемым кораблем «Орел», в том числе и для

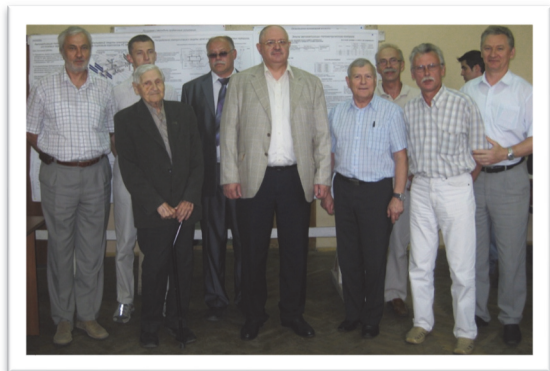


обеспечения межпланетных полетов. У нас были серьезные разговоры о перспективном транспортном корабле. Огромный объем задач! Чтобы организовывать работу такого масштаба, отвечая за ее результаты и сроки, нужно быть очень уверенным в себе человеком и оптимистом по сути. Уверен: именно на таких людях и держится человечество! Евгений Анатольевич, безусловно, был таким. Оптимистом, нацеленным на будущее, уверенным, что это будущее можно сделать лучше, надо

только каждый день встречать с улыбкой и делать все от тебя зависящее. Он и в других умел вселять всепобеждающий оптимизм.

Евгений Анатольевич много занимался и образовательной деятельностью. Он руководил кафедрой «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедрой «Аэрофизическая механика и управление движением» Московского физико-технического института.

Мы с ним заканчивали один университет – МГТУ им. Н.Э. Баумана. Когда в начале 90-х стало понятно, что наша космическая отрасль стареет и пикирует, мы решили вернуться в свою альма-матер. Считали, что никто лучше работающих в «Энергии» не подготовит кадры для корпорации. Нас поддержали Черток и Легостаев. Стали читать лекции студентам, принимали экзамены, лучших с 3-4-го курсов тащили к себе работать.



Е.А. Микрин с преподавателями кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана



Е.А. Микрин с преподавателями кафедры «Аэрофизическая механика и управление движением» МФТИ

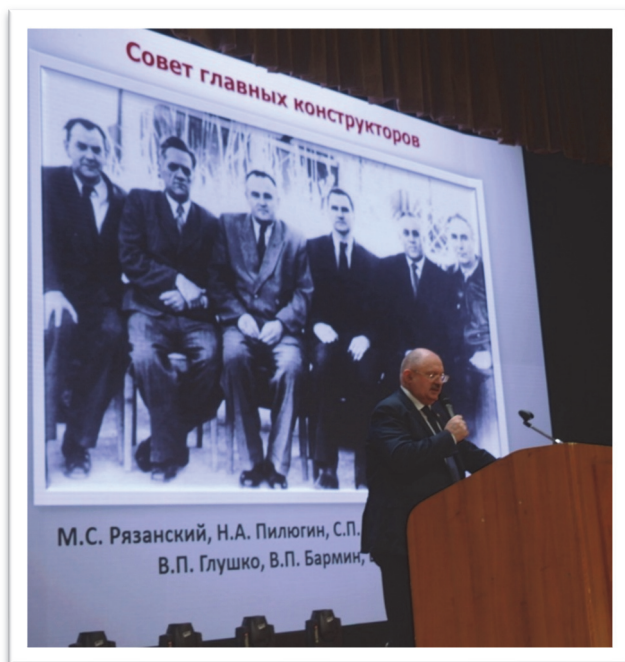
Евгений Анатольевич в Академии наук занимал очень высокое положение. Он был членом Президиума РАН, являлся заместителем академика-секретаря В.Е. Фортова отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, руководителем секции проблем машиностроения и процессов управления, в которую вхожу и я. Он, самый молодой академик, был старшим среди нас.



С академиками В.Г. Пешехоновым и В.Е. Фортовым, 2019 г.

В Академии наук Евгений Анатольевич занимал очень высокое положение. Он был членом президиума РАН, являлся заместителем академика-секретаря В.Е. Фортова Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, руководителем секции проблем машиностроения и процессов управления, в которую вхожу и я. Он, самый молодой академик, был старшим среди нас.

Е.А. Микрин был председателем комиссии по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства.



Выступление с пленарным докладом на Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева



Во время конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах», 2018 г.

Мы очень активно вместе с ним работали, для того чтобы поставить мемориальную доску на доме, где жил Глушко и где жил Раушенбах Борис Викторович, в г. Королеве новая улица названа именем Виктора Павловича Легостаева.

Микрин являлся руководителем Оргкомитета Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Традиционно секцию «Системы управления космических аппаратов и комплексов» в рамках этого крупнейшего форума по космонавтике возглавлял Евгений Анатольевич.

Начиная с 2014 года на основе Российской мультиконференции по проблемам управления (председатель президиума – академик РАН В.Г. Пешехонов) на базе ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в Санкт-Петербурге проводится конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах».

Сопредседателем программного комитета этой конференции являлся академик Е.А. Микрин. Он регулярно выступал с пленарными докладами, неизменно вызывая большой интерес слушателей. Тематика докладов отражала широкий круг работ академика Микрина – от задач теории управления и космической навигации до проблем равновесия Международной космической станции и навигационного обеспечения лунных миссий. В память о нем конференции «Управление в аэрокосмических системах» присвоено имя академика Е.А. Микрина.

Евгений Анатольевич умел делать свою такую насыщенную практической и научной работой жизнь организационно упорядоченной. Я удивлялся: генеральный конструктор, у которого колоссальный фронт работ, а на рабочем столе ничего лишнего – все разложено аккуратно, упорядоченно. Редкие люди, которые могут крутиться в большом объеме информации

и успевать ее систематизировать. Для генерального конструктора это большое дело.

Его трудно было выбить из колеи. Если у нас возникали какие-то неприятности, он сразу понимал размеры бедствия. Наверняка внутреннее напряжение было велико, но он никогда этого не показывал. Однажды пришел к нему на срочное совещание. Ситуация – полная «труба». Народу в кабинете полно. Все унылые. И входит Евгений Анатольевич, бодрым шагом, с улыбкой. «Все хорошо! Сейчас мы во всем разберемся!» Всем казалось, ему было легко. Но какую колоссальную внутреннюю силу надо иметь, чтобы любую ситуацию встречать с улыбкой и верой в победу!

Он был в высшей степени интеллигентным, вежливым человеком. После разговора он не забывал тебя поблагодарить за общение. А еще он очень любил родной город Лебедянь и город Королев, в каждом из них был почетным жителем, любил спорт, особенно волейбол, которым серьезно занимался в молодости, свою семью.

Планов у него было много. Он очень хотел, чтобы полетел перспективный транспортный корабль. Активно занимался Луной. Конечно, верил в эти полеты. В этом и нелепица его быстрого ухода!

V.A. Solov'ev (RSC ENERGIA, JSC, Korolev, Russia)

IN MEMORY OF EVGENII MIKRIN

In May 2020, Yevgenii Mikrin, General Designer of manned space systems and complexes of the Russian Federation, General Designer of RSC Energia, JSC, a well-known Russian scientist in the field of mechanics and control processes, Academician of the Russian Academy of Sciences, passed away after illness. He was only 64 years old. So much has been done and achieved over these years! Behind the dry lines of biography, there is a wonderful person: reliable, responsible, faithful, courageous, and at the same time very kind-hearted and refined. This is the man that will remain in my memories forever.

В. А. СОЛОВЬЕВ
(ПАО «РКК «Энергия», Королёв)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрены структура и основные характеристики системы управления полетом пилотируемых космических комплексов на базе трех основных контуров управления: бортовой автоматический контур управления на базе бортового комплекса управления КА, бортовой ручной контур управления КА, реализуемый экипажем КА и БКУ, и контур управления полетом космического комплекса, состоящий из наземного комплекса управления, бортового комплекса управления и экипажа. Приведены основные характеристики и особенности каждого из контуров управления, в совокупности образующие единую систему управления полетом пилотируемого космического комплекса, функционирующую в реальном масштабе времени.

Введение. С первого полета человека в космос разрабатывались бортовые комплексы управления космическими кораблями и орбитальными станциями [1]. Одновременно создавались и развивались и наземные комплексы управления, образуя автоматизированную систему управления полетом. В предлагаемом докладе рассмотрены основные черты современной системы управления полетом пилотируемых космических комплексов, включающей в себя бортовые комплексы управления реального времени, наземные комплексы управления и экипаж как единую человеко-машинную систему управления реального времени.

Система управления полетом современного пилотируемого космического комплекса – многоконтурная автоматизированная человеко-машинная система управления реального времени. Под системой реального времени понимаются «системы, которые предсказуемо (в смысле времени реакции) реагируют на непредсказуемые (по времени появления) внешние события» [2]. Говоря о многоконтурности, подразумеваем следующие контуры управления:

1 контур – управление всеми бортовыми комплексами космического аппарата средствами бортового комплекса управления (БКУ);

2 контур – экипаж пилотируемого КА управляет бортовыми системами напрямую и посредством БКУ;

3 контур – наземный комплекс управления осуществляет управление полетом КА в целом посредством БКУ и экипажа КА.

Бортовой комплекс управления – автоматическая система, функционирующая в соответствии с законами управления бортовыми системами, выраженными в алгоритмах программного обеспечения бортовой вычислительной системы КА. Входными параметрами для БКУ являются:

- параметры состояния космического аппарата, получаемые в составе телеметрической информации от датчиков БКУ;
- командно-программная информация от НКУ, задающая требуемые значения управляемых параметров КА (числовые и логические уставочные данные, в том числе программы изменения параметров и режимов КА в виде функции времени и координат) в соответствии с программой полета и процедурами выполнения запланированных полетных операций;
- управляющие воздействия от экипажа пилотируемого КА.

Ядром БКУ является бортовая вычислительная система (БВС), предоставляющая вычислительные ресурсы для управления бортовыми системами КА с использованием хранящихся в памяти БВС и исполняющихся алгоритмов управления бортовыми системами. БВС обеспечивает прием телеметрической информации о состоянии бортовых систем КА для корректного исполнения алгоритмов управления. БВС относится к системам жесткого реального времени – в таких системах нарушение критического времени обслуживания приводит к невыполнению системой своего функционального назначения или даже необратимым катастрофическим последствиям. Она обеспечивает управление как быстро текущими, так и медленными процессами, другими словами, обладает широким диапазоном значений характеристики времени.

Наземный комплекс управления – сложная человеко-машинная автоматизированная система. В состав НКУ входят Центр управления полетом, комплекс технических средств наземного автоматизированного комплекса управления, система связи и передачи данных, спутниковая система контроля и управления. В Центре управления полетом работает главная оперативная группа управления (персонал управления), которая решает основные задачи по управлению полетом пилотируемого комплекса:

- планирование полета (исполнительского уровня);
- реализация полетных операций (детальное планирование полетных операций и командно-программное управление);
- контроль полета.

НКУ формирует вектор управления, который является функцией текущего вектора состояния КА, вектора заданных параметров и времени:

$$\vec{U} = f(\vec{X}, \vec{P}, t), \quad (1)$$

где $\vec{U}$ – вектор управляющих воздействий, $\vec{X}$ – вектор состояния КА, $\vec{P}$ – вектор заданных параметров, t – время.

Наземный комплекс управления обладает следующими характеристиками:

- относится к системам мягкого реального времени (в таких системах нарушение критического времени обслуживания приводит к ухудшению характеристик процесса управления, но не является фатальным). В отдельных случаях можно говорить и о жестком реальном времени, когда возникает такая нештатная ситуация, при которой в случае выхода за располагаемое время на ее парирование возможно развитие аварийной ситуации [3];
- адаптивность системы (структурная и параметрическая адаптивность) определяется наличием в ее составе человеко-машинных звеньев. Присутствие человека в контуре управления наделяет его свойствами, аналогичными свойствам экипажа пилотируемого КА, приведенным ниже;
- распределенная в пространстве (объекты НКУ могут располагаться в удаленных друг от друга географических пунктах, на разных континентах, на Земле и в космосе) [4].

Экипаж пилотируемого космического комплекса – уникальное звено системы управления, выступающее в двух ролях. С одной стороны, это элемент директивного контура управления, своего рода исполнительный орган НКУ, действующий по указаниям ЦУП в соответствии с инструкциями ЦУП и бортовой документацией. С другой стороны, это интеллектуальное звено, обладающее индуктивным мышлением, способностью обобщать исходя из отдельных фактов. Человек может узнавать объект в целом, а не только его отдельные характеристики. Человеку присуща гибкость, приспособляемость к изменяющимся условиям, особенно в непредвиденных ситуациях. Способность находить решение задачи при отсутствии готового алгоритма действия.

Заключение. Каждый из контуров автоматического, ручного или автоматизированного управления обладает своими уникальными характеристиками, благодаря которым успешно решаются наборы задач, специфические для каждого из контуров. Взаимно дополняя друг друга для решения своих задач управления, эти три контура образуют, тем не менее, единую автоматизированную систему управления полетом пилотируемого комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легостаев В.П., Микрин Е.А. История создания систем управления космических аппаратов // Автоматика и телемеханика. 2013. № 3.
2. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
3. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: в 2 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
4. Энциклопедия «Машиностроение». Том IV–22 / под редакцией В.П. Легостаева. М.: Машиностроение.

V.A. Soloviev (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev)

FLIGHT CONTROL SYSTEM FOR MANNED SPACE COMPLEXES

The paper presents the structure and main characteristics of the flight control system for manned space complexes based on three main control loops: an onboard automatic control loop on the basis of an onboard spacecraft control system, an onboard manual spacecraft control loop implemented by the spacecraft crew and the spacecraft control system, and a space complex flight control loop consisting of a ground-based control system, an onboard control system and a crew. The main characteristics and features of each of the control loops are presented, which together form a unified flight control system of a manned space complex, operating in real time.

В. Г. ПЕШЕХОНОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПРОБЛЕМА УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ В ВЫСОКОТОЧНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Рассматривается методическая погрешность инерциальной навигационной системы, обусловленная несовпадением отвесной линии и нормали к поверхности референц-эллипсоида. Анализируются методы оценки указанного расхождения, их использование для коррекции выходных данных инерциальных навигационных систем.

Уравнения инерциальной навигации получены в предположении однородной структуры Земли, когда геоид и референц-эллипсоид совпадают, и следовательно, совпадают нормали к геоиду (отвесная линия) и к референц-эллипсоиду (нормальная сила тяжести). Однако в районах аномалий гравитационного поля Земли отвесная линия не совпадает с нормальной силой тяжести. Этот эффект принято называть отклонением отвесной линии (УОЛ).

УОЛ приводит к отличию инерциальных координат от геодезических и порождает методическую погрешность инерциальной навигационной системы (ИНС), аддитивную к ее инструментальной погрешности. Чем выше инструментальная точность ИНС, тем больше вклад методической погрешности в результирующую погрешность.

Общее представление о величине УОЛ дает оценка для Мирового океана [1]: на 80% площади среднее значение УОЛ составляет 5 угл. с (слабоаномальные районы), на 15% площади – 15 угл. с (существенно аномальные районы), на 5% площади величина УОЛ может достигать 1 угл. минуты (сильноаномальные районы, например районы разлома земной коры).

Анализ показывает, что в случае среднеточной ИНС (допустимая максимальная погрешность – 1 морская миля) необходимо учитывать УОЛ только в сильноаномальных районах. Для высокоточной ИНС (0,5 морской мили) область учитываемого УОЛ включает существенно и сильноаномальные районы. При использовании прецизионной ИНС (предельная погрешность порядка 0,1 морской мили) необходимо учитывать УОЛ во всех аномальных районах с погрешностью порядка 1 угл. с.

Для решения обсуждаемой в настоящее время проблемы построения ИНС с точностью выработки координат, приближающейся к точности глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС), необходимо знание УОЛ с погрешностью порядка 0,1 угл. с.

Непосредственное измерение УОЛ невозможно. Разработаны и реализуются методы [2], основанные на измерении двух других параметров, характеризующих аномалии гравитационного поля (аномалия силы тяжести и высота геоида), и их производных с последующей оценкой УОЛ в результате апостериорной обработки результатов измерений.

Измерения производятся с подвижного основания (морские, авиационные и космические носители). В интересах высшей геодезии и уточнения эфемерид космических аппаратов проводится глобальная съемка, и на ее основе строятся глобальные модели гравитационного поля Земли. Для поиска месторождений полезных ископаемых и устранения методической погрешности ИНС и других применений выполняется локальная съемка гравитационных аномалий.

Гравиметрический метод заключается в измерении аномалии силы тяжести (Δg) с последующим вычислением по формулам Венинг-Мейнеса составляющих УОЛ в плоскости меридиана и в плоскости первого вертикала. Для оценки составляющих УОЛ с погрешностью на уровне 1 угл. с необходимо измерить Δg с погрешностью не более 1 мГал и координаты с точностью ГНСС. Современные гравиметры, в частности российские «Чекан-АМ» (версия «Шельф») и GT-2 (GT-2A и GT-2M), обеспечивают необходимую точность измерений Δg с морских и авиационных носителей.

Ввиду значительной трудоемкости гравиметрической съемки метод применяется только для определения УОЛ в локальных районах и является в этой части в настоящее время основным.

Градиентометрический метод основывается на измерении составляющих тензора градиента силы тяжести с последующим вычислением УОЛ. Основная проблема заключается в необ-

ходимости измерений с погрешностью не более 1 ЭТВ (изменение ускорения силы тяжести на величину $10^{-11} g$ на расстоянии 0,1 м) на фоне инерционных помех, на десять порядков превосходящих измеряемую величину.

Измерения производятся с помощью гравитационных градиентометров, принципиальная конструкция которых представляет собой пространственную структуру пробных тел. Для выделения полезного сигнала используется модуляционное вращение градиентометра, обеспечивающее частотное разделение сигнала и помех. В качестве пробного тела используется электростатический акселерометр, собственные шумы которого можно снизить за счет снижения пондеромоторных сил электростатического подвеса.

До настоящего времени градиентометры нашли ограниченное применение. Наиболее эффективно они использованы в космических геодезических миссиях, обеспечив построение глобальных моделей гравитационного поля в виде ряда сферических функций с минимальной длиной волны 10 км. В высокоточной инерциальной навигации модели используются для оценки УОЛ в слабоаномальных районах с «плоским» гравитационным полем, а в аномальных районах при расчете УОЛ по данным гравиметрической съемки по моделям определяется поле в дальней зоне.

Астрономо-геодезический метод моделирует УОЛ: составляющие УОЛ определяются по разности астрономических и геодезических координат. Метод обеспечивает необходимую точность определения УОЛ, но при использовании традиционных приемов наблюдательной астрономии чрезвычайно трудоемок и применяется только на стационарных наземных пунктах. Определение УОЛ в точке наблюдения занимает до трех месяцев.

Современные технологии открыли возможность автоматизированного определения составляющих УОЛ в течение одного часа. Определение положения изображения звезды на мегапиксельной КМОП-матрице с точностью до сотых долей пикселя, компьютерная обработка результатов измерений, в том числе идентификация звезд, обеспечили решение задачи без участия оператора [3].

Астрономо-геодезические системы, построенные на базе зенитного телескопа, определяют УОЛ с точностью 0,2-0,3 угл. с за час наблюдений на неподвижном основании. Вопрос работы на подвижном основании остается пока открытым, но проблема имеет чисто технический характер и при определенных ограничениях на движение основания безусловно может быть решена.

Инерциально-геодезический метод [4, 5] является модификацией астрономо-геодезического, когда вместо зенитного телескопа используется ИНС. Очевидным достоинством этого метода по сравнению с астрономо-геодезическим является независимость от гидрометеорологических условий и от инерционных ускорений подвижного основания. Однако есть и серьезные ограничения: инструментальная погрешность используемой ИНС должна быть существенно меньше методической погрешности, обусловленной УОЛ. В связи с тем что инструментальная погрешность ИНС нарастает во времени, астрономо-геодезический метод может использоваться лишь на ограниченных временных отрезках. Кроме того, этим методом определяется не абсолютная величина УОЛ, а относительная к исходной точке измерения.

В силу указанных ограничений инерциально-геодезический метод практического применения пока не нашел.

Заключение. В целом проблема УОЛ в высокоточной инерциальной навигации изучена, но предстоит большой объем работ по картографированию УОЛ в районах с аномалиями гравитационного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П., Элинсон Л.С. Судовые средства измерения гравитационного поля Земли. Л.: ЦНИИ «Румб», 1989. С. 89.
2. **Современные методы и средства** измерения гравитационного поля Земли / под редакцией В.Г. Пешехонова и О.А. Степанова. СПб.: ГНЦ РФ «АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.

3. **Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В.** Высокоточное определение параметров гравитационного поля Земли автоматизированным зенитным телескопом // XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2017. С. 474–479.
4. **Анучин О.Н.** Инерциальные методы определения параметров гравитационного поля Земли на море. Дисс. ... доктора технических наук, 05.11.03. 1992. С. 425.
5. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб.: ГНЦ РФ «ЦНИИ «Электроприбор», 1997. С. 208.

V.G. Peshekhonov (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, Russia; ITMO University, St. Petersburg, Russia)

PROBLEM OF THE VERTICAL DEFLECTION IN HIGH-PRECISION INERTIAL NAVIGATION

The paper addresses the systematic error of an inertial navigation system, caused by the discrepancy between the plumb line and the normal to the reference ellipsoid surface. The methods of this discrepancy estimation, and their use for correcting the data of inertial navigation systems are studied.

А. А. ГОЛОВАН
(МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ «БИНС–ОДОМЕТР»: ОДИН ИЗ ПРОЕКТОВ ЛАБОРАТОРИИ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ МГУ

Доклад состоит из двух частей. В первой части дается краткий обзор работ лаборатории в области интегрированных навигационных систем и их приложений, а также образовательных программ лаборатории. Так получилось, что лаборатория связана совместными работами со многими промышленными партнерами как в России, так и за рубежом. Конкретные приложения связаны с морской, подземной, пешеходной, наземной, воздушной, космической навигацией. Опыт прикладных работ предопределил образовательную составляющую деятельности лаборатории. Во второй части как пример рассматривается известная задача топопривязки – задача построения интегрированных решений в навигационном комплексе, состоящем прежде всего из бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) и одометра. Описываются основные идеи построения интеграции «БИНС–одометр» для трехмерной навигации. Результаты основаны на работах лаборатории с промышленными партнерами, занимающимися вопросами навигации дефектоскопов нефтяных и газовых труб, задачами топопривязки для наземных объектов разного назначения.

Введение. Лаборатория управления и навигации МГУ была организована в 1987 году по указанию директивных органов СССР для решения задач управления и навигации космических объектов. Первым руководителем лаборатории был заслуженный профессор МГУ, классик инерциальной навигации Николай Алексеевич Парусников.

После развала СССР лаборатория была вынуждена самостоятельно определять круг исследовательских задач с одновременным поиском потенциальных промышленных партнеров для совместной работы. Ситуация с поиском заказов для академических, университетских коллективов кардинально поменялась в 90-е годы: именно промышленные партнеры как обладатели финансовых средств стали весьма прагматично определять, с какими коллективами можно и нужно сотрудничать, стали жестко контролировать результаты совместной работы.

Понимая это, лаборатория активно стала искать потенциальных заказчиков, используя ранее сложившиеся связи с промышленностью. Первой практической задачей стала задача топопривязки (1991–1993 гг.) для наземного объекта на колесной базе, когда при помощи данных инерциальной навигационной системы (ИНС) платформенного типа и режима периодических кратковременных остановок (в англоязычной литературе ZUPT – Zero Velocity Update Technology) требовалось возможно точнее определять координаты объекта. Работа проводилась совместно с НИИ 29 ВТУ МО и с Московским институтом электромеханики и автоматики (МИЭА) – разработчика ИНС И-21.

Успешное завершение работы предопределило участие лаборатории в разработке (1995 г.) совместно с МИЭА, ВНИИГеофизика, ГНПП «Аэрогеофизика», Институтом физики Земли двух модификаций аэрогравиметров на базе платформенной ИНС Л-41, у которой вместо блока астрокоррекции были установлены гравиметры-акселерометры (струнные, кварцевые). Участие в этих проектах привело к расширению контактов с новыми научными, инженерными коллективами, а с научной стороны – к освоению спутниковых навигационных технологий, к опыту разработки программного обеспечения задач спутниковой навигации и аэрогравиметрии, применяемого до сих пор в качестве коммерческого программного продукта для аэрогравиметров серии GT-2А.

Параллельно лаборатория стала активно участвовать в профильных российских конференциях, прежде всего в МКИНС, в конференции имени Н.Н. Острякова, что также расширило круг знакомств в научном, профильном инженерном мире, в том числе состоялось знакомство с представителями потенциальных промышленных партнеров – как российских, так и зарубежных.

Ширился круг исследовательских, практических задач, причем относящихся к разным аспектам теории интегрированных инерциальных навигационных систем, приложениям, объектам навигации.

За эти годы лаборатория проводила и проводит (и, надеюсь, будет проводить) совместные работы той или иной продолжительности, интенсивности, глубины кооперации со многими научно-исследовательскими, приборостроительными компаниями, академическими организациями, университетами: МИЭА, РПКБ, ИТТ (г. Раменское), ПНППК (г. Пермь), ГосНИИАС, 29 НИИ ВТУ МО, ЛИИ им. М.М. Громова, МКБ «Компас», «Темп-Авиа» (г. Арзамас), ПАО «Туполев», «Оптолинк», Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, ЦНИИМаш, НИИП, ОКБ «Марс», «Электрооптика», ГНПП «Аэрогеофизика», ВНИИГеофизика, Институт физики Земли РАН, АО «Геологоразведка», МАИ, МВТУ им. Баумана, НПП «Гравиметрические технологии», «Геокен» (Казахстан), НПО «Регион», ЗАО «Нефтегазкомплектсервис», «Газпром Оргэнергогаз», филиал «Саратоворгдиагностика», «ГироЛаб», Институт проблем морских технологий ДВО РАН, ИПУ, Baker Hughes, Canadian Micro Gravity, CMG Operations Australia, Fugro Airborne Surveys, Southeast University (Nanjing, China), China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Natural Resource, Beijing Institute of Aerospace Control Devices, XUAWEL.

Перечень объектов навигации:

- подводные автономные роботы;
- дефектоскопы нефтяных, газовых труб;
- наземные объекты – топопривязчики, автомобиль-лаборатория для диагностики дорожного покрытия, железнодорожный объект;
- навигация пешехода;
- самолетная, вертолетная, ракетная навигация.

Сопутствующие задачи, кроме собственно интеграционных задач:

- задача калибровки инерциальных систем в сборе при помощи первичной (инерциальные датчики) и вторичной выходной информации БИНС, включая вопросы температурной калибровки;
- задача выставки на неподвижном и подвижном основаниях;
- задача довыставки и автокалибровки БИНС по ее функционированию;
- компьютерные имитаторы перечисленных выше задач.

Совместная работа с промышленными партнерами предопределила образовательную составляющую деятельности лаборатории. Лаборатория создала и развивает курсы лекций по математическим основам интегрированных навигационных систем:

- теории инерциальных навигационных систем;
- теории спутниковых навигационных систем (СНС);
- приложениям методов теории оценивания к задачам навигации;
- задаче калибровки инерциальных навигационных систем;
- задачам выставки на неподвижном и подвижном основаниях;
- методам компьютерного моделирования задач навигации.

Лекции читались и читаются:

- студентам, магистрантам механико-математического факультета МГУ;
- студентам, аспирантам МВТУ им. Баумана;
- инженерам промышленных партнеров: РПКБ, ИТТ, ГосНИИАС, ПНППК, ОКБ «Марс», ПАО «Туполев», слушателям из Ирана, Китая, в том числе в рамках летней школы МГУ по навигации.

Цель лекционных курсов – передать накопленные при выполнении практических работ знания и опыт.

Лаборатория приняла для себя следующие принципы проведения совместных научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ:

- интерес представляют работы, связанные прежде всего с конкретным перспективным приложением;
- лаборатория берет на себя разработку моделей, алгоритмов, методики и т.п. в плотном контакте с заказчиком, предоставляет исчерпывающее математическое описание;
- лаборатория занимается при необходимости обработкой экспериментальных данных заказчика;

- лаборатория предоставляет при необходимости разумно комментируемый исходный код (язык С) алгоритмов и программ.

Далее рассматривается известная задача топопривязки – задача построения интегрированных решений в навигационном комплексе, где главными его составляющими являются БИНС и одометр. При этом первичное измерение одометра представляют собой приращение пройденного пути вдоль «измерительной» оси одометра. Такая задача востребована для навигации:

- дефектоскопов нефтяных и газовых труб;
- наземных объектов на колесной, гусеничной тяге и т.п.;
- объектов железнодорожного транспорта.

В доступной открытой литературе по обозначенной тематике исследования представлены работы коллективов из ЛЭТИ (железнодорожный транспорт), МГТУ им. Баумана, Московского авиационного института (автомобильные приложения), Красноярского государственного технического университета (внутритрубные инспекционные снаряды), МГУ им. М.В. Ломоносова.

Среди научно-промышленных предприятий можно выделить ВНИИ «Сигнал», ПНППК (Пермь), АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ОООНПК «Электрооптика», ЦНИИАГ, «ГироЛаб» (Пермь) и др.

Часто измерения одометра интерпретируются (формируются) как скоростное измерение, используемое далее для коррекции БИНС. Именно этот вариант в первых «одометрических» проектах нами и применялся.

Информационно родственными задачами интеграции «БИНС–одометр» являются задачи коррекции БИНС при помощи показаний лага, задача коррекции воздушного судна при помощи показаний системы воздушно-скоростных сигналов.

В представляемом докладе приводятся модели интеграционного алгоритма «БИНС–одометр» для случая трехмерной навигации при позиционной интерпретации измерений одометра. Основу алгоритма составляют:

- алгоритмы трехмерного (3D) инерциального автономного («шулеровского») счисления, включая вертикальный канал БИНС;
- алгоритмы 3D-кинематического одометрического счисления;
- 3D-уравнения ошибок БИНС;
- 3D-уравнения ошибок кинематического одометрического счисления;
- уравнения непрерывной позиционной коррекции БИНС при помощи позиционных данных одометрического счисления.

Помимо традиционных моделей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, в модель алгоритма входят: погрешность k масштабного коэффициента одометра, перекосы δ_1 , δ_3 «измерительной» оси одометра по каналам курса и тангажа [1–3]. Алгоритм не требует организации режима коррекции по нулевой скорости – ZUPТ-коррекции, традиционно применяемой в задаче топопривязки. Алгоритм коррекции реализуется в обратных связях или в замкнутом варианте.

Модель автономного «шулеровского» счисления БИНС. В качестве модели автономного счисления БИНС используется вариант, когда в качестве опорного навигационного трехгранника принят географический трехгранник с тем или иным законом азимутальной ориентации: координатная сетка, абсолютно либо относительно свободная ориентации в азимуте. Пример:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda} &= \frac{V_E}{(R_E + h) \cos \varphi}, \quad \dot{\varphi} = \frac{V_N}{R_N + h}, \quad \dot{h} = V_{UP} \text{ (координаты)}, \\ \dot{V} &= (\hat{\Omega} + 2\hat{u})V + f + g(\varphi, h) \text{ (относительная линейная скорость)}, \\ A_{z^0\xi} &= \hat{\omega}_{z^0} A_{z^0\xi} \text{ (ориентация приборного трехгранника)}.\end{aligned}$$

Модель кинематического одометрического счисления. Кинематическое одометрическое счисление географических координат использует углы истинного курса, крена, тангажа, предоставляемые БИНС, измерение одометра Δs – приращение пройденного пути вдоль «измерительной» оси одометра.

$$\Delta S = \begin{pmatrix} \Delta s_E \\ \Delta s_N \\ \Delta s_{UP} \end{pmatrix} = A_{x^0 z^0} \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta s \\ 0 \end{pmatrix} \text{ и}$$

$$\lambda_{j+1}^o = \lambda_j^o + \frac{\Delta s_E}{(R_E + h) \cos \varphi}, \quad \varphi_{j+1}^o = \varphi_j^o + \frac{\Delta s_N}{(R_N + h)}, \quad h_{j+1}^o = h_j^o + \Delta s_{UP}.$$

Здесь $A_{x^0 z^0}$ – матрица перехода от приборных осей БИНС к осям географического трехгранника.

При этом «одометрическая» высота может использоваться для непрерывного демпфирования неустойчивого вертикального канала БИНС:

$$g = g(\varphi^o, h^o),$$

$$\dot{h} = V_{UP} - q_1(h - h^o),$$

$$\dot{V}_{UP} = (\Omega_N + 2u_N)V_E - (\Omega_E + 2u_E)V_N + f_{UP} + g_{UP}(\varphi^o, h^o) - q_2(h - h^o),$$

где q_1, q_2 – коэффициенты обратной связи.

Модель уравнений ошибок БИНС. Используется модель, когда полные ошибки определения относительной линейной скорости разделяются на динамическую и кинематическую составляющие [4], а модели инструментальных погрешностей инерциальных датчиков – акселерометров и датчиков угловой скорости – представлены смещениями нулевых сигналов, шумовыми составляющими. В качестве угловых ошибок БИНС используются угловые ошибки α_1, α_2 построения вертикали и кинематическая азимутальная ошибка β_3 .

Модель уравнений ошибок кинематического одометрического счисления. Параметрами модели являются угловые ошибки БИНС (поскольку в одометрическом счислении используется угловая информация БИНС), погрешность k масштабного коэффициента одометра, два угла δ_1, δ_3 перекосов «измерительной» оси одометра по каналам курса и тангажа:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{y}_E^o \\ \Delta \dot{y}_N^o \\ \Delta \dot{y}_{UP}^o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Omega_{UP} & -\Omega_N \\ -\Omega_{UP} & 0 & \Omega_E \\ \Omega_N & -\Omega_E & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta y_E^o \\ \Delta y_N^o \\ \Delta y_{UP}^o \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} V_E \\ V_N \\ V_{UP} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & \beta_{UP} & -\beta_N \\ -\beta_{UP} & 0 & \beta_E \\ \beta_N & -\beta_E & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_E \\ V_N \\ V_{UP} \end{pmatrix} + A_{x^0 z^0} V^o \begin{pmatrix} -\delta_3 \\ 0 \\ \delta_1 \end{pmatrix} + \Delta V^s.$$

Здесь $\Delta y_E^o, \Delta y_N^o, \Delta y_{UP}^o$ – ошибки одометрического счисления в восточном, северном, вертикальном направлениях, Ω_i – компоненты относительной угловой скорости сопровождающего географического трехгранника, V_i – компоненты относительной линейной скорости.

Модель автономной непрерывной коррекции системы «БИНС-одометр». В качестве сигналов коррекции БИНС используется разность географических координат (долготы, широты, высоты), определяемых БИНС и одометрическим счислением. Эта разность в линейном приближении есть разность соответствующих позиционных ошибок БИНС и позиционных ошибок одометрического счисления:

$$z_\lambda = \lambda^{\text{БИНС}} - \lambda^o \simeq \Delta \lambda^{\text{БИНС}} - \Delta \lambda^o, \quad z_\varphi = \varphi^{\text{БИНС}} - \varphi^o \simeq \Delta \varphi^{\text{БИНС}} - \Delta \varphi^o, \dots$$

Использование внешней позиционной информации для коррекции системы «БИНС-одометр». В задаче топопривязки возможна ситуация, когда доступна дополнительная внешняя навигационная информация, предоставляемая, например, приемником сигналов спутниковых навигационных систем, информация об известных координатах маркерных, реперных точек, мимо которых проследовал объект. В этом случае осуществляется одномоментная позиционная коррекция как БИНС, так и одометрического счисления.

Численная реализация алгоритмов интеграции. Применялся дискретный фильтр Калмана в форме метода корня с соответствующими настройками под класс точности инерциально-измерительного блока, алгоритм интеграции реализовывался в варианте обратных связей или в замкнутом варианте (варианте управления).

Экспериментальная отработка алгоритма интеграции «БИНС–одометр». Алгоритм тестировался на экспериментальных данных, предоставленных лаборатории управления и навигации МГУ нашими партнерами (из различных производственных организаций) по совместным работам. Ядро алгоритма (модели инерциального и одометрического счисления, матрицы уравнений ошибок и корректирующих измерений) для разного типа приложений, обозначенных выше, оставались неизменными, модификации подлежали настройки шумов системы и измерений под класс точности используемых инерциальных блоков, разрешающую способность одометра. В этих приложениях использовались блоки на основе МЭМС-датчиков, волоконно-оптических гироскопов разного класса точности, лазерных гироскопов. Объекты навигации: дефектоскопы нефтяных и газовых труб, автомобиль-лаборатория для диагностики дорожного полотна, топопривязчик на колесной базе, железнодорожный носитель навигационного комплекса. Во всех случаях получены разумные по точности интеграционные решения.

Заключение

1. Описаны основные подходы к проектированию 3D-алгоритмов интеграции «БИНС–одометр» при позиционной интерпретации показаний одометра. Основу составляют:
 - 3D-инерциальное счисление БИНС;
 - 3D-кинематическое одометрическое счисление;
 - использование «одометрических» координат для непрерывной коррекции БИНС.
2. Выделен прием с использованием «одометрической» высоты для демпфирования неустойчивого вертикального канала БИНС.
3. Отмечена нетривиальность модели ошибок одометрического счисления.
4. Отмечено, что базовые алгоритмические решения *с модификациями под класс точности инерциальных датчиков и параметров одометра* использовались для разных приложений:
 - навигации дефектоскопа нефтяной трубы;
 - навигации дефектоскопа газовой трубы;
 - навигации автомобиля лаборатории при использовании MEMS-блоков;
 - навигации автомобиля-топопривязчика, железнодорожного вагона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голован А.А., Никитин И.В. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1 // Вестник московского университета. Математика. Механика. 2015. №2. С. 69–72.
2. Голован А.А., Никитин И.В. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 2 // Вестник московского университета. Математика. Механика. 2015. №4. С. 68–72.
3. Никитин И.В. Задача навигации наземного объекта на основе данных БИНС и одометра. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2015.
4. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Математические модели инерциальной навигации. М.: Издательство Московского университета, 2020. 162 с.

A.A. Golovan (Lomonosov Moscow State University, Moscow)

MOBILE MAPPING BASED ON INS-ODOMETER AIDING: ONE OF THE PROJECTS DONE AT MSU LABORATORY OF CONTROL AND NAVIGATION

The presented article consists of two sections. The first section provides a brief overview of the laboratory's work in the field of integrated navigation systems and their applications, as well as the laboratory's educational programs. It so happened that the laboratory is associated with joint work with many industrial partners both in Russia and abroad. Specific applications are related to marine, underground, pedestrian, land, air, and space navigation. The experience of applied work predetermined the educational component of the laboratory's activities. In the second part, as an example, we consider the

well-known mobile mapping problem when relevant navigation complex consists of a strapdown inertial navigation system (INS) and an odometer wheel. We also suppose that raw odometer readings reflect an increment of a travelled distance along the "measuring" axis of the odometer. 3D models of the INS-odometer integration algorithm are presented. The algorithm is based on the INS error equations, the kinematic error equations of odometer-based dead reckoning, continuous in time INS aiding via odometer derived positional data. The algorithm model includes (in addition to traditional models of instrument errors of inertial sensors): the error of the scale factor of the odometer, misalignments (heading and pitch directions) of the "measuring" axis of the odometer. The algorithm does not require ZUPT correction, which is traditionally used in the mobile mapping problem on the basis of inertial technology.

В. В. КОСЬЯНЧУК, С. Ю. ЖЕЛТОВ, Е. Ю. ЗЫБИН
(ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва)

НОВЫЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассматриваются новые способы обеспечения отказоустойчивости системы управления летательного аппарата при наличии структурных и параметрических неопределенностей за счет мониторинга технического состояния и реконфигурации в реальном времени измерительных, исполнительных и вычислительных подсистем с использованием параметрических и непараметрических методов теории динамических систем.

Введение. Одними из самых опасных в отношении безопасности полетов летательных аппаратов (ЛА) являются как конструкционные и эксплуатационные отказы измерительных, исполнительных и вычислительных подсистем систем управления (СУ), так и их повреждения в результате столкновения ЛА с препятствиями, другими ЛА или птицами. При их возникновении изменяется структура и параметры прямых и/или обратных связей СУ, что может привести к потере устойчивости и управляемости ЛА. Для предотвращения развития аварийной ситуации в полете необходимо вовремя обнаружить и локализовать отказавшие элементы с целью замены их на резервные исправные и диагностировать их количественные характеристики для осуществления реконфигурации СУ с использованием функциональной избыточности – перераспределения исправных сигналов по неисправным каналам с целью сохранения стереотипа управления ЛА, заданных характеристик устойчивости и управляемости [1–3].

Постановка задачи. Известны различные подходы к обеспечению отказоустойчивости СУ ЛА с использованием большого количества методов решения задач теории динамических систем [4–9]. При этом все их многообразие можно условно разбить на две большие группы – параметрические и непараметрические, как показано на рис. 1 [9].

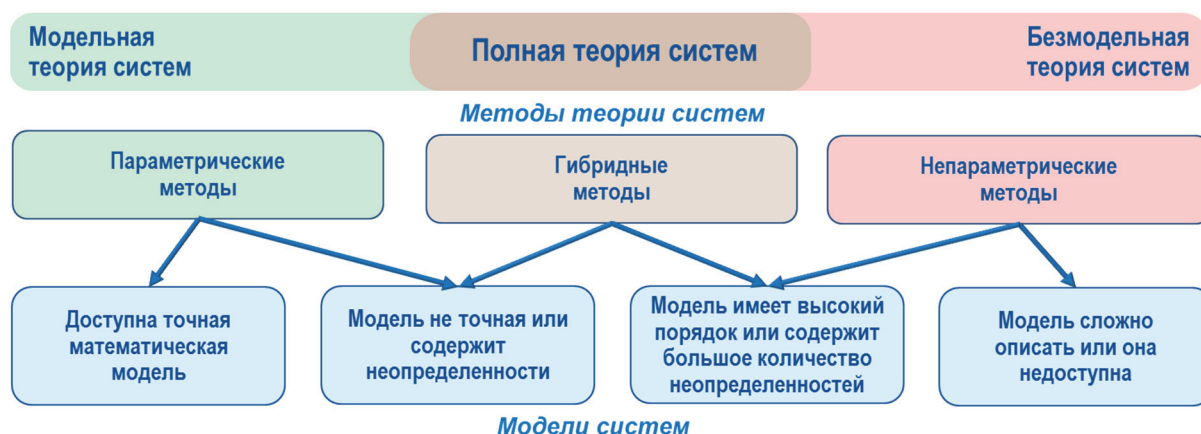


Рис. 1. Полная теория динамических систем

Параметрические (parametric) или модельные (model-based) методы (регрессионные, авторегрессионные, в пространстве состояний и т.д.) считаются классическими и по определению прямо или косвенно основаны на информации о параметрах моделей динамических систем, значения которых задаются априорно или оцениваются в процессе идентификации [6, 7, 9]. Они позволяют получать точные решения с учетом анализа всех внутренних взаимосвязей систем, описывать все множество эквивалентных решений, а в случае их отсутствия указать конкретные причины неразрешимости поставленных задач и корректировать их с учетом требований к оптимальности и робастности.

Использование параметрических методов на практике затрудняется рядом факторов, обусловленных нестационарностью и нелинейностью моделей ЛА, неточностью в определении их параметров, действием возмущений и влиянием ошибок измерений. Эти факторы приводят к появлению неопределенностей и возникновению модельных ошибок в конечных решениях, что обуславливает низкую достоверность получаемых результатов. При этом уменьшение неопределенностей за счет идентификации существенно ограничено проблемой неидентифицируемости модели разомкнутой динамики ЛА в режиме нормальной эксплуатации [10, 11]. В результате параметрические методы применимы на практике только тогда, когда точно известны текущие параметры и структура математической модели ЛА, а неопределенности в постановке задачи существенно ограничены.

Данных недостатков лишены непараметрические (nonparametric) методы, известные также как безмодельные (model-less, model-free), основанные на данных (data-driven, data-based), знаниях (knowledge-based), сигналах (signal-based) или прошлых измерениях (history-based) [6–9, 12–20]. Такие методы относятся к интеллектуальным, так как не требуют априорной информации о структуре и параметрах модели динамической системы, основаны только на анализе измерений ее входных и выходных сигналов и могут работать с ней как с «черным ящиком» в условиях структурных и параметрических неопределенностей. Алгоритмическую основу таких методов, как правило, составляют так называемые «мягкие» вычисления, которые в отличие от традиционных «жестких», требующих точных исходных данных и поставленных целей, способны менять структуру и параметры алгоритмов в зависимости от получаемых результатов.

Однако широко известные непараметрические методы либо требуют их предварительного обучения или настройки для конкретного объекта, что обуславливает их узкую направленность (нейросетевые, генетические, нечеткие, хаотические, марковские, клеточных автоматов, опорных векторов, и т.д.), либо основаны на статистических (вероятностных) алгоритмах, требующих достаточно большой выборки данных измерений, что неизбежно приводит к увеличению времени, требуемого для решения поставленных задач. В условиях практической эксплуатации применение таких подходов для обеспечения отказоустойчивости может потребовать время, превышающее критическое время реакции СУ, и ЛА может перейти в невосстанавливаемое состояние.

Предлагаемый доклад посвящен описанию концепции и методологии синтеза гибридной отказоустойчивой СУ ЛА, сочетающей в себе как параметрические, так и непараметрические методы. Такое решение позволит использовать преимущества и компенсировать недостатки обоих подходов и обеспечит эффективное и безопасное функционирование СУ в любых отказных ситуациях.

Концепция отказоустойчивой СУ ЛА. Разрабатываемая СУ должна быть активной, то есть способной обнаружить, локализовать, диагностировать и компенсировать возникающие отказы в режиме реального времени. Она должна иметь высокое быстродействие и быть способной быстро адаптироваться к изменению структуры и параметров СУ на любых, в том числе критических, режимах полета ЛА при действии на него возмущений. Алгоритмы, используемые для обеспечения отказоустойчивости, должны быть детерминированными для обеспечения сертифицируемости СУ ЛА и иметь низкие вычислительные затраты для их реализуемости в бортовых вычислителях.

Отказоустойчивость в такой СУ ЛА обеспечивается согласованной работой систем мониторинга и реконфигурации. Система мониторинга состоит из внешней и встроенных систем контроля и диагностирования технического состояния СУ ЛА. Для повышения достоверности решений задач обнаружения и локализации отказов используется также информация от центральной бортовой системы технического обслуживания. Реконфигурация СУ ЛА осуществляется с использованием как аппаратных, так и функциональных методов.

Параметрический мониторинг реализуется методами порогового контроля, аппаратной и функциональной избыточности. При пороговом контроле значения параметров в каждом канале проверяются на соответствие своим допустимым диапазонам и скоростям изменения. Методы аппаратной избыточности, в которых используются несколько резервированных элементов, выполняющих одинаковые функции, основаны на использовании перекрестного контроля, кворумирования и мажорирования сигналов. Для мониторинга технического состояния элементов

СУ ЛА без аппаратного резервирования используются методы функциональной избыточности, построенные с использованием известных аналитических зависимостей между различными каналами измерений и управлений.

При непараметрическом мониторинге, реализованном во внешних системах контроля, применяются оригинальные методы обнаружения и локализации отказов, результаты работы которых используются далее при аппаратной реконфигурации [12–18]. Для диагностирования количественных характеристик отказов, используемых при параметрической функциональной реконфигурации, одновременно решаются две задачи: прогнозирование вектора измерений и восстановление вектора управлений с оценкой рассогласований между реальными и оцененными значениями [19]. Применяемые непараметрические методы не требуют решения задачи восстановления вектора состояний и обеспечения аппаратной избыточности и могут быть использованы для решения задач мониторинга СУ ЛА даже в случае неидентифицируемости его модели. Непараметрический мониторинг обеспечивает устойчивость СУ к таким отказам и повреждениям, которые не могут быть диагностированы с помощью встроенных систем, так как неизвестны их истинные входные или выходные сигналы (некоторые механические отказы, отказы нерезервированных датчиков параметров полета, повреждения управляющих поверхностей и т.д.).

Аппаратная реконфигурация СУ реализуется при наличии доступных резервов путем замены отказавших элементов на аналогичные исправные. При исчерпании аппаратного резервирования применяется функциональная реконфигурация.

Для синтеза законов функциональной параметрической реконфигурации используется аналитический матричный подход, учитывающий ограничения на отклонения управляющих поверхностей и позволяющий отслеживать нестационарность модели ЛА за счет адаптации законов реконфигурации по режимам полета на основе банка аэродинамических характеристик ЛА [21–25]. При незначительном увеличении степени неопределенности задачи осуществляется синтез робастных решений, обеспечивающих минимальную чувствительность законов к изменениям режима полета [26].

Непрерывная адаптация к резким изменениям структуры и параметров СУ при возникновении отказов обеспечивается непараметрическими методами функциональной реконфигурации, позволяющими обеспечивать плавный переход из одного режима управления в другой без забросов по управлению, как правило возникающих при включении режима реконфигурации, и обеспечить безударность переключений не только на критических режимах полета, но и при активном маневрировании ЛА [20].

Заключение. Использование предлагаемых подходов для обеспечения отказоустойчивости СУ ЛА позволяет записать решение каждой задачи на основе единого универсального математического аппарата, объединяющего в себе параметрические и непараметрические методы решения прямых и обратных задач теории динамических систем. При наличии незначительных неопределенностей используются традиционные параметрические методы обнаружения, локализации, диагностирования и компенсации отказов в СУ ЛА. При увеличении степени неопределенности осуществляется непрерывная коррекция отклонений управляющих поверхностей и показаний датчиков с использованием непараметрических методов мониторинга и реконфигурации. Предлагаемые методы построены только на основе анализа штатных входных и выходных сигналов СУ и могут быть использованы для решения задач в условиях структурно-параметрической неопределенности. Они не требуют информации о параметрах модели ЛА и не подвержены влиянию модельных ошибок, при этом, в отличие от широко известных параметрических методов, не используют логические или статистические вычисления, обучение или длительную настройку. Основу данных методов составляют алгебраические условия разрешимости задач идентификации линейных дискретных математических моделей динамических систем в различных постановках. Такой подход позволяет смягчить требования к аппаратной избыточности элементов СУ, снизить вычислительные затраты, потребляемую мощность, вес и стоимость оборудования, обеспечить сертифицируемость и надежность СУ ЛА в целом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-08-01215, 18-08-00453, 19-29-06091, 20-08-01215.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Косьянчук В.В., Константинов С.В., Колодяжная Т.А., Редько П.Г., Кузнецов И.П.** Перспективный облик отказоустойчивых цифровых систем управления маневренных ЛА // Полет. 2010. № 2. С. 20–27.
2. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И.** Отказоустойчивая архитектура комплексных систем управления перспективных самолетов транспортной категории на базе единой вычислительной платформы // Тезисы докладов 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». М.: Издательство «Научтехлитиздат», 2017. С. 227–229.
3. **Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Карпенко С.С., Бондаренко Ю.В.** Резервированная интегрированная система мониторинга технического состояния воздушного судна // 9-й Международный аэрокосмический конгресс IAC-18. Тезисы докладов. 2018. С. 119–121.
4. **Edwards, C., Lombaerts, T., Smaili, H.,** Fault Tolerant Flight Control: A Benchmark Challenge, Springer, Berlin, 2010.
5. **Fekih, A.,** Fault diagnosis and fault tolerant control design for aerospace systems: a bibliographical review, American Control Conference (ACC), IEEE, 2014, pp. 1286–1291.
6. **Tidriri, K. et al.,** Bridging data-driven and model-based approaches for process fault diagnosis and health monitoring: A review of researches and future challenges, Annual Reviews in Control, 2016, vol. 42, pp. 63–81.
7. **Gao, Z., Cecati, C., Ding, S.X.,** A Survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches, IEEE Trans. on Ind. Elec., 2015, vol. 62, no. 6, pp. 3757–3767.
8. **Gao, Z., Cecati, C., Ding, S.X.,** A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part II: Fault diagnosis with knowledge-based and hybrid/active-based approaches, IEEE Trans. on Ind. Elec., 2015, vol. 62, no. 6, pp. 3768–3774.
9. **Hou, Z.S., Wang, Z.,** From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective, Information Sciences, 2013, vol. 235, pp. 3–35.
10. **Косьянчук В.В.** Контроль и диагностирование подсистем в замкнутом контуре управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. № 1. С. 67–76.
11. **Зыбин Е.Ю.** Об идентифицируемости линейных динамических систем в замкнутом контуре в режиме нормальной эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4 (165). С. 160–170.
12. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Карпенко С.С.** О некоторых непараметрических методах теории управления динамическими объектами // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2018. № 6. С. 288–298.
13. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.** Алгебраический критерий обнаружения факта и времени возникновения отказов в системах управления динамическими объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 4. С. 50–61.
14. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Кульчак А.М.** Алгебраические условия неисправности исполнительной подсистемы воздушного судна // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2016. № 2 (26). С. 3–11.
15. **Бондаренко Ю.В., Зыбин Е.Ю.** Метод функционального контроля технического состояния датчиков системы управления полетом воздушного судна в условиях полной параметрической неопределенности // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 3. С. 39–51.
16. **Zybin, E., Kosyanchuk, V., Karpenko, S.,** Quantitative model-free method for aircraft control system failure detection, MATEC Web of Conferences, 2017, p. 03011.
17. **Karpenko, S.S., Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V.,** Nonparametric method for failures detection and localization in the actuating subsystem of aircraft control system, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA2017), 2018, p. 012010.
18. **Bondarenko, Yu.V., Chekin, A.Yu., Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V.,** Nonparametric method for aircraft sensor fault real-time detection and localization, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 714, p. 012004.
19. **Terent'yev, M.N., Karpenko, S.S., Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V.,** Nonparametric methods for failures diagnosis in the actuating subsystem of aircraft control system, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 312, p. 012025.
20. **Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю.** Реконфигурация систем управления полетом летательных аппаратов в условиях структурной и параметрической неопределенности // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). 2019. С. 18–21.
21. **Kosyanchuk, V., Selvesyuk, N., Kulchak, A.,** Aircraft control law reconfiguration, Aviation, 2015, vol. 19, no. 1, pp. 14–18.
22. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.** Аналитический синтез многосвязных отказоустойчивых систем управления с упрощенной схемной реализацией // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 108–117.
23. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Кульчак А.М.** Аналитическое решение задачи оптимальной реконфигурации системы управления летательного аппарата при отказе нескольких органов управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 59–66.
24. **Кульчак А.М., Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю.** Реконфигурация комплексной системы управления воздушного судна при отказах приводов с учетом ограничений на управление // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 65–78.
25. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.** Синтез системы управления многосвязного объекта на основе технологии вложения // Автоматика и телемеханика. 2002. № 8. С. 22–36.
26. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И., Кульчак А.М., Сапожников А.В.** Робастная к изменению режима полета реконфигурация управления воздушным судном при отказах приводов // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2014. № 2. С. 331–336.

V.V. Kosyanchuk, S.Yu. Zheltov, E.Yu. Zybin (GosNIIAS, Russia)

NEW WAYS TO ENSURE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM FAULT TOLERANCE UNDER STRUCTURAL AND PARAMETRIC UNCERTAINTIES

New ways to ensure aircraft control system fault tolerance by health monitoring and real-time reconfiguration of sensor, actuator and computing subsystems using parametric and nonparametric dynamic systems theory methods under structural and parametric uncertainties are considered.

М. В. СИЛЬНИКОВ
(АО «НПО Спецматериалов», Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОРАЖЕНИЯ МОРСКИМ ОРУЖИЕМ

Электрический разряд в воде (электровзрыв) характеризуется высокой плотностью энергии в канале разряда, в десятки и сотни раз превышающей плотность энергии при взрыве тротила. Электровзрыв позволяет легко управлять параметрами генерируемых ударных и акустических волн в воде в широких пределах. Путем изменения приложенного напряжения и энерговклада возможно изменять амплитуду ударной волны давления и ее длительность. Эта технология может быть использована для защиты морских подвижных объектов от подводных террористов и для противодействия гидроакустическим системам обнаружения и наведения.

Введение. Электрический разряд в воде [1–3] находит широкое применение во многих областях науки и техники, связанных с использованием импульсов высокого и сверхвысокого давления, таких как гидроакустика, медицина, горное дело, строительство, обработка металлов давлением. Ударные волны, созданные электрическим разрядом в воде, который можно назвать электровзрывом, существенно отличаются от ударных волн, создаваемых подводным химическим взрывом взрывчатых веществ. Эти отличия обусловлены отличиями в реакционном объеме, скорости ввода энергии и ее плотности.

При химическом взрыве реакционный объем равен объему взрывчатого вещества. При электровзрыве – это объем канала электрического разряда в воде, который в десятки тысяч раз меньше. При электровзрыве характерная длительность ввода электрической энергии в канал разряда составляет 10^{-6} – 10^{-5} с, что на порядок меньше времени детонации и высвобождения химической энергии в объеме заряда взрывчатого вещества при химическом взрыве. Наиболее существенным отличием электровзрыва от химического взрыва является отличие в плотности энергии в реакционном объеме. Так, плотность энергии в канале разряда при электровзрыве достигает 10^6 – 10^7 Дж/см³, в то время как, например, для тротила, она равна $4 \cdot 10^3$ Дж/см³, то есть в десятки и сотни раз меньше. При этом температура в канале разряда достигает величины $T = (1-5) \cdot 10^4$ °К.

Применение технологии электровзрыва для защиты морских подвижных объектов. Технологию генерации ударных волн электровзрывом, характеризующуюся высокой плотностью выделяемой энергии в малом реакционном объеме, можно эффективно использовать для защиты морских подвижных объектов. Высоковольтный пробой в воде требует наличия в разрядном промежутке высокой напряженности электрического поля $E_{кр} \geq 3,6$ кВ/мм, достаточной для электрического пробоя. Неопределенность пространственной локализации канала разряда и его низкое сопротивление затрудняют оптимизацию эффективности передачи энергии в канал разряда и могут привести к существенно более высоким требованиям к источнику энергии [4]. Преимуществом данного способа формирования канала разряда является сравнительная техническая простота реализации и возможность генерации пачки импульсов давления. Применение для формирования канала разряда инициирующего металлического проводника, взрывающегося под действием электрического тока, позволяет снизить амплитуду импульса напряжения, формирующего канал разряда, осуществить его пространственную локализацию, согласовать величины сопротивлений генератора и разрядного канала, исключить влияние проводимости жидкости [5]. К недостаткам этого способа можно отнести необходимость обеспечить обновление инициирующего проводника и связанную с этим низкую частоту следования импульсов давления.

В настоящее время представляются наиболее перспективными два направления применения электровзрыва. Первым направлением является защита морских подвижных объектов от подводных террористов путем генерации ударных волн. Степень воздействия ударной волны давления, распространяющейся в воде, на человека зависит от амплитуды волны давления и ее

длительности. Для эффективного воздействия на человека требуется достичь избыточного давления не менее 0,5 атмосферы. Эти характеристики были реализованы с использованием емкостных накопителей энергии в устройствах различной мощности.

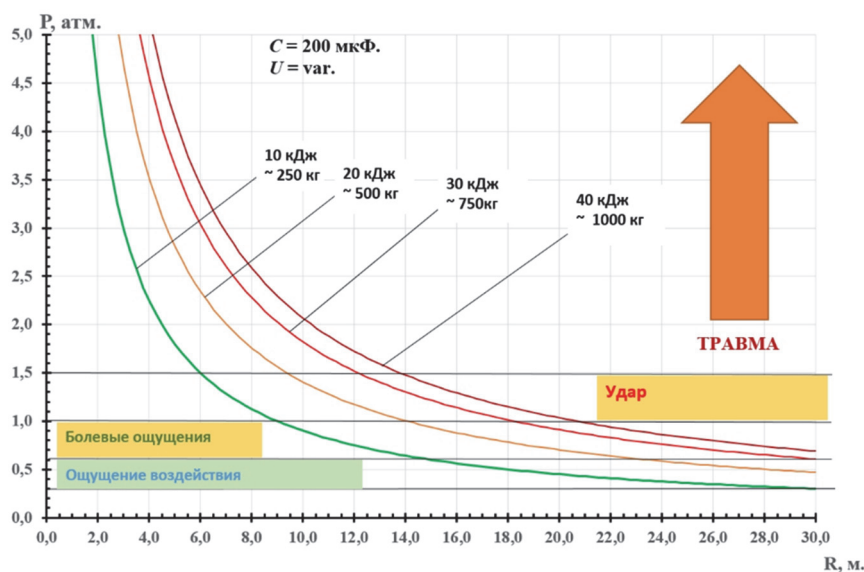


Рис. 1. Зависимости амплитуды сферической волны давления при различном энергозапасе и массе генератора волны давления

Вторым направлением является противодействие гидроакустическим системам обнаружения и наведения. При этом в полной мере проявляется способность электровзрыва к генерации мощных коротких, длительностью в несколько микросекунд, импульсов давления, что позволяет создавать широкополосные акустические помехи.

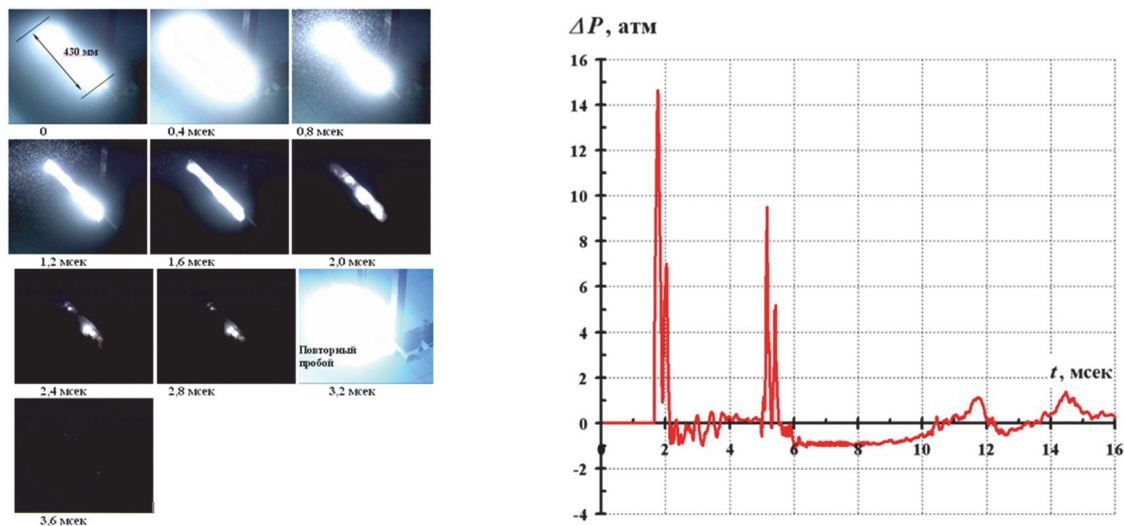


Рис. 2. Излучение волн давления с помощью электрического разряда в иницирующем проводнике

Вне зависимости от конкретной схемы формирования канала разряда технология электровзрыва обладает тем очевидным преимуществом, что позволяет легко управлять параметрами генерируемых ударных и акустических волн в воде в широких пределах. Путем изменения приложенного напряжения и энергоклада возможно изменять амплитуду ударной волны давления и ее длительность. Варьируя форму и размеры излучателя, сопряженного с каналом разряда, возможно изменять также диаграмму направленности генерируемых волн. Это обеспечивает дополнительную гибкость в тактике применения устройств.

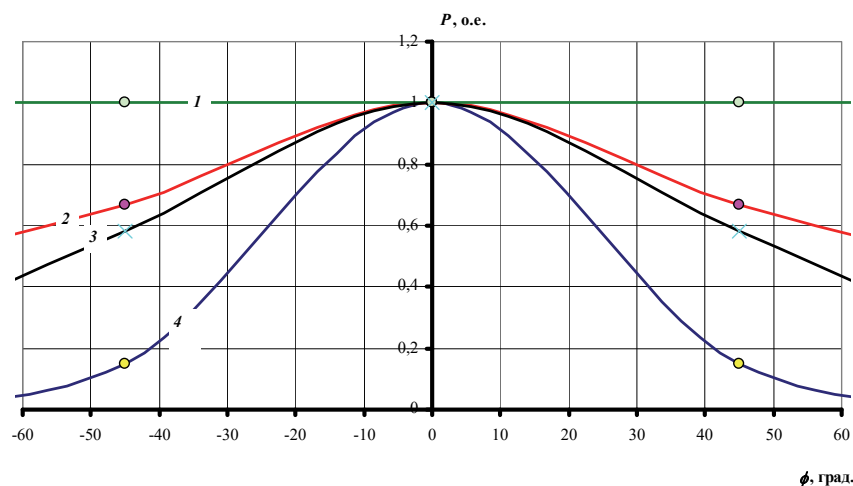


Рис. 3. Диаграмма направленности, соответствующая исследуемым системам, построенная в относительных единицах:

1 – сферическая волна; 2 и 3 – цилиндрические насадки разной длины; 4 – цилиндрическое насадка с рупором

Заключение. Технология электровзрыва позволяет создавать эффективные генераторы ударных и акустических волн в воде для защиты морских подвижных объектов от подводных диверсантов и средств обнаружения и поражения морским оружием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных Х.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155с.
2. Сильников М.В., Лазоркин В. И., Михайлин А.И. Средства активной защиты подвижных объектов на новых физических принципах // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, 2010. Вып. 5–6. С. 9–13.
3. Silnikov, M.V., Kulakov, S.L., Kulakov, K.S., Mikhaylin, A.I., Water electric discharge as a source of shock waves for non-lethal weapons, 4th European Symposium on Non-Lethal Weapons, Ettingen, Germany, 2007, pp. 4–9.
4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. Москва: «Наука», 2004. 704 с.
5. Сильников М.В., Кулаков К.С., Кулаков С.Л. и др. Использование электрогидравлического эффекта для создания метательных устройств // Вопросы оборонной техник. Сер. 16. 2009. Вып. 11–12. С. 15–22.

M.V. Silnikov (Science and production association of special materials, Saint-Petersburg)

APPLICATION OF ELECTRIC EXPLOSION TECHNOLOGY TO PROTECT MARINE MOBILE OBJECTS FROM DETECTION AND DESTRUCTION OF MARINE WEAPONS

An electric discharge in water (electric explosion) is characterized by a high energy density in the discharge channel, tens or hundreds of times higher than the energy density of a TNT explosion. Electric explosion allows you to easily control the parameters of generated shock and acoustic waves in water within a wide range. By changing the applied voltage and power supply, it is possible to change the amplitude of the pressure shock wave and its duration. This technology can be used to protect marine mobile objects from underwater terrorists and to counteract sonar detection and guidance systems.

С. А. ПОТРЯСАЕВ, Б. В. СОКОЛОВ, Р. М. ЮСУПОВ
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный
исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург)

ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ

В докладе рассматриваются научные и практические основы разработанной прикладной теории проактивного (упреждающего) управления информационными процессами в промышленном интернете на основе облачных и туманных вычислений. Основной научный вклад результатов исследований состоит в том, что современная информатика благодаря разработанной теории обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике и неокибernetике. В докладе рассматриваются основные элементы данной теории, проводится анализ возможных путей и развития и практического использования.

Введение. В предлагаемом докладе в качестве основных объектов исследования рассматривались информационные процессы (ИнфП) в киберфизических системах (КФС) и промышленном интернете (ПрИ), а также системы и технологии проактивного управления ими, которые могут, как показывает анализ, широко использоваться при создании соответствующих катастрофоустойчивых информационных систем, повсеместное внедрение которых на практике в настоящее время является крайне необходимым [1–4]. Разработанная к настоящему времени концепция промышленного интернета и реализующие ее клиентоориентированные мелкосерийные гибкие виртуальные производства на базе реальных территориально-распределенных промышленных мощностей могут справиться со сложившейся глобальной кризисной обстановкой в экономиках разных стран, вызванной эпидемией коронавируса COVID-19. Для этого надо правильно организовать соответствующие информационно-управляющие и инфокоммуникационные процессы на основе интеграции облачных, граничных и туманных вычислений в рамках созданного и постоянно развиваемого ПрИ, важная роль в котором отводится существующим и перспективным КФС, создающим материально-информационную основу для реализации положительных и отрицательных обратных связей не только на технологическом, но и, что особенно важно, на организационных уровнях управления промышленным производством [3]. В отличие от интернета вещей в ПрИ порядок проведения вычислений и параметры вычислительных операций диктуются самой технологией (упорядоченностью) производственного процесса. В этом случае появляется множество альтернативных способов организации вычислительного процесса, сопровождающего и обеспечивающего необходимой информацией производство. Каждый способ и соответствующий ему план вычислений может быть оценен с использованием таких критериальных функций, как скорость (интенсивность) выполнения операций и работ, объем потребляемой энергии, показатель сбалансированности загрузки телекоммуникационных каналов, показатели устойчивости и робастности плана и др.

В связи со сказанным **главная проблема оптимального распределения информационно-управляющих и инфокоммуникационных ресурсов в ПрИ** состоит в следующем. Определение оптимальных программ управления ИнфП в ПрИ может быть выполнено лишь после того, как будет известен перечень структур технологий, функций и алгоритмов обработки информации и управления в ПрИ, который должен быть реализован в соответствующих элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам ПрИ зависит от структуры и параметров планов и законов управления данными элементами и подсистемами. Анализ существующих подходов к решению рассматриваемых классов задач многокритериального структурно-функционального синтеза, проведенный в диссертации, показал, что данные задачи изучены недостаточны [2–7]. В этих условиях объективно становится необходимой разработка соответствующих теоретических основ (концепций, моделей, методов, алгоритмов и методик) решения различных классов задач многокритериального структурно-функционального синтеза и управления ИнфП в ПрИ. Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что данная тематика является, несомненно, **новой и актуальной** и требует проведения соответствующих комплексных междисциплинарных исследований.

Методология и технологии решения проблемы. В основу создаваемой методологии решения исследуемой проблемы были положены три фундаментальные системно-кибернетические концепции: *концепция комплексного (системного) моделирования При* (и его базовых элементов – КФС), которая предполагает разработку и реализацию новых принципов, подходов к проведению полимодельного логико-динамического описания различных вариантов построения и использования При, а также разработку и комбинированное использование методов, алгоритмов и методик многокритериального анализа, синтеза и выбора наиболее предпочтительных проактивных управленческих решений (в том числе и ориентированных на их реконфигурацию), связанных с созданием, использованием и развитием рассматриваемых объектов в различных условиях динамически изменяющейся внешней и внутренней обстановок; *концепция проактивного управления структурной динамикой При* в изменяющихся условиях, вызванных воздействием возмущающей среды. *Проактивное управление*, в отличие от традиционно используемого на практике *реактивного управления* При (КФС), ориентированного на оперативное реагирование на уже произошедшие негативные события и недопущение их последующего развития, предполагает упреждающее предотвращение причин возникновения инцидентов за счет создания (либо целенаправленного поиска) в соответствующие системе проактивного мониторинга и управления *новых системно-функциональных резервов*, обеспечивающих динамическое формирование принципиально новых возможностей по парированию возможных расчетных и нерасчетных нештатных и аварийных ситуаций, с использованием методологии и технологий системного (комплексного) моделирования, а также многовариантного ситуационно-адаптивного прогнозирования. В докладе представлены конструктивные пути реализации данной концепции на основе построения и использования многомерных аппроксимированных областей достижимости логико-динамических моделей, описывающих рассматриваемую предметную область [2, 5, 9]. Еще одной используемой авторами доклада концепцией является *концепция интеллектуализации управления*, предусматривающая в качестве условий эффективного управления При (КФС) необходимость применения интеллектуальных инструментов управления (новых интеллектуальных информационных технологий), носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение комплексной интеграции естественного и искусственного интеллектов. Наряду с разработанной методологией в докладе представлены полимодельное логико-динамическое описание задач синтеза технологий и программ проактивного управления ИнфП в При, а также комбинированные методы и алгоритмы совместного и раздельного решения указанных задач и задач оценивания возможностей и обеспечения требуемого (оптимального) уровня показателей надежности, живучести, устойчивости и в целом эффективности рассматриваемых информационно-управленческих процессов.

Заключение. Основной научный вклад результатов выполненных исследований в рассматриваемой предметной области состоит в том, что современная информатика, благодаря разработанной прикладной теории проактивного управления ИнфП в При, обогащается методологией и методическим обеспечением, разработанным в классической кибернетике и неокибернетике. В докладе показано, как на конструктивном уровне можно подойти к принципиально новому решению задач многокритериального структурно-функционального синтеза и проактивного управления функционированием и развитием промышленного интернета, а также и к доказательству корректности соответствующих вычислительных процедур. Предлагаемый подход отличается от традиционно используемых типовых проектных решений и базируется не на эвристиках, а на фундаментальных научных результатах, полученных к настоящему времени в системологии, информатике и теории управления, и позволяет на практике существенно повысить оперативность, обоснованность и в целом эффективность принятия решений на различных этапах жизненного цикла создаваемой продукции в существующем и перспективном При за счет их нового системно-кибернетического описания, а также комплексного решения. В докладе приводятся сведения о практической реализации выполненных исследований на промышленном предприятии, в ракетно-космической отрасли, в робототехнике, экологии [9].

Работа проводилась при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 17-29-07073-офи-м, 18-07-01272, 18-08-01505, 19-08-00989, 20-08-01046), в рамках бюджетной темы №№0073–2019–0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Охтилев М.Ю.** Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. №1 (162). С. 162–174.
2. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. **Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Снягов С.А.** Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4. № 2. С. 18–24.
4. **Wolf, W.**, Cyber-physical systems, *Computer*, 2009, no. 3, pp. 88–89.
5. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с.
6. **Цвиркун А.Д.** Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982. 200 с.
7. **Цвиркун А.Д., Акинфиев В.И.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993. 157 с.
8. **Ростовцев Ю.Г., Юсупов Р.М.** Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1991. № 7. С. 7–14.
9. <http://litsam.ru>.

S.A. Potraysaev, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov (St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg)

PROACTIVE INFORMATION CONTROL ON THE INDUSTRIAL INTERNET

The report shows the scientific and practical foundations of the developed applied theory of proactive control of information processes in the industrial Internet based on cloud and fog computing. The main scientific contribution of the research results is that modern informatics, thanks to the developed theory, is enriched with the methodology and methodological support developed in classical cybernetics and neocybernetics. The report shows the main elements of this theory, analyzes the possible ways of its development and practical use.

**МАТЕРИАЛЫ
ОБЩИХ ПЛЕНАРНЫХ ЗАСЕДАНИЙ, 2020**

Верстка *Е.А. Дубровская*

Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.
Тел. (812) 499-82-93, факс (812) 232 33 76,
e-mail: editor@eprib.ru
<http://www.elektropribor.spb.ru>