85 ЛЕТ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ





Дорогие коллеги!

Перед вами – книга об Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, которому в июне 2024 г. исполнилось 85 лет.

85 лет – немалый исторический промежуток. Наука об управлении за это время прошла долгий и насыщенный путь, добилась ярких результатов, обогатилась новыми направлениями, продемонстрировала свое важное место в современном обществе. И тем более приятно осознавать, что история Института тесно связана с этими достижениями. За 85 лет нашими учёными получены результаты мирового уровня (многие из которых названы их именами), развиты целые научные направления, созданы научные школы, основаны добрые традиции. Обо всем этом – настоящая книга, посвящённая истории Института, но не только ей, а еще и тому, как Институт живёт в настоящее время, каковы его научные интересы и достижения.

Есть несколько подходов к описанию истории Института. Во-первых, можно рассматривать основные научные направления, с их хронологической ретроспективой и текущим состоянием. Во-вторых, можно взять за основу имена и свершения тех учёных, которые создавали славу Института на протяжении его 85-летней истории. В-третьих, можно рассматривать историю его научных подразделений – лабораторий, их научную тематику и ключевых сотрудников. В настоящей книге выбран первый подход: история Института описывается как история развития основных научных направлений теории управления:

- теория систем управления;
- управление подвижными объектами и навигация;
- технические средства управления;
- управление в промышленности, энергетике, транспорте и сельском хозяйстве;
- информационные технологии в управлении;
- управление системами междисциплинарной природы,

каждое из которых детализируется на ряд поднаправлений, со своими отцами-основателями и их научными школами. Завершает книгу краткое описание научно-организационной и прикладной деятельности Института.

Дополнениями настоящей книги являются два издания: «Институт проблем управления: лаборатории» и «Институт проблем управления: прикладные

разработки», отражающие соответственно историю создания и развития научных подразделений, а также опыт и (в большей степени) текущее состояние работ Института по приложениям теории управления в самых разных областях (авиация и космос, энергетика и промышленность, экономика и медицина и др.).

Книга большей частью составлена из очерков, подготовленных сотрудниками Института, авторами или соавторами многих фундаментальных результатов, корифеями и/или их учениками. Глубокая признательность всем, кто их писал, – здравствующим и уже покинувшим нас. Благодарность всем, кто принял участие в огромной работе по подготовке и оформлению материалов.

За последние годы в Институт пришло много молодёжи, и эта книга позволит новым сотрудникам узнать, как зарождались самые современные направления теории управления, ныне доверенные их попечению.

Поздравляю с юбилеем замечательный коллектив Института, который продолжает энергично и вдохновенно работать, храня и развивая славные традиции.

Директор ИПУ РАН,
академик РАН  Д.А. Новиков

К 85-летию ИПУ РАН

Институт проблем управления

им. В.А. Трапезникова

Российской академии наук

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

2-е издание, переработанное

Москва
ИПУ РАН
2024

УДК 007:681.5:681.3:658.5
ББК 32.81:32.965:20
И57

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук: научные направления / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова; редкол.: акад. РАН Д.А. Новиков (гл. ред.) и [др.] – 2-е изд. : переработ. – М.: ИПУ РАН, 2024. – 358 с. – ISBN 978-5-91450-273-4. – Текст: непосредственный.

В книге рассказывается об истории и сегодняшнем дне Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), которому в июне 2024 г. исполнилось 85 лет. Подробно представлены история и современное состояние всего спектра исследований ИПУ РАН.

Издание предназначено для специалистов в области теории систем управления и ее приложений

Главный редактор: Д.А. Новиков

Редакционная коллегия: З.К. Авдееева, И.Н. Барабанов, Н.Н. Бахтадзе, В.М. Вишневский, А.А. Галяев, А.О. Калашников, Е.В. Каршаков, В.Г. Лебедев, А.С. Мандель, Р.В. Мещеряков, М.В. Хлебников, А.Г. Чхартишвили

Авторский коллектив: более ста сотрудников ИПУ РАН, ИСА РАН, ИППИ РАН, ИПИ РАН и др.

Автор компоновки и дизайна книги: А.С. Мандель

Фотографии: В.М. Бабиков, В.М. Кондаков, М.В. Пятницкая, Е.О. Мизякина, В.П. Михайлов, архив ИПУ РАН

Рабочая группа: М.В. Пятницкая, Е.О. Мизякина, В.П. Михайлов

Компьютерная вёрстка: А.С. Мандель

ISBN 978-5-91450-273-4

© ИПУ РАН, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

1. Вместо предисловия 7
    1.1. Рождение и становление Института 7
    1.2. Путь к вершинам 20
    1.3. Новые времена 24
2. Теория систем управления 27
    2.1. Теория инвариантности 27
    2.2. Теория дискретных систем 28
    2.3. Релейные системы 29
    2.4. Теория оптимального управления 30
    2.5. Системы с переменной структурой 34
    2.6. Блочный подход в теории управления 36
    2.7. Нелинейный анализ в теории управления 39
    2.8. Адаптивные и обучающиеся системы 42
    2.9. Адаптивные системы с эталонной моделью 43
    2.10. Робастные системы 45
    2.11. Линейные системы: новые подходы 46
    2.12. Стохастические робастные системы управления 48
    2.13. Стохастические системы 50
    2.14. Теория идентификации 54
    2.15. Многосвязные системы управления 58
    2.16. Нелинейные системы 61
    2.17. Системы с распределёнными параметрами 66
    2.18. Дискретная оптимизация 75
    2.19. Многоагентные системы 77
3. Управление подвижными объектами и навигация 88
    3.1. Управление космическими аппаратами 88
        3.1.1. Теория терминальных систем управления 97
    3.2. Управление летательными аппаратами 101
    3.3. Автоматизация АПЛ Проекта 705 106
    3.4. Управление морскими подвижными объектами 112
    3.5. Групповое управление в условиях неполной информации 117
    3.6. Бортовые измерения физических полей 145
    3.7. Робототехнические системы 148

Стр.

4. Технические средства управления 157
4.1. Технические средства автоматизации 157
4.2. Многопроцессорные вычислительные комплексы серии ПС 165
4.3. Надёжность, живучесть, техническая диагностика, отказоустойчивость 168
5. Управление в промышленности, энергетике, транспорте и сельском хозяйстве 180
5.1. Системы управления в атомной энергетике 180
5.2. Логическое управление 189
5.3. Управление технологическими процессами 191
5.4. Управление разработкой месторождений и добычей углеводородов 199
5.5. Информатизация системы жизнеобеспечения Москвы 203
5.6. Управление электроэнергетическими системами 206
5.7. Управление плазмой в токамаках 209
5.8. Цифровые технологии управления в сельском хозяйстве 215
6. Информационные технологии в управлении 218
6.1. Искусственный интеллект и интеллектуальные технологии 218
6.1.1. Распознавание, классификация и машинное обучение 219
6.1.2. Машинное и глубокое обучение 221
6.1.3. Машинное зрение 223
6.1.4. Программирование игры в шахматы 224
6.1.5. Системы понимания естественного языка 224
6.1.6. Интеллектуальная поддержка принятия решений, основанная на когнитивных картах 225
6.1.7. Методы работы со знаниями 235
6.1.8. Голографический подход к моделированию когнитивных процессов мозга 237
6.1.9. Моделирование нейронных сетей 238
6.1.10. Биологически правдоподобные модели управления движением 240
6.1.11. Групповое поведение роботов 241
6.2. Автоматизированные информационно-управляющие системы 243

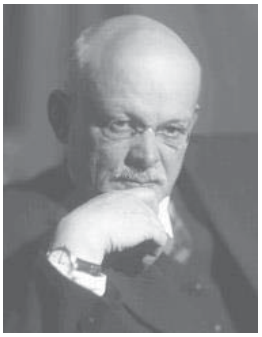
6.3. Компьютерная графика и объёмно-геометрическое моделирование 249
6.4. Информационно-телекоммуникационные сети 252
6.5. Геоинформационные системы 257
6.6. Речевые технологии в управлении 264
6.7. Моделирование и анализ бизнес-процессов (Теория бизнес-процессов) 268
6.8. Информационная безопасность 272
7. Управление системами междисциплинарной природы 284
7.1. Человек в системе управления 284
7.2. Исследование операций 286
7.3. Принятие решений и теория выбора 291
7.4. Управление проектами и программами 295
7.5. Управление инновациями 296
7.6. Управление социальными и политическими системами 299
7.7. Управление экологической безопасностью 302
7.8. Управление в биологии и медицине 307
8. Научно-организационная и прикладная деятельность Института 316
8.1. Учёный совет 316
8.2. Диссертационные советы 317
8.3. Экспертиза 318
8.4. Научные журналы 320
8.5. Семинары и конференции 329
8.6. Система обучения в Институте 335
8.6.1. Базовые кафедры и практики студентов 336
8.6.2. Аспирантура и докторантура 339
8.6.3. Дополнительное профессиональное образование 341
8.6.4. Молодёжные научные школы 342
8.6.5. Научно-образовательные центры 343
8.6.6. Центр молодёжного инновационного творчества 344
8.7. Прикладные работы 346
9. Вместо послесловия 352





1. Вместо предисловия

1.1. Рождение и становление



Александр Алексеевич Чернышёв

В июне 1934 г. было принято решение Президиума АН СССР об организации в составе Технической группы Академии Комиссии по телемеханике и автоматике. Именно эту Комиссию можно считать «прародительницей» Института проблем управления, поскольку она вскоре стала Институтом автоматики и телемеханики (ИАТом), а впоследствии – ИПУ РАН.

Комиссия создавалась с целью координации всех проводившихся в то время работ по автоматическому управлению. Требовалось обобщить уже накопленный опыт и сформулировать требующие решения насущные проблемы. Председателем Комиссии был назначен академик Александр Алексеевич Чернышёв, специалист в области электротехники.

Комиссия по телемеханике и автоматике сразу взялась за дело. Уже в 1935 г. состоялась весьма представительная (около 600 участников) первая Всесоюзная конференция по автоматике, телемеханике и диспетчеризации. В 1936 г. был учреждён журнал «Автоматика и телемеханика» – первое в мире специализированное издание, полностью посвящённое проблемам автоматического управления. Удалось создать дискуссионную площадку для подготовки и обсуждения научной и инженерной общественностью планов автоматизации народного хозяйства страны.

Но для осуществления столь грандиозных планов одной только научно-организаторской деятельности уже было недостаточно. Конец 1930-х стал периодом бурного развития техники. Особенно это было заметно в авиации, имевшей огромное значение для повышения военного потенциала страны. Требовался крупный научный центр, институт для проведения серьёзных теоретических и прикладных исследования в области автоматики и телемеханики. Это было очевидным не только для Академии наук, но и для Правительства страны.



Виктор Сергеевич Кулебакин

В 1938 г. по инициативе академика Виктора Сергеевича Кулебакина, «отца авиационной электроэнергетики», Комиссия была преобразована в Комитет телемеханики и автоматики. В 1939 г. В.С. Кулебакин добился решения Совнаркома об организации в составе Отделения технических наук АН СССР Института автоматики и телемехани-

ки (ИАТ), он же стал его директором.

Первый директор ИАТ был во всех смыслах яркой личностью. Выдающийся учёный, в своё время он был одним из первых военных лётчиков России. После революции активно работал в Комиссии ГОЭЛРО, принимал участие в организации и становлении Государственного экспериментального электротехнического института. В Московском энергетическом институте создал кафедру и лабораторию электроаппаратостроения; в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского организовал факультет и кафедру. Имя В.С. Кулебакина навсегда вписано в историю Института.



ИЗВЕСТИЯ СОВЕТОВ ДЕПУТАТОВ ТРУДЯЩИХСЯ СССР

ГОД ИЗДАНИЯ 23-й

№ 99 (6805) ПЯТНИЦА 28 АПРЕЛЯ 1939 г.

4

Из писем читателей

НЕОБХОДИМ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В исторических решениях XVIII с'езда ВКП(б) даны директивы о завершении механизации трудоемких работ и широком внедрении автоматизации производства. Директивы эти имеют глубочайшее значение, так как они знаменуют собой переход к высшим формам труда, переход к технике коммунизма.

Указания с'езда партии об автоматизации обязывают не только промышленность, — они ставят огромные задачи и перед советской наукой. Надо прямо сказать, что до недавнего времени многие видные представители нашей науки стояли в стороне от автоматики и телемеханики. Мало того, они считали эти дисциплины разделами инженерного искусства и отказывались признать автоматику и телемеханику технической наукой.

Одной из главных причин недопустимо медленного освоения и внедрения аппаратуры автоматического и телемеханического управления в наше народное хозяйство является неудовлетворительная организация научно-исследовательской деятельности в области автоматики и телемеханики.

Отсутствие строгой теоретической базы для расчета и проектирования автоматических и телемеханических приборов и аппаратов, распыленность и случайность научных исследований привели к тому, что в области использования автоматики и телемеханики мы отстали от передовых капиталистических стран.

Насколько поверхностно относилась к этой важнейшей народнохозяйственной проблеме Академия наук, показывает тот факт, что до сих пор в системе Академии нет научно-исследовательского института, который занимался бы вопросами автоматики и телемеханики.

Существующий в составе Отделения технических наук комитет телемеханики и автоматики не располагает экспериментально-исследовательской базой и не является поэтому ведущим научно-техническим штабом автоматизации. При всей положительной роли комитета в смысле накопления и систематизации опыта он не мог осуществить деловой увязки творческой работы ученых с плановым развитием всего народного хозяйства.

Для того, чтобы вести науку вперед, «давать правильный тон... в теоретической работе по развитию передовой советской науки» (Молотов), необходимо основываться на экспериментальных исследованиях, а значит, иметь свою лабораторно-экспериментальную базу.

Научные кадры для реорганизации комитета в Институт автоматики и телемеханики имеются. Оборудовать институт на первых порах можно будет путем использования лабораторий быв. группы технической физики, электромагнитной лаборатории, переданной членом-корреспондентом В. И. Ковалевским Академии наук СССР, и ряда лабораторий отраслевых институтов, развитие которых вышло за рамки данной отрасли (например, лаборатории телевидения Научно-Исследовательского института кино-фотопромышленности и др.). Специального строительства институт не потребует, так как для него может быть использовано постепенно освобождающееся здание Отделения технических наук.

Научно-исследовательский центр по борьбе за освоение автоматики и телемеханики должен быть создан незамедлительно. Этого требуют великие задачи третьей пятилетки.

Академик В. КУЛЕБАКИН.

Статья В.С. Кулебакина в «Известиях» о необходимости создания Института автоматики и телемеханики

Институт разместили в здании в Малом Харитоньевском переулке, где в то время располагалось Отделение технических наук АН СССР, которое предоставило Институту несколько комнат. До нынешнего здания, окружённого территорией с её парком-садом и треугольником пруда, было ещё очень и очень далеко.



«Родовое гнездо» Института – здание в Малом Харитоньевском переулке Москвы

Поначалу в Институте было всего 22 сотрудника. В их число входили выдающиеся в будущем советские учёные Б.Н. Петров (впоследствии академик), М.А. Гаврилов (впоследствии член-корреспондент АН СССР), профессор Н.Н. Шумиловский, профессор В.Л. Лоссиевский, профессор Г.В. Щипанов и др.

Перед Институтом была поставлена задача развернуть фундаментальные исследования в области теории автоматического регулирования и создания элементов автоматических устройств. Сразу же возникла проблема кадров, так как специалистов

в области автоматического управления в стране практически не было. Одновременно с научной работой Институту пришлось самостоятельно заняться подготовкой сотрудников, обладающих необходимой квалификацией.

В.С. Кулебакин понимал, что для развития теории регулирования сотрудникам Института необходима высочайшая математическая подготовка. В 1940 г. в Институт был приглашен выдающийся математик, создатель Московской математической школы академик Н.Н. Лузин. Это решение было непростым, поскольку в 1936 г. ученый был объявлен «врагом в советской маске». Причиной травли стал отказ Николая Николаевича Лузина подписать «обращение советских учёных к заграничным коллегам» по поводу процесса Промпартии, чего не могли ему простить партийные функционеры. К 1940 г. Лузин остался без работы и средств к существованию.

Но Кулебакин, человек решительный и смелый, несмотря на протесты высших партийных организаций, пошел на риск и зачислил опального учёного в штат Института.

Риск был вознаграждён.

Н.Н. Лузин сыграл огромную роль в подготовке научных кадров Института. Он на высшем уровне организовал преподавание математики для сотрудников: читал лекции по университетскому курсу математики для сотрудников, аспирантов и докторантов; а с теми, кому требовалось углублённое изучение предмета, занимался персонально, у себя дома, по 2–3 раза в неделю. Ученик Н.Н. Лузина Б.Н. Петров вёл семинарские занятия.



Николай Николаевич Лузин

Одновременно с учебной работой Н.Н. Лузин выполнил глубокие исследования по матричной теории дифференциальных уравнений, по решению векового уравнения, по приближённому интегрированию дифференциальных уравнений методом С.А. Чаплыгина.

Однако, несмотря на удачный старт, первые годы становления Института оказались очень сложными. Вскоре молодой научной команде предстояло «налететь на первые пороги».



Георгий Владимирович Щипанов

В 1939 г. Георгий Владимирович Щипанов в журнале «Автоматика и телемеханика» опубликовал статью, в которой сформулировал «условия компенсации». Как утверждал автор, при выполнении этих условий система управления не реагирует на приложенное внешнее возмущение. Работа Г.В. Щипанова вызвала широкую дискуссию, в которой приняли участие крупные математики и механики. В 1940 г. была создана Комиссия АН СССР под председательством академика О.Ю. Шмидта, которая признала, что условия компенсации приводят к абсурдным выводам и не соответствуют реально осуществимым регуляторам. При этом Комиссия отметила особое мнение В.С. Кулебакина и Н.Н. Лузина, сводившееся к тому, что по задаче компенсации возмущений необходимы дальнейшие исследования.

В 1941 г. в журнале «Большевик» вышла статья, в которой утверждалось, что в ИАТе занимаются чем-то вроде «вечного двигателя» и что «лженаучная деятельность» Института наносит стране огромный вред. Г.В. Щипанов был уволен и все работы, связанные с развитием его теории, было предписано прекратить.

Однако В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин и Б.Н. Петров по достоинству оценили идею Г.В. Щипанова. В то время большинство исследователей в СССР и в мире занимались проблемами устойчивости системы регулирования, а вот работы по исследованию качества процесса регулирования ещё только начинались. Именно Г.В. Щипанов первым в мире поставил задачу синтеза регуляторов. В.С. Кулебакин и Н.Н. Лузин (позднее к ним присоединился Б.Н. Петров) продолжили исследования в этой области. В 1940 г. Н.Н. Лузин дал строгое математическое толкование условиям компенсации и ввёл термин «условия инвариантности». Впоследствии в научной литературе всё направление, связанное с исследованием условий Г.В. Щипанова, получило название «теория инвариантности».

В 1948 г. В.С. Кулебакин показал, что мостиковая схема удовлетворяет условиям абсолютной инвариантности. В 1953 г. Б.Н. Петров получил необходимые условия физической осуществимости условий абсолютной инвариантности (критерий двухканальности Б.Н. Петрова). В 1960 г. Комиссия в составе А.А. Дородницына, А.Ю. Ишлинского и Б.Н. Петрова пришла к заключению, что ошибка Г.В. Щипанова состояла не в формулировке условий компенсации, а в применении этих условий к расчёту простейшей одноконтурной (одноканальной) системы. Кстати сказать, сам Г.В. Щипанов говорил, что одноконтурная система «бедна, как пустыня». В 1966 г. условия компенсации Г.В. Щипанова были признаны открытием с приоритетом от апреля 1939 г.

Но подлинное признание щипановских идей пришло позже. А в начале 1940-х годов дискуссия по работе Г.В. Щипанова привела к тому, то к ИАТу был «пришпилен» ярлык «лженаучности». По тем временам это могло привести к трагическим для Института последствиям.

В 1940 г. Институт организовал 1-е Всесоюзное совещание по теории регулирования, которое открылось программным докладом В.С. Кулебакина. Это событие привлекло внимание учёных всех научных центров страны, занимавшихся проектированием регуляторов и их элементов, и дало мощный импульс развитию теории регулирования, а также конструированию регуляторов и их элементов.

Среди участников Совещания был будущий академик, а впоследствии сотрудник ИАТа Александр Александрович Андронов: известный физик, один из создателей научной школы в теории нелинейных колебаний. Именно в ходе работы Совещания, прослушав ряд докладов, А.А. Андронов пришел к выводу, что теория автоматического управления является новой и важной областью приложения результатов теории нелинейных колебаний. Это впоследствии сыграло важную роль в развитии направлений исследований Института.

С началом Великой отечественной войны часть научных сотрудников ушла на фронт. В сентябре Институт был эвакуирован в г. Ульяновск. В этот период ИАТ возглавил профессор Александр Фёдорович Шорин, специалист в области телемеханики и связи. Через месяц он умер и директором был назначен член-

корреспондент АН СССР Валентин Иванович Коваленков, известный работами по проводной связи.



ИАТ в 1941-1943 гг. (г. Ульяновск)

В условиях военного времени определились три наиболее актуальные проблемы: автоматический контроль массовых изделий, разработка датчиков и систем борьбы с минной опасностью.



Александр Фёдорович Шорин

Работы по автоматическому контролю массовых изделий возглавил д.т.н. профессор В.А. Трапезников, будущий академик и директор Института, пришедший в ИАТ в июле 1941 г. Главным исполнителем был молодой инженер Б.Н. Петров, которым были разработаны основы теории электроконтактного метода контроля размеров и геометрической формы изделий. Он же был автором вибрационного электроконтактного измерителя, на базе которого к концу 1942 г. В.А. Трапезниковым и Б.Н. Петровым была создана и внедрена в производство серия автоматов для контроля и отбраковки патронных гильз крупного калибра. Станок «ЛОГ» (локального обмера гильз) много лет спустя демонстрировался в Политехническом музее Москвы.



Валентин Иванович Коваленков

С 1942 г., под руководством Б.С. Сотскова (со временем он станет д.т.н., профессором, членом-корреспондентом АН СССР), Н.Н. Шумиловским (которому предстоит стать д.т.н., профессором, академиком Киргизской АН), А.П. Шорыгиным (тогда ещё не д.т.н.) и другими сотрудниками Института проводились работы по созданию противоминных и противоторпедных устройств для Военно-морского флота.

Группа под руководством М.А. Гаврилова (впоследствии д.т.н., профессора, члена-корреспондента АН СССР) на военном заводе занималась наладкой релейной аппаратуры, разрабатывала способы борьбы с помехами применительно к задачам управления подвижными объектами.

Естественно, многие сотрудники ИАТа, в том числе будущие, в это время находились на фронте. Среди них были и те, кому впоследствии предстояло стать корифеями науки управления: М.А. Айзерман, П.П. Пархоменко, Э.А. Трахтенгерц, Я.З. Цыпкин и многие другие.

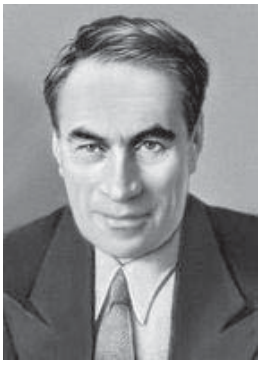
В 1943 г. Институт возвратился в Москву.

К концу 1945 г. несколько комнат в здании в Малом Харитоньевском переулке уже не могли вместить всех сотрудников, нужно было новое помещение. Надо сказать, что ещё в 1939 г. В.С. Кулебакин «пробил» Постановление Правительства о



Здание ИАТа на Ленинградском проспекте

строительстве для Института специального здания, и оно было построено. Но по окончании строительства, это здание было передано Институту точной механики и вычислительной техники АН СССР. Немалую роль в этом решении сыграл прилипший к Институту автоматики и телемеханики ярлык «лженаучности» проводимых здесь исследований, а также сложившееся в высших академических кругах мнение, что для нашей страны гораздо важнее быстрое развитие вычислительной техники. Как бы то ни было, ИАТу досталось помещение на Ленинградском проспекте. Причем вовсе не академического происхождения, а здание бывшего ресторана «Спорт», да и то не целиком, лишь его часть. Тем не менее, научные исследования продолжались даже в стенах бывшего ресторана.



Александр Александрович Андронов

В 1944 г., с приходом в ИАТ академика Александра Александровича Андронова, начался «андроновский период», ставший важной вехой в развитии Института. Глубокие знания академика в области физики и механики и замечательные личные качества сплотили вокруг него группу молодых учёных, впоследствии ставших ведущими учёными страны (Я.З. Цыпкин, В.В. Петров, М.А. Айзерман, М.В. Мееров и др.).

Особое значение имел организованный Андроновым семинар. Это было собрание ярких и очень талантливых учёных. На андроновский семинар в Институт съезжались инженеры и научные работники со всей страны. Молодые специалисты – вчерашние выпускники вузов – могли общаться с известными учёными, уже получившими важные результаты в области теории автоматического регулирования. На семинаре царил дух творчества, научные результаты обсуждались честно и порою нелицеприятно: его участники не боялись по-настоящему острой, но объективной критики. Семинар стал подлинной «высшей школой» в области управления для многих иатовцев и гостей из других научных организаций нашей страны.



Михаил Александрович Гаврилов

В первые послевоенные годы в Институте была создана теория релейно-контактных схем. Михаилу Александровичу Гаврилову удалось найти математический аппарат – алгебру логики, отображающую соотношения, реализующиеся в релейно-контактных схемах. Был предложен язык «таблиц включения», разработана методика преобразования параллельно-последовательных и мостиковых схем со специализированными элементами и с релейно-контактными элемен-

тами общего вида. Однако, как и в случае с Г.В. Щипановым, далеко не все учёные поняли и приняли теорию М.А. Гаврилова. Нашлись «доброхоты» из числа высокопоставленных деятелей науки, припомнившие «лженаучные труды» ИАТа, которые принялись громить теорию релейно-контактных схем. Правда, в данном случае обошлось без Комиссии АН СССР и публикаций в партийной печати. Тем не менее, долгое время М.А. Гаврилову не позволяли защитить докторскую диссертацию. Когда же в 1946 г. после вмешательства академика А.И. Берга, эта защита, наконец, состоялась, то в своём выступлении Аксель Иванович сказал: «Мы присутствуем при величайшем открытии современности, которое совершит революцию в технике».



Борис Николаевич Петров

В 1947 г. директором Института был назначен Борис Николаевич Петров. Институт уже с 1946 г. значительно пополнился научными талантами. Продолжала интенсивно развиваться теория линейных систем регулирования. Ещё в 1940 г. В.С. Кулебакин предложил простейшую интегральную оценку в задачах исследования качества процессов регулирования и поставил проблему выбора коэффициентов регулятора при заданных значениях корней характеристического уравнения. Несколько позже Б.Н. Петровым была разработана алгебра структурных преобразований.



Марк Аронович Айзерман

Начиная с 1947 г. в работах учёных ИАТа рассматривались системы с запаздыванием; системы с распределёнными параметрами; развивалась теория импульсных систем, которая положила начало теории дискретных и цифровых систем управления. Эти исследования были выполнены Я.З. Цыпкиным, впоследствии академиком РАН, лауреатом Ленинской премии. Работы учёных Института послужили основой для формирования отечественной частотной школы в теории регулирования. Так, д.т.н., профессором В.В. Солодовниковым были развиты частотные критерии устойчивости линейных систем, метод трапецеидальных частотных характеристик построения переходных процессов, метод исследования качества процессов регулирования и метод синтеза корректирующих устройств на основе логарифмических частотных характеристик, получены первые результаты по статистической динамике линейных систем. Выполнялись оригинальные исследования в области теории устойчивости систем, допускающих бесконечно большой коэффициент усиления (М.В. Мееров, впоследствии д.т.н., профессор); было сформулировано понятие структурной устойчивости и получены условия существования этого типа устойчивости (М.А. Айзерман, впоследствии д.т.н., профессор, лауреат Ленинской премии); проводились исследования процессов регулирования при возмущениях, ограниченных по модулю (Г.М. Уланов, впоследствии д.т.н., профессор, лауреат Государственных премий СССР).



Александр Михайлович Лётов

Большое значение для науки имели работы по теории нелинейных систем. Так, Я.З. Цыпкиным были разработаны точные методы исследования релейных систем; В.В. Петровым, впоследствии членом-корреспондентом РАН, лауреатом Государственной премии СССР, и Г.М. Улановым построена теория релейных одно- и двухкаскадных сервомеханизмов. М.А. Айзерман исследовал влияние сил сухого трения на процессы регулирования. А.М. Лётов (впоследствии член-корреспондент АН СССР, лауреат Государственной премии СССР) разработал ряд оригинальных и эффективных методов построения функций Ляпунова для установившихся и неустановившихся движений нелинейных систем регулирования.

Проводились работы по созданию аналоговых вычислительных систем (В.А. Трапезников, Б.Я. Коган – впоследствии д.т.н., профессор, и др.). Первая в СССР электронная моделирующая установка (ЭМУ-1) была создана в ИАТе в 1949 г.



Борис Яковлевич Коган

Важные работы выполнялись по проблеме автоматизированного электропривода (В.С. Кулебакин и др.); по чувствительным элементам и датчикам систем управления, по релейным элементам и электромагнитам (Б.С. Сотсков, Д.И. Агейкин – впоследствии д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии СССР, и др.); по теории магнитных усилителей (Б.С. Сотсков, М.А. Розенблат – впоследствии д.т.н., профессор, Е.К. Круг – впоследствии д.т.н., и др.), послужившей основой для создания первой отечественной общепромышленной серии магнитных усилителей (1949–1950 гг.).



Борис Степанович Сотсков

Большое практическое значение имели работы по автоматизации и созданию элементов систем автоматического контроля бурения скважин и нефтедобычи (Н.Н. Шумиловский); по управлению различными типами технологических процессов (В.Л. Лоссиевский – впоследствии д.т.н., профессор); по асинхронным двигателям и электронным регуляторам для управления электроприводами (А.А. Булгаков – впоследствии д.т.н., профессор). Был выдвинут агрегатный принцип построения системы автоматических устройств как единого комплекса, удовлетворяющего требованиям различных отраслей промышленности (В.А. Трапезников, А.Я. Лернер – впоследствии д.т.н., профессор, Е.К. Круг – впоследствии д.т.н., профессор и др.).

Институт получил широкую известность во многих научно-исследовательских и промышленных организациях страны. В 1950 г. С.П. Королёв и В.П. Глушко обратились в ИАТ с просьбой провести исследования и разработку систем управления для первой межконтинентальной ракеты

Р-7. Под руководством Б.Н. Петрова начались работы по управлению жидкостными ракетными двигателями, которые положили начало научным исследованиям Института по управлению летательными аппаратами и внесли большой вклад в развитие космической техники в нашей стране.

Однако в том же 1950 г. возник очередной очень драматичный эпизод в становлении и развитии Института. Вновь нашлись люди, не забывшие о дискуссиях по работам Г.В. Щипанова и М.А. Гаврилова, о «лженаучных» работах в Институте автоматики и телемеханики. Несмотря на то что в Институте успешно развивались всё новые направления теории автоматического регулирования, были созданы первая в СССР электронная аналоговая вычислительная машина, серия магнитных усилителей, пневматическая система управления компрессорными скважинами, система автоматического управления технологическими агрегатами бетонных заводов, начаты работы по космической технике и многое-многое другое, несмотря на то, что Институт внёс огромный вклад в эффективную работу оборонной промышленности в годы войны, Академия наук СССР решила перевести Институт из Москвы в Ленинград. Это означало только одно – уничтожение Института в его звёздном составе, поскольку многие ведущие учёные-иатовцы, не имея возможности переезда, уже подыскивали в Москве новые места работы.

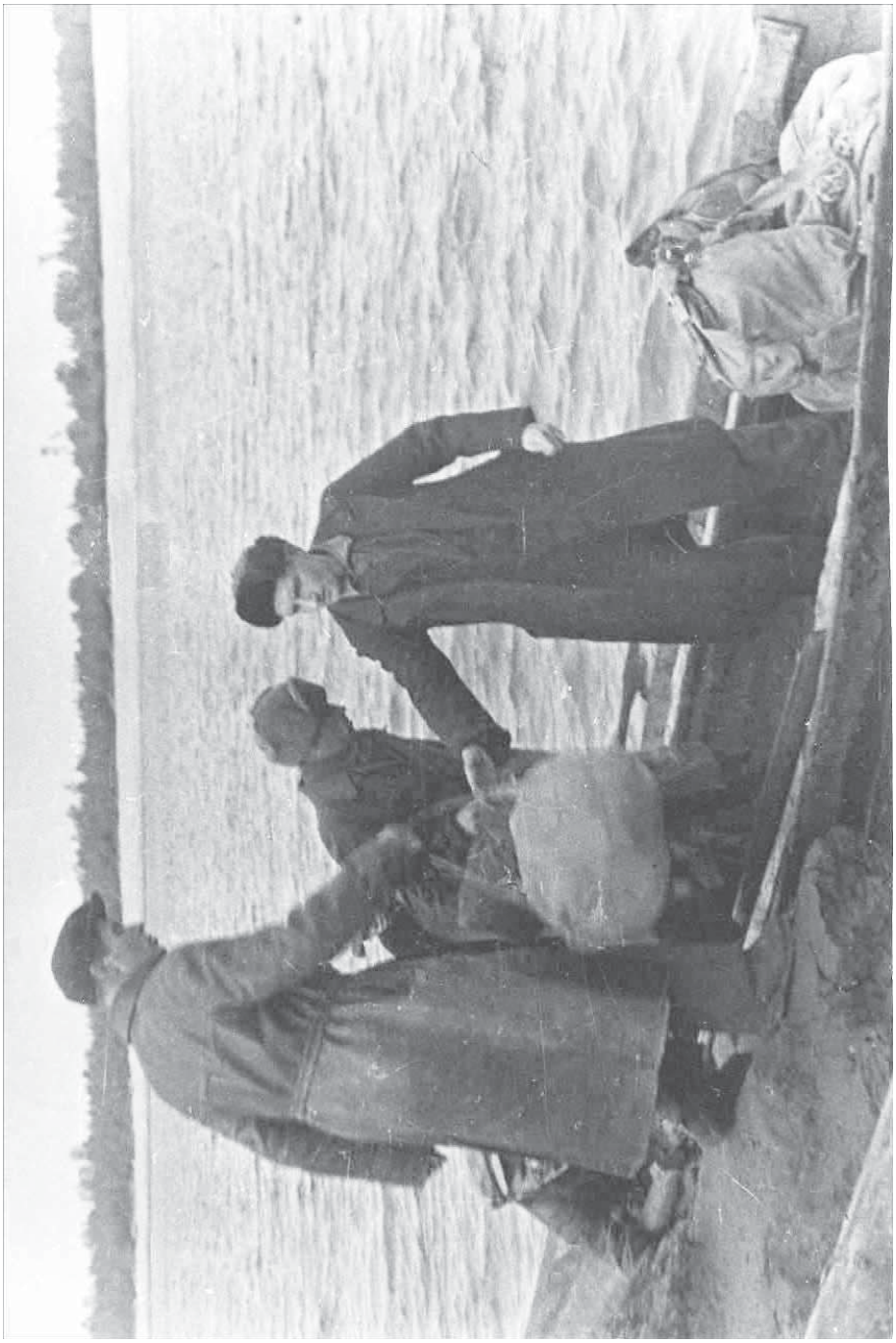


Здание Института на Каланчёвской улице

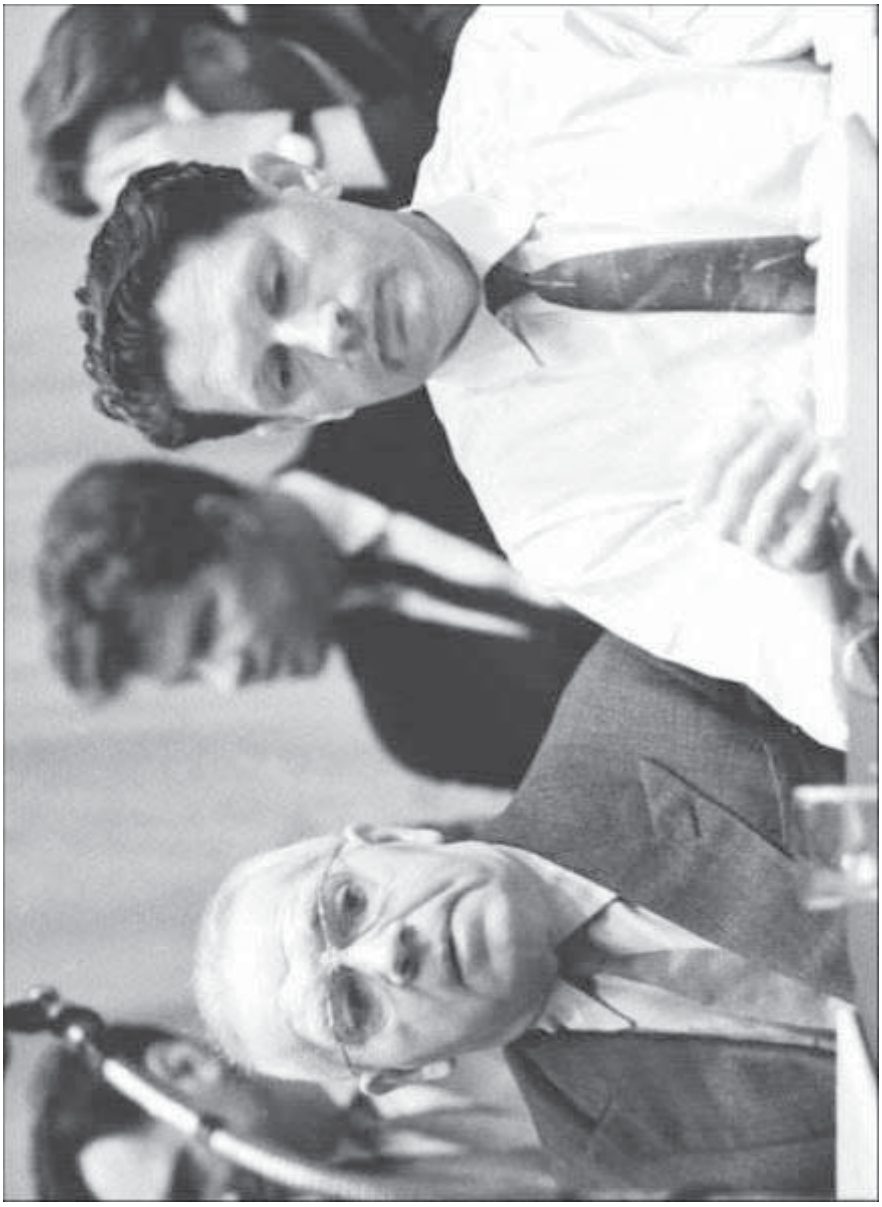
В Ленинграде создание Института автоматики и телемеханики пришлось бы начинать с нуля. В сложившейся ситуации директор Института Б.Н. Петров проявил яркий дипломатический талант и добился, чтобы Институт посетил заведующий отделом науки ЦК КПСС Ю.А. Жданов. Существенную помощь в организации этого визита беспартийному Б.Н. Петрову оказал секретарь партбюро Института и один из его первых сотрудников Д.Я. Либенсон. «VIP-гость» потратил целый рабочий день, посетив все лаборатории, и высоко оценил значение проводимых фундаментальных работ в области управления для развития страны, включая её оборонную промышленность.

После визита Ю.А. Жданова вопрос о переводе в Ленинград был снят, и, что не менее важно, наконец-то отправлено в утиль клише о «лженаучности» работ Института автоматики и телемеханики.

В 1951 г., к окончанию срока пребывания Б.Н. Петрова на посту директора был создан очень сильный научный коллектив. Фактически Институт стал ведущим центром в СССР по созданию новой и актуальной теории автоматического управления, элементов и систем управления во многих ведущих отраслях промышленности.



В.А. Трапезников и Б.Н. Петров собираются за дровами (г. Ульяновск)



Академики В.С. Кулебакин и Б.Н. Петров

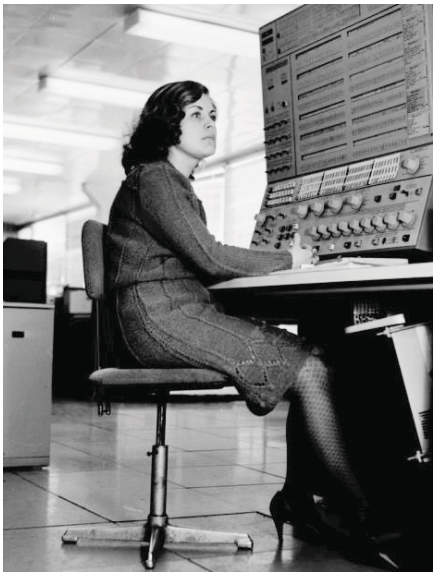
Так постепенно менялись вычислительные возможности



Ламповый «Урал-2» (на Каланчёвке)



ГВС-100



ЕС-1045



ICL 4-70



Вот оно и появилось – новое здание на Профсоюзной!



А вот так поначалу к нему добирались:
станция метро была в низине – там, где теперь депо

1.2. Путь к вершинам



Вадим Александрович Трапезников

В 1951 г. директором ИАТа был назначен Вадим Александрович Трапезников. Доктор технических наук, профессор В.А. Трапезников работал в Институте уже 10 лет и к моменту назначения руководил лабораторией № 9.

К этому времени ИАТ уже не считался источником «лженауки», и партийные органы прекратили нападки на Институт. Однако в начале 50-х годов в стране разгоралась новая кампания – «по борьбе с космополитизмом». ИАТ эта «инициатива» также не могла обойти стороной: Институт были вынуждены покинуть такие сотрудники, как А.Я. Лернер, М.А. Розенблат и многие другие.

Два года новому директору приходилось как-то организовывать работу в подобных условиях. Но в 1953 г. Вадим Александрович принялся за восстановление нормальной жизни. Постепенно, год за годом, он возвращал в ИАТ всех, кто был несправедливо уволен. Не менее методично (и так же не спеша) избавлялся от тех, кто был особенно «ретив» в период гонений. Так благодаря усилиям и воле Трапезникова в Институте возникла доброжелательная рабочая атмосфера (до сих пор называемая «духом ИАТа»), свободная от интриг и располагающая к научному творчеству, воссоздан многоликий и дружный коллектив.

Обновлённый ИАТ со свежими силами готов был к новым свершениям. Но для воплощения в жизнь новых перспектив было нужно обеспечить эффективную работу коллектива. Жизненно необходим был рост авторитета Института в научном сообществе не только страны, но и мира. По прошествии многих лет можно смело утверждать, что Трапезникову удалось всё намеченное.

Период с 1951 по 1987 гг. с полным основанием можно назвать «эрой Трапезникова». Это время отмечено расширением работ по изучению динамики систем (в основном дискретных и нелинейных) и продолжением разработок по созданию новых технических средств моделирования и автоматизации. Помимо этого, ИАТ обратился к ряду принципиально новых задач, связанных с анализом и синтезом систем управления. Были инициированы исследования по многим основополагающим проблемам современной теории управления, теории и методам обеспечения работоспособности управляющих систем, теории и методам оценки и принятия решений по векторным критериям.

В теории управления наиболее весомые результаты удалось получить при решении следующих проблем:

- оценивание координат и параметров объектов в условиях действия помех (теория фильтрации);
- построение математических моделей процессов, протекающих в управляемом объекте (теория идентификации);
- формирование оптимальных, адаптивных, робастных и терминальных алгоритмов управления;
- анализ процессов в дискретных системах (релейных, импульсных, цифровых);
- исследование роли человека в системе управления.

В теории обеспечения работоспособности систем управления на стадии их эксплуатации были разработаны методы технической диагностики, методы анализа и обеспечения надёжности, живучести и эффективности.

Значительное место занимало решение теоретических и технических проблем автоматизации объектов различной природы, главным образом крупных технических комплексов. Значительный вклад в эти годы учёные ИАТа внесли в автоматизацию ракетно-космической техники, кораблей атомного флота (в том числе подводного – так называемый «проект 705» комплексной автоматизации АПЛ), авиационных и морских транспортных систем, объектов цементного, нефтехимического и металлургического производств.

В 1980-е годы масштабным проектом для Института стали работы по автоматизации атомных электростанций. В 1985 г. зам. директора Института академик Грузинской академии наук (ГАН) И.В. Прангишвили был назначен генеральным конструктором АСУ ТП АЭС по Министерству приборостроения. Большой вклад в развитие работ по автоматизации атомных станций внёс министр Минприбора СССР М.С. Шкабардня. Михаил Сергеевич правильно оценил возможности организаций Минприбора и возложил статус головной организации по АСУ ТП АЭС на Институт. Научным руководителем работ был назначен академик В.А. Трапезников. Руководителем работ Минсредмаша СССР по атомной проблематике был Президент АН СССР академик А.П. Александров.



Михаил Сергеевич Шкабардня

Вадим Александрович Трапезников простоял на капитанском «мостике» Института на редкость долго – 36 лет. За это время Институт автоматики и телемеханики (ИАТ) Минприбора СССР и АН СССР был переименован (1969 г.) в Институт проблем управления (ИПУ) и превратился, уже к концу 50-х годов, в одного из лидеров мировой науки об управлении. Это было подтверждено тем, что первый мировой научный конгресс Международного комитета по автоматическому управлению был проведён в Москве в 1960 г., и среди тысяч его участников можно было увидеть даже «отца кибернетики» Норберта Винера.

Через четыре года после смерти В.А. Трапезникова (1994 г.) Институт получил его имя.

Вторая половина 80-х – 90-е – время глобальных перемен в жизни страны. Масштабные изменения происходили и в стенах Института.

В 1987 г. В.А. Трапезников прибавил к названию своей должности директора слово «Почётный» (сейчас это бы назвали научным руководством). Директором Института стал академик ГАН Ивери Варламович Прангишвили, возглавлявший его до 2006 г. Процедура выборов директора в духе нового времени была неустоявшейся и непривычной: кроме давно знакомых партбюро и профкома появился Совет трудового коллектива, директор избирался голосованием сотрудников.



Ивери Варламович Прангишвили

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1987 г. И.В. Прангишвили был назначен Генеральным конструктором по АСУ ТП АЭС. Надо отметить, что в то время в СССР такой высокий статус имели только 10 человек. Институт стал головной организацией по данной Программе, в которой участвовало более 200 организаций из 14-ти союзных министерств и ведомств.

В 1988 г. состоялось полное возвращение Института в систему Академии наук – длительный период «двойного подчинения» (Минприбор и АН СССР) завершился.

В это время сложилась близкая к нынешней структура секций Учёного совета Института:

- теория систем управления;
- теория управления социально-экономическими, медико-биологическими и организационными структурами;
- технические средства автоматики и вычислительной техники;
- системы управления технологическими процессами;
- теория и методы разработки программного обеспечения систем управления;
- автоматизированные системы организационного управления и обработки данных;
- управление подвижными объектами и навигация.

Теперь помимо «чистой» науки Институт начинает заниматься и хозрасчётными работами. Как ни парадоксально, в «минприборовские времена» никакой хоздоговорной деятельности, характерной для всех отраслевых НИИ, в Институте не было. Все прикладные «внедренческие» работы велись или по госзаказу (в основном «оборонка»), или на общественных началах – на основе так называемых договоров о социалистическом сотрудничестве. В последнем случае эта деятельность приветствовалась и поощрялась, но в основном морально. Конечно, некоторые наиболее удачные работы получали и премии: от наград институтского ежеквартального конкурса внедрённых работ, медалей и премий ВДНХ – до государственных.

Впрочем, большие межлабораторные работы, определявшие лицо Института, такие как крупные оборонные проекты, АСУ «Металл», «Морфлот», «Сирена», развитие ПС-3000 и др., формировались именно в то время. Типичный пример –

работы по созданию АСУ ТП для ядерных энергетических установок. Многие из этих направлений живут и активно развиваются по сей день.

И всё же нараставшая необходимость «зарабатывать деньги» в прямых контактах с реальным сектором экономики ставила перед Институтом непривычные задачи, причём в условиях быстро формировавшейся конкуренции.

Величайшей заслугой Ивери Варламовича является то, что он в очень непростые перестроечные годы сумел сохранить Институт, его коллектив, что Институт смог адаптироваться к новой ситуации и не просто выжить, а обеспечить перспективы.

Но давалось это нелегко. Падало число публикаций, защит диссертаций, научных конференций. Явно обозначилась опасность прерывания важнейшего процесса преемственности поколений: перспективная молодёжь и авторитетные учёные оказались за рубежом или в бизнесе. Впрочем, это имело и свою положительную сторону – появлялись новые возможности для укрепления международных научных связей.

Для поддержки фундаментальных исследований Институт довольно успешно использовал появившиеся в этот период возможности – гранты РФФИ, фонда Сороса, ИНТАС и др. Были учреждены стипендии для поддержки молодых учёных и аспирантов. В 2005 г. на должность заместителя директора Института по научной работе был назначен самый молодой за всю историю ИАТа-ИПУ доктор наук Дмитрий Александрович Новиков, защитивший докторскую диссертацию по техническим наукам в 27 лет.

К этому же времени относится и появление в Институте новых форм связи науки и народного хозяйства – научно-внедренческих отделов, ориентированных, в основном, на прикладные исследования и разработки.

В конце 90-х стала возрождаться система постоянно действующих общемосковских семинаров. К 2006 г. в Институте ежемесячно собирали свою аудиторию семинары:

- «Экспертные оценки и анализ данных» (руководители: д.т.н., проф. Ф.Т. Алескеров, д.т.н., проф. А.А. Дорофеюк, д.т.н., проф. Б.Г. Литвак, д.т.н., проф. Ю.В. Сидельников, д.т.н., проф. Д.А. Новиков).
- «Логическое моделирование» (руководитель: д.т.н., проф. С.А. Юдицкий).
- «Теория управления организационными системами» (руководитель: д.т.н., проф. Д.А. Новиков).
- «Проблемы искусственного интеллекта» (руководители: д.т.н., проф. А.П. Еремеев, д.т.н., проф. В.П. Кутепов, д.т.н., проф. О.П. Кузнецов, д.т.н., проф. В.К. Финн).
- «Теория автоматического управления» (руководитель: д.т.н., проф. Б.Т. Поляк).

Институт вновь стал организовывать и проводить международные и всероссийские научные конференции, в том числе по перспективным направлениям – управлению активными системами, управлению безопасностью сложных систем, нелинейной динамике, идентификации систем и задачам управления, нейрокомпьютерам и их применениям, параллельным вычислениям в задачах управления, когнитивному анализу в управлении и др.

В эти же годы Институт учредил ряд новых журналов – «Проблемы управления», «Датчики и системы», «Управление большими системами».

В 1999 г. состоялась 1-я Международная конференция по проблемам управления (МКПУ-I), приуроченная к празднованию 60-летия ИПУ РАН. Этой конференции предстояло стать серьёзным научным форумом, регулярно собирающим специалистов по управлению из России, стран СНГ и дальнего зарубежья: МКПУ-II состоялась в 2003 г., МКПУ-III – в 2006 г., а МКПУ-IV – в 2009 г.



Мемориальная доска в память о В.А. Трапезникове

1.3. Новые времена



Фёдор Фёдорович Пащенко

В феврале 2006 г. Ивери Варламовича Прангишвили не стало. В 2006 году обязанности директора Института более полугода исполнял доктор технических наук, профессор Фёдор Фёдорович Пащенко, до этого много лет работавший учёным секретарем Института. Фёдору Фёдоровичу в непростой переходный период удалось обеспечить стабильность работы Института, сохранение «духа ИАТа».

В конце 2006 г. директором Института был назначен академик РАН Станислав Николаевич Васильев. Коллектив ИПУ РАН воспринял нового директора по-разному: одни встретили С.Н. Васильева, выдающегося российского учёного – специалиста по процессам управления, восторженно, другие – с волнением, поскольку впервые за долгие годы на пост руководителя был поставлен «варяг» – человек, который ранее в Институте не работал и не был знаком со сложившимися здесь традициями. Впрочем, довольно быстро все успокоились. Да, приоритеты у С.Н. Васильева были свои, но к уже устоявшимся направлениям научной деятельности Института он отнёсся очень бережно и при этом, естественно, начал привлекать к работе в ИПУ РАН новых людей, крупных учёных в тех областях науки об управлении, которые считал важными и перспективными. Так в Институте появились д.т.н., проф. В.Н. Афанасьев, д.т.н., проф. В.М. Вишневский, д.ф.-м.н., проф. И.С. Красильщик,



Станислав Николаевич Васильев

д.ф.-м.н., проф. А.Г Кушнер, д.ф.-м.н., проф. А.А. Лазарев, д.ф.-м.н., проф. В.В. Лычагин, д.ф.-м.н., проф. М.М. Хрусталёв и многие другие. Двое сотрудников Института были избраны членами-корреспондентами РАН: Дмитрий Александрович Новиков (2008) и Андрей Алексеевич Галяев (2016).

Появились и/или получили активное развитие такие научные направления, как:

- интеллектуальное управление;
- многоагентные системы;
- управление системами с распределёнными параметрами;
- дискретная оптимизация и теория расписаний;
- групповое управление в условиях неполной информации, противодействия и противоборства;
- управление плазмой в токамаках;
- информационно-телекоммуникационные сети в управлении;
- управление системами междисциплинарной природы (организационно-техническими, эколого-экономическими, социально-экономическими, медико-биологическими и др.);
- управление активно-адаптивными электроэнергетическими сетями.

Институт укрепил и развил сотрудничество, в том числе в рамках ряда программ Президиума и отделений РАН, с ведущими российскими научными центрами в области теории управления (ИСА РАН, ИПТМУ РАН, ИПУСС РАН, ИДСТУ СО РАН, ИАПУ ДВО РАН и др.).

Была создана сеть научно-образовательных центров на базе ведущих российских вузов (МФТИ, МГТУ, МАИ, СГАУ, УГАТУ, ЛГТУ, ВГТУ, ВолГУ и др.). Начали регулярно проводиться молодёжные научные школы-конференции:

- «Управление большими системами»;
- «Управление, информация и оптимизация»;
- «Зимняя геометрическая школа».

Возобновилась традиция проведения Всероссийских совещаний по проблемам управления (ВСПУ) – в 2014 и 2019 гг. были проведены соответственно XII и XIII ВСПУ, в каждом из которых участвовало более 1000 исследователей.

Отдельно следует отметить создание молодёжных научных школ (МНШ) Института – коллективов молодых сотрудников, работающих под руководством ведущего учёного. Сегодня успешно функционируют 21 МНШ. Поддержка МНШ, осуществляемая на конкурсной основе решением Учёного совета, способствует привлечению и удержанию в Институте талантливых молодых учёных и специалистов.

В 2016 г. директор Института академик РАН С.Н. Васильев по возрасту оставил свой пост и на должность директора был избран член-корреспондент РАН Дмитрий Александрович Новиков (в 2022 г. избран академиком РАН).

В последние годы спектр научных и прикладных исследований и разработок Института расширился за счёт появления и/или активизации развития таких направлений, как:

- управление робототехническими системами;
- машинное обучение и анализ больших данных;

– управление знаниями и на основе знаний;
– управление жизненными циклами сложных организационно-технических систем;
– управление информационной и кибербезопасностью;
– управление в цифровой энергетике;
– геоинформационные системы в управлении;
– киберфизические системы.

Были созданы новые центры компетенций:

– Центр управления безопасностью сложных систем;
– Центр интеллектуальных робототехнических систем;
– Центр интеллектуальной цифровой электроэнергетики;
– Центр интеллектуального цифрового сельского хозяйства;
– Центр технологий искусственного интеллекта;
– Центр новых информационных технологий.



Дмитрий Александрович Новиков

Значительное внимание уделяется созданию испытательных полигонов («физических» и виртуальных) – робототехнического (наземного, водного и воздушного), электроэнергетического и др.

Появился ряд новых регулярных общемосковских семинаров:

– «Проблемы управления автономными робототехническими комплексами»;
– «Проблемы организации и управления научными исследованиями и разработками»;
– «Проблемы авиационно-космической электроэнергетики»;
– «Социофизика».

Активно ведутся прикладные работы в интересах обороны и безопасности, а также таких заказчиков, как организации и предприятия Росатома, Роскосмоса, Ростеха, ОАК, Транснефти и др.

В рамках развития системы подготовки кадров «школа – вуз – аспирантура», наряду с резким увеличением числа студентов вузов (МГУ, МФТИ, МГТУ, МИФИ, МИРЭА, МАИ и др.), проходящих практику в Институте, следует отметить появление и успешную работу Центра молодёжного инновационного творчества Института, готовящего новые поколения исследователей в области теории управления.

В последующих разделах книги рассказывается о научных направлениях деятельности Института, часть из которых начала своё развитие ещё при Б.Н. Петрове и В.А. Трапезникове, большинство развиваются и поныне. В не меньшей степени представлены и новые направления исследований, которые появились в последние годы или были интенсифицированы в XXI веке.

2. Теория систем управления

2.1. Теория инвариантности

В послевоенное время в Институте продолжались работы, начатые в 1939 г. Г.В. Щипановым, В.С. Кулебакиным и Н.Н. Лузиным, по новому в то время направлению науки управления – теории инвариантности. Был доказан критерий физической реализуемости условий абсолютной инвариантности (критерий двухканальности Б.Н. Петрова), развита теория комбинированных систем управления, использующих условия инвариантности (разомкнутый канал) и принцип обратной связи (замкнутый канал) (В.С. Кулебакин, Б.Н. Петров, Г.М. Уланов и др.). Предложено К(D)-изображение заданного возмущения (В.С. Кулебакин). Показано, что вынужденная составляющая решения дифференциального уравнения, связанная с подачей возмущения в виде заданной функции времени, равняется нулю в том и только том случае, когда операторный полином перед возмущением имеет в качестве сомножителя К(D)-изображение возмущения. Показано также, что оптимальная по Винеру передаточная функция замкнутой системы по отношению к возмущению, дисперсия которого стремится к нулю, должна содержать в качестве сомножителя К(D)-изображение этого возмущения.

Введены понятия избирательной инвариантности или селективной инвариантности, поливариантности (В.С. Кулебакин и О.И. Ларичев) и построена их теория, рассмотрены некоторые вопросы реализации условий инвариантности в нелинейных системах (Б.Н. Петров), развит вариационный подход в теории инвариантности (Л.И. Розоноэр), открыт новый класс систем – системы двукратной инвариантности (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский).

Идеи инвариантности нашли широкое применение в теории систем с переменной структурой (С.В. Емельянов и др.), в теории адаптивного управления и теории координатно-параметрического управления (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков). Идеи инвариантности весьма популярны при построении систем управления в самых различных областях техники, для измерительных систем, в приборостроении (В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков).

2.2. Теория дискретных систем



Яков Залманович Цыпкин

Сразу после войны в институте стало развиваться новое направление – теория дискретных систем.

Фактически дискретные системы возникли ещё на заре развития техники автоматического регулирования – достаточно вспомнить прерывистые и релейные регуляторы паровых машин, импульсную радиосвязь, радиолокацию. Однако адекватной теории подобных управляющих устройств тогда не существовало.

С 1948 г. Я.З. Цыпкин начал развивать единый подход к описанию дискретных систем (первоначально они назывались прерывистыми). Этот подход был основан на идее дискретного преобразования Лапласа (z-преобразования) и позволил синтезировать цельный математический аппарат, подобный операторному методу описания непрерывных систем. Это дало возможность ввести для дискретных систем стандартные понятия передаточной функции, частотной характеристики и т.п., а также обобщить классические критерии устойчивости Найквиста и Михайлова на случай дискретных систем. Полученные на этом этапе результаты были подытожены в монографии *Я.З. Цыпкин* «*Переходные и установившиеся процессы в импульсных системах*» (1951 г.).

Дальнейшее развитие теории импульсных систем шло по пути разработки частотных методов исследования как при детерминированных, так и случайных внешних воздействиях. Кроме того, удалось установить специфическое свойство дискретных систем – существование процессов конечной длительности, в теории линейных непрерывных систем попросту невозможных. Этот факт лёг в основу фундаментального понятия управляемости, введённого Р. Калманом.

Все эти результаты относились к линейной теории, но практические потребности требовали выхода за её рамки. Развитие теории абсолютной устойчивости для дискретных систем привело к созданию «критерия Цыпкина» (дискретного аналога критерия устойчивости Попова). Новый критерий нашёл многочисленные применения в задачах цифровой фильтрации и обработки сигналов.



Юрий Соломонович Попков

Следующим шагом стало исследование оптимальных дискретных систем. Теория таких систем (линейно-квадратичная оптимизация, условия экстремума, численные методы) была развита в работах Я.З. Цыпкина, Л.И. Розоноэра, А.И. Пропоя, А.Г. Бутковского в 60-е годы.

Я.З. Цыпкиным и его учениками И.С. Моросановым, И.В. Пышкиным и Ю.С. Попковым была развита теория нелинейных дискретных систем, систематически изложенная в моногра-

фии «*Теория нелинейных импульсных систем*» (*Я.З. Цыпкин, Ю.С. Попков. – М.: Физматгиз, 1971*).



Борис Теодорович Поляк

Впоследствии теория дискретных систем стала удобным аппаратом для исследования адаптивных и обучающихся систем управления.

Значительно позже, в 90-е годы, дискретные системы вновь привлекли внимание исследователей ИПУ в связи с проблемой робастности. Тогда были построены графические критерии робастной устойчивости таких систем и методы синтеза робастных регуляторов для них (Я.З. Цыпкин, Б.Т. Поляк).

2.3. Релейные системы



Марк Аронович Айзерман



Александр Аронович Фельдбаум

К работам по дискретным системам тесно примыкают исследования по релейным системам. В отличие от дискретных систем, в релейных квантование производится не по времени, а по уровню управления. Такие системы неизбежно являются нелинейными, и в них могут возникать свойственные нелинейным задачам эффекты, исследовавшиеся ещё в пионерских работах А.А. Андронова. Эти работы были продолжены М.А. Айзерманом, В.В. Петровым, Г.М. Улановым и В.Ю. Рутковским. Систематическая теория релейных систем управления была создана Я.З. Цыпкиным; его книга «*Теория релейных систем автоматического регулирования*» вышла в свет в 1955 г. и была переведена на немецкий, японский, испанский и английский языки. Яков Залманович разработал конструкцию «годографа Цыпкина» – графический частотный метод для изучения вынужденных колебаний в замкнутых релейных системах. В целом для релейных систем были созданы методы расчёта, которые по своей эффективности оказались близки к тем, что применялись в теории линейных систем.



Яков Залманович Цыпкин

Релейное управление может возникнуть и в линейных оптимальных задачах при наличии ограничений на управление. Впервые этот факт был установлен для одного частного случая А.А. Фельдбаумом в 1949 г., позже им и А.Я. Лернером были получены более общие результаты

того же типа (например, знаменитая «теорема об *n*-интервалах»). Эти работы проложили путь к созданию общей теории оптимального управления.

За работы по теории импульсных и релейных систем д.т.н. Я.З. Цыпкину была присуждена Ленинская премия (*Я.З. Цыпкин. Теория импульсных систем. – М.: Физматгиз, 1958*; *Я.З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963*).

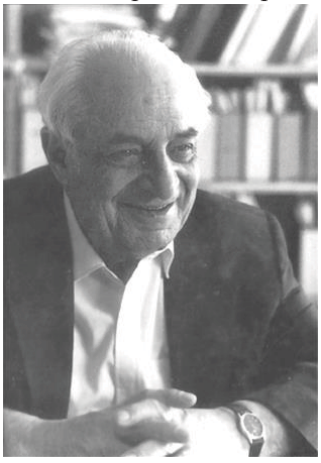
2.4. Теория оптимального управления

До середины XX века основные направления теории автоматического регулирования были связаны с анализом устойчивости и с методами стабилизации с помощью разного рода регуляторов. Однако позже на первый план стали выдвигаться проблемы качества процесса регулирования и более масштабно – проблемы оптимизации процесса управления. Становление и развитие теории оптимального управления, её успешное применение в различных областях науки, техники и промышленности в немалой степени связаны с фундаментальным вкладом сотрудников Института проблем управления.



Александр Аронович Фельдбаум

Ещё в 1948 г. А.А. Фельдбаум впервые в мире построил и теоретически исследовал нелинейную (квадратичную по скорости) обратную связь, доказав, что она обеспечивает предельную величину быстродействия в системе следящего электропривода. Тем самым была поставлена важная задача оптимального управления – задача на быстродействие – и было получено ее решение для некоторых классов линейных систем. Существенно, что в этой работе впервые рассматривались ограничения на управление. В следующем году А.А. Фельдбаум рассмотрел возможность применения релейного управления для задач быстродействия. Наконец, в 1953 г. публикацией статьи с новаторским заголовком «Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования» Александр Аронович заложил основы теории оптимального управления для линейных систем. Им был получен и первый теоретический результат (так называемая теорема об *n*-интервалах) – о релейной структуре оптимального скалярного управления.



Александр Яковлевич Лернер

В это же время близкой проблематикой заинтересовался А.Я. Лернер. В 1952 г. он напечатал две ра-

боты, в которых доказал возможность существенного улучшения динамических свойств автоматических компенсаторов. В 1954 г. была опубликована фундаментальная монография под редакцией В.В. Солодовникова* «*Основы теории автоматического регулирования*», подводившая итог исследованиям отечественных учёных (главным образом, из Института автоматики и телемеханики) и ставшая на долгие годы настольной книгой множества исследователей и инженеров. В.В. Солодовников сформировал тематику книги, собрал коллектив учёных из Института автоматики и телемеханики АН СССР и других научных учреждений, где энергично развивалась теория управления (17 авторов), взял на себя труд по редактированию рукописи, сам написал ряд разделов. За объём (1117 страниц) книгу прозвали «кирпичом», и она пользовалась огромной популярностью. Впоследствии этот научный труд лёг в основу серии инженерных монографий «Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования». За эту работу В.В. Солодовников был удостоен Государственной премии СССР. Одна из глав (31-я) этого огромного тома написана А.Я. Лернером. По сути, она посвящена теории оптимального управления. Рассматриваются линейные и нелинейные задачи на быстродействие с ограничениями на управление, для ряда примеров найдено оптимальное решение и показана его структура.



Владимир Викторович Солодовников

Эти работы подготовили почву для появления строгой математической теории оптимального управления, развитой Л.С. Понтрягиным, Р.В. Гамкрелидзе, В.Г. Болтянским, Е.Ф. Мищенко из Института математики им. Стеклова. Более того, математики узнали об этих задачах из докладов А.А. Фельдбаума и А.Я. Лернера на семинарах. Первые выступления и публикации Л.С. Понтрягина с соавторами относятся к 1956 г., впоследствии (в 1958 г.) ими был доказано общее необходимое условие оптимальности – принцип максимума Понтрягина. Очень важно, что в работах математиков появилась наиболее удобная и общая формулировка задач оптимального управления в пространстве состояний с явно выделенным управлением в правой части.

Работы Л.С. Понтрягина с коллегами были написаны на языке вариационного исчисления, а доказательство принципа максимума было весьма сложным. Большую роль в «объяснении» этих результатов для инженеров сыграли три статьи Л.И. Розоноэра в «Автоматике и телемеханике» в 1959 г. Во-первых, автор показал, что через функцию Понтрягина наглядно и удобно выписывается приращение функционала. Во-вторых, для простейшей постановки задачи – со свободным правым

* Ещё до прихода в Институт автоматики и телемеханики АН СССР (ныне Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН), в котором В.В. Солодовников проработал с 1946 по 1956 гг., им впервые было сформулировано понятие и поставлена проблема качества систем автоматического регулирования при детерминированных воздействиях, даны исходные положения оригинального частотного метода решения этой проблемы.



Лев Ильич Розоноэр

концом – им было получено простое доказательство и объяснен смысл сопряженного уравнения в формулировке принципа максимума. Наконец, Л.И. Розоноэр рассмотрел дискретный вариант задачи оптимального управления и вывел для него условия экстремума.

Кстати, дискретная постановка задачи вызвала в своё время много споров и недоразумений. Сразу же появились работы с формулировкой «дискретного принципа максимума». Ясность появилась, когда в 1963 г. А.Г. Бутковский впервые построил пример, опровергающий эти утверждения. Сотрудник ИАТа А.И. Пропой впоследствии опубликовал монографию об условиях экстремума и численных методах для дискретных задач оптимального управления.

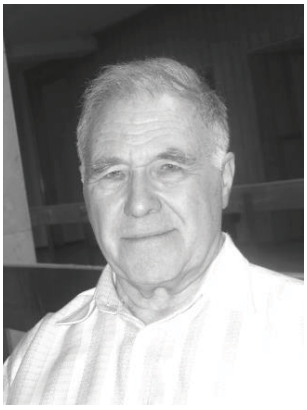


Анатолий Иванович Пропой



Анатолий Григорьевич Бутковский

В 1960 г. в «Докладах АН СССР» и журнале «Автоматика и телемеханика» появились две совместные работы А.Г. Бутковского и А.Я. Лернера, в которых был предложен широкий класс задач управления, в том числе оптимального, для случая систем с распределёнными параметрами. А.Г. Бутковский интенсивно продолжал эти исследования. Так, в 1963 г. он применил метод бесконечномерной *l*-проблемы моментов, чтобы построить точный и приближённый методы решения задач оптимального управления распределёнными системами. В 1965 г. А.Г. Бутковским опубликована монография «Теория оптимального управления системами с распределёнными параметрами», которая была переведена на английский и издана в США. Прикладные результаты изложены в двух монографиях А.Г. Бутковского, написанных им в соавторстве с Ю.Н. Андреевым и С.А. Малым и посвящённых оптимальному нагреву изделий в производственных процессах (М.: Металлургия, 1972, 1981).



Вадим Фёдорович Кротов

1961 г. был ознаменован выходом в свет двух работ В.Ф. Кротова, в которых впервые в теории управления рассматривались разрывные решения и скользящие режимы. Это вносило существенный вклад в развитие аппарата и идеологии самого вариационного исчисления и теории оптимального управления, а предложенные методы позволили решить конкретные прикладные задачи, связанные с управлением летательными аппаратами. В 1962–1963 гг. В.Ф. Кротов в статьях, опубликованных в журнале «Автоматика и телемеханика», сформулировал

оригинальные достаточные условия абсолютного минимума в вариационном исчислении и в теории оптимального управления для сосредоточенных и распределённых систем. Это был важный результат, позволивший предложить новые методы решения задач управления. В частности, удалось построить численные методы, применимые к ряду трудных квантово-механических проблем. Исследования В.Ф. Кротова были подхвачены его учениками и сотрудниками. Так, В.И. Гурман исследовал вырожденные вариационные задачи и ряд аэрокосмических и экологических приложений оптимального управления.



Михаил Михайлович Хрусталёв

С 2015 г. в ИПУ РАН эту тематику продолжил М.М. Хрусталёв. В его работах достаточные условия Кротова были обобщены на стохастические управляемые системы и на дифференциальные игры (равновесие по Нэшу). Исследовались также задачи стохастического оптимального управления с управлением по выходу на конечном или бесконечном временном интервале. Кроме этого, М.М. Хрусталёв вернулся к знаменитой проблеме инвариантности (ведущей начало от статьи Г.В. Щипанова в журнале «Автоматика и телемеханика» 1939 г.) и рассмотрел её стохастические аналоги. Им были получены достаточные условия терминальной инвариантности по возмущениям и условия абсолютной инвариантности стохастических систем диффузионного и диффузионно-скачкообразного типов.



Арам Владимирович Арутюнов

В 2019 г. в Институт пришла группа сотрудников во главе с А.В. Арутюновым, которым были исследованы экстремальные задачи при наличии вырождений с различными видами ограничений. Для анормальных задач с ограничениями типа равенств и неравенств А.В. Арутюнов разработал методы получения необходимых, а также достаточных условий оптимальности второго порядка. Эти результаты были развиты на задачи оптимального управления с концевыми ограничениями, при наличии фазовых ограничений, ограничений смешанного типа, задачи с запаздыванием, дифференциальные включения и т.п. Им были получены условия существования локальной и глобальной неявных функций в задачах с ограничениями без априорных предположений нормальности. Были исследованы неотрицательность и положительность вырожденных квадратичных форм классического вариационного исчисления. Для них выведены обобщенные уравнения типа Якоби. На основе конструкции λ-укорочений получены теоремы о существовании обратной функции при наличии вырождений высокого порядка и их приложения к теории робастности. В работах А.В. Арутюнова разработаны условия существования точек совпадения обычных и многозначных отображений, а также их приложения к задачам теории управления. Часть последних результатов была получена совместно с учениками и соавторами.

Наконец, в первом десятилетии XXI века А.С. Позняк в соавторстве с В.Г. Болтянским разработал робастную версию принципа максимума в задачах оптимального управления при наличии неопределённости в описании системы.



Александр Семёнович Позняк

2.5. Системы с переменной структурой



Станислав Васильевич Емельянов

Толчком к появлению теории систем с переменной структурой (СПС) послужило сформулированное в 1957 г. предложение С.В. Емельянова (впоследствии ставшего академиком и лауреатом Ленинской и Государственных премий, а также лауреатом премий Совета министров СССР и Правительства РФ, Андроновской премии РАН и Ломоносовской премии МГУ) использовать нелинейную коррекцию, в соответствии с которой в зависимости от состояния системы управления параметры обратной связи скачкообразно менялись. Идея эта оказалась плодотворной и стала систематически применяться для улучшения качества регулирования при решении самых разнообразных задач управления.

Привычный сегодня для специалистов в области управления термин СПС впервые употребляется в 1962 г. Тогда же появляется понятие ψ-ячейки (переключателя структуры системы) и начинают проглядываться контуры новой теории.

Для систем второго порядка С.В. Емельяновым вводятся основные режимы работы СПС: движение по вырожденным траекториям, режим переключений и режим скольжения по прямой переключения структур.

Выясняется, что именно в режиме скольжения движение в замкнутой системе не зависит от факторов неопределённости (неизвестных, в том числе и переменных, параметров объекта и внешних сил), и потому далее доминирующей идеей синтеза СПС становится идея преднамеренного введения режима скольжения по прямой переключения, положение которой заметно влияет на качество переходных процессов.

В 1962–1963 гг. С.В. Емельянов и В.А. Таран доказывают, что неидеальная информация о состоянии системы разрушает идеальность скользящего режима, превращая его в реальный режим скольжения, то есть режим с конечной частотой переключения и конечным же отклонением от прямой скольжения. Важно, что при

определённых условиях это не приводит к неустойчивости системы, в отличие, например, от систем с бесконечным коэффициентом усиления. Иначе говоря, СПС демонстрирует робастность, то есть работоспособность при наличии динамических неидеальностей.

С 1963 г. С.В. Емельянов и В.И. Уткин (впоследствии – д.т.н., профессор, лауреат Ленинской премии) начинают систематическое использование принципа переменности структуры для управления по состоянию объектами *n*-го порядка, в том числе объектами с переменными параметрами и при наличии внешних воздействий. Удаётся доказать, что для стабилизации таких объектов методами СПС достаточно информации только о диапазонах изменения параметров и характеристиках внешних воздействий, а их изменение во времени не играет большой роли.

В 1964 г. Станислав Васильевич Емельянов публикует первый набросок теории СПС с изложением основных её идей и принципов, который становится очерком методов анализа и синтеза СПС. К 1967 г. первый набросок теории превращается в первую монографию С.В. Емельянова по теории СПС.



Вадим Иванович Уткин

С 1963 по 1970 гг. рассматриваются в основном объекты, заданные в пространстве производных регулируемой координаты с СПС-подобной обратной связью по её производным. Это сделало актуальной проблему многократного дифференцирования в шумах, которой занимались С.В. Емельянов, В.И. Уткин, А.М. Шубладзе (впоследствии д.т.н., проф.) и другие авторы. Было показано, что проблема дифференцирования решается методами СПС при дефиците информации о дифференцируемой функции и характеристиках помех, а дифференциаторы СПС обладают повышенной помехозащищённостью, поскольку автоматически адаптируют свои параметры в зависимости от статистических свойств помехи, что улучшает соотношение сигнал/шум.

В 1970 г. коллектив авторов публикует монографию (под ред. С.В. Емельянова), в которой излагается общая теория СПС по полному фазовому вектору. Помимо уже упомянутых тем в этой книге затрагивается ряд новых проблем: задача автономного регулирования в многосвязных системах (С.В. Емельянов и к.т.н. М.Б. Гриценко), проблема адаптации поверхности разрыва с целью повышения качества регулирования (к.т.н. Е.Н. Дубровский, к.т.н. А.В. Кортнев), проблема стабилизации объекта при наличии оператора дифференцирования в правой части (Н.Е. Костылева, ныне – д.т.н., проф.).

Метод эквивалентного управления (1971 г., В.И. Уткин) позволил просто выписывать уравнения скольжения, исследовать их свойства, в том числе устойчивость, и тем самым естественным образом вписать теорию СПС в общий контекст формализма пространства состояний, а также иметь дело не только со скалярными, но и с векторными линейными и нелинейными объектами произвольного вида, решать задачи идентификации (1971–1974 гг., А.Д. Браславский, А.М. Шубладзе, Н.Е. Костылева, В.И. Уткин), экстремального регулирования и математического программирования (1970–1974 гг., С.К. Коровин, впоследствии академик РАН, д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии РФ, Премии Совета министров СССР, Андроновской премии РАН и Ломоносовской премии МГУ; В.И. Уткин). В последнем случае осо-



Сергей Константинович Коровин

бенность методов СПС состоит в возможности решения задач оптимизации без использования информации о градиентах оптимизируемой функции и функций, задающих ограничения.

Итог этому периоду развития теории подведён в монографии В.И. Уткина (1974).

Современные очертания теория СПС обрела после разработки методов синтеза обратной связи по выходу с использованием наблюдателей состояния (1980 г., В.И. Уткин), создания методов управления объектами с распределёнными параметрами (1982 г., Ю.В. Орлов, ныне – д.ф.-м.н., проф.; В.И. Уткин) и теории дискретных СПС и СПС для объектов с последействием (1985 г., С.В. Дракунов, ныне – д.т.н., проф.; В.И. Уткин).

Систематическое использование СПС в промышленных регуляторах было начато А.М. Шубладзе (1974 г.) и привело в 1977 г. к разработке и серийному выпуску комплекса технических средств (КТС) из 40 приборов для решения задач локальной автоматики ЛИУС-СУПС (С.В. Емельянов, Н.Е. Костылева, В.И. Уткин, А.М. Шубладзе). Этот КТС успешно использовался в различных отраслях промышленности десятки лет.

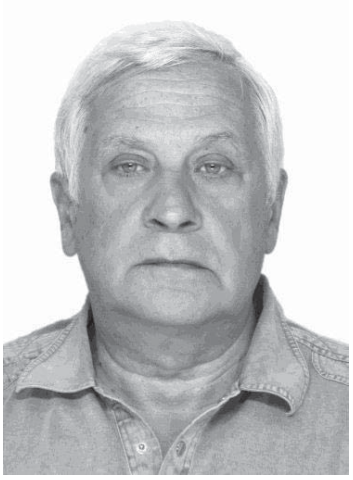
В 1978–1980 гг. были разработаны методы СПС для управления электродвигателями, в том числе и асинхронными моторами (к.т.н. Д.Б. Изосимов, В.И. Уткин).

2.6. Блочный подход в теории управления



Александр Георгиевич Лукьянов

В середине 80-х годов XX века была предложена новая концепция декомпозиционного синтеза обратных связей в многомерных системах различного назначения – блочный принцип управления (В.А. Уткин, А.Г. Лукьянов). Основная идея блочного подхода состоит в преобразовании модели объекта управления высокого порядка в эквивалентную блочную форму. Она состоит из связанных элементарных подсистем (блоков), количество и размерность которых определяются структурными свойствами объекта управления в решае-



Виктор Анатольевич Уткин

мой задаче (свойствами управляемости, наблюдаемости, автономности, инвариантности). Далее на основе этой формы в каждом блоке последовательно формируются локальные обратные связи. В качестве фиктивных управлений выступают переменные следующего блока, а на последнем шаге – истинное управление.

Конструктивность блочного подхода состоит в том, что он позволяет с единых позиций выполнять анализ и синтез как линейных, так и нелинейных систем при решении различных фундаментальных задач: стабилизации, оптимального, робастного и адаптивного[†] управления, наблюдения и фильтрации, автономного управления, слежения, инвариантности и их комплекса. Базовое преимущество блочного подхода при решении типовых задач – декомпозиция. В сочетании с методами теории скользящих режимов и глубоких обратных связей блочный подход стал эффективным инструментом для решения различных малоизученных задач теории автоматического управления с расширением типа и комплекта неопределённостей как в описании модели объекта управления, так и среды его функционирования.

За прошедшие сорок лет в рамках блочного подхода сотрудниками Института получены **следующие основные результаты**:

– В рамках блочного подхода разработаны концепция, методология и процедуры декомпозиционного синтеза робастных регуляторов для практически значимого класса линейных стационарных многомерных систем, в которых при изменении параметров в известных диапазонах сохраняются структурные свойства управляемости, определяемые номинальной системой. Впервые в мировой практике для указанного класса систем разработаны конструктивные процедуры синтеза обратной связи, обеспечивающие заданную степень устойчивости замкнутой системы при всех допустимых значениях неопределённых параметров (С.А. Краснова, В.А. Уткин).



Светлана Анатольевна Краснова

– Разработаны концепция, методология и процедуры каскадного синтеза наблюдателей состояния динамических систем, позволяющие с единых позиций проводить анализ разрешимости задачи наблюдения и реализовывать метод декомпозиции при синтезе наблюдателей состояния для широкого класса линейных и нелинейных многомерных динамических объектов управления, функционирующих в условиях действия внешних возмущений и параметрической неопределённости оператора объекта управления. Впервые в мировой практике разработаны: методы решения задачи наблюдения нелинейных систем при действии внешних возмущений различного типа без ввода экзогенных динамических моделей, имитирующих действие внешних возмущений; декомпозиционные методы синтеза наблюдателей состояния и с непрерывными, и с разрывными корректирующими воздействиями, функциони-

[†] Процедура блочного синтеза адаптивного управления для нелинейных одноканальных систем в конце прошлого века была предложена П. Кокотовичем и получила название *integrator backstepping* («бэкстеппинг») – обход интегратора.

рующими в скользящем режиме. В отличие от стандартных подходов разработанные наблюдатели обладают инвариантностью по отношению к параметрической неопределённости и внешним возмущениям, не требуют детализированной математической модели объекта управления, а также перенастройки в зависимости от наличия/отсутствия внешних возмущений. Данные наблюдатели позволили существенно расширить класс систем, по выходным переменным которых можно восстановить параметры не только не измеряемых переменных вектора состояний, но и внешних возмущений (С.А. Краснова, В.А. Уткин).



Антон Викторович Уткин

– Разработаны концепция, методология и процедуры декомпозиционного синтеза инвариантных систем слежения для линейных и нелинейных многомерных, многоканальных объектов автоматического управления, функционирующих в условиях действия внешних неконтролируемых возмущений, неполных измерений и неполной информации о задающих воздействиях. Впервые в мировой практике введены: понятие и принципы организации совместной блочной формы наблюдаемости и управляемости относительно выходных переменных с учётом внешних возмущений различных типов; комплексный подход к оцениванию смешанных переменных без выделения отдельных подзадач наблюдения неизмеряемых переменных вектора состояний и внешних воздействий. Реализация данных методов позволяет: упростить структуру регулятора; существенно снизить требования к объёму априорной информации об объекте управления и среде его функционирования; расширить класс систем, в которых можно обеспечить асимптотическую сходимость выходных переменных к заданным траекториям без расширения пространства состояний за счёт ввода экзогенных динамических моделей возмущающих и задающих воздействий (В.А. Уткин, С.А. Краснова, А.В. Уткин).



Сергей Александрович Кочетков

– Получены уникальные результаты по обеспечению инвариантности к неизвестным несогласованным (не принадлежащим пространству управлений) возмущениям с использованием релейно-непрерывных управлений. Разработанный VORTEX-алгоритм применим как в цепи обратной связи, так и в наблюдателях состояния. Предложены методы компенсации неустранимых неидеальностей разрывных управления (типа гистерезиса) за счёт подачи на их вход дополнительного высокочастотного сигнала. Получаемый эффект вибролинеаризации позволяет использовать методы синтеза непрерывных управлений на низких частотах (С.А. Кочетков, В.А. Уткин).

Последнее десятилетие вектор развития блочного подхода обусловлен введением новых локальных связей при синтезе регуляторов, а также корректирующих воздействий динамических дифференциаторов, наблюдателей состояния и возмущений в виде *S*-образных кусочно-линейных и нелинейных сигмовидных функций (А.С. Антипов, Ю.Г. Кокунько, Д.В. Краснов, С.А. Краснова, А.В. Уткин, В.А. Уткин). Эти ориентированные на практическую реализацию методы стали ключом к решению проблем учета проектных ограничений на переменные состояния и управления на стадии синтеза, подавления несогласованных возмущений, а также к новым постановкам задач. В частности, впервые в мировой практике разработаны концепция, методология и процедуры декомпозиционного синтеза следящих дифференциаторов, которые автоматически, без громоздких вычислений, аппроксимируют последовательности путевых точек и порождают гладкие реализуемые эталонные траектории для мобильных роботов на плоскости и в пространстве с учётом ограничений на скорость, ускорение и рывок.

Теоретические методы блочного анализа и синтеза, разработанные для линейных и нелинейных систем общего вида, конкретизированы для систем управления различными техническими объектами, функционирующими в условиях неполной информации: роботами-манипуляторами и беспилотными мобильными роботами, электромеханическими системами и электроприводами различного типа, объектами тепло- и электроэнергетики.

2.7. Нелинейный анализ в теории управления

В 1960-е годы в Институте происходили знаковые события, связанные со значительной математизацией исследований. Эта тенденция вызывалась объективными условиями – сам аппарат теории управления становился всё более сложным, и традиционного «инженерного» уровня уже не хватало для его развития и применения. Так, язык пространства состояний для описания линейных и нелинейных систем и особенно задачи оптимального управления с использованием принципа максимума, предъявляли значительно более высокие требования к математическому багажу специалиста по управлению. Этот «зов времени» почувствовали многие молодые сотрудники Института, имевшие техническое образование и понявшие необходимость новых знаний. Некоторые из них (Р.Ш. Липцер, В.И. Уткин, Б.А. Березовский и др.) поступили на так называемый «инженерный поток» механико-математического факультета МГУ и успешно закончили его. С другой стороны, очень большую роль сыграли математики, приглашённые на работу в Институт.



Марк Александрович Красносельский

Здесь нужно прежде всего отметить профессора Марка Александровича Красносельского. Это был



Алексей Вадимович Покровский

выдающийся математик, создатель основ современного подхода к задачам нелинейного анализа, прекрасный и необычайно заботливый педагог, воспитавший несколько поколений высокопрофессиональных и одарённых специалистов. В 1968 г. М.А. Красносельский переехал из Воронежа в Москву и поступил на работу в Институт автоматики и телемеханики АН СССР. Здесь Марк Александрович организовал Лабораторию математических методов анализа сложных систем, в которую пригласил своих любимых воронежских учеников: А.В. Покровского, Н.А. Бобылёва и др. Специфика тематики Института вскоре нашла явное отражение в прикладном характере ряда направлений иатовского периода научной деятельности М.А. Красносельского и его коллектива. Они начинают заниматься нелинейными проблемами теории управления, математическими моделями гистерезиса и многим другим. Здесь же он прочитал несколько циклов лекций по функциональному анализу и современным методам нелинейного анализа. Эти лекции собирали почти полный Малый конференц-зал. Однако влияние М.А. Красносельского не ограничивается собственными исследованиями и лекциями. Двери его кабинета были всегда открыты, и к нему непрерывно шли сотрудники других лабораторий — рассказать о своих задачах и проблемах. Все они получали заинтересованного собеседника и уходили, полные новых идей. В середине 70-х годов Марк Александрович предложил обширную программу исследования систем с гистерезисом и привлёк к её выполнению большую группу своих учеников (А.В. Покровский, В.С. Козякин, П.П. Забрейко, А.Ф. Клепцын, Е.А. Лифшиц, Н.И. Грачев, Д.И. Рачинский, В.В. Черноруцкий и др.). Эта программа была связана с введением специальных математических операций, формализующих различные чисто феноменологические модели гистерезиса в теории пластичности, магнетизме и др. Её реализация потребовала решения нескольких необычных математических задач: были выделены и изучены виброустойчивые уравнения; проанализирована возможность выделения отвечающих индивидуальным винеровским процессам индивидуальных траекторий решений стохастических дифференциальных уравнений; исследована роль условий Фробениуса для стохастических уравнений и т.д. В построенную теорию уложились практически все классические модели гистерезиса. Она позволила редуцировать феноменологические модели гистерезиса (конструктивного, магнитного, пластического и др.) в удобные для использования математические модели.



Николай Антонович Бобылёв

Впоследствии исследования возглавил Николай Антонович Бобылёв. Он продолжил традиции, заложенные его учителем. Ему принадлежит ряд важнейших резуль-

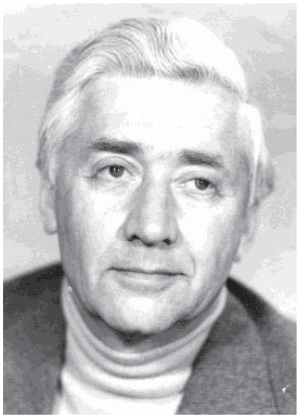
татов в различных областях нелинейного анализа, теории оптимизации и управления. Им был создан гомотопический метод исследования экстремальных задач, в основе которого лежит открытый Бобылёвым принцип инвариантности минимума. Деформационный метод привёл к существенным продвижениям в классических областях математики (доказательство различных неравенств, их усиления и обобщения, точные константы в неравенствах, новые подходы к исследованию устойчивости градиентных, потенциальных и гамильтоновых систем). Метод оказался полезным и эффективным в исследовании задач математической физики, вариационного исчисления, задач математического программирования (анализ устойчивости решений, новые достаточные признаки минимума, алгоритм исследования вырожденных экстремалей, связь теорем единственности краевых задач с признаками минимума интегральных функционалов). На его основе была решена известная проблема Улама о корректности вариационных задач. Другое направление деятельности Н.А. Бобылёва – теория топологических инвариантов и её приложения к задачам хаотической динамики. Он также решил ряд важных практических задач теории управления. В частности, им разработан оригинальный подход к построению кусочно-линейных функций Ляпунова для систем с непрерывным временем, получена оценка радиуса устойчивости для широких классов конечномерных и бесконечномерных динамических систем.



Валерий Иванович Опойцев

Очень ярким представителем научной школы М.А. Красносельского был В.И. Опойцев. Он продолжал исследования по нелинейному анализу; им опубликованы монографии: «*Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения*», «*Нелинейные операторы в пространствах с конусом*», «*Нелинейная системостатика*». Однако он останется в памяти, прежде всего, автором уникального научного проекта, аналогов которому трудно найти в современной науке, характеризующейся узкой специализацией исследователей. В 2004–2018 гг. он издал 16-томные «*Лекции по математике*» (под псевдонимом В. Босс), в которых представлен свежий и неординарный взгляд на основные разделы математики и связи между ними. Эти книги написаны не как стандартные учебники, а как заинтересованный разговор, вовлекающий читателя в мотивы и трудности научной проблемы. При этом научный уровень изложения очень высок. Книги пользуются огромным успехом, они переиздаются и переводятся на иностранные языки.

2.8. Адаптивные и обучающиеся системы



Яков Залманович Цыпкин

Уже в самом начале становления теории управления стало понятным, что, как правило, точное описание системы управления недоступно, и неизбежные неопределённости параметров и характера динамики системы приводят к необходимости синтеза управления в условиях неопределённости. В рассматриваемой ситуации наиболее естественно воспользоваться стратегией адаптивного управления, когда одновременно происходит и уточнение описания системы, и управление ею. Наиболее глубоко идея подобного подхода была воплощена в концепции дуального управления А.А. Фельдбаума. По логике Фельдбаума, управление имеет двойственную природу: с одной стороны, оно является пробным воздействием, предназначенным для изучения управляемой системы, а с другой – решает некоторую задачу оптимизации. Влияние, которое оказала теория дуального управления на современную теорию управления, трудно переоценить. Недаром цикл статей А.А. Фельдбаума, вышедший в 1960–1961 гг., был признан специальной комиссией ИФАК одной из «вех науки об управлении в XX веке». Однако непосредственное формирование оптимального дуального управления возможно лишь в очень редких случаях, вот почему внимание исследователей сконцентрировалось на применении менее сложных стратегий – стратегий адаптивного управления. Например, в работах В.Ю. Рутковского и его сотрудников применялся удобный метод эталонной модели, о котором рассказывается в следующем разделе.

Другая волна исследований по адаптивным и обучающимся системам была вызвана тем, что ещё в конце 1950-х годов появились (в рамках науки, которая тогда называлась «кибернетика») работы по распознаванию образов и обучению автоматических систем. В Институте эти работы развивались по двум направлениям. С одной стороны, М.А. Айзерман и его сотрудники Л.И. Розоноэр и Э.М. Браверман разработали модель распознавания, связанную с разделением компактных множеств точек в пространстве образов, и предложили для решения задачи метод потенциальных функций. Эти исследования были позже подытожены в их монографии «Метод потенциальных функций в теории обучения машин», вышедшей в 1970 г. С другой стороны, А.Я. Лернером и В.Н. Вапником для решения той же задачи распознавания был разработан метод «обобщённого портрета». Впоследствии этот результат лёг в основу очень глубоких исследований В.Н. Вапника и А.Я. Червоненкиса, связанных с решением проблемы восстановления зависимостей по экспериментальным данным.

Родство задач распознавания и обучения с общими проблемами теории адаптации было подмечено Я.З. Цыпкиным в середине 1960-х гг. Он первым понял, что

общим математическим аппаратом для их исследования могут служить рекуррентные стохастические алгоритмы (в частности, уже известный в статистике метод стохастической аппроксимации). Оказалось, что в этих рамках могут быть рассмотрены такие разнообразные задачи, как оценивание параметров, идентификация, распознавание образов, стохастическая оптимизация и ряд других базовых задач теории управления.

Первоначально эти идеи вызвали острую дискуссию, не сразу было осмыслено их соотношение с классическими статистическими методами и методом потенциальных функций. Позднее, после выхода в свет монографий *Я.З. Цыпкин «Адаптация и обучение в автоматических системах»* (1968 г.) и *Я.З. Цыпкин «Основы теории обучающихся систем»* (1970 г.), метод стохастической аппроксимации стал общепризнанным инструментом описания и исследования рекуррентных адаптивных процедур. В работах Я.З. Цыпкина и Б.Т. Поляка 1970–80-х годов были строго исследованы сходимость и скорость сходимости адаптивных алгоритмов и предложены оптимальные (по скорости сходимости) версии алгоритмов. Те же авторы предложили робастные варианты алгоритмов, сохраняющие работоспособность при недостаточной информации о вероятностных свойствах помех.

2.9. Адаптивные системы с эталонной моделью

Работы по теории адаптивных систем с моделью были начаты в Институте под руководством Б.Н. Петрова в 1957 г. в связи с необходимостью создания систем управления для новых типов летательных аппаратов. Параметры динамических моделей таких аппаратов изменялись в очень широких пределах, причём со скоростью, соизмеримой с темпом переходных процессов в нормальных условиях полёта.

Были предложены два новых принципа построения беспоисковых самонастраивающихся систем: системы с контролем частотных характеристик и системы с моделью, реализуемой во временно́й области* (авторы: Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова). Позднее в мировой и отечественной литературе такие системы стали называть адаптивными системами с эталонной моделью.

В Институте проблем управления были получены следующие результаты:

- разработан метод синтеза основного контура адаптивных систем с эталонной моделью, основанный на идеях теории инвариантности;
- введено понятие обобщённого настраиваемого объекта, позволяющего наиболее просто решать задачу синтеза оптимального управления нестационарным объектом;

* Первые научные публикации вышеперечисленных авторов по этим принципам вышли только в 1965 г. В настоящее время хорошо известно, что аналогичные принципы построения адаптивных систем были предложены примерно в то же время, что и в ИАТе, многими другими организациями, занимавшимися проектированием адаптивных систем. За рубежом первая публикация по системам с эталонной моделью появилась в 1958 г., а по системам с контролем частотных характеристик – в 1962 г.

- получены условия, при которых система обладает свойством двукратной инвариантности;
- решена проблема минимально допустимого числа перестраиваемых коэффициентов регулятора (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов);
- предложен новый подход, названный мультипликативной адаптацией (С.Д. Земляков, Е.М. Фирсова).

При выбранной структуре системы и основного контура управления центральной проблемой является синтез алгоритмов адаптации. Были предложены две группы алгоритмов: эвристические (В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова) и алгоритмы, синтезированные прямым методом Ляпунова (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков). Этот подход до сих пор применяется в работах отечественных и зарубежных учёных. Именно прямой метод Ляпунова позволил получить фундаментальные результаты в области синтеза адаптивных систем.

Именно в ИПУ впервые в мировой литературе доказана теорема о равномерной (по начальному моменту и начальным отклонениям) асимптотической устойчивости невозмущённого движения адаптивной системы с эталонной моделью при неизвестных, но постоянных параметрах объекта. Получены достаточные условия указанного типа устойчивости в виде требований, предъявляемых к входному воздействию на систему. Доказана устойчивость движения при ляпуновских алгоритмах адаптации в случае переменных параметров объекта, удовлетворяющих условиям теоремы И.Г. Малкина.

Разработаны линеаризованные модели параметрического управления (И.Б. Ядыкин, Б.В. Павлов, И.Н. Крутова, В.С. Косиков), на основе которых впервые созданы инженерные методики расчёта систем с контролем частотных характеристик и систем с эталонной моделью. Эти методики основаны на расчётных соотношениях для определения стратегии управления в основном контуре и позволяют рассчитывать основные показатели качества не только процессов управления, но и процессов настройки параметров с той же степенью детализации, что и в основном контуре.

Разработана теория адаптивных систем управления с неявной эталонной моделью (И.Б. Ядыкин). Открыт новый класс структурных инвариантов контура управления с обратной связью, названных адаптируемостью регулятора – характеристикой, определяющей потенциальную точность настройки контура управления при изменении рабочей точки (режима) объекта управления. Изучены виды адаптируемости (слабая, частичная и полная, локальная и глобальная) и найдены критерии адаптируемости в виде ранговых свойств матриц адаптируемости; установлена связь свойств адаптируемости со свойствами инвариантности, управляемости, наблюдаемости, устойчивости и робастности.

Предложена концепция координатно-параметрического управления (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков), представляющая собой дальнейшее развитие адаптивного управления. Под координатно-параметрическим управлением понимается управление объектом не только с помощью традиционных органов

управления, но также и посредством целенаправленного изменения его конструктивных параметров в режиме нормального функционирования. Развита теория координатно-параметрического управления и синтезированы алгоритмы управления, которые можно использовать для широкого класса технических объектов.

Разработана теория настраиваемой работоспособности системы в условиях неопределённости, решена задача восстанавливаемой функциональной работоспособности и настраиваемой стратегии управления, получила развитие теория оптимальных адаптивных регуляторов для нелинейных многосвязных объектов (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, В.М. Глумов).

2.10. Робастные системы

Как уже отмечалось, основная идея адаптивных методов управления заключается в одновременном решении двух задач: исследования системы и управления ею во имя достижения некоторой заданной цели. Однако встречаются ситуации, когда идентификация системы невозможна или нежелательна, и тогда необходимо применять методы робастного управления, то есть управления в условиях неопределённости. По существу, уже сам классический принцип обратной связи имеет своей целью устранение неизбежных неопределённостей в функционировании и, соответственно, описании системы. Теория робастного управления по-настоящему заинтересовала учёных сравнительно поздно, в 90-е гг., хотя некоторые фундаментальные идеи робастности присутствовали в теории управления с самого ее зарождения.

Первые результаты в этой области относились к анализу систем с неопределённостями – удалось построить робастные аналоги основных критериев устойчивости линейных систем. Так, например, робастный вариант критерия Михайлова позволяет проверить устойчивость интервального семейства полиномов («годограф Цыпкина–Поляка»). Эти результаты были обобщены и распространены на многие другие проблемы анализа робастной устойчивости (критерий Найквиста, дискретные системы, нелинейно входящие параметры и т.д.) Серьёзные результаты были получены и в задачах робастного синтеза (то есть проектирования регуляторов для робастных систем). В книге *Б.Т. Поляка* и *П.С. Щербакова* «*Робастная устойчивость и управление*» (2002) описываются основные итоги этих исследований.



Борис Теодорович Поляк и Павел Сергеевич Щербаков

2.11. Линейные системы: новые подходы

В 70-е годы, помимо традиционных линейно-квадратичных задач, теория линейных систем управления, казавшаяся в значительной степени завершённой, обогатилась новыми идеями и подходами.



Александр Петрович Курдюков

Во-первых, разрабатывались новые критерии качества управления, включая, например, квадратично-экспоненциальные функционалы, чувствительные к риску, и новые методы синтеза управления, основанные на замене вероятностной меры И.В. Гирсанова в стохастических системах. Появились и новые детерминистские постановки, использующие идеи функционального анализа, такие как теория возмущений и индуцированные нормы операторов на гильбертовых пространствах. Они нашли применение в задачах описания чувствительности и обеспечения робастности систем управления по отношению к параметрическим неопределённостям и входным шумам с конечной энергией. Эти идеи легли в основу H_∞-теории робастного управления, созданной в работах западных учёных (Зеймс, Гловер, Френсис, Дойл и др.) и оформившейся в 1980-х годах. В Институте первыми энтузиастами этой теории стали А.С. Позняк и А.П. Курдюков. В частности, ещё в 1990 г. была выпущена брошюра (А.С. Позняк, Г.Г. Себряков, А.В. Семёнов, Е.А. Федосов. H_∞-теория управления: феномен, достижения, перспективы, открытые проблемы. М. 1990) с обзором H_∞-теории – по-видимому, первая в нашей стране. В 1993–1996 гг. был осуществлен синтез идей H_∞-теории и теоретико-энтропийного описания статистической неопределённости входных шумов в линейных стохастических системах с помощью функционалов анизотропии. Эти результаты, полученные И.Г. Владимировым (ГосНИИАС, ИППИ РАН) и опубликованные в середине 1990-х – начале 2000-х годов в соавторстве с А.П. Курдюковым (ИПУ РАН) и А.В. Семёновым (ГосНИИАС), положили начало анизотропийной теории стохастического робастного управления и фильтрации, использующей стеснённую версию операторной нормы линейной системы при анизотропийном ограничении на внешние возмущения. Такой подход содержит H_∞-теорию и LQG-управление в качестве предельных случаев. Впоследствии А.П. Курдюков вместе со своими учениками занимались развитием анизотропийной теории.

Во-вторых, некоторые «старые» идеи обрели новое дыхание. Так, восходящая ещё к Вышнеградскому (1876) задача выделения области устойчивости линейной системы в пространстве двух параметров была успешно решена в рамках так называемого D-разбиения (Неймарк, 1948). Впоследствии оказалось, что эта задача важна как при синтезе регуляторов низкого порядка, так и при анализе робастной

устойчивости. Сотрудникам лаборатории № 7 Е.Н. Грязиной и А.А. Трембе удалось значительно развить теорию *D*-разбиения: была выяснена геометрия области устойчивости для непрерывных и дискретных систем, исследован матричный вариант задачи, предложено обобщение на случай большего чем два числа параметров, построены робастные обобщения *D*-разбиения и его аналог для H_∞-оптимизации.

В-третьих, развита новая техника линейных матричных неравенств (ЛМН) для анализа и синтеза линейных систем. Основы этого подхода были заложены ещё А.М. Ляпуновым. В.А. Якубович первым записал некоторые задачи управления на языке ЛМН. Однако лишь после выхода в 1994 г. монографии американского учёного С. Бойда с соавторами ЛМН превратились в удобный и общепринятый аппарат исследования разнообразных задач управления. Ситуация облегчалась тем, что в работах А.С. Немировского и Ю.Е. Нестерова были предложены эффективные методы внутренней точки для решения ЛМН. Написанные на их основе программные средства сделали решение ЛМН алгоритмически удобным и доступным средством. Первые такие пакеты программ появились еще в середине 1990-х годов; более современный пакет *cvx* (созданный под руководством С. Бойда) значительно расширил рамки решаемых задач. На основе ЛМН-подхода сотрудникам лаборатории № 7 Б.Т. Поляку, М.В. Хлебникову и П.С. Щербакову удалось решить важную задачу подавления неслучайных ограниченных внешних возмущений.



Борис Теодорович Поляк



Михаил Владимирович Хлебников



Павел Сергеевич Щербаков

Эта задача стояла с момента возникновения теории линейных систем, но её удавалось решить лишь для некоторых типов возмущений (единичный скачок, гармонические возмущения, гауссовские помехи и т.д.). Для наиболее распространённого класса произвольных ограниченных возмущений проблема оставалась открытой. Здесь следует отметить пионерские исследования Б.В. Булгакова (1946 г.) по анализу таких систем и их обобщения в трудах Ф.Л. Черноусько и А.Б. Куржанского. Однако задача синтеза регуляторов при наличии подобных возмущений представляла большие трудности. Развитая в лаборатории «Адаптивных и робастных систем» им. Я.З. Цыпкина техника инвариантных эллипсоидов в сочетании с аппаратом ЛМН позволила преодолеть эти трудности; соответствующие результаты были подытожены в монографии *Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков «Управление линейными системами при внешних возмущениях:*

техника линейных матричных неравенств», вышедшей в 2014 г. и удостоенной премии Президиума РАН имени Б.Н. Петрова за 2016 г.

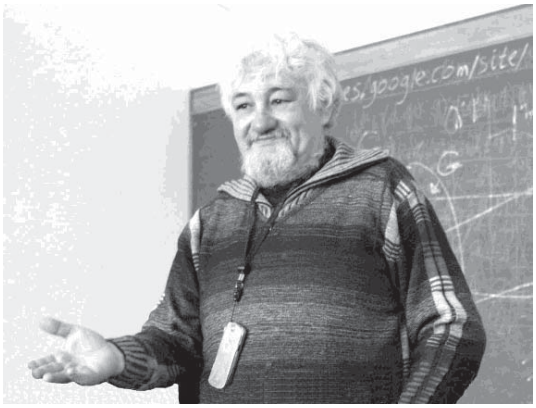
В-четвёртых, классическая задача о переходных режимах в линейных системах обычно исследовалась как реакция системы на единичный скачок. Еще в 1948 г. А.А. Фельдбаум рассмотрел другую постановку задачи – выяснить, каково влияние ненулевых начальных условий на возможные уклонения траектории от положения равновесия. Эта тематика не была продолжена, пока в 1987 г. Р.Н. Измайлов (сотрудник лаборатории М.А. Красносельского) не сделал важного вывода о неизбежности больших уклонений при сдвиге корней характеристического полинома в отрицательную полуплоскость. Сравнительно недавно сотрудники лаборатории получили новые результаты в изучении этой интересной проблемы о «всплеске». Были даны оценки (верхние и нижние) величины «всплеска» для различных расположений корней замкнутой системы. Неожиданный эффект был обнаружен для дискретных систем: оказалось, что если добиваться конечной длительности переходного процесса (то есть сделать все корни характеристического полинома равными нулю), то это может привести к возникновению больших уклонений.

Наконец, одно из новых и перспективных направлений исследований связано с «оптимизационным» подходом к линейным задачам управления, предполагающим их сведение к задачам матричной оптимизации. Например, в классической задаче о линейно-квадратичном регуляторе можно рассматривать матрицу линейной обратной связи как переменную и сводить проблему к минимизации показателя качества по этой переменной. Такой подход, восходящий к пионерским работам Р. Калмана, был впервые применен Б.Т. Поляком и М.В. Хлебниковым к задаче о линейно-квадратичном регуляторе по выходу, к задачам подавления неслучайных ограниченных внешних возмущений при помощи статической линейной образной связи по состоянию или по выходу, а также при помощи динамической обратной связи по выходу с использованием наблюдателя. Предложенный подход также может быть использован для решения задач настройки ПИ- и ПИД-регуляторов. Разработанные алгоритмы решения возникающих оптимизационных задач показали свою эффективность и приводят ко вполне удовлетворительным по инженерным критериям качества регуляторам.

2.12. Стохастические робастные системы управления

Работы по робастному управлению для линейных дискретных систем со случайными возмущениями внутренних параметров были начаты в Институте в 1992 г. как развитие идей H_∞-теории управления, активно обсуждавшихся в период 1991–1992 гг. на семинарах А.С. Позняка и А.П. Курдюкова. В 1993–1996 гг. в Институте действовал другой исследовательский семинар «Стохастическая H_∞-оптимизация и энтропийные задачи управления», движущей силой которого был И.Г. Владимиров, получивший основополагающие результаты анизотропийной теории стохастического робастного управления и фильтрации в условиях статистически неопределённых

входных шумовых воздействий.



А.П. Курдюков на семинаре

Построенная теория использует функционалы анизотропии (меры неинвариантности относительно группы вращений), характеризующие в терминах относительной энтропии Кульбака–Лейблера отклонение вероятностного закона внешнего возмущения системы от соответствующих изотропных нормальных распределений (с нулевым средним и скалярной ковариационной матрицей) фрагментов последовательности дискретного гауссовского белого шума. Последний является идеализированной моделью случайных шумов в задачах *LQG*-управления и фильтрации. Будучи энтропийным показателем «количества» статистической неопределённости (в знании конечномерных вероятностных распределений входного шума), функционал анизотропии (или асимптотическая быстрота её создания в случае стационарных шумов – средняя анизотропия) ведет к стохастическому стеснённому аналогу индуцированной нормы системы как линейного оператора при ограничении на (среднюю) анизотропию входного возмущения. Получающаяся анизотропийная норма системы характеризует чувствительность её выхода к статистически неопределённым входным воздействиям, тем самым делая минимизацию такой нормы полезным с практической точки зрения критерием качества в задачах стохастического робастного управления в условиях частичной статистической неопределённости. Анизотропийная теория управления обобщает теорию *LQG*-регуляторов и H_∞-теорию с позиции способа описания действующих сигналов и их влияния на объект управления.

Анизотропийная теория сочетает преимущества перечисленных выше теорий, позволяя строить регуляторы, менее консервативные, чем H_∞-регуляторы, и более робастные, чем *LQG*-регуляторы. Ключевой процедурой синтеза оптимальных анизотропийных регуляторов является численное решение системы перекрёстно связанных уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и алгебраического уравнения специального вида. Построенная теория доказала свою состоятельность, например, в приложении к построению регуляторов в задаче посадки самолёта в условиях ветровых возмущений и статистически неопределённых шумов измерений.

Исследования по анизотропийной теории управления интенсивно ведутся в Институте и в настоящее время. К настоящему времени решены разнообразные задачи, включая синтез субоптимального анизотропийного управления, а также анизотропийных регуляторов для алгебро-разностных систем и систем с мультипликативными шумами.

Материалы по анизотропийной теории управления вошли в три монографии, (последняя была издана в 2018 г. издательством *Springer*, авторы А.П. Курдюков, А.А. Белов и О.Г. Андрианова), были опубликованы в ведущих научных журналах в России (статьи в «Докладах РАН» и журнале «Автоматика и телемеханика») и за рубежом (*International Journal of Control*, *Archives of Control Sciences, Journal of Ap-*

plied Mathematics and Stochastic Analysis), доложены на ведущих мировых конгрессах: ИФАК, CDC, ECC, ROCOND и др. – и всероссийских конференциях.

2.13. Стохастические системы



Владимир Семёнович Пугачёв

По мере развития теории автоматического управления был постепенно осознан тот факт, что методы классической теории недостаточны для расчёта сложных автоматических систем, работающих в условиях случайных воздействий. Естественным шагом в развитии теории систем и процессов управления стало привлечение вероятностных методов, позволяющих учитывать влияние различного рода случайных возмущений и помех на работу автоматических систем и их элементов. В результате в рамках общей теории процессов управления оформилось важное направление: стохастическая теория процессов управления, математическим фундаментом которой стали методы теории вероятностей и математической статистики.

Работы Института в области стохастических систем дали мощный толчок её интенсивному развитию, существенно обогатили теорию и привели к появлению и развитию новых разделов. Важным направлением исследований стала теория статистически оптимальных систем, в рамках которой были разработаны методы синтеза оптимальных нестационарных и нелинейных систем. Классическая монография, впервые вышедшая в 1960 г.: *В.С. Пугачёв. Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз*, – переиздавалась множество раз. В 1969 г. вышла книга *Л.П. Сысоев. Оценка параметров, обнаружение и различение сигналов*. Описание новых эффективных методов нелинейной фильтрации и экстраполяции случайных процессов составило содержание также классической монографии *Р.Ш. Липцер*, *А.Н. Ширяев. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974*. В 1980 г. вышла книга Н.И. Андреева, в которой излагалась теория статистически оптимальных систем управления.



Роберт Шевилевич Липцер

В Институте были разработаны эффективные приближённые методы расчёта и анализа точности многомерных нелинейных систем, подвергающихся случайным воздействиям. Была создана статистическая теория обучения и самообучения автоматических систем, функционирующих в условиях неполной информации (*В.С. Пугачёв. Статистическая теория обучающихся автоматических систем, 1967*), заложены основы общей теории стохастических систем (*В.С. Пугачёв, И.Н. Синицын. Стохастические дифференциальные системы, 1985*). Для последнего периода развития стохастической теории управления характерен большой интерес к



Александр Викторович Добровидов

синтезу автоматических систем в условиях параметрической и непараметрической неопределённости. Были разработаны основы теории устойчивого непараметрического оценивания функционалов от неизвестных распределений и на её основе создана теория непараметрического оценивания случайных процессов с неизвестными вероятностными характеристиками (*А.В. Добровидов, Г.М. Кошкин. Непараметрическое оценивание сигналов». – М.: Физматлит, 1997*; *В.А. Васильев, А.В. Добровидов, Г.М. Кошкин. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей». – М.: Наука, 2004*). Обновленный вариант теории непараметрического оценивания функционалов опубликован в США на английском языке (*A. Dobrovidov, G. Koshkin, V. Vasiliev. Non-parametric State Space Models*, *Kendrick Press, 2012*). В последнее десятилетие активно развивались методы оптимизации непараметрических ядерных алгоритмов нелинейной обработки информации, основанные на построении состоятельных оценок параметров размытости ядерных функций, определенных на бесконечных и конечных носителях.

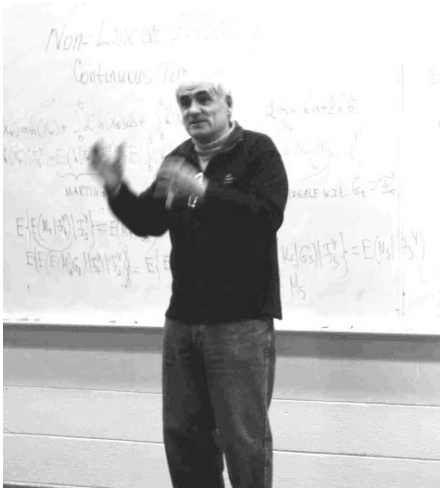
Развивая стохастические методы теории управления, Институт стимулировал образование нового раздела теории управления – теории идентификации систем и процессов (более подробно об идентификации – в разделе 2.14 этой книги), то есть методов построения математических моделей объектов управления по результатам их функционирования. Значительное место в развитии этой теории занимают алгебраические методы и методы теории групп, позволяющие учитывать естественную симметрию структуры объектов управления. Для систем, инвариантных относительно некоторых групп преобразований, алгебраическими методами решались задачи идентификации, оценивания параметров, принятия статистических решений, редукции наблюдений к инвариантам групп преобразований.

Другим направлением работ в теории управления стохастическими системами начиная с 2010 г. явилась теория робастных стохастических систем, анализ и оптимизация таких систем. Опубликована серия работ по оптимизации мультипликативных стохастических систем при ограничениях на индуцированную норму матричной передаточной функции от внешнего возмущения к регулируемому выходному сигналу. Достаточные условия оптимальности формулируются в виде условий существования решений систем матричных уравнений Риккати обобщённого типа. Получены условия разрешимости таких систем. Исследованы робастные стохастические системы с несколькими внешними возмущениями и построены оптимальные процедуры управления.

Следует подчеркнуть, что работы сотрудников Института в области теории стохастических систем осуществлялись в тесном контакте с известными российскими и зарубежными учёными. Результаты этого плодотворного сотрудничества, многие из которых уже стали классическими, опубликованы в ведущих научных журналах и монографиях, вышедших в свет и получивших известность не только у нас в стране, но и за рубежом. В частности, мировое признание получили совместные работы Р.Ш.

Липцера и А.Н. Ширяева (МИАН им. В.А. Стеклова) по теории мартингалов (*Р. Ш. Липцер, А.Н. Ширяев. Теория мартингалов. – М.: Наука, 1986*).

Фактически, в Институте много лет подряд существовала научная школа Р.Ш. Липцера, который готовил своих учеников, работая одновременно профессором Московского физико-технического института. Сам Роберт Шевилевич и «выпускники» его школы: А.И. Яшин, П.И. Кицул, А.П. Серебровский, А.А. Бутов, Е.В. Кричагина, Е.Я. Рубинович и др., – внесли значительный вклад в развитие теории калмановской фильтрации и её приложений. Применение мартингальных методов позволило заметно расширить класс случайных процессов, для которых оптимальные в среднеквадратическом смысле оценки можно получить в реальном времени из решения стохастических дифференциальных уравнений характеристик динамических систем по скачкообразным наблюдениям.



Липцер был замечательным лектором



Анатолий Иванович Яшин

Ещё одной темой исследований, важной как в теоретическом, так и в прикладном аспектах является управление наблюдениями. Под управлением наблюдениями понимают управление процессом сбора информации. Ясно, что чем более «качественную» информацию об объекте наблюдения удастся собрать в процессе наблюдения, тем выше будет точность оценивания. У нас в стране начало этих работ (конец шестидесятых) связано с именами академиков Ф.Л. Черноусько и А.Б. Куржанского, д.ф.-м.н. В.Б. Колмановского. В ИПУ РАН в эти исследования, проводившиеся под руководством будущего академика Н.А. Кузнецова, большой вклад внесли А.И. Яшин, Ф.Н. Григорьев, А.П. Серебровский, Б.М. Миллер, Е.Я. Рубинович (*Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов, А.П. Серебровский. Управление наблюдениями в автоматических системах. – М.: Наука, 1986*).



Евгений Яковлевич Рубинович

В связи с интенсивным развитием беспилотных мобильных комплексов, оказались востребованы работы Института по траекторному управлению наблюдениями (Е.Я. Рубинович). Суть дела в том, что точность оценивания, например, фазовых координат маневрирующего случайным образом динамического объекта по зашумлённым наблюдениям со стороны подвижного наблюдателя может

существенно зависеть от собственно траектории наблюдателя. Поэтому, управляя его траекторией, имеется возможность улучшить (иногда – в разы!) точность оцениваемых параметров за счёт использования более «качественной» информации об объекте, получаемой в процессе наблюдения.



Наталья Михайловна Маркович

Ещё одна область исследований Института – статистический анализ экстремальных величин (д.ф.-м.н. Н.М. Маркович). Эта область знаний интенсивно развивается с начала 1990-х годов. Связано это с тем, что распределения с «тяжёлыми» хвостами (распределения, хвосты которых убывают на бесконечности медленнее, чем экспонента, и у которых не все моменты существуют) получили всеобщее признание как вполне реалистические модели различных явлений, естественных и искусственно созданных. Так, объёмы файлов, передаваемых через Интернет, размеры страховых сумм на случай катастроф, наблюдаемые в природе ряды низких и высоких температур, уровни воды в реках при наводнениях, сила штормовых ветров и волн, концентрация редких полезных ископаемых, содержание озона в атмосфере – вот далеко не полный перечень явлений, которые могут быть хорошо представлены распределениями с тяжёлыми хвостами. Отсутствие конечных моментов распределения, в частности, второго момента, не позволяет воспользоваться многими классическими результатами теории вероятностей и статистики (например, центральной предельной теоремой). Это требует разработки принципиально новых методов, не опирающихся на факт существования второго момента. Присутствие в наблюдаемой выборке нетипичных аномальных наблюдений также является неотъемлемым свойством распределений с тяжёлыми хвостами.

В Институте разработаны непараметрические статистические методы оценивания, позволяющие провести анализ данных на наличие тяжёлых хвостов и оценить их статистические характеристики по выборкам независимых наблюдений ограниченных объёмов. В том числе получены непараметрические оценки: (а) плотностей распределений с тяжёлыми хвостами; (б) высоких квантилей, то есть квантилей, близких к 100 %; (в) хвостового индекса – базовой характеристики распределения с тяжёлым хвостом, отражающей форму хвоста; (г) функции восстановления и (д) так называемого экстремального индекса. Полученные алгоритмы использованы при анализе измерений в телекоммуникационных системах типа Интернет с целью оптимизации их работы в реальном времени (*N. Markovich. Nonparametric Analysis of Univariate Heavy-Tailed Data: Research and Practice. – London: Wiley. 2007*).

С 2019 г. под руководством Н.М. Маркович интенсивно ведутся работы по анализу экстремумов случайных сетей. Известно, что в современных сетях таких, как Интернет, характеристики узлов, а именно, число связей, *пейджранги*, имеют распределения с тяжёлыми хвостами. Рассматриваются модели эволюции сетей, в которых возможны удаления узлов и связей при присоединении новых узлов. Актуальность проблемы определяется тем, что эволюция сети возникает во многих приложениях таких, как Интернет, транспортные сети, сети цитирования между

научными статьями, распространение инфекций в популяциях и многих др. С эволюцией могут меняться экстремальные характеристики мер влиятельности узлов: хвостовой и экстремальный индексы. Данная тематика открывает простор для широкого спектра задач, таких как, в частности, передача сообщений, выявление лидирующих сообществ.

2.14. Теория идентификации

Идентификация (совокупность методов и алгоритмов построения моделей объектов, процессов, явлений по данным функционирования) является одной из основных задач современной теории автоматического управления. Формализация процесса создания модели, адекватно отражающей свойства объекта управления в условиях воздействия внешних факторов, заключается в выборе оператора, обеспечивающего функционирование модели, близкое к действию объекта в смысле выбранного критерия.

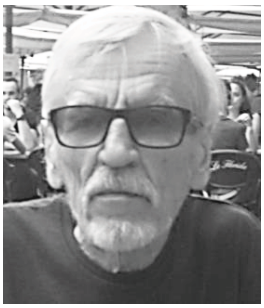
В случае известной структуры, полученной в результате предварительного анализа, различают задачи параметрической и непараметрической идентификации, сосредоточенной на исследовании различных характеристик объекта. При неизвестной структуре оператора объекта решается задача структурной идентификации. В этом случае в результате предварительного исследования выявляются наиболее информативные переменные, оцениваются степень линейности и степень стационарности объекта. При управлении объектом в условиях неопределённости в процессе обработки результатов наблюдений осуществляется снижение неопределённости его начального описания. В современных системах автоматического управления идентификация представляет собой неотъемлемую часть процесса адаптивного управления, когда оптимальные в смысле определённого критерия управляющие воздействия вырабатываются на основе настройки моделей по данным реального функционирования. Опыт проектирования систем управления свидетельствует о невозможности построить адекватную математическую модель, основываясь только на теоретическом исследовании физических, химических и других процессов в системе, либо на имитационных исследованиях.



Наум Самойлович Райбман

Идентификация была признана самостоятельной научной теорией в середине прошлого столетия. Значительная роль в этом принадлежит профессору Науму Самойловичу Райбману, основавшему в Институте лабораторию «Идентификации систем управления», ставшую средоточием научных контактов специалистов в этой области из многих стран. В лаборатории успешно развивались методы идентификации, основанные на принципах и методах математической статистики. Здесь же сложились и основные направления: структурная, непараметрическая и параметрическая идентификация. Именно в лаборатории Райбмана

(заведующими которой после его смерти были последовательно Владимир Алексеевич Лотоцкий и, в настоящее время, Наталья Николаевна Бахтадзе) были развиты научные подходы к разработке систем управления с идентификатором, так называемых систем непрямого адаптивного управления (в терминологии Я.З. Цыпкина).



Владимир Алексеевич Лотоцкий



Валентин Маркович Чадеев

В 1976 г. Одним из первых примеров реально работающих систем такого типа стала разработанная сотрудниками лаборатории адаптивная система управления с идентификатором – АСИ для Первоуральского новотрубного завода (Государственная премия СССР 1976 г.). Одним из основных её разработчиков является В.М. Чадеев.



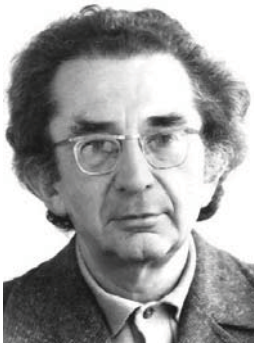
Александр Львович Бунич

Были разработаны эффективные алгоритмы идентификации линейных объектов с дискретным временем и аддитивным возмущением (А.Л. Бунич). Изучена проблема грубости системы управления по отношению к структурным изменениям (пертурбациям) внутренних моделей, используемых при построении расчётных регуляторов. Предложены методы построения итеративных по структуре фрактальных регуляторов, обеспечивающих управление с заданной точностью регулирования в установившемся режиме для класса возмущений с неполным спектром. С помощью таких регуляторов достигается компромисс между требуемой точностью и сложностью реализации регулятора высокого порядка при соблюдении требований грубости. Разработан идентификационный подход к синтезу робастно-оптимальных систем управления для определённых классов внешних возмущений (дискретный белый шум, марковские последовательности, мартингалы) (Н.Н. Бахтадзе).

Созданы методы синтеза основного контура в линейных системах с неполной информацией о статистических характеристиках внешних возмущений, исследованы вырожденные задачи и условия вырожденности линейно-квадратичных задач синтеза для линейных объектов со стационарными возмущениями (А.Л. Бунич).

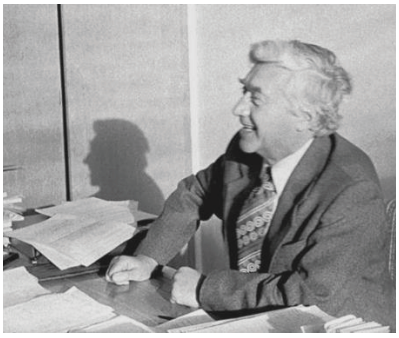
В Институте осуществляются разработка и исследование методов идентификации нелинейных динамических стохастических систем, основанных на использовании состоятельных мер зависимости случайных величин (процессов). Разработка информационно-теоретических подходов к структурной, параметрической и непараметрической идентификации стохастических систем предполагает применение согласованных мер зависимости случайных величин и мер расходимости вероятностных распределений. Информационные характеристики являются состоятельными характеристиками связи между случайными сигналами.

Разработаны методы и получены условия идентифицируемости систем по критерию максимума информации о выходном сигнале и параметрах системы, содержащейся во входном сигнале, что позволяет максимально использовать всю имеющуюся информацию об исследуемом объекте. В лаборатории «Интеллектуальных систем управления и моделирования» получены (И.С. Дургарян) энтропийные оценки структурных инвариантов линейных и нелинейных систем, в том числе оценки информативности, стохастичности, нелинейности и идентичности моделей. В лаборатории «Идентификации систем управления» предложены (К.Р. Чернышёв) меры с использованием энтропий Реньи и Цаллиса, которые включают энтропию Шеннона как частный случай.



Иосиф Исаакович Перельман

Получила развитие и реальное воплощение идея управления с прогнозирующей моделью профессора Иосифа Исааковича Перельмана. Прогнозирующая модель представляет собой настраиваемый фильтр, вычисляющий прогноз выходной переменной объекта управления с использованием данных наблюдений. Для некоторых классов объектов задача идентификации эквивалентна настройке прогнозирующей модели по критерию точности прогноза, который определяется функционалом невязки выходных переменных объекта и модели.



Яков Залманович Цыпкин

Особое место занимают фундаментальные работы Я.З. Цыпкина, создавшего информационную теорию идентификации. В рамках этой теории разработаны методы идентификации и алгоритмы, являющиеся оптимальными на определённых классах объектов и внешних возмущений в зависимости от имеющейся априорной информации об объекте управления. Таким образом, были обозначены предельные возможности построения аппроксимационных моделей.

В лаборатории «Адаптивных и робастных систем» им. Я.З. Цыпкина Б.Т. Поляком и А.В. Назиным были предложены новые способы снижения неопределённости в описании объектов на основе *интервального анализа* и *гарантированного оценивания*, базирующиеся на методе эллипсоидов. Результаты этих исследований нашли эффективное применение при решении задач идентификации. Также в этой лаборатории активно развивались методы частотной идентификации (А.Г. Александров).



Борис Теодорович Поляк, Александр Викторович Назин

В Институте создана теория *непараметрического оценивания* сигналов (А.В. Добровидов), приводящая к асимптотически оптимальным результатам при неполной информации о полезных ненаблюдаемых сигналах. В дальнейшем теория развивалась в направлении создания устойчивых ядерных оценок функционалов от распределений случайных последовательностей. Для этого были предложен класс кусочно-гладких аппроксимаций оценок подстановки, позволивший получить сходящиеся в среднеквадратическом смысле устойчивые процедуры оценивания.



Александр Викторович Добровидов

Для широкого класса объектов, характеризующихся неопределённостью описания, нелинейностью, нестационарностью, сложностью формализации и др., построение идентификационных моделей традиционными методами практически невозможно. Альтернативой могут служить методы, использующие *индуктивные знания* – закономерности, получаемые в результате анализа данных. В настоящее время для генерации явных знаний широко используются методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных.

Анализ данных мониторинга функционирования объекта может быть вербальным – как при экспертно-статистической обработке информации с дальнейшей её формализацией (например, с помощью нечётких моделей), так и интеллектуальным – извлечение индуктивных знаний на основе обра- ами математической статистики и распознавания образов.



Наталья Николаевна Бахтадзе

В лаборатории «Идентификации систем управления» им. Н.С. Райбмана г.н.с. Н.Н. Бахтадзе разработан метод идентификации, основанный на построении *виртуальных моделей*, реализующих принцип «здесь и сейчас»: модель существует только тогда, когда действует порождающая её реальность. Метод, получивший название *ассоциативного поиска*, предполагает не аппроксимацию реального процесса во времени, а построение прогнозирующей модели динамического объекта на каждом такте с использованием наборов архивных данных («ассоциаций»), сформированных на этапе обучения.

Такой подход созвучен идее, высказанной в 2008 г. крупнейшим на сегодня специалистом по идентификации Л. Льюнгом *(Prof. Lennart Ljung, Linköping University, Sweden*) о необходимости использования дополнительной априорной информации об объекте в форме обучения, когда обучение становится этапом идентификации.

Представлено описание ассоциативных идентификационных моделей в виде кратно-масштабного вейвлет-разложения. Метод вейвлет-анализа при исследовании сигналов позиционируется как альтернатива преобразованию Фурье, локализующему частоты, но не отражающему динамику частот. Для задач идентификации

нестационарных объектов построены ассоциативные вейвлет-модели. Получены критерии устойчивости динамических объектов на основе исследования спектра кратно-масштабного вейвлет-разложения, а также условия перехода к хаотической динамике. Разработаны методы нечёткого моделирования и нечёткой кластеризации, позволяющие осуществлять ассоциативный поиск для плохо формализуемых систем и процессов.

Предложены методы ассоциативного прогнозирования состояния динамических объектов на несколько моментов времени вперед в условиях ограниченной неопределённости, а также методов сценарного моделирования в реальном времени. Разработаны методы создания виртуальных анализаторов в системах управления с прогнозирующей моделью.

В лаборатории «Интеллектуальных систем управления и моделирования» предложен подход к идентификации линейных и нелинейных динамических систем на базе использования знаний об исследуемой системе, в рамках которого на основе расширения понятия дисперсионных функций получено решение уравнения идентификации для определения весовой функции системы. При этом используются методы типовой идентификации с экспертным выбором из базы знаний, которая содержит значения дисперсионных функций входного и выходного процессов и каталог известных моделей системы. Получен ряд результатов, опирающихся на использование априорной информации в форме профессиональных знаний о физических и конструктивных особенностях объектов; разработаны принципы построения экспертно-статистической системы конструирования алгоритмов моделирования систем управления.

До 2015 г. включительно в Институте регулярно проводились конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO). Теперь традиции этой конференции реализуются в формате ежегодно организуемых приглашенных секций *System Identification for Manufacturing Control Applications*' (SIMCA) на симпозиумах и конгрессах Международной федерации автоматического управления.

В настоящее время в Институте осуществляется развитие описанных выше и разработка новых методов, основанных на машинном обучении, интеллектуальном анализе данных, создании баз знаний и других современных методах обработки информации. Перспектива развития методов идентификации на сегодняшний день – в их интеллектуализации.



Михаил Владимирович Мееров

2.15. Многосвязные системы управления

Основателем теории многосвязных систем управления является Михаил Владимирович Мееров, доктор технических

наук, профессор, лауреат премии им. А.А. Андронова АН СССР за выдающиеся работы в области классической механики и теории управления.

Исходное классическое определение многосвязной системы характеризует её как систему с наличием множества каналов управления с прямыми и перекрёстными обратными связей между ними, то есть связями между входными (управляющими) и выходными (управляемыми) величинами. Такое определение справедливо для систем автоматического регулирования многосвязными объектами с сосредоточенными и распределёнными параметрами (*М.В. Мееров. Системы многосвязного регулирования. – М.: Наука. 1965*). К числу реальных многосвязным систем управления можно отнести и системы автоматического регулирования толщины листа при непрерывной холодной и горячей прокатке металла на распределённых по длине клетях прокатного стана, и сложные энергосистемы, представляющие собой совокупность генерирующих электрических станций (источников), связанных между собой произвольной сетью линий электропередачи с нагрузками (потребителями).

Характер функциональных связей между каналами управления в многосвязных системах отличается разреженной диагональной или ленточной структурой матричных передаточных функций межу входными и выходными переменными. Поэтому решение систем операторных уравнений после применения методов конечно-разностной (МКР) или конечно-элементной (МКЭ) аппроксимаций исходных уравнений математической модели сопряжено проблемой плохой обусловленности матричных передаточных функций и приводит к неустойчивости процедуры вычислений (*М.В. Мееров. Исследование и оптимизация многосвязных систем управления. – М.: Наука. 1986*). Для решения этой проблемы были созданы специальные методы совместного решения прямых и сопряжённых задач, в том числе так называемые *S*–алгоритмы (*М.В. Мееров, Б.Л. Литвак. Оптимизация систем многосвязного управления. М.: Наука. 1972*) и ДЛП–методы (динамического линейного программирования) (*М.В. Мееров, Я.М. Берщанский. Решение динамических задач оптимизации для линейных многосвязных систем. Препринт. – М. Институт проблем управления. 1975*). Теоретически эти алгоритмы опирались на симплекс-метод линейного программирования, а практически использовались для решения задач выбора установившихся и неустановившихся оптимальных режимов работы нефтедобывающих скважин (*М.В. Мееров, Я.М. Берщанский, В.Н. Кулибанов и др. Управление разработкой нефтяных месторождений. – М.: Недра. 1983*; *М.В. Мееров, А.В. Ахметзянов, Я.М. Берщанский и др. Управление многосвязными системами. – М.: Наука. 1990*).

Другая особенность многосвязных систем связана с проблемой большой размерности (по Р. Беллману – «проклятие размерности») возникающую при сеточной аппроксимации исходных уравнений модели, представляющих собой систему нелинейных уравнений в частных производных с характерными связями между функциональными параметрами уравнений. При сеточной аппроксимации МКР или МКЭ диагональные или ленточные матричные функциональные связи между

векторными управляемыми и управляющими переменными обладают сверхбольшой размерностью (10^9 и более) и решение таких операторных уравнений требует уже применения высокопроизводительных суперкомпьютеров с одновременной разработкой специальных иерархических методов декомпозиции и расщеплением по пространственным и временным координатам, с многоуровневым распараллеливанием вычислений с использованием программных интерфейсов для оптимального вложения вычислительных алгоритмов в архитектуру вычислительных систем. При отсутствии больших градиентов изменения управляющих и управляемых переменных такой подход позволяет решить целый ряд крупномасштабных задач управления разработкой нефтяных и газовых месторождений на поздней стадии разработки.

В ряде моделей многосвязных систем, связанных с нефтедобычей и нефтепереработкой, появляются градиентные термодинамические и гидрогазодинамические процессы, которые имеют волновой характер с фронтальными распределением изменения управляющих воздействий и управляемых переменных. Это связано с фазовыми переходами (пар-вода, нефть-газ и др.). Для таких моделей упомянутые выше вычислительные методы практически не применимы, поскольку для контроля положения и движения фронтов требуется существенное измельчение пространственно-временных шагов сеточной аппроксимации (или применение адаптивных сеток). Это приводит к сверхбольшой размерности системы операторных уравнений сеточной аппроксимации и становятся проблемой даже для самых высокопроизводительных суперкомпьютеров. К настоящему времени представление о многосвязных системам управления существенно расширено так, чтобы охватить объекты сверхбольшой размерности и эволюционные процессы, состояние которых описывается текущими распределениями физических, химических, термодинамических параметров. К числу таких систем относятся системы управления:

- процессами теплопередачи и тепломассопереноса в сплошных средах;
- процессами многофазной неизотермической фильтрации флюидов (нефти, газа, воды или других вытесняющих реагентов) с фазовыми переходами при тепловых, физико-химических, волновых, циклических и др. управляющих воздействиях с целью извлечения нефти, газа или других углеводородов из пористых сплошных сред природных залежей (месторождений);
- процессами транспортировки нефти, нефтепродуктов, газа, газоконденсатов и др. от источников к потребителям по трубопроводным сетям произвольной конфигурации с использованием промежуточных насосных или компрессорных станций, подземных хранилищ и др.;
- уровнем грунтовых вод для защиты мегаполисов и крупных населённых пунктов, особо важных и других промышленных объектов от подтопления с целью предотвращения техногенных катастроф.

Для решения перечисленных проблем в Институте был создан научный коллектив из сотрудников лабораторий многосвязных и распределённых систем управления, поставивший перед собой проблему разработки новых алгоритмов решения указанных выше задач с использованием методов конечномерных динамик,

геометрических и асимптотических методов теории нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных для исследования их особых (сингулярных) решений (*А.В. Ахметзянов, А.Г Кушнер, В.В. Лычагин. Математическое модели управления разработкой нефтяных месторождений. Научное издание. – М. ИПУ РАН. 2017*).

Достигнутые и ожидаемые результаты научного коллектива не требуют применения адаптивного измельчения сеток и направлены на разработку интегрированных и аналитических и вычислительных методов для решения оптимального управления разработкой трудноизвлекаемых запасов нефти и газа с применением с использованием тепловых, физико-химических, волновых и др. управляющих воздействий для вытеснения нефти из однородных пористых сред, анизотропных трещиновато-пористых сред.

Применение волновых технологий с использованием обобщённых моделей деформируемых насыщенных пористых сред (Френкеля-Био-Николаевского) в сочетании с тепловыми и физико-химическими методами воздействия очень перспективны для дополнительного извлечения остаточной (защемлённой) нефти из истощённых месторождений с увеличением конечной нефтеотдачи до 10–15 %. Это эквивалентно открытию и освоению новых крупномасштабных месторождений без дополнительных затрат на обустройство, поскольку обычно основная инфраструктура уже существует.

2.16. Нелинейные системы

ИАТ (ИПУ) стал той колыбелью, в которой зародилась современная теория автоматического управления (ТАУ). У этой «колыбели» стояли великие люди, с именами которых связаны многие разделы теории управления. Часть разделов можно условно объединить под общим названием «теория нелинейных систем управления» или «теория нелинейных процессов управления». Развитие методов ТАУ началось с линейной теории, которая к настоящему времени разработана хорошо. Учёным и инженерам доступны мощные методы анализа, синтеза и оптимизации линейных систем. В то же время оказывается, что большинство реальных систем нелинейно. Точнее, нелинейны математические модели, которые адекватно описывают поведение реальных систем. Выпускники естественно-научных специальностей вузов знают, что разложение в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки помогает провести анализ свойств нелинейной модели при условии, что отклонение от точки линеаризации мало. Отказ от предположения малости отклонений открывает возможность анализа таких нелокальных динамических свойств, как множественность изолированных положений равновесия, бифуркации положений равновесия и бифуркации рождения циклов, возникновение автоколебаний, хаотическая динамика детерминированной системы, наличие гармоник и субгармоник. Мир нелинейных явлений и моделей оказывается сложнее мира линейных моделей и исследование нелинейных задач сложнее и увлекательнее.

Среди многих направлений исследования нелинейных систем управления, развиваемых в Институте, выделим два направления, связанные с именами Марка Ароновича Айзермана и Евгения Серафимовича Пятницкого. Это теория абсолютной устойчивости и теория управляемых систем механической природы.



Марк Аронович Айзерман

В период с 1947 по 1949 гг. М.А. Айзерман опубликовал несколько работ по анализу устойчивости систем управления, содержащих линейную и нелинейную части. Среди этих работ есть две работы «Об учёте нелинейных функций от нескольких аргументов при исследовании устойчивости систем автоматического регулирования» и «Об одной проблеме, касающейся устойчивости «в большом» динамических систем», которые послужили началом целому научному направлению, получившему название «Теория абсолютной устойчивости». Первой в СССР и в мире книгой, содержащей систематическое изложение задач и методов этой теории, была книга *М.А. Айзермана и Ф.Р. Гантмахера «Абсолютная устойчивость регулируемых систем»*, изданная АН СССР в 1963 г. В рамках теории абсолютной устойчивости при анализе устойчивости системы выделяется линейная и нелинейная части. Линейная часть считается детерминированной динамической системой с одним или несколькими входами и одним или несколькими выходами. Она задаётся либо дифференциальным уравнением, либо своей скалярной или матричной передаточной функцией. Нелинейная часть задается нелинейной функцией, скалярной или векторной, от переменных состояния линейной части или от линейной комбинации этих переменных. Замкнутая система представляется последовательным соединением линейной и нелинейной частей. В простейшем скалярном случае выход линейной части является входом нелинейной части, выход которой в свою очередь подаётся на вход линейной части замкнутой системы. Точное знание нелинейной функции не требуется. Требуется лишь знание о том, что график этой функции принадлежит некоторому сектору, заданному двумя прямыми на плоскости, где по оси абсцисс откладывается аргумент нелинейной функции (выход линейной части), а по оси ординат – значение функции (вход линейной части). Поскольку секторные условия, наложенные на график нелинейности, определяют целый класс нелинейных функций, то абсолютная устойчивость означает по существу асимптотическую устойчивость в целом классе систем, имеющих одну и ту же линейную часть и произвольную нелинейную часть с графиком нелинейности, принадлежащем сектору.

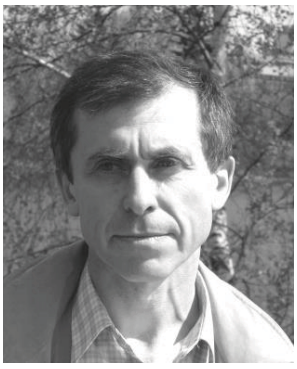
Первые работы по теории абсолютной устойчивости были посвящены алгебраической задаче о существовании функций Ляпунова из заданных параметрических классов. Получение необходимых и достаточных условий существования функций Ляпунова достаточно общего вида с отрицательно определённой производной представляет собой безнадёжно трудную задачу. Поэтому ограничивались функциями из класса квадратичных форм или квадратичных форм с добавлением интегралов от стационарных нелинейностей. Последние функции называются функциями Лурье – Постникова. В начале 60-х годов появились работы румынского учёного В.М. Пóпова, в которых

развивался другой подход к решению задачи абсолютной устойчивости, основанный на проверке частотных условий. Связь выполнения частотных критериев с существованием функций Ляпунова из класса квадратичных форм или функций Лурье – Постникова исследована в работах В.А. Якубовича и Р. Калмана. Эту связь устанавливает знаменитая «частотная теорема», доказанная В.А. Якубовичем.



Евгений Серафимович Пятницкий

В 1982 г. по инициативе Марка Ароновича Айзермана на базе группы сотрудников его лаборатории была создана новая лаборатория «Динамики нелинейных систем управления». Её заведующим стал доктор технических наук, профессор Евгений Серафимович Пятницкий, внёсший большой вклад в развитие теории абсолютной устойчивости. Ему принадлежит ряд значительных продвижений в теории абсолютной устойчивости. В 1971 г. Е.С. Пятницким предложен вариационный метод исследования абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем. Согласно этому методу абсолютная устойчивость такой системы эквивалентна асимптотической устойчивости по части переменных некоторой специально построенной детерминированной системы с переключениями. Подход оказался чрезвычайно плодотворным. На его основе Е.С. Пятницкий совместно со своим учеником выпускником МФТИ А.П. Молчановым опубликовал цикл работ по необходимым и достаточным условиям абсолютной устойчивости систем с несколькими нелинейными нестационарными нелинейностями. Совместно с Л.Б. Рапопортом исследована граница области абсолютной устойчивости и установлено существование периодических решений специального вида. Для случая двумерных и трёхмерных систем это дало возможность сформулировать необходимые и достаточные условия абсолютной устойчивости в форме алгебраического критерия. Эти и некоторые другие результаты легли в основу докторской диссертации, защищённой Л.Б. Рапопортом в 1995 г. под руководством Е.С. Пятницкого. Л.Б. Рапопортом было также получено решение давно поставленной алгебраической задачи, связанной с необходимыми и достаточными условиями существования функций Лурье – Постникова с отрицательно определённой производной для систем с несколькими нелинейностями. Ранее были известны только достаточные условия, получаемые с помощью так называемой *S*-процедуры, ущербной для случая нескольких связей.



Лев Борисович Рапопорт

Алгебраическими вопросами и численными методами, связанными с существованием функций Ляпунова из различных параметрических классов, занимались сотрудники и ученики Е.С. Пятницкого В.И. Скородинский, В.А. Каменецкий, Л.Б. Рапопорт. Начиная с середины 80-х годов, сотрудниками лабора-

тории развивается подход, сводящий задачу о существовании решения линейных матричных неравенств к задаче выпуклой оптимизации.

Другим важным классом нелинейных задач, исследованием которых занимались сотрудники лаборатории «Динамики нелинейных систем управления»[†], являлась теория управляемых систем механической природы или, другими словами, управление «чёрным ящиком» механической природы. Эти исследования были проведены Е.С. Пятницким совместно с его учениками Н.В. Дунской, В.И. Матюхиным, В.В. Барановым. Центральным результатом явилась разработка и обоснование метода декомпозиции для построения систем управления объектами механической природы. Декомпозиция означает динамическую развязку степеней свободы механической природы с помощью разрывных управлений достаточно большой интенсивности. Большая интенсивность и разрывный характер управления позволяют преодолеть внутренние динамические свойства механической нелинейной системы и заставить её двигаться в соответствии с простыми дифференциальными уравнениями, в терминах которых формулируется цель управления по каждой степени свободы независимо. В начале 1990-х годов Е.С. Пятницким и В.И. Матюхиным совместно с ЦАГИ выполнен цикл работ по управлению летательными аппаратами на основе метода декомпозиции.

Две рассмотренные выше задачи не исчерпывают, разумеется, многообразие подходов к анализу нелинейных динамических систем. В силу исторических и личных причин этими задачами занимались конкретные люди – ученики М.А. Айзермана и Е.С. Пятницкого. С этими задачами и именами связан не только сложный и увлекательный раздел науки, но и период истории Института.

Другими, геометрическими и групповыми методами анализа нелинейных динамических систем занимались известные учёные – математики М.А. Красносельский и его ученики Н.А. Бобылев, В.И. Опойцев, А.В. Покровский (см. в этой книге раздел 2.7 «Нелинейный анализ в теории управления»).



Валентин Николаевич Тхай

С начала 2000-х годов в лаборатории работает д.ф.-м.н. профессор В.Н. Тхай, который совместно с к.ф.-м.н. И.Н. Барабановым занимается теорией колебаний нелинейных динамических систем. Развитием теории устойчивости по Ляпунову и по Жуковскому занимается д.ф.-м.н., проф. О.В. Дружинина.



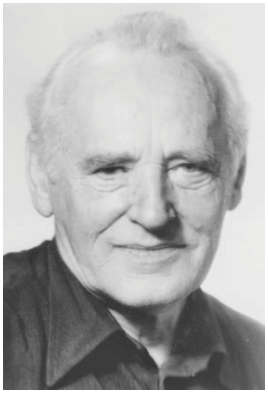
Иван Николаевич Барабанов

Говоря об истории Института и задачах анализа нелинейных систем нельзя не упомянуть о вкладе д.ф.-м.н., проф. Бориса Сергеевича Разумихина. Работая в Институте до 1976 г. в лаборатории члена-корреспондента АН СССР А.М. Лётова, он занимался анализом устойчивости нелинейных систем с

[†] Сегодня она называется лаборатория «Нелинейных систем управления» им. Е.С. Пятницкого.

запаздыванием. Им были сформулированы теоремы об устойчивости таких систем в терминах функций Ляпунова. В отечественной и зарубежной науке эти результаты называются теоремами Разумихина. Ценность этих теорем для теории устойчивости нелинейных систем с запаздыванием состоит в том, что вопрос об устойчивости решается с помощью именно функций, а не функционалов.

Коллективом лаборатория «Нелинейных систем управления» им. Е.С. Пятницкого внесён значительный вклад в теорию спутниковой навигации, частично отражённый в книге *A. Leick, L. Rapoport, and D. Tatarnikov, GPS Satellite Surveying, 4th edition*, изданной в 2015 г. издательством *Wiley*.



Борис Сергеевич Разумихин

Большое внимание сотрудниками лаборатории уделено задаче управления колесными роботами: синтезирован и апробирован на практике ряд оригинальных законов управления, с помощью методов абсолютной устойчивости построены эллипсоидальные оценки областей притяжения для задачи путевой стабилизации, а также разработаны эффективные методы планирования пути для колесных роботов.

В последние годы А.В. Пестеревым и Ю.В. Морозовым ведутся работы по исследованию устойчивости систем с переключениями, возникающих при замыкании обратными связями специального вида в форме вложенных сатураторов. Выбирая соответствующим образом коэффициенты таких обратных связей, можно обеспечить выполнение заданных характеристик переходного процесса (таких, как ограничение на максимальную скорость приближения к состоянию равновесия и/или заданная асимптотическая скорость убывания отклонения, а также обеспечить выполнение некоторых фазовых ограничений). Установлено, что потеря глобальной устойчивости в таких системах может быть связана с возникновением так называемых скрытых аттракторов.



Александр Витальевич Пестерев

2.17. Системы с распределёнными параметрами

Линейные системы

Пионерские работы по управлению линейными системами с распределёнными параметрами были выполнены в лаборатории «Теории и принципов управления системами с распределёнными параметрами». Бессменным руководителем этой лаборатории с момента её образования в 1975 и до 2011 гг. был д.т.н., проф. Анатолий Григорьевич Бутковский.

Здесь были разработаны принципы оптимального и финитного управления линейными системами с распределёнными параметрами, в частности, принцип максимума для систем управления, описываемых интегральными уравнениями, и методы построения оптимальных управлений. Была сформулирована проблема подвижного управления и исследованы вопросы управления системами, которые описываются уравнениями с дробными производными.

Полученные теоретические результаты использованы для решения ряда практических задач управления в теплотехнике, металлургии, химической технологии, других отраслях и внедрены в промышленность. В частности, в лаборатории проводились работы по проектированию комплекса «нагревательные печи – стан», разработке алгоритмов оптимального управления полем радиальных термонапряжений и термоперемещений поверхности валков прокатных станов, разработке имитационных моделей технологических комплексов «СТАЛЬ-ПРОКАТ».

Нелинейные системы

В 2012 г. лаборатории «Теории и принципов управления системами с распределёнными параметрами» была присоединена к лаборатории «Проблем качественного исследования нелинейных динамических систем», руководителем которой с 2010 г. является главный научный сотрудник ИПУ РАН, профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Алексей Гурьевич Кушнер.



Алексей Гурьевич Кушнер

На протяжении последних лет в этом коллективе ведутся работы по разработке геометрических методов нелинейных дифференциальных уравнений и геометрических методов управления нелинейными системами с распределёнными параметрами. Такие системы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Начало геометрической теории дифференциальных уравнений восходит к работам С. Ли, Г. Дарбу, А. Трессе, Э. Картана. Так, например, Софус Ли для исследования обыкновенных дифференциальных уравнений и построения их точ-

ных решений впервые предложил использовать непрерывные группы, которые впоследствии были названы Г. Вейлем его именем и которые лежат в основе современной физики и дифференциальной геометрии – группы Ли. Он ввел понятие инфинитезимальных симметрий для обыкновенных дифференциальных уравнений, то есть таких преобразований зависимых и независимых переменных, которые получены в результате сдвига вдоль траекторий векторных полей. Спустя почти век после работ Ли Л.В. Овсянников распространил этот метод на уравнения в частных производных. Это обобщение оказалось очень плодотворным.



Иосиф Семёнович Красильщик (слева) и Валентин Васильевич Лычагин

В 70-х годах прошлого века на мехмате МГУ начал работать научный семинар А.М. Виноградова. Его постоянными участниками стали тогда еще студенты И.С. Красильщик, В.В. Лычагин и А.В. Самохин. На этом семинаре разрабатывался новый универсальный подход к нелинейным дифференциальным уравнениям в частных производных. Этот подход основан на представлении дифференциальных уравнений многообразиями в некоторых специальных пространствах – пространствах джетов. Само понятие джета было введено в 50-х годах XX века французским математиком Ш. Эресманном, который использовал его для нужд дифференциальной геометрии. По сути, джеты являются бескоординатными аналогами отрезков рядов Тейлора. Именно их бескоординатное описание позволяет взглянуть на дифференциальные уравнения с инвариантной точки зрения, не зависящей от случайно выбранных координат (*А.М. Виноградов. И.С. Красильщик, В.В. Лычагин. Введение в геометрию нелинейных дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1986*).

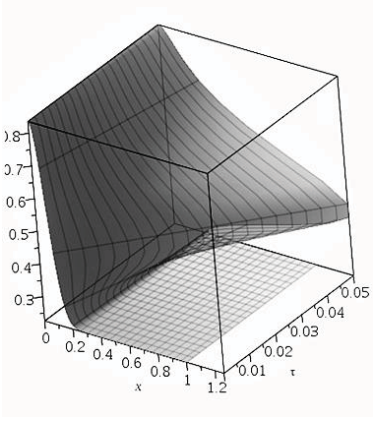
На пространстве 1-джетов существует дифференциально-геометрическая структура – неинтегрируемое распределение (то есть не удовлетворяющее условиям теоремы Фробениуса), названное именем Картана. Это распределение позволило ввести понятие многозначного решения, которое, в свою очередь, было использовано для строгого определения разрывных решений нелинейных дифференциальных уравнений и описывать тем самым решения с особенностями (например, ударные волны). Распределение Картана, будучи «максимально неинтегрируемым», определяет на пространстве джетов контактную структуру. Автоморфизмы контактной структуры называются контактными преобразованиями. Таким образом, было расширено понятие симметрии дифференциального уравнения и вместо точечных преобразований (преобразований зависимых и независимых переменных) стало возможным рассматривать контактные преобразования, перемешивающие независимые, зависимые переменные и производные. Аналогом контактных преобразований в пространствах джетов более высокого порядка являются преобразования Ли. Применение методов контактной геометрии к уравнениям второго порядка описано в монографии А. Кушнера, В. Лычагина и В. Рубцова (*A. Kushner,*

V. Lychagin, V. Rubtsov. Contact Geometry and Nonlinear Differential Equations; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; xxii+496 p.).

Управление сингулярными решениями и ударными волнами

Дифференциальные уравнения, возникающие в теории сплошных сред, как правило, являются нелинейными. Традиционный подход к нелинейным уравнениям состоит в их линеаризации путём отбрасывания нелинейных членов. Однако при этом возможна потеря важных свойств их решений и, как результат, неадекватность линейных моделей реальным процессам. Под сингулярными решениями дифференциальных уравнений понимают либо разрывные решения типа ударных волн, либо непрерывные решения, у которых имеют разрыв производные (так называемые контактные ударные волны). Наличие сингулярности создает известные трудности и при построении разностных схем: требуется измельчение шага сетки при приближении к поверхности разрыва, положение которой к тому же неизвестно, что не обеспечивает требуемую точность вычислений. В результате получаются грубые алгоритмы. Метод введения искусственной вязкости также не решает проблему точности вследствие размытия разрывов. Однако использование многозначных решений вместо классических может существенно упростить ситуацию.

В отличие от классического решения, проекция многозначного решения на пространство независимых переменных может иметь геометрические особенности – каустики. При удалении из графика многозначного решения точек каустики он распадётся на куски, каждый их которых является графиком классического решения. Реальные разрывы решений не обязательно совпадают с геометрическими особенностями – за появление разрывов отвечают условия Гюгонио–Ренкина, которые записываются исходя из законов сохранения. Эти условия в простейшем случае представляют собой уравнения Гамильтона-Якоби, решения которых и определяют точки разрыва. В случае линейных уравнений всякому многозначному решению можно сопоставить обобщённое (в смысле С.Л. Соболева) решение. Таким образом, многозначные решения представляют собой естественное распространение теории обобщённых решений на нелинейные уравнения.

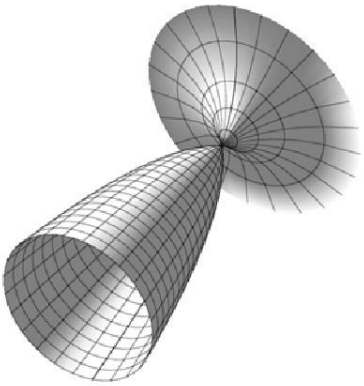


Многозначное решение уравнения Бакли–Леверетта

Описанная идея была применена к задачам нелинейной двухфазной фильтрации, описываемой уравнениями Бакли–Леверетта. Эта модель применяется при управлении разработкой нефтяных месторождений путём вытеснения нефти водой.

Другой пример – задача управления ограниченным звуковым пучком, распространяющимся в нелинейной среде. В случае отсутствия диссипации процесс распространения звукового пучка описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка – уравнением Хохлова–Заболоцкой, а при наличии диссипации – уравнением Кузнецова, которое имеет 3-ий порядок. В.В. Лычагиным была найдена алгебра контактных симметрий и вычислены законы сохранения уравнения Хохлова–Заболоцкой. Оказалось, что это уравнение облада-

ет бесконечномерной алгеброй Ли симметрий, но большая часть из них не имеет физического смысла. Отсев таких «нефизичных» симметрий позволил выделить конечномерную подалгебру и на её основе построить классы точных решений этого уравнения. Анализ этих решений позволил объяснить ранее наблюдавшееся в экспериментах явление самофокусировки звукового пучка, распространяющегося в нелинейных средах.



Самофокусировка звукового пучка

Более того, оказалось, что если амплитуду звукового пучка менять по гармоническому закону вблизи генератора звука, то на некотором расстоянии от него произойдет фокусировка пучка. Это явление уже существенно отличается от явления самофокусировки и указывает метод управления звуковым пучком. Решения уравнения Хохлова–Заболоцкой, моделирующие фокусировку, имеют контактный разрыв и их получение основано на понятии многозначных решений дифференциальных уравнений. Отметим, что наличие диссипации не разрушает явление фокусировки пучка.

Аттракторы и конечномерные динамики эволюционных уравнений

Другой подход к построению сингулярных решений эволюционных уравнений и управлению ими основан на конечномерных динамиках (*V.V. Lychagin, O.V. Lychagina. Finite Dimensional Dynamics for Evolutionary Equations. Nonlinear Dyn. 2007, 48, 29–48] и [Dynamics of evolutionary PDE systems // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2020. — Vol. 41, no. 12. — P. 2448–2457*). В основе теории конечномерных динамик эволюционных дифференциальных уравнений лежит теория симметрий обыкновенных дифференциальных уравнений, восходящая к работам Софуса Ли, о которых вы уже знаете.

При исследовании поведения решений нелинейных эволюционных уравнений в частных производных проблемы устойчивости занимают центральное место. Основная сложность при этом состоит в том, что в настоящее время отсутствует сколько-нибудь общая теорема существования решений таких уравнений (скажем, в пространстве гладких функций). Теория конечномерных динамик эволюционных дифференциальных уравнений является естественным развитием теории динамических систем. Методы этой теории позволяют выделять конечномерные подмногообразия в бесконечномерном пространстве гладких функций, инвариантные относительно потока, задаваемым эволюционным уравнением. Эти подмногообразия состоят из решений обыкновенных дифференциальных уравнений и могут быть использованы для построения точных решений эволюционных уравнений даже в случае, когда уравнение не обладает достаточным запасом симметрий, а также для исследования устойчивости решений и для построения новых численных методов. Это позволяет избежать вопроса о существовании решений, ибо такие подмногообразия состоят из решений обыкновенных дифференциальных уравнений, а кроме того даёт конструктивный метод для их нахождения. Функции на соответствующих

пространствах джетов, задающие эти подмногообразия, используются для оценки близости между решениями и, в частности, для определения аттрактора.

Конечномерные динамики применяются для создания новых численных методов решения эволюционных дифференциальных уравнений, в том числе уравнений, описывающих двухфазную фильтрацию, применяемую при разработке нефтяных месторождений (*А.В. Ахметзянов, А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин. Аттракторы в моделях фильтрации // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 472, № 6. — С. 627–630*).

Управление термодинамическим состоянием газов

Проблема оптимального управления термодинамическими процессами представляет интерес еще с XIX века, когда была опубликована работа Карно, положившая начало изучению оптимальных тепловых машин. Геометрический подход восходит к работам Гиббса. Объединение первого и второго законов термодинамики привело его к так называемому «фундаментальному уравнению термодинамики».

С точки зрения современной геометрии, это уравнение представляет собой дифференциальную 1-форму на нечётномерном пространстве, координатами в котором являются экстенсивные и интенсивные переменные. Эта дифференциальная 1-форма, которая сейчас называется формой Гиббса, не удовлетворяет условию теоремы Фробениуса и поэтому определяет максимально неинтегрируемое, то есть контактное, распределение, которое называется распределением Гиббса. Таким образом, контактная геометрия является естественным языком для описания термодинамических процессов и систем. Это, в частности, объясняет популярность применения в термодинамике преобразования Лежандра, которое является контактным преобразованием, то есть преобразованием, которое сохраняет распределение Гиббса. Переход от одних термодинамических переменных к другим осуществляется именно при помощи контактных преобразований.

В работе *В.В. Лычагина "Contact Geometry, Measurement, and Thermodynamics"* (*Nonlinear PDEs, Their Geometry and Applications; Kycia, R., Schneider, E., Ulan, M., Eds.; Birkhäuser: Cham, Switzerland, 2019; pp. 3–52*) термодинамика рассматривается с точки зрения измерения случайных векторов, а именно экстенсивных переменных. В.В. Лычагиным применён подход к термодинамике, объединяющий контактную геометрию, теорию измерений и теорию оптимального управления. Термодинамические состояния в ней описываются как лежандаровы и лагранжевы многообразия, на которых определена риманова структура, а именно, определена квадратичная форма, которая представляет собой дисперсию измерения экстенсивных величин. Такое геометрическое представление позволило использовать принцип максимума Понтрягина, чтобы найти оптимальный термодинамический процесс, максимизирующий функционал работы. Использование же римановых структур на термодинамических состояниях газов позволило сформулировать и решить задачу оптимального управления (*A. Kushner, V. Lychagin, M. Roop. Contact Geometry in Optimal Control of Thermodynamic Processes for Gases // Doklady Mathematics. - 2020. - Vol. 102, No. 1. P. 346-349*).

Например, в результате применения принципа максимума в случае идеального газа получается вполне интегрируемая гамильтонова система, решение которой можно конструктивно построить в терминах переменных действие-угол с использованием теоремы Лиувилля–Арнольда. Применённый подход к термодинамике

позволяет использовать геометрические методы к описанию и исследованию многих физических процессов.

Управление фазовыми переходами

Система уравнений механики сплошных сред, как известно, состоит из дифференциальных законов сохранения энергии, массы (уравнение неразрывности) и импульса. При этом закон сохранения импульса в различных ситуациях принимает разнообразные формы.

Например, в наиболее общем случае вязких сжимаемых сред это уравнение Навье-Стокса, для невязких сред закон сохранения импульса принимает вид уравнения Эйлера, а для сред, совершающих движение в пористой среде, это закон Дарси. Однако полученные системы уравнений оказываются неполными. Для их замыкания требуются дополнительные функциональные соотношения на термодинамические переменные, входящие в уравнения, такие как давление, температура, плотность, энергия и энтропия, называемые уравнениями состояния. Таким образом, термодинамика среды существенно влияет на её движение.

Геометрическая формулировка термодинамических состояний как лежандровых многообразий в некотором специальном термодинамическом контактном пространстве позволяет применить теорию лежандровых и лагранжевых особенностей В.И. Арнольда для анализа таких явлений, как фазовые переходы – скачки среды из одного агрегатного состояния в другое (например, жидкость-газ).

А именно, область фазовых переходов определяется особенностями проекции термодинамических лежандровых многообразий на подпространство интенсивных переменных (например, давление и температуру). Подавляющее большинство таких лежандровых многообразий, отвечающих термодинамическим состояниям реальных газов, обладают особенностью типа сборки.

С другой стороны, сами уравнения нелинейны, а значит, их решения сами по себе могут иметь особенности. Эти два типа особенностей, а именно особенности решений нелинейных уравнений механики сплошных сред и особенности термодинамической природы, можно объединить вместе как «критические явления». Этот подход применим для описания фазовых переходов и даёт возможность, меняя термодинамические величины, управлять процессом фазового перехода. Этому направлению была посвящена серия работ (см., например, *V. Lychagin, M. Roop. Singularities in Euler Flows: Multivalued Solutions, Shockwaves, and Phase Transitions // SYMMETRY. 2021. Vol. 13, Iss. 1. P. 13010054*).

Среды с внутренней структурой

В классической теории сплошных сред за основу принимается макроскопическая модель. Её основное предположение состоит в том, что среда рассматривается как континуум, и описание этого континуума даётся в терминах макроскопических скоростей, давления, температуры, плотности и энтропии. На ограничения этого подхода указал Г. Биркгоф. Он отметил, что для более адекватного описания некоторых процессов необходимо учитывать молекулярную структуру среды. Задолго до него братья Коссера анализировали носители, состоящие из «жестких микроэлементов».

Используется единый подход к изучению сред, состоящих из линейных, плоских и пространственных молекул (*A. Kushner, V. Lychagin. Generalized Navier-Stokes Equations and Dynamics of Plane Molecular Media // Symmetry, 2021, Vol. 13, 288] и [A. Duyunova, V. Lychagin, S. Tychkov. Continuum mechanics of media with inner structures // Differential Geometry and its Applications, 2021, Vol. 74, 101703*). На основе законов сохранения массы, импульса и энергии получены аналоги уравнений Навье–Стокса.

Интегрируемость дифференциальных уравнений магнитной гидродинамики и управление плазмой

Сложные физические процессы, протекающие в токамаках, описываются не менее сложными дифференциальными уравнениями в частных производных, анализ которых в общем случае не представляется возможным. Для описания наиболее важных процессов нелинейной динамики плазмы в токамаках в 1980-х годах было предложены так называемые редуцированные уравнения магнитной гидродинамики, также известные как уравнения Кадомцева-Погуце. Изучению этих уравнений было посвящено большое количество работ. Была установлена их гамильтоновость, исследованы симметрии, законы сохранения и наиболее важные точные решения этих уравнений.

В недавней работе О.И. Морозова (*O.I. Morozov. Lax representations via twisted extensions of infinite-dimensional Lie algebras: some new results. "The Diverse World of PDEs: Geometry and Mathematical Physics". Edited by I.S. Krasil'shchik, A.B. Sossinsky, A.M. Verbovetsky. Contemporary Mathematics, Volume 788, American Mathematical Society, Providence RI, 2023, pp. 215–230*) была установлена интегрируемость уравнений Кадомцева–Погуце, а именно, было установлено, что эти уравнения допускают представления Лакса с неустранимым спектральным параметром. Представления Лакса являются базовой конструкцией для применения различных методов изучения дифференциальных уравнений, поэтому они рассматриваются как основная особенность, указывающая на интегрируемость уравнений. Особенно важными являются представления Лакса, содержащие неустранимый спектральный параметр. Предложен подход к важной нерешённой проблеме нахождения внутренних условий, обеспечивающих существование представлений Лакса, основанный на возможности построения расширений алгебры контактных симметрий изучаемого дифференциального уравнения. С использованием этого подхода были найдены новые интегрируемые дифференциальные уравнения, представления Лакса которых порождены расширениями алгебр Ли типа Каца-Муди и алгебры гамильтоновых векторных полей на плоскости. Этот метод был обобщён в работе О.И. Морозова (*O.I. Morozov. Integrable partial differential equations and Lie–Rinehart algebras. Journal of Geometry and Physics, Volume 181 (2022), 104661*), которая посвящена расширению пределов применимости указанного выше метода. Анализ наиболее сложных примеров уравнений, допускающих представление Лакса, показывает, что в технику построения этих представлений должны быть включены дифференциальные инварианты алгебры симметрий изучаемого дифференциального уравнения. Это оказалось возможным с помощью рассмотрения алгебр Ли-Райнхарта, соответствующих алгебрам симметрий дифференциальных уравнений.

Дальнейшее обобщение этой техники было применено для нахождения нового представления Лакса уравнения Эйлера, описывающего двумерную динамику невязкой несжимаемой жидкости. Это уравнение является одной из наиболее важных и интенсивно изучаемых моделей гидродинамики. Аналогичные представления Лакса были найдены для уравнений Кадомцева-Погуце. Отметим, что эти результаты дают новый пример весьма редких представлений Лакса с неустранимым параметром для четырёхмерных дифференциальных уравнений.

Аналогичные результаты были получены О.И. Морозовым (*O.I. Morozov. A Lax representation of the Charney-Obukhov equation for the ocean. Lobachevskii Journal of Mathematics. Volume 44, No 9 (2023), 3072–3074*) для четырёхмерного уравнения Чарни–Обухова, которое используется в динамической метеорологии и геофизике для описания крупномасштабных циркуляций атмосферы и океана.

Управление фильтрацией в пористых средах

При разработке нефтяных месторождений поддержание энергии нефтяного пласта обеспечивается закачкой под давлением вытесняющей жидкости (воды, горячей воды или водных растворов активных реагентов) в нагнетательные скважины, что обеспечивает уменьшение вязкости нефти и способствует повышению нефтеотдачи. При этом перепад давления между забоями нагнетательных и добывающих скважин приводит к возникновению фильтрационных потоков. Если геометрия нефтяного месторождения сложная и число скважин велико (иногда это несколько тысяч скважин) расчёт фильтрационных потоков требует значительного времени и больших вычислительных ресурсов. Как правило, для этого используются многопроцессорные вычислительные комплексы.

Решение задачи осложняется ещё и тем, что решения дифференциальных уравнений, описывающих процесс фильтрации, имеют особенности (сингулярности типа полюса) в точках, где расположены скважины. Чтобы обойти эту трудность, обычно эти точки окружают малыми окрестностями и строят сетки уже в области регулярности решений. Эту трудность удалось преодолеть построением сингулярных асимптотик решений в терминах обобщённых функций (*А.В. Ахметзянов, А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин. Оптимальное управление разработкой нефтяных месторождений в модели Бакли–Леверетта // Автоматика и телемеханика. — 2018. — № 4. — С. 75–91*). Более того, управление режимами фильтрации в нашей версии осуществляется изменением интенсивностей закачки и отбора именно в особых точках. Был предложен метод расчёта фильтрационных нефтяных потоков, основанный на модели Бакли-Леверетта для изотермической и неизотермической фильтраций (*А.В. Ахметзянов, А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин. Термодинамика фильтрационных потоков и оптимальное управление ими при разработке нефтяных месторождений // Доклады Академии наук. 2018. Т. 479, № 3] и [Kostiuchek M. Gas Filtration at Constant Thermodynamic Potential // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022. Vol. 43, No. 10. P. 2746-2756*).

Одно из научных направлений посвящено фильтрации суспензии. Проблема фильтрации взвеси, состоящей из жидкой фазы (например, воды или нефти) и мельчайших твердых частиц в поровом пространстве, активно изучается в последнее время. Эта проблема актуальна для нефтяной, химической и геологической отраслей промышленности. При движении частиц вместе с жидкостью часть частиц

захватывается пористой средой. В результате частицы оседают на стенках порового пространства и образуют внутреннюю фильтрующую корку. Этот процесс ухудшает фильтрационные свойства среды, такие как пористость и проницаемость. Для обеспечения высокого качества фильтрации необходимо учитывать эффект захвата частиц. Поскольку пространственные размеры среды много больше размера пор, можно использовать усреднённые характеристики пористой среды как сплошного материала с достаточно большим количеством. В серии работ построено общее решение нелинейной фильтрации нефти со взвешенными мелкими частицами в пористой среде и решена соответствующая начально-краевая задача (*A. Kushner, S. Mukhina. Integration of the Deep Bed Filtration Equations // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2022. Vol.43, No. 10. C. 2785-2792*).

Нелинейных волновые управляющие воздействия на нефтяной пласт

Одно из направлений исследовательской работы связано с применением нелинейных волновых управляющих воздействий для увеличения нефтеотдачи природных залежей. В процессе разработки месторождений нефти применяются волновые периодические возмущения для увеличения дебита скважин и повышения конечной нефтеотдачи пластов. В неоднородной среде, при наличии диссипации и/или дисперсии, гармонические колебания, создаваемые в забоях скважин, превращаются в пилообразные волны с периодическими ударными фронтами.

Описаны и исследованы одномерные и двумерные нелинейные математические модели таких процессов (*A. Samokhin. Taylor Trick and Travelling Wave Solutions // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2022. – Vol. 43, No. 10. – P. 96–103*).

Пилообразные волны — периодические затухающие волны возмущения, профиль которых содержит слабые разрывы. В вязкой среде без дисперсии любое периодическое возмущение на больших расстояниях превращается в «пилу» с треугольными зубцами. Каждый период содержит слабый разрыв и почти прямолинейный участок профиля. При дальнейшем распространении изменяются лишь пиковые значения амплитуды возмущений. Профили пилообразных волн довольно устойчивы и мало изменяются при парном взаимодействии и при слабом воздействии дополнительных факторов – дифракции, дисперсии, низкочастотной модуляции и т.п. Пилообразные волны аналогичны ударным волнам, но распространяются в средах с вязкостью.

2.18. Дискретная оптимизация

Дискретная оптимизация – бурно развивающаяся область математики, широко применяемая в исследовании операций, теории алгоритмов и компьютерных науках. К данному классу относятся оптимизационные задачи, решение которых может быть найдено путём прямого или косвенного перебора конечного числа вариантов. Большинство таких задач классифицируются как *NP*-трудные, вследствие чего сложность переборных алгоритмов их решения растет экспоненциально от размерности задач. Поэтому в подавляющем большинстве случаев точные алгоритмы решения неэффективны уже для задач «средней» размерности, что делает актуальным поиск эффективных приближённых алгоритмов, разработку эвристических методов, построение нижних оценок целевой функции, исследование сложностного статуса задач.



Александр Алексеевич Лазарев

Теоретические исследования, проводимые в Институте, охватывают все основные современные направления изучения дискретных оптимизационных задач. Так в области поиска *точных решений* в Лаборатории теории расписаний и дискретной оптимизации (зав. лаб. А.А. Лазарев) предложена модификация классического метода динамического программирования, основанного на принципе оптимальности Беллмана – графический метод, который позволяет существенно сократить трудоёмкость решения большого класса задач комбинаторной оптимизации.

В Лаборатории активных систем (зав. лаб. А.Г. Чхартишвили) разработано другое обобщение динамического программирования и метода множителей Лагранжа – *сетевое программирование* (В.Н. Бурков, И.В. Буркова). В его основе лежит возможность представления функции в виде суперпозиции более простых функций. Такую суперпозицию удобно представлять в виде сети – отсюда и название метода. В каждой вершине сети решаются более простые задачи оптимизации, при этом в конечной вершине получаются либо оптимальное решение (если сеть является деревом), либо оценка решения (верхняя или нижняя) для исходной задачи. С помощью метода сетевого программирования получены новые эффективные алгоритмы решения задач о ранце (и задачи о ранце с сетевыми ограничениями), о максимальном потоке, задачи целочисленного квадратичного программирования и другие.



Владимир Николаевич Бурков

В Лаборатории теории расписаний и дискретной оптимизации проводятся исследования по определению

сложности индивидуальных задач комбинаторной оптимизации с целью вероятностного прогнозирования сложности при больших размерностях задачи.

Еще одним перспективным направлением является построение *приближённых алгоритмов* решения дискретных оптимизационных задач. В частности, в лаборатории разработан метод метризации пространства параметров задач. Данный метод позволяет получать решения с гарантированной погрешностью за полиномиальное время для *NP*-трудных задач. Значение метрики ограничивает сверху оценку абсолютной погрешности целевой функции, поэтому становится возможным построение полиномиально или псевдополиномиально разрешимого примера, который находится наиболее близко (по значению целевой функции) от данного примера. Сформулирован соответствующий класс задач линейного программирования, решение которых строит проекцию начальной точки на подпространство разрешимых примеров. Нахождение новых подпространств полиномиально разрешимых примеров позволяет сократить абсолютную погрешность значения целевой функции решения. Метод метризации пространства параметров задачи для получения приближённых решений продемонстрировал эффективность для значительного множества классических задач теории расписаний. Кроме того, на базе графического метода сотрудниками Института разработано большое количество полиномиальных аппроксимационных схем решения известных комбинаторных задач. В Лаборатории теории расписаний и дискретной оптимизации активно развивается идеология построения эффективных алгоритмов: за приемлемое время для заказчика находится приближённое решение с гарантированной погрешностью целевой функции, устойчивое к «небольшим» изменениям значений входных параметров. Развиваются три вида алгоритмов: метрический, аппроксимационный и интерполяционный на основе множителей Лагранжа и Чебышёва.

Некоторые успехи есть и в направлении построения эффективных нижних и верхних оценок целевых функций известных задач дискретной оптимизации. Например, для задачи управления проектом с ограничением на ресурсы, имеющей широкие практические приложения, разработанные в Институте подходы позволили улучшить оценки на некоторых примерах библиотеки PSPLIB, которая используется специалистами в области дискретной оптимизации всего мира для тестирования новых методов и сравнения их с существующими передовыми подходами.

Помимо получения новых теоретических результатов Институт проблем управления ставит своей целью поиск практического применения сформулированных решений и построение эффективных методов нахождения точных и приближённых решений для практических задач дискретной оптимизации. Институт на протяжении долгих лет сотрудничает с ОАО «РЖД» и рядом транспортных научных институтов по решению дискретных задач управления движением подвижных средств в транспортных и логистических системах, включая задачи формирования, маршрутизации и диспетчеризации транспортных потоков, а также задач планирования и управления комплексом взаимосвязанных операций. В настоящее время ведутся исследования по разработке алгоритмов построения адаптивного плана формирования поездов. Проведены совместные с Институтом нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко исследования по составлению расписания работы операционных комнат с учётом

работы анестезиологов. Совместно с Центром подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина разработан прототип комплекса программ по автоматическому составлению расписаний подготовки космонавтов к работе на Международной космической станции. Разработаны системы автоматического составления расписаний занятий в вузах. Полученные методы решения реализованы в пакетах программных средств, предназначенных для включения в комплексные информационные системы управления различными процессами в прикладных областях транспортной логистики, производства и управления. Более подробно результаты исследований Лаборатории теории расписаний и дискретной оптимизации ИПУ РАН представлены на сайте *www.orsot.ru*.

2.19. Многоагентные системы

С начала XXI века отмечается лавинообразный рост количества работ в мире, направленных на исследование многоагентных систем. Само понятие многоагентной (или мультиагентной) системы является весьма общим; многоагентные системы различаются структурой агентов, характером их взаимодействия, моделями, описывающими их динамику.

Из-за огромного разнообразия моделей и методов, применяемых в теории многоагентных систем очень трудно дать сколько-нибудь полный перечень проводившихся в Институте работ, которые внесли вклад в эту теорию.

Работы, выполненные в ИПУ РАН и относящиеся к данной области науки об управлении, сгруппируем по темам.

Общие проблемы децентрализованного управления многоагентными системами

– Работы по сетевым протоколам консенсуса, выполнявшиеся в лаборатории «Математических методов анализа многоагентных систем» (Р.П. Агаев, П.Ю. Чеботарёв) и опирающиеся на полученные ранее сотрудниками Института результаты по спектральной теории графов. Для ряда дискретных и непрерывных протоколов поиска консенсуса исследована асимптотика и получены выражения компонент предельных состояний через собственные проекторы лапласовских матриц ориентированных графов зависимости агентов. Получены теоремы о лесах и консенсусе, дающие теоретико-графовые интерпретации консенсусных решений. Предложено и исследовано несколько моделей латентного консенсуса, применимых в случаях, когда орграфы влияний агентов не имеют остовных исходящих деревьев.



Рафиг Паша оглы Агаев и Павел Юрьевич Чеботарёв

– Идентификация многоагентных систем на основе проблемно-ориентированных

знаний (К.Р. Чернышёв).
– Разработка логического подхода к интеллектуальному управлению многоагентными системами (С.Н. Васильев).

Приложения к подвижным объектам и электроэнергетике

– Разработка линейных децентрализованных алгоритмов выстраивания агентами геометрической формы, нелинейных алгоритмов достижения консенсуса за заданное время, методов решения соответствующих вычислительных задач (Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков, А.В. Назин, А.Е. Поляков, С.Э. Парсегов, Я.И. Квинто).
– Разработка многоагентных технологий обеспечения устойчивости энергетических сетей (Н.Н. Бахтадзе, И.Б. Ядыкин, В.А. Лотоцкий, А.Л. Генкин, И.В. Никулина, Е.М. Максимов, Н.Е. Максимова, Г.Г. Воробьев, Е.А. Абдулова, Д.А. Новицкий).

Приложения к транспортным, логистическим, производственным системам



Сергей Ефимович Рывкин

– Разработка многоагентных систем управления междугородними перевозками и логистики (Н.Н. Бахтадзе, В.А. Лотоцкий, А.Ю. Заложнев).
– Разработка оптимизационных алгоритмов многоагентного управления железнодорожным транспортом (Ф.Ф. Пащенко, И.К. Минашина, Е.М. Захарова).
– Использование многоагентного подхода для решения задач организации гибкого производства, управления производством на основе проблемно-ориентированного обучения (С.Е. Рывкин, К.Р. Чернышёв).

Вычислительные системы и системы передачи данных; анализ данных

– Разработка процедур управления и диагностики (CaD) для неоднородных систем, состоящих из процессоров, блоков памяти и коммутатора и представляемых двудольным графом, а также систем со структурой тороидальных сеток на основе многоагентного подхода (В.А. Ведешенков, В.Н. Лебедев).
– Оценка риска в оверлейных сетях передачи данных, рассматриваемых как многоагентные системы (Н.М. Маркович).
– Разработка многоагентных технологий распознавания образов в робототехнических системах (С.Е. Рывкин, В.В. Девятков).



Наталья Михайловна Маркович

Многоагентный подход в организационных системах

– Разработка теоретико-игровых моделей механизмов стимулирования для многоагентных организационных систем. Рассмотрены три основных принципа оптимального построения схемы стимулирования для взаимодействующих агентов: принцип компенсации, принцип декомпозиции и принцип агрегирования. В терминах игр с побочными платежами исследованы модели самосогласованности агентов, а также задачи идентификации предпочтений агентов. Исследование моделей формирования команд, ценообразования и других теоретико-игровых моделей многоагентных систем (В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, М.В. Губко, И.В. Буркова, В.О. Корепанов, Н.А. Коргин, Д.Н. Федянин).



Александр Гедеванович Чхартишвили

– Разработка новых моделей динамики мнений в социальных сетях, информационного влияния, управления и противоборства (Д.А. Новиков, И.Н. Барабанов, Н.А. Коргин, А.Г. Чхартишвили, Д.А. Губанов, Д.Н. Федянин, С.Э. Парсегов, И.В. Козицин).

– Цикл исследований манипулируемости процедур коллективного выбора и голосования, анализ индексов влияния в сетях и системах принятии коллективных решений (Ф.Т. Алескеров, В.И. Вольский, В.И. Якуба, Ю.А. Веселова, А.Л. Мячин, А.В. Карпов, С.В. Швыдун).

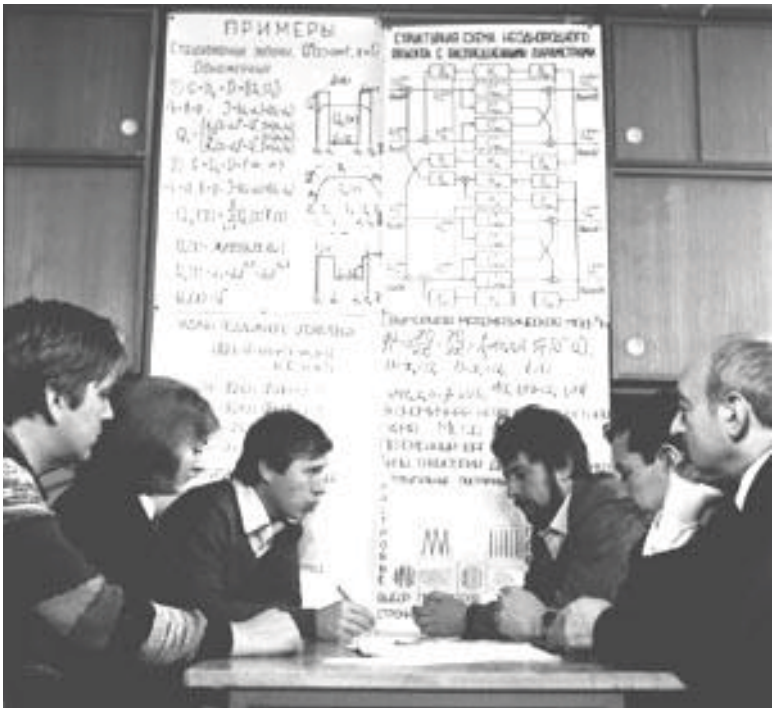
– Анализ систем, динамика которых определяется коллективными решениями в стохастической среде. Эти работы продолжают проводившиеся ранее выполнявшиеся исследования моделей динамического голосования, инициированные А.В. Малишевским и М.А. Айзерманом. Особенность модели ViSE (Voting in Stochastic Environment) – возможность изучения влияния на социальную динамику таких социальных установок участников, как эгоизм, коллективизм, альтруизм и др. В рамках данного направления конструируются механизмы кооперации, ищутся оптимальные для разных условий процедуры принятия коллективных решений и стимулирования участников. В частности, введено и исследовано понятие оптимального порога голосования (П.Ю. Чеботарёв, З.М. Лезина, Я.Ю. Цодикова, А.К. Логинов, В.А. Малышев, В.А. Афонькин). Анализ кооперативных игровых решений со структурными ограничениями на формирование коалиций (А.Б. Хмельницкая).



Фуад Тагиевич Алескеров



Открытие I Конгресса ИФАК в Колонном зале Дома Союзов в Москве (1960)



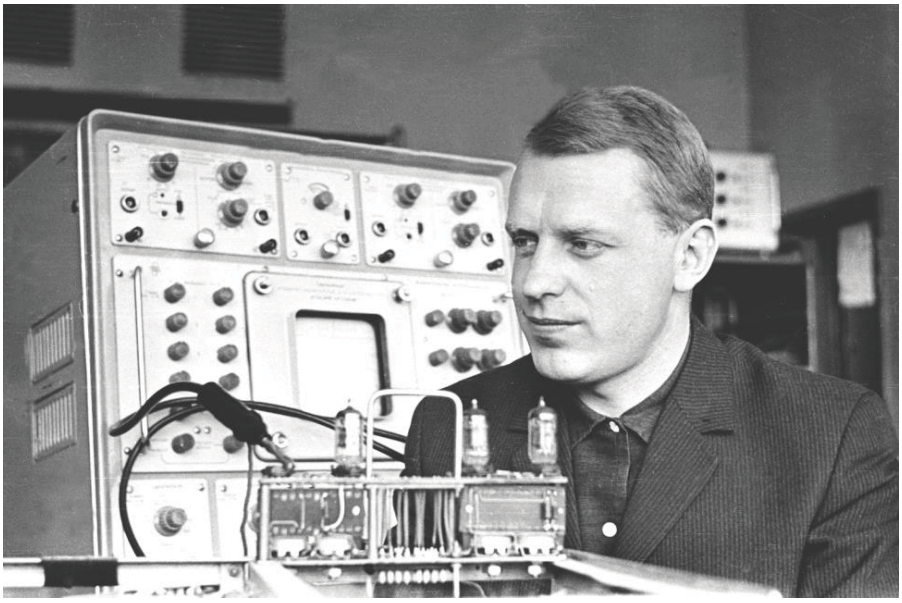
Молодая лаборатория А.Г. Бутковского без начальника



…и во главе с Анатолием Григорьевичем



Выступление перед Трапезниковым (даже для Цыпкина это серьёзно)



Саша Шубин (из лаборатории Фельдбаума) за работой



**Мы пока в двойном подчинении: АН СССР и Минприбора, –
а бывшего министра Михаила Сергеевича Шкабардню и сейчас ценят и уважают**



С такими коллегами хочется работать, работать и ещё раз работать

Суровые будни



на субботнике…



…и в подшефном колхозе



Однажды в Ноябре



Обе колонны ИАТа – за науку управления



Совещание на ходу:
президент АН СССР академик А.П. Александров, И.В. Прангишвили и директор ИАТа академик В.А. Трапезников

3. Управление подвижными объектами и навигация

3.1. Управление космическими аппаратами



В.П. Глушко и Б.Н. Петров

Работы по космической тематике в Институте были начаты по инициативе С.П. Королёва и В.П. Глушко в 1950 г. Руководителем этого направления стал Б.Н. Петров, тогда молодой доктор наук, профессор, а впоследствии академик АН СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР.

Исследования начались с анализа жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) как объекта управления. Эти первые работы выполнили Ю.П. Портнов-Соколов (впоследствии д.т.н., проф., заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственных премий СССР), Н.Н. Михайлов и М.В. Пустошкина. В 1953 г. в Институте выпустили проект в семи томах, где были представлены результаты исследований динамики ЖРД на основе полных уравнений движения и получены первые результаты по решению проблемы управления расходованием топлива, проектированию системы опорожнения баков, системы регулирования кажущейся скорости, а также рассматривались возможные типы исполнительных механизмов в системах управления ракетой. Исполнителями проекта были Ю.П. Портнов-Соколов; член-корреспондент АН СССР, лауреат Государственной премии СССР В.В. Петров, С.В. Емельянов (позднее академик РАН, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и РФ, лауреат премий Совета министров СССР и РФ); В.Ю. Рутковский (впоследствии д.т.н., проф., заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственных премий СССР); Г.М. Уланов (впоследствии д.т.н., проф., лауреат Государственных премий СССР), И.Н. Крутова (ныне д.т.н., проф., заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии СССР) и др.

Проект обсуждался на заседании Комиссии Президиума АН СССР под председательством академика М.В. Келдыша. С докладом выступил руководитель проекта и его непосредственный исполнитель Б.Н. Петров. Работа получила

высокую оценку М.В. Келдыша, академиков Б.С. Стечкина и В.П. Мишина – первого заместителя С.П. Королёва.

В 1954 г. Институту автоматики и телемеханики Постановлением Правительства было поручено возглавить исследования в части управления двигательной установкой разрабатываемой С.П. Королёвым межконтинентальной составной двухступенчатой ракеты Р-7. Научным руководителем был назначен Б.Н. Петров.

Проблема построения систем управления тягой ЖРД и синхронизации опорожнения баков ракеты сложной архитектуры была на тот момент чрезвычайно актуальной задачей, а её решение сопровождалось немалыми трудностями, которые всегда сопутствуют созданию принципиально новых систем – «с нуля», при полном отсутствии прототипов и серьёзных литературных источников.



Б.Н. Петров, С.П. Королёв и В.П. Мишин (тогда первый зам. Королёва)

Работы Б.Н. Петрова и его учеников, посвящённые методологии разработки математических моделей ЖРД, анализу динамики двигателя как объекта управления и исследованию проблемы управляемости ЖРД составили важнейший раздел теории ЖРД, в который вошло значительное число принципиально новых теоретических задач, возникших при создании ракеты Р-7 и всех последующих крупных жидкостных ракет.

Как динамическое звено, ЖРД стал составной частью систем управления тягой, систем регулирования опорожнения баков и синхронизации расходования топлива в ракетах пакетной архитектуры.

Разработанная Б.Н. Петровым, Ю.П. Портновым-Соколовым, к.т.н. В.Н. Марковым и к.т.н. А.Н. Чацкиным методика электронного моделирования ЖРД на аналоговых ЭВМ (цифровых ЭВМ тогда ещё не было) существенно ускорила поиск способов решения проблемы продольной неустойчивости ракеты Р-7. По сути, это был первый проход через настоящую «терра инкогнита».

Шёл 1958 г., страна готовилась к полёту на Луну первой автоматической межпланетной станции «Мечта». Но официальный старт неоднократно откладывался из-за взрывов ракет при испытательных пусках. Усилиями большого коллектива учёных и конструкторов природа этой сложнейшей проблемы была наконец осмыслена. Дело оказалось в том, что, являясь источником колоссальной энергии, ЖРД входит в колебательный контур, который включает трубопроводы и конструкцию ракеты. Поэтому при возникновении резонанса разрушалась вся ракета. Разработанная Б.Н. Петровым методика имитационного моделирования ЖРД позволила существенно ускорить поиск причины возникавших катастроф и найти средства их предотвращения.

Глубокое понимание динамики ЖРД и умение выполнить корректное упрощение описывающих её сложных уравнений дали возможность осуществить аналоговое моделирование системы регулирования кажущейся скорости. Оказалось, что из-за наличия ряда нелинейностей в системе регулирования соотношения компонентов топлива ЖРД возникали автоколебания дросселя в магистрали компонента. После того, как моделирование системы с ЖРД в замкнутом контуре было завершено, это опасное явление удалось устранить. Затем последовало и теоретическое исследование деталей этого феномена. И вновь к искомому результату – осмыслению способов борьбы с автоколебаниями дросселя – привела разумная упрощающая аппроксимация сложных уравнений работы двигателя.

В 1954 г. Правительством был выпущен ряд постановлений в обеспечение процесса создания межконтинентальной ракеты. В частности, было поручено создать беспоплавковые бортовые измерители уровня компонентов высокой точности, предназначенные для установки в системе опорожнения баков. К работе были привлечены многие специализированные организации.

В рамках этой работы, которая в стенах ИАТа велась под руководством Б.Н. Петрова, в Институте был создан эндовибраторный датчик (разработчики: Л.Г. Палевич и В.А. Викторов) и проведены поисковые работы по изучению прототипа ёмкостной чувствительной точки. Было изучено влияние крайне низких температур на работу датчика, при этом учитывалась неопределённость распределения компонентов топлива в баках. Также в ИАТе были выполнены первые работы по поиску рациональных характеристик управляющих органов – дросселей системы опорожнения баков и регулирования соотношения компонентов топлива в магистралях ЖРД.

В целом, Б.Н. Петров взял на себя ответственность за идеологию создания принципиально новых терминальных систем управления расходованием топлива ЖРД. За счёт резкого сокращения гарантийных запасов топлива подобные системы существенно повышали энергетику ракеты. Следует отметить, что Б.Н. Петров был научным руководителем работ по таким системам для всех крупных жидкостных ракет, начиная с королёвской Р-7, и для последующих крупных боевых ракет и ракет-носителей космических аппаратов.

В это же время в связи с созданием систем регулирования опорожнения баков и синхронизации расходования топлива, которые служат типичными примерами бортовых терминальных систем управления, Б.Н. Петровым, Ю.П. Портновым-Соколовым, будущими д.т.н. А.Я. Андриенко, В.П. Ивановым и другими, были начаты исследования по теории терминального управления.

В 1952–1954 гг. в Институте были получены конструктивные результаты по новой по тем временам системе стабилизации углового положения ракеты пакетной схемы с помощью рассогласования тяг ЖРД боковых блоков (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский). Идея такого способа управления ракетой была впервые высказана В.П. Мишиным. В то время его идея была встречена довольно прохладно, однако сегодня этот способ управления нашёл достаточно широкое применение.

В 1980 г. Б.Н. Петров ушёл из жизни. Работы по системам управления ЖРД в Институте возглавил Ю.П. Портнов-Соколов. Под его руководством была



Открытие мемориальной доски в память о Б.Н. Петрове

завершена разработка общей концепции совершенствования средствами управления энергетических характеристик жидкостных ракет-носителей (РН) (А.Я. Андриенко и В.П. Иванов). Согласно этой концепции, при выведении РН с заданными характеристиками необходимо управлять:

- режимом работы двигателей ракетных блоков (тягой и соотношением расходов компонентов топлива);
- моментами времени включения и выключения двигателей;
- межблочным перетеканием жидкого топлива (в случае гидросвязи между ракетными блоками РН) и другими процессами с тем, чтобы обеспечить выведение на целевую орбиту полезного груза как можно большей массы.

При реализации этой концепции было сформировано обширное семейство систем управления расходованием топлива (СУРТ) – свыше пятнадцати типов, различающихся по составу используемой бортовой информации, исполнительных органов, бортовых алгоритмов управления и пр. Большая часть этих систем либо была реализована практически при создании РН «Энергия», «Зенит-2S», «Зенит-3SL» (для международной программы «Морской старт») и «Протон-М» (при участии В.А. Жукова, к.т.н. В.К. Завадского и др.), либо нашла отражение в перспективных проектах систем для РН «Ангара», «Единство», «Союз-2», «Ямал», «Аврора», «Онега» (В.А. Жуков, В.К. Завадский, к.т.н. А.А. Муранов, к.т.н. А.И. Чадаев и др.).

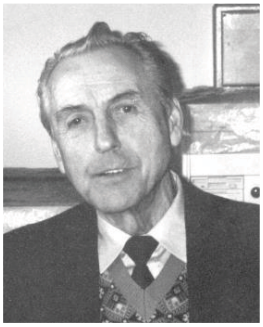
На рубеже столетий был выполнен цикл научных работ по обеспечению безопасности средств управления ракетно-космической техникой в соответствии с общепринятой концепцией приемлемого риска, доработанной при учёте чрезвычайно высокой энергетической и информационной напряжённости рассматриваемых объектов (А.Я. Андриенко и В.П. Иванов). Работы данного цикла исходят из приоритета критерия безопасности на всех этапах жизненного цикла объектов ракетно-космической техники, а также из необходимости использования здесь всех видов управления: традиционного управления в бортовых системах, управления проектно-техническими решениями, эксплуатационно-технического управления и др.

Научные результаты этих работ реализованы в современных разработках ракетно-космической техники (с участием В.А. Жукова, В.К. Завадского и др.). В частности, созданная в ИПУ методика сравнительного анализа вариантов проектного облика по уровню безопасности была апробирована в ГК НПЦ им. М.В. Хруничева применительно к РН «Ангара». Кроме того, при проектной разработке семейства РН «Ангара» реализованы новые технологии построения пневмогидравлических систем подачи топлива с использованием новых непрерывных датчиков давления и алгоритмических средств диагностики и парирования отказов в каналах измерения и исполнительных органах. В состав модернизированного варианта РН «Протон» введена система управления выработкой топлива и выключением двигателей ступеней, позволяющая

существенно снизить уровень экологически неблагополучных остатков компонентов топлива. Созданные в ИПУ методики наземной отработки бортового программного обеспечения и анализа фрагментов телеметрической информации при лётных испытаниях используются для повышения безопасности эксплуатации отдельных бортовых систем РН «Протон-М» и «Союз-V».

В последние десятилетия Институт принял участие в выполнении программы введения в эксплуатацию вместо ракет-носителей «Спутник», «Восток», «Молния», «Союз-V» и «Союз ФГ» новой ракеты-носителя «Союз-2», обеспечившей успешное выведение на орбиту космических аппаратов «Метон», «Меридиан» и «Коро».

С 1956 г. важным направлением работ Института, также выполнявшимся под руководством Б.Н. Петрова, стала разработка теории и самих систем управления искусственными спутниками Земли (ИСЗ) (В.Ю. Рутковский; д.т.н., проф. В.И. Попов; к.т.н. В.С. Косиков; д.т.н., лауреат Государственной премии СССР Б.В. Павлов; д.т.н. В.М. Суханов и др.).



Владислав Юльевич Рутковский

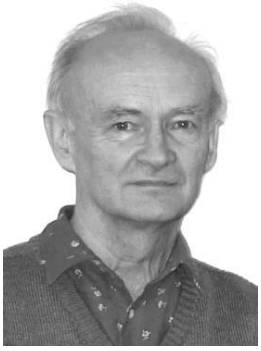
По инициативе академика Д.Е. Охоцимского в конце 1950-х годов в нашей стране начали создаваться гравитационные системы ориентации ИСЗ. Это пассивные системы, не требующие расхода какого-либо вида энергии для создания восстанавливающих моментов. Однако при отделении спутника от ракеты-носителя возникали столь значительные возмущения, что понадобилась простая и экономичная система предварительного успокоения.

В Институте были разработаны структура и теория оригинальной релейной системы предварительного успокоения, в которой высокая экономичность достигалась за счёт введения специальной связи, компенсирующей петлю гистерезиса релейной характеристики, и посредством выбора соответствующего соотношения между ограничениями датчиков угловой скорости и углового положения ИСЗ. В связи с тем влиянием, которое оказывали на динамику системы и расход потребляемой энергии изгибные колебания штанги гравитационного стабилизатора, пришлось поставить и решить специальную задачу коррекции закона управления.

Дальнейшее развитие этого направления было связано с разработкой теории и систем управления деформируемых космических аппаратов (ДКА). К последним относятся ИСЗ с присоединёнными гибкими элементами (большие панели солнечных батарей, выносные радиоантенны).

При управлении нежёсткость конструкции ДКА порождает новые проблемы. Чем ниже степень конструктивной жёсткости и чем выше интенсивность управляющих воздействий, тем серьёзнее эти проблемы. Особенно опасным оказывается взаимодействие регулятора с упругими колебаниями ДКА в случае релейного управления, когда периодически повторяющиеся «ударные» нагрузки управляющего воздействия могут привести к неконтролируемому нарастанию амплитуды упругих колебаний до того критического значения, при котором происходят «захват регулятора» и связанная с этим потеря устойчивости движения ДКА. При этом следует отметить, что в полёте режимы с релейными управлениями занимают весьма

продолжительное время практически для всех типов ДКА с длительным сроком активной жизни (разгрузка гиродинов, стабилизация углового положения при коррекции орбиты).



Виктор Миньонович Суханов

В связи с этим В.Ю. Рутковским и В.М. Сухановым была предложена модально-физическая форма математической модели ДКА, исследование динамики которой и синтез релейной системы ориентации упругим объектом могли быть осуществлены на основе разработанного ими математического аппарата, названного методом фазовой биплоскости. Этот метод позволил осмыслить роль фазовых соотношений во взаимодействии управления с изгибными колебаниями конструкции ДКА и изучить порождаемый этими колебаниями процесс потери устойчивости движения. В результате была определена величина критического значения амплитуды колебаний конструкции, при которой происходит «захват регулятора» колебаниями. Был выявлен закон распределения случайных значений фазы доминирующей моды в моменты переключения регулятора и предложены два типа алгоритмов (амплитудный и фазовый) стабилизации колебаний.

В период 1957–1980 гг. все исследования по ИСЗ, проводившиеся под руководством Б.Н. Петрова, а с 1980 г. – под руководством В.Ю. Рутковского, осуществлялись в тесном взаимодействии с НПО прикладной механики (главный конструктор – академик М.Ф. Решетнёв) и нашли практическое применение при проектировании и создании систем управления ориентацией спутников связи на геосинхронной орбите серий «Радуга» и «Горизонт», спутников непосредственного телевещания серии «Экран», ряда большемерных спутников серии «Луч 1».

В последние годы была решена проблема совместного оценивания координат движения объектов космической техники, обладающих нежёсткой конструкцией (ДКА), на основе использования модально-физических моделей таких объектов с привлечением алгоритмов, построенных на базе объединения методов калмановской фильтрации и теории проверки статистических гипотез (В.М. Суханов, к.т.н. Т.В. Ермилова, к.т.н. А.С. Ермилов, к.т.н. В.Г. Борисов).

Предложена дискретная адаптивная система управления ДКА и построена методика её исследования с использованием дискретных аналогов теорем Ляпунова, при этом выполнен синтез алгоритма адаптации на базе нечёткой логики (И.Н. Крутова и В.М. Глумов).

Разработаны приближённые модели ДКА, опирающиеся на оценки огибающей упругих колебаний (В.М. Суханов и А.В. Силаев), предложена графовая модель ДКА «зонтичного» типа (В.М. Суханов, И.Н. Крутова, В.М. Глумов).

В 1957 г. по просьбе главного конструктора ОКБ «Факел» академика П.Д. Грушина в Институте начались работы по созданию самонастраивающихся систем управления для разрабатываемых в этом ОКБ ракет. Работы возглавил Б.Н. Петров. В.Ю. Рутковским и И.Н. Крутовой были предложены два принципа построения беспоисковых самонастраивающихся систем (БСНС): с контролем частотных характеристик и с моделью. В дальнейшем была разработана новая по тем временам теория БСНС (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, д.т.н., проф.,



Борис Викторович Павлов



Станислав Данилович Земляков



Игорь Борисович Ядыкин

лауреат Государственной премии СССР С.Д. Земляков, Б.В. Павлов, д.т.н., проф. И.Б. Ядыкин), на основе которой в 1970–1980 гг. совместно с МОКБ «Радуга» и МИЭА удалось создать первые в СССР самонастраивающиеся системы управления для нескольких классов ракет главного конструктора И.С. Селезнёва.

Применение БСНС позволило:

- расширить тактико-технические характеристики ракетных комплексов за счёт свойств адаптации систем управления по высотам, скоростям, дальности и видам траекторий полёта;
- увеличить точность управления в 5–10 раз по сравнению с существующими системами;
- обеспечить устойчивость движения при изменениях коэффициентов объектов в 50–100 раз, при градиентах до 50–100 ед/с, при изменении знака коэффициента статической устойчивости и при неоднозначной зависимости коэффициентов от скоростного напора;
- увеличить на отдельных режимах дальность полёта на 30–35 % с одновременным решением проблемы движения на высоких скоростях и на предельно низких высотах над пересечённой местностью;
- увеличить жизнеспособность ракет за счёт расширения в 2–3 раза областей устойчивости по отношению к возмущениям типа взрывной волны;
- улучшить технологичность систем за счёт расширения допусков на параметры системы до 50% по сравнению с 15–20% у существовавших ранее систем;
- повысить надёжность (за счёт компенсации некоторых типов отказов аппаратуры основного контура системы управления);
- повысить серийноспособность и взаимозаменяемость блоков за счёт унификации и создания базовых структур;
- сократить сроки разработки и доводки систем;
- уменьшить число ракет, необходимых для проведения полётных испытаний (до 40 %).

В создании самонастраивающихся систем управления также приняли активное участие В.С. Косиков, к.т.н. В.Н. Ссорин-Чайков, к.т.н. В.А. Путинцев, Т.В. Ермилова и др.

По решению Правительства в 1958–1976 гг. в Институте под руководством Б.Н. Петрова проводились работы по теории и системам управления ядерными энергетическими установками (Г.М. Уланов, д.т.н. В.П. Жуков, д.ф.-м.н. Э.М. Солнечный и др.). Изучались маршевые ядерные ракетные двигатели, а также ионные и плазменные двигатели малой тяги, которые рассматривались как наиболее перспективные силовые установки для освоения ближнего и дальнего

космоса. Были построены математические модели двигателей и предложены принципы управления подобным классом объектов.

С 1970 г. по начало XXI века была разработана теория оптимального управления ориентацией различных типов космических аппаратов, в том числе многодвигательных (к.т.н. Б.Е. Чупрун). Получены необходимые условия экстремума для оптимальной задачи с ограничением или минимизацией полного изменения заданной векторной функции координат нелинейной системы с двумя векторными управлениями, значения первого из которых ограничены, тогда как второе имеет ограниченное полное изменение. Данная теория, в частности, позволяет выбирать не только оптимальное местоположение на космическом аппарате управляющих его ориентацией двигателей, но и режим их включения.

Под руководством Б.Н. Петрова осуществлена разработка принципов построения структур и методов реализации бортовых информационно-управляющих систем высокоресурсных автономных космических аппаратов для исследований комет, малых планет и спутников больших планет Солнечной системы. В рамках этой проблемы велись самостоятельные исследования по методам управления и технической диагностике бортовых ядерных энергоустановок и систем обеспечения целевых научных программ космических аппаратов.

Разработки ИПУ РАН в этой области (д.т.н. В.В. Бугровский, к.т.н. Д.А. Гольдин, И.А. Вогау) были реализованы в техническом проекте НПО им. С.А. Лавочкина по созданию космического аппарата с ядерным источником энергии и двигателями малой тяги для исследования комет, малых планет и спутников больших планет Солнечной системы.

В последние годы в Институте разработаны принципы построения и теория систем управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами (КМР) (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, В.М. Суханов, В.М. Глумов), предназначенными для обслуживания и ремонта внешних элементов пилотируемых космических станций (ПКС), для запуска с борта ПКС малых космических аппаратов, спасения космонавтов при возможном обрыве фала во время их работы в открытом космосе и т.д. Были поставлены и решены задачи формирования оптимальной конфигурации системы «манипулятор-груз» в режиме транспортировки полезного груза, разработаны принципы безопасного полёта КМР вблизи ПКС, выполнен синтез алгоритмов зависания КМР над заданной точкой поверхности ПКС, предложены способ и алгоритмы высокоэкономичного управления ориентацией КМР на перемещениях вблизи ПКС.

Для обеспечения устойчивости и требуемого качества функционирования сразу нескольких подсистем КМР было сформулировано новое для теории управления понятие «технической управляемости многосвязной нелинейной системы управления». Доказана теорема о необходимых и достаточных условиях автономной технической управляемости объекта, решены задача выбора минимально необходимого вектора ограничений на управление из условия автономной технической управляемости и другие задачи.

Рассматривая КМР как сложную механическую систему, учёные Института смогли разработать метод декомпозиции его математической модели при наличии множества законов управления релейного типа на простейшие системы второго порядка.

Продолжает разрабатываться теория управления ориентацией больших космических конструкций (БКК), собираемых на орбите с помощью КМР. Особенностью БКК в процессе сборки как объектов автоматического управления служит дискретное изменение их механической структуры, ведущее к скачкообразному изменению размерности и вектора коэффициентов используемой при управлении математической модели объектов данного класса. Это существенно усложняет задачу синтеза регулятора. К перспективным объектам, относящимся к классу БКК, сегодня можно отнести:

- большие космические электростанции (КЭС), вырабатывающие электроэнергию на основе использования солнечного излучения с последующей её передачей при помощи лазерных преобразователей энергии. Габариты подобных КЭС соизмеримы с размерами футбольного поля и более;
- большие составные космические зеркала для ретрансляции солнечной световой энергии в избранные районы земной поверхности, что позволит освещать города Заполярья в ночное время, снижая расходы земных энергоресурсов, и подсвечивать отдельные акватории мирового океана, повышая степень воспроизводства рыбных запасов за счет активизации роста планктона;
- большие космические рефлекторные антенны, необходимые для радиозондирования дальнего космоса.

Для обеспечения высокоточной ориентации объектов этого класса были предложены три стратегии адаптивного управления, последовательно реализуемые по мере качественного изменения сложности модели собираемой БКК:

1) управление, основанное на использовании подсистемы интеллектуальной диагностики, осуществляющей адаптивную настройку базового алгоритма, которая обеспечивает стабилизацию как основного («жёсткого») движения объекта, так и упругих колебаний его конструкции;
2) способ адаптивного управления ориентацией БКК с использованием оценок фазовых значений доминирующей моды в моменты переключения регулятора;
3) адаптивное управление с коррекцией параметров базового алгоритма на основе привлечения методов нечёткой логики (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов, И.Н. Крутова).

Осуществлён синтез алгоритмов и разработаны структурные схемы регуляторов, реализующие принципы адаптивного и координатно-параметрического управления на соответствующих этапах сборки БКК (С.Д. Земляков, В.М. Суханов, Т.В. Ермилова и др.).

С конца 90-х годов Институт совместно с РКК «Энергия» начал исследования по направлению «Модели и методы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов» (д.т.н., проф. В.В. Кульба и Б.В. Павлов). На основе единой методологии и принципов модульности были разработаны комплексный подход, методы формализации, модели и алгоритмы проектирования информационно-управляющих систем реального времени для бортовых комплексов управления космических аппаратов, обеспечивающие формальный анализ и синтез технологии разработки, отработки и испытаний программного и информационного обеспечения бортовых комплексов управления, предупреждение нештатных ситуаций.

Работы Института в области управления летательными аппаратами получили мировую известность и сыграли большую роль в развитии космонавтики в нашей стране, в развитии теории и практики построения адаптивных систем управления летательными аппаратами различных классов.

С 1965 г. теоретические результаты постоянно докладываются на конгрессах ИФАК, МАФ, на симпозиумах ИФАК по аэрокосмосу.

За достижения в области теории и создания систем управления космическими и летательными аппаратами сотрудники Института были удостоены Ленинской и пяти Государственных премий СССР.

В 1980 г. Академия наук СССР учредила Золотую медаль им. Б.Н. Петрова (с 1993 г. – премия им. Б.Н. Петрова), присуждаемую учёным за выдающиеся работы в области теории и систем автоматического управления, а также в области экспериментальных исследований по освоению космического пространства. Первую Золотую медаль им. Б.Н. Петрова в 1983 г. получил В.Ю. Рутковский, в 2004 г. премии им. Б.Н. Петрова удостоены Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко и В.П. Иванов, в 2007 г. – В.В. Кульба и Б.В. Павлов. В 2012 г. Президиум РАН присудил В.Ю. Рутковскому, В.М. Суханову и В.М. Глумову Премию им. К.Э. Циолковского. В 2013 г. Президиум РАН присудил А.П. Курдюкову и М.М. Чайковскому Премию им. Б.Н. Петрова. В 2016 г, В.П. Иванов награжден Золотой медалью им. С.П. Королёва. В 2019 г. Президиум РАН присудил Премию имени Б.Н. Петрова А.К. Волковицкому и Е.В. Каршакову.

3.1.1. Теория терминальных систем управления

Во многих областях техники возникает задача приведения объекта управления в заданное конечное состояние, определяемое совокупностью нескольких краевых условий. Терминальный момент определяется как момент выполнения одного из краевых условий, а задача терминального управления заключается в обеспечении выполнения остальных краевых условий в этот момент с максимальной точностью.



Юрий Петрович Портнов-Соколов

Толчком к становлению теории терминальных систем управления послужили практические задачи, возникающие в ракетно-космической и авиационной технике. Принципы и алгоритмы терминального управления разрабатывались под руководством Б.Н. Петрова – вначале при создании бортовой системы управления расходованием топлива, затем при разработке систем управления сближением, мягкой посадкой и др.

В начале 70-х годов академиком Б.Н. Петровым, д.т.н., проф. Ю.П. Портновым-Соколовым, д.т.н. А.Я. Андриенко и к.т.н. В.П. Ивановым (ныне д.т.н., зав. лаб.) был подготовлен обстоятельный обзор работ по теории терминальных систем

управления, а в начале 80-х годов те же авторы опубликовали монографию «*Бортовые терминальные системы управления. Принципы построения и элементы теории*».

Теория терминального управления развивалась в основном как ветвь общей теории оптимального управления в задачах с граничными условиями на правом конце траектории и/или с терминальным критерием оптимальности.



Анатолий Яковлевич Андриенко

Терминальные системы управления отличаются от других систем управления (например, систем стабилизации) не только по назначению, но и по способу организации процесса управления. Принципы управления, наиболее адекватные терминальным системам, предусматривают прогнозирование будущего движения системы от текущего до терминального момента и формирование процесса изменения управляющего воздействия (программы управления), приводящего систему в заданное конечное состояние. С целью компенсации неизбежно возникающих в реальных условиях погрешностей управления такая процедура многократно повторяется и в последующие моменты времени, что обеспечивает требуемую коррекцию программы управления. За счёт фильтрации помех при оценке текущего состояния системы и повышения качества прогнозирования можно достичь уменьшения погрешностей управления по мере приближения к терминальному моменту.

Основное содержание теории составляют методы анализа и синтеза терминальных систем управления.

В Институте была сформулирована общая стохастическая задача синтеза терминальных систем управления и определены физические основы её решения.

Задачи терминального управления, как правило, являются многокритериальными (требование максимизации терминальной точности дополняется критериями интегрального типа). Методы синтеза систем терминального управления используют идею разбиения общей задачи на два этапа.

На первом этапе из условия экстремума интегрального критерия находится класс функций, определяющих программу управления на интервале от текущего до терминального момента. На втором этапе решается задача синтеза системы управления с обратной связью. Механизм обратной связи реализуется путём коррекции параметров программы управления по результатам оценивания координат состояния и возмущений и прогнозирования невязок краевых условий в терминальный момент времени (фактически – промаха). Алгоритм управления возмущённым движением находится из условия минимума терминального критерия.

Для ряда прикладных задач терминального управления (процессами выведения ракет-носителей (РН), расходования компонентов топлива, сближения космических аппаратов) получены оптимальные программы управления по различным критериям: энергетическому, быстродействия, безопасности (д.т.н. А.Я. Андриенко, к.т.н. А.А. Муранов, к.т.н. А.И. Чадаев).

Применительно к терминальным системам разработаны методы синтеза алгоритмов оценивания координат состояния по результатам измерений на ограничен-

ном интервале предыстории и алгоритмов калмановского типа для нелинейных объектов управления (А.Я. Андриенко).

Одним из направлений второго этапа синтеза стали исследования по разработке методов прогнозирования промаха и алгоритмов управления по прогнозируемому промаху.

В рамках данного направления разработаны и исследованы двухуровневые алгоритмы фильтрации и многоуровневые итеративные алгоритмы терминального управления, основанные на использовании при прогнозировании и управлении нескольких отличающихся по сложности моделей объекта (д.т.н. В.П. Иванов и к.т.н. В.К. Завадский).



Владимир Петрович Иванов

Повышение требований к энергетике и безопасности современных средств выведения космических аппаратов вызвало необходимость применения новой концепции управления. В рамках данной концепции управление ракетой понимается в широком смысле, охватывающем управление моментами времени включения и выключения ЖРД отдельных ракетных блоков и ступеней составной жидкостной ракеты, управление режимами работы силовых установок и других агрегатов, ориентацией векторов тяги ЖРД, моментами сброса отработавших частей ракеты и пр. Реализация новой концепции потребовала совершенствования принципов и методов терминального управления.

В Институте предложена новая, нестандартная структура алгоритмов фильтрации и прогнозирования терминальных систем, где в явном виде присутствует управляемая модель объекта. Целью управления в этом случае является адаптация модели объекта к реальным, возмущённым условиям функционирования. Разработаны методы синтеза терминальных систем, использующие алгоритмы фильтрации и прогнозирования. Применительно к терминальным системам развиты принципы комбинированного управления, обеспечивающие функционирование при неполной априорной информации о возмущающих факторах.

Решена новая для ракетодинамики задача управления моментами выключения двигателей различных ступеней ракет-носителей (РН) по критерию безопасности.

Развита теория отказоустойчивых бортовых терминальных систем. Сформулирован принципиально новый подход к синтезу, заключающийся в том, что состояние системы с частичным отказом рассматривается как одно из допустимых её состояний, которое должно учитываться при выборе алгоритма управления (А.Я. Андриенко, В.П. Иванов, Ю.П. Портнов-Соколов). В идеологию построения алгоритма управления закладывается способность сохранения приемлемого качества при появлении отказов. Отказоустойчивые системы синтезируются в классе систем управления с многоуровневой структурой, из которой могут быть образованы каналы управления различного уровня сложности, адекватные сложившимся условиям функционирования. В синтезируемом алгоритме управления предусматриваются возможности диагностики состояний системы с отказами и перестройки на новые условия работы. Важно отметить, что повышение надёжности

системы в данном случае обеспечивается без привлечения дополнительных аппаратных средств.

В процессе эксплуатации ракетно-космической техники одной из актуальных задач является оценка функционирования бортовых систем и выявление аномалий в их работе по результатам телеметрических измерений. Проведено коренное совершенствование методологии анализа телеметрических данных о работе бортовых систем управления РН – с переходом к использованию итерационной процедуры оценивания координат нелинейного объекта. Новая методология обеспечивает существенное повышение точности и достоверности анализа работы бортовых систем управления.

В рамках теории терминального управления были также разработаны: методы синтеза систем управления объектами многоцелевого назначения; способ пороговодискретного программного управления и метод статистической оптимизации временно́й последовательности интервалов квантования; методы статистической оценки точности управления бортовых терминальных систем.

В последние годы в работах лаборатории значительное внимание уделялось детерминированным постановкам задачи синтеза стратегии управления, обеспечивающей решение терминальной задачи в классе систем с прогнозированием невязок краевых условий.

Подход к синтезу основывается на выделении в системе взаимосвязанных процессов терминального управления и стабилизации объекта.

Прогнозирование невязок краевых условий производится при постоянных значениях координат объекта, регулируемых контуром стабилизации. Получены дифференциальные уравнения для вектора прогнозируемых невязок, производная которых в явном виде зависит от терминального управления.

Для управления в классе кусочно-постоянных функций дифференциальные уравнения преобразуются в разностные уравнения. На основе применения принципа динамического программирования развит метод детерминированного синтеза терминального управления в классе кусочно-постоянных функций времени и прогнозируемых невязок. Сформулировано условие управляемости системы в части решения терминальной задачи.

В связи с усложнением задач, решаемых бортовыми терминальными системами, и расширением их функциональных возможностей развивается новая аддитивная технология поэтапного синтеза терминального управления. Новая технология основывается на декомпозиции исходной задачи синтеза на последовательность усложняющихся задач. Предполагается сохранение преемственности промежуточных решений. На основе этих решений выделяются классы терминального управления, различающегося по характеру и степени использования априорной и текущей информации. Отметим, что новая технология, кроме преодоления трудностей поиска решения сложной задачи синтеза, позволяет поэтапно контролировать правильность промежуточных решений.

Основные результаты теории терминальных систем управления были использованы при создании бортовых систем для космических ракет-носителей «Союз», «Протон-М», «Зенит», «Энергия-Буран», «Ангара», обеспечивших реализацию отечественных космических программ и международных проектов («Союз-Аполлон», «Морской старт», «КСЛВ» (Южная Корея), Союз-СТ (Гвианский космический

центр Франции)), а также для ряда межконтинентальных баллистических ракет, составивших основу ракетно-ядерного потенциала нашей страны.

3.2. Управление летательными аппаратами



В конце 60-х годов Институт принимал участие в проекте, возглавляемом д.т.н. Б.Я. Коганом, по разработке первого в СССР аналого-цифрового вычислительного комплекса, явившегося основой универсального моделирующего комплекса на ММЗ им. С.В. Ильюшина. Комплекс предназначался для отработки ручной системы управления самолётом Ил-62. Этот контакт с авиационной промышленностью на много лет определил направление исследований: разработка теории, методов и средств автоматизации научного эксперимента. Были разработаны и реализованы принципы построения многоуровневых систем управления натурным экспериментом, систем моделирования и идентификации динамических параметров объекта. Работа проводилась совместно с Центральным аэрогидродинамическим институтом им. Н.Е. Жуковского, ММЗ им. С.В. Ильюшина, МНТК «Надёжность машин». В процессе управления и обработки результатов выполненных натурных экспериментов получен богатый практический опыт, который в дальнейшем был реализован при разработке программных пакетов SAD – сбор, обработка и анализ данных и EMP – подбор эмпирических формул. Впоследствии эти пакеты не только использовались в проводимых Институтом работах, но и нашли применение в других научных организациях. Разработанная методика управления, алгоритмы, программы, комплекс технических средств использовались при создании системы автоматизации прочностных испытаний авиационных конструкций на ММЗ им. С.В. Ильюшина. Под научно-методическим руководством Института и при активном участии сотрудников Института созданная система успешно использовалась при проведении статических испытаний на прочность серии самолётов ИЛ-76, ИЛ-86, ИЛ-96 (к.т.н. Ю.С. Легович, Н.Г. Журавлёва).



Борис Яковлевич Коган



Юрий Сергеевич Легович



Нина Георгиевна Журавлёва

С начала 1990-х годов в Институте проводились исследования, связанные с решением задачи автоматического управления продольным движением самолёта и направленные на преодоление атмосферных возмущений – сдвига ветра при заходе на посадку вдоль глиссады с заданным относительным углом наклона (д.т.н. А.П. Курдюков, к.т.н. В.Н. Тимин, д.т.н. М.М. Чайковский). Сдвиг ветра на низких высотах с большими градиентами вертикальной и горизонтальной составляющих профиля ветра, обусловленными атмосферными возмущениями, представляет собой потенциально опасное явление для самолёта при заходе на посадку. Задача заключается в том, чтобы по измерениям отклонений воздушной скорости самолёта и его высоты от заданных значений, определяемых траекторией глиссады в каждый момент времени, сформировать управляющие воздействия для рулей высоты и тяги двигателей, помогающие пилоту удержать самолёт на глиссаде в заданном режиме полёта. В условиях данной задачи предполагалось, что измеряемые сигналы искажены случайными возмущениями с неизвестными параметрами распределений, профиль ветра неизвестен (но энергия его конечна), а математическая модель летательного аппарата содержит неопределённые параметры. Для решения данной задачи были применены методы разрабатываемой в Институте анизотропийной теории стохастического робастного управления и опробованы различные критерии качества (H_2-норма, H_∞-норма и анизотропийная норма замкнутой системы, характеризующие влияние атмосферных возмущений, шумов измерений и параметрической неопределённости на регулируемые величины – отклонения воздушной скорости и высоты от заданных значений). Минимизация критериев качества гарантирует удержание самолёта на траектории глиссады и сохранение желаемого режима полёта при воздействии потенциально опасных ветровых возмущений.



Александр Петрович Курдюков



Михаил Михайлович Чайковский



Андрей Михайлович Шевченко

Важным теоретическим направлением исследований является разрабатываемый в Институте энергетический подход к управлению движением в пространстве (к.т.н. А.М. Шевченко). Основой этого подхода является уравнение баланса энергий в системе «летательный аппарат–силовая установка–внешняя среда». Разработана модифицированная энергетическая система управления полётом с возможностями адаптации к изменению условий полёта. Модифицированная система управления продемонстрировала явные преимущества перед традиционными системами для широкого класса самолётов в диапазоне масс от 10 тонн до 200 тонн (В.Г. Борисов, к.т.н. А.М. Чесноков). Результаты внедрены в Московском институте электромеханики и автоматики (МИЭА) при про-

ектировании систем управления полётом самолётов Ту-154, Ту-204, Ил-96, Ан-148, Су-80 и Ан-70.

Управление в автоматическом и ручном режиме на этапе взлёта воздушного судна существенно зависит от его массы. Для исключения ошибочных или сознательно искаженных значений загруженной массы коммерческой нагрузки или заправленного топлива разработан метод объективного контроля массы самолёта, основанный на анализе полной энергии подвижного объекта. Основное достоинство энергетического метода вычисления массы состоит в том, что метод хорошо работает с сильно зашумлёнными измерениями, содержащими систематические погрешности. Это объясняется тем, что в вычислениях используются измерения на интервале или приращения измерений. Метод предназначен для мониторинга этапа разбега перед взлётом в реальном времени. Он был протестирован по записям бортовых самописцев и продемонстрировал достаточную надёжность для выявления случаев с некорректным заданием массы (В.Г. Борисов).

ИПУ РАН был привлечён к участию в программе по модернизации вертолёта КА-27 после приостановки полётов в связи с многочисленными инцидентами, обусловленными потерей пилотом пространственной ориентации при полётах над морем (2004–2006 гг.). Работы проводились в тесном контакте с сотрудниками ОКБ «Камов». Было принято решение о необходимости улучшения ситуационной осведомлённости пилота путём установки в поле зрения электронных индикаторов с развитой символикой, помогающей интуитивному восприятию рекомендованных действий для выхода из критических режимов полёта. Один из индикаторов встроен в состав пилотажного стенда и установлен в кабине реального вертолёта. Тестирование проводил заслуженный лётчик-испытатель СССР Н.П. Бездетнов. По результатам летных испытаний индикатор получил положительную оценку и был рекомендован к внедрению на борт.

Неизменной тенденцией развития гражданской авиации является повышение интенсивности перевозок и расширение эксплуатационного диапазона полётов. В этой связи вопросы безопасности воздушных перевозок приобретают первостепенное значение. Мировая статистика авиационных происшествий показывает, что более половины всех инцидентов происходит на этапах взлёта и посадки, а из них почти 70 % – по причине «человеческого фактора». С целью снижения стрессовых нагрузок и снижения предпосылок для ошибочных или несвоевременных решений экипажа ведутся работы по улучшению информационной поддержки экипажа и формированию дружественной среды взаимодействия экипажа с приборным оборудованием (А.М. Шевченко, Г.Н. Начинкина).

Энергетический подход был распространен на наземные режимы движения самолётов, где помимо аэродинамических сил возникают механические тормозящие силы со стороны шасси. На основе энергетического подхода разработана методика прогнозирования возможности достижения терминальных состояний на наиболее критических наземных участках траектории. На этапе взлёта – это состояние пролёта над высотным препятствием с необходимой скоростью устойчивого полёта. На этапе посадки – это состояние останова. Проведение статистических испытаний алгоритмов прогнозирования с моделью самолёта ТУ-204 показало высокую точность и достоверность прогноза.

Вопросы совершенствования системы управления воздушным движением (УВД) остро стоят перед мировым сообществом в силу непрерывного роста интенсивности воздушного движения. Для решения этих вопросов ведутся исследования в двух основных направлениях. Особое внимание уделяется разработке инструментов повышения эффективности работы существующей системы УВД. Однако более долгосрочные научно-исследовательские работы ориентированы на развитие методов децентрализованного УВД.

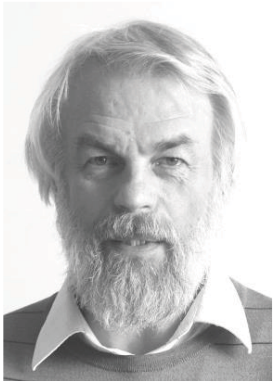
Современные схемы УВД направляют воздушное движение вдоль небольшого количества фиксированных маршрутов, что позволяет минимизировать конфликты. Перспективная концепция УВД – «свободный полёт» – не предполагает централизованного управления. В этом случае части воздушного пространства будут резервироваться динамически децентрализованным способом с использованием компьютерных коммуникаций, авиакомпаниям и пилотам будет предоставлена бóльшая свобода при выборе траектории полёта из одного аэропорта в другой. При отказе от фиксированных маршрутов и введении концепции «свободный полёт» прогнозируется сокращение операционных расходов авиакомпаний за счёт выбора более экономичных траекторий, сокращения времени полёта. Однако будет увеличиваться разнообразие траекторий и снижаться их предсказуемость, что существенно увеличит возможность возникновения конфликтов между воздушными судами. На практике переход к концепции децентрализованного группового управления «свободный полёт» возможен после оснащения всех воздушных судов перспективными бортовыми процедурами, предназначенными для предотвращения и разрешения конфликтов.

Одним из важных направлений работ в последние годы является разработка методов, моделей и алгоритмов управления движущимися объектами с учётом факторов конфликтности для систем поддержки принятия решений экипажами летательных аппаратов. Проводятся исследования и разработка методов и алгоритмов управления маневрированием самолёта на малой высоте в условиях многокритериальности, неопределённости и риска, связанных со сложным рельефом местности, погодными факторами и воздушным движением. Совместно с Центральным аэрогидродинамическим институтом им. Н.Е. Жуковского предложена методика использования бортовой модели самолёта для прогноза его движения, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций и определения реализуемости траекторий, сгенерированных для разрешения конфликтов.

В настоящее время ведутся работы по:

- автоматизации управления потоками воздушного движения;
- исследованию и развитию теории, методов и алгоритмов планирования и регулирования воздушного движения;
- построению различных стратегий нахождения оптимальных (или близких к оптимальным) решений в задаче оптимизации потоков воздушного движения при различных критериях с учётом неопределённости;
- разработке программных средств для построения оптимальных очередей на посадку с целью обеспечения безопасного, упорядоченного и ускоренного воздушного движения, уменьшения издержек авиакомпаний и пассажиров, уменьшения негативного влияния на окружающую среду.

Совместно с Государственным научно-исследовательским институтом авиационных систем предлагаемые модели, методы и алгоритмы испытываются на



Валентин Григорьевич Лебедев



Елена Львовна Кулида

комплексном исследовательском стенде управления воздушным движением (к.т.н. Е.Л. Кулида, к.т.н. Н.А. Егоров, д.т.н. В.Г. Лебедев).

Разработаны и апробированы методики, модели и алгоритмы для поддержки принятия решений при предварительном проектировании летательных аппаратов в условиях неопределённости. Предложенная методика решения задач оптимального проектирования используется для создания многокритериальных моделей оптимизации при наличии входных и проектируемых параметров с эпистемической и алеаторной неопределённостью. Данные модели позволяют обеспечить достижение усреднённых значений характеристик летательного аппарата, низкую чувствительность целевых функций к изменению входных и проектируемых параметров, надёжность и допустимость полученных решений.

Полученные теоретические и прикладные результаты предназначены для повышения эффективности длительного итерационного процесса проектирования, требующего автоматизации решения многокритериальных оптимизационных задач большой размерности. Использование данных результатов позволяет избежать ситуации, когда необоснованное назначение экспертами детерминированных значений параметров летательного аппарата при предварительном проектировании может привести к неэффективным или некорректным решениям. Полученные результаты проверялись совместно с сотрудниками Центрального аэрогидродинамического института им. Н.Е. Жуковского (д.т.н. Г.С. Вересников, к.т.н. Л.А. Панкова, к.т.н. В.А. Пронина.).



Георгий Сергеевич Вересников



Валерия Александровна Пронина



Людмила Александровна Панкова

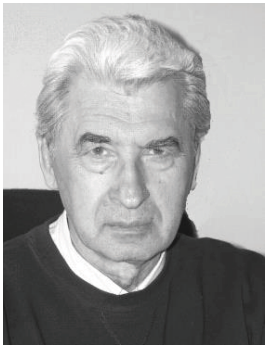
3.3. Автоматизация АПЛ Проекта 705



Вадим Александрович Трапезников

В 1958 г. академик А.П. Александров предложил В.А. Трапезникову принять участие в конкурсе предэскизных проектов глубокой комплексной автоматизации нового класса атомных подводных лодок (АПЛ) – истребителей подводных и надводных кораблей вероятных противников. После обсуждения этого предложения с рядом ведущих сотрудников Института и консультаций с руководством организаций, привлечённых к разработке проекта АПЛ, Вадим Александрович принял решение участвовать в конкурсе и выиграл его.

Постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР Институту было поручено научное руководство автоматизацией АПЛ и проведение исследований, необходимых для поддержки процесса проектирования. Привлечение академической организации к новому и ответственному проекту было не случайным. На начальном этапе развития атомного флота именно учёные определяли пути развития этого вида вооружения. Упомянутым Постановлением все работы по новой АПЛ возглавил акад. А.П. Александров, по ядерной энергетической установке – акад. А.И. Лейпунский, по автоматизации – акад. В.А. Трапезников. Главным конструктором корабля был назначен Г.М. Русанов, высокообразованный и смелый инженер-подводник (ЦКБ «Малахит»).



Борис Григорьевич Волик

Институту проблем управления предстояло взяться за решение ответственной, трудной и чрезвычайно объёмной прикладной проблемы. Для этого под общим руководством В.А. Трапезникова были объединены усилия учёных многих лабораторий Института. Заместителем Вадима Александровича по всем вопросам, связанным с разработкой проекта новой АПЛ, был назначен Борис Григорьевич Волик.

Традиционное, эволюционное улучшение свойств нового корабля не давало требуемого уровня его тактико-технических характеристик. Тактические схемы применения лодок-истребителей, в отличие от лодок-ракетоносцев, требуют активных действий по отношению к силам противника для получения необходимой информации и последующего применения оружия. Этим требованиям можно было удовлетворить, только существенно повысив тактико-технические характеристики корабля, и в первую очередь точность и оперативность принятия решений, причём обязательно в сравнении с аналогичными характеристиками сил вероятного противника.

Оценки параметров систем и лодки в целом показали, что наряду с выполнением более жёстких технических требований необходимо примерно в три раза сократить численность личного состава в сравнении с близкими по объёму установленного оборудования торпедными лодками. Потребовались новые предложения буквально по всем системам и видам оборудования, начиная с корпуса и винта корабля. В результате напряжённой работы многих организаций и предприятий в 1970 г. ВМФ был передан для испытаний опытный образец лодки, который удовлетворял заданным тактико-техническим требованиям.

Решение технических проблем и разработки по информационным и управляющим системам первой в мире комплексно автоматизированной подлодки представляют несомненный исторический интерес.

Труднее всего далось решение проблемы сокращения численности личного состава корабля. Было намечено два пути. Первый заключался в увеличении степени автоматизации операций принятия и исполнения решений, как сказали бы сегодня – в повышении уровня интеллектуализации управляющих систем. Второй путь – увеличение числа технологически связанных между собой объектов, которыми можно управлять одновременно при посредстве одной управляющей команды человека-оператора.

Возможности реализации первого пути в 60-е годы прошлого столетия были не столь велики, как сегодня. Но они были и в основном сводились к тому, чтобы:

- более эффективно организовать рабочие места операторов;
- более полно автоматизировать системы предаварийной защиты и выполнения оконечных операций (операций ввода в номинальные режимы и останова технологического оборудования);
- наладить контроль правильности функционирования, выполнения диагностики и документирования состояния систем, оборудования и регистрируемых на борту лодки событий;
- создать управляющие системы с более эффективной структурой.

Задача выбора оптимального соотношения между автоматизированными операциями переработки информации и принятия решений и операциями, выполняемыми человеком-оператором вручную, была и остаётся одной из труднейших. Чем сложнее объект, тем труднее задача. Необходимость передачи человеку-оператору непосредственного решения тех или иных проблем, выполнения тех или иных операций обусловлена уникальной способностью человека действовать интуитивно в условиях значительной информационной и событийной неопределённости.

Конечно, такая способность оператора проявляется только тогда, когда он хорошо обучен, а организация его рабочего места удовлетворяет высоким требованиям. При выполнении работ по Проекту 705 решения отыскивались, главным образом, экспериментально – на полунатурных стендах. Создавались модификации реальных пультов управления, а на электронных моделях воспроизводились все варианты режимов функционирования систем и оборудования, включая возникновение предаварийных ситуаций и вероятные аварии. В результате подобного моделирования и при учёте возникающих в процессе эксперимента стрессовых состояний определялось минимально необходимое число операторов. Одновременно реша-

лись задачи профессионального отбора операторов по «скорости» мышления и выбора технических средств визуализации и характера представления поступающей к операторам информации.



Атомная подводная лодка Проекта 705

Вопросы оценки действий операторов в стрессовых ситуациях и по сей день можно считать открытыми. Специалисты подобного профиля проходят многолетнюю профессиональную выучку, но, несмотря на это, 70% аварийных ситуаций возникают по их вине. В Проекте 705 наибольшее число операторов было задействовано в контурах управления тактическими и боевыми действиями лодки. Это члены так называемого командирского боевого расчёта (КБР), в который входят командир корабля, штурман, гидроакустик и другие специалисты. Организация коллективной работы КБР относится к классу задач координированного управления. Варианты её наилучшего решения определялись в основном с помощью работы на специализированных стендах.

При минимизации числа операторов важную роль играли вопросы выбора структуры систем подлодки, средств сжатия информации и способов организации группового управления. Предпочтение было отдано иерархическим структурам. Иерархия – древнейший способ управления многообъектными комплексами. Однако главная задача, которая возникает при формировании иерархической структуры: выбор числа уровней иерархии и числа управляемых объектов нижестоящего уровня, подчинённых конкретному объекту вышестоящего уровня (задача комплексирования), – не имеет строгого теоретического решения. Известны лишь некоторые характеристические свойства, например, увеличение числа уровней упрощает алгоритмы координации действий объектов нижестоящих уровней, но влечёт за собой снижение быстродействия и надёжности всей системы.

Анализ структуры управляемых технологических комплексов корабля показал, что для большинства из них минимальное число связей между уровнями связано с выбором трёхуровневой структуры управления. Нижний уровень включал в себя средства получения информации и её первичной обработки (фильтрация и нормирование), регуляторы, системы логического управления пусками и остановами объектов и, наконец, средства обмена информацией в пределах уровня. Средний уровень образовывали средства формирования заданий нижнему уровню, предаварийной защиты и реконфигурации структуры нижнего уровня, обобщения информации, передаваемой на верхний уровень. Верхний уровень сводился к рабочим местам операторов, органам резервного дистанционного управления средствами нижних уровней и системе автоматической регистрации событий («чёрный ящик»). При этом нижний уровень систем компоновался из условия обеспечения максимально возможной надёжности его средств при условии сохранения допустимого уровня качества управления.

Автоматизация сбора информации о состоянии оборудования и аппаратуры, её обобщение и сжатие перед представлением оператору вкупе с групповыми коман-

дами управления в корне изменили не только характер работы самих операторов, но и внешний вид корабельных пультов управления. Теперь внимание операторов сосредотачивалось только на изменениях режимов работы систем – событиях, и лишь для уточнений могли вызываться численные значения координат и параметров. Выбранная организация информационных каналов повышала точность и сокращала время принятия решений. Для реализации группового управления были введены специальные команды управления целыми режимами функционирования объектов. Затем с помощью средств логического управления эти команды автоматически развёртывались во времени, связывались с событиями и преобразовывались в индивидуальные команды, подававшиеся на исполнительные органы и локальные системы.

Изучая динамику процессов в атомной энергетической установке, в комплексе пространственного маневрирования и в других системах корабля, сотрудники Института выполнили колоссальный объём исследований. В контакте с организациями-соисполнителями отрабатывались математические модели процессов, синтезировались законы управления, формировались модели исходных событий, которые могли привести к авариям, и их последующего развития, изучались варианты действия управляющих систем по компенсации возможных последствий. В процессе работы над проектом применялись разнообразные аналитические методы. Однако главным инструментом было моделирование на разработанных в нашем Институте аналоговых вычислительных машинах (ЭМУ-10). Необходимость моделирования диктовалась значительным числом нелинейностей и высочайшей многомерностью (многосвязностью) исследуемых процессов. Модели некоторых комплексов, например, энергетической установки, занимали около трёхсот решающих усилителей. Выполненные исследования динамики позволили не только синтезировать алгоритмы работы управляющих систем, но и выявить существование ряда доселе неизвестных и опасных процессов.

Следует особо отметить ту роль, которую Проект 705 сыграл в развитии исследований по проблемам анализа и обеспечения надёжности и живучести автоматизированных комплексов. В проектной документации того времени разделы, посвящённые анализу надёжности, не предусматривались. Именно Проект 705 стал прецедентом, сделавшим обязательным осуществление предварительного количественного анализа надёжности корабельных систем. Для этого пришлось выполнить немалый объём аналитических и организационных работ. Институт выпустил все необходимые руководящие материалы, разработал методы расчёта надёжности, предложил типовые модели оценки надёжности систем, подготовил справочник исходных данных для определения интенсивностей отказов всех технических компонент. Сотрудники Института организовали и провели обучение работников проектных организаций, выполнили предварительный расчёт и анализ надёжности всех разрабатываемых систем. В те времена бытовало недоверие к количественным оценкам надёжности, однако все участники работ над Проектом 705 воспринимали результаты предварительного анализа надёжности как конструктивный и полезный способ выявления слабых мест, позволяющий добиться так называемой надёжностной равнопрочности основных систем.

Таким образом, работы над Проектом 705 стимулировали развитие теории и создание новых оригинальных методов анализа надёжности и живучести систем сложной структуры. Были разработаны принципы и способы введения избыточности (резервирования) и подсистем восстановления работоспособности в специальным образом расклассифицированную аппаратуру; выполнена унификация элементной базы и конструктивов аппаратуры, предложены методы контроля работоспособности и обеспечения ремонтопригодности. Значительный эффект по показателям качества и надёжности управления дала предпринятая по инициативе Института разработка унифицированных для всех систем лодки блоков логического управления (около 80 % всей аппаратуры) и аппаратуры информационных каналов (датчиков, источников питания, вторичных приборов усиления, фильтрации и нормализации сигналов).

Чтобы подчеркнуть всю сложность проблем обеспечения надёжности, приведём один пример. В соответствии с требованиями Минэлектронпрома интенсивность отказа выпускаемых отечественной электронной промышленностью комплектующих элементов должна была составлять величину порядка 10^{-3}–10^{-4} отказов/ч, а наработка на отказ – около 2 тыс. ч. При таких нормативах и разумных запасах резервной аппаратуры (ЗИПа) на борту лодка не смогла бы обеспечить номинальной продолжительности автономного плавания, то есть должна была постоянно держаться ближе к базе для своевременного пополнения ЗИПа. Выход из положения нашёл В.А. Трапезников, предложивший командованию флота принять нормативный документ, в соответствии с которым гарантировался ресурс наработки до 10–15 тыс. ч и интенсивность отказа на уровне зарубежных аналогов (10^{-5}). Разумеется, это вызвало острую дискуссию, тем не менее флотское начальство предложение Вадима Александровича приняло.

На плечах Трапезникова – научного руководителя всех разработок по системам управления – лежала колоссальная ответственность. Вадим Александрович отлично знал истинное положение дел в области надёжности по Проекту 705. Впрочем, не хуже он разбирался в психологии и принципах работы большинства советских руководителей: не обещай лишнего – меньше будет шишек. Экономические механизмы тогда не работали. Поэтому результативность и качество выполнения работ зависели от двух факторов: страха перед неудачей и чувства личной ответственности. Последнего директору нашего Института было не занимать.

Результат по надёжности получился таким. Элементная база проходила специальный отбор, была введена прогрессивная технология изготовления печатных плат, и, по данным эксплуатации, фактический ресурс электронных блоков достиг 30–40 тыс. ч.

В связи со значительным сокращением личного состава особо жёсткие ограничения были установлены на объёмы трудозатрат по техническому обслуживанию и восстановлению работоспособности систем. Конечно, при этом были использованы все известные результаты отечественных и зарубежных исследователей в области теории надёжности: методы и схемы контроля, диагностики, задачи оптимального резервирования. Впрочем, труднее всего оказалось решить организационные вопросы. Мощнейшим рычагом минимизации упомянутых затрат на техобслуживание всегда являлась унификация элементной базы, конструктивов и других техни-

ческих решений. Однако системы подлодки создавались десятками предприятий страны, которые относились к разным министерствам и работали по разным нормативным документам. Общесоюзная стандартизация была ещё слаба, а рынок, как эффективный механизм стандартизации, отсутствовал. Поэтому проблема решалась «силовыми» методами – на уровне высокого руководства (в частности, научного) и Совета министров СССР. Участие в Проекте 705 было престижным, поэтому руководители проекта организовывали конкурсные разработки. Так, конструирование блоков логического управления было заказано сразу четырём организациям (лучшей была признана разработка СПКБ ЮВМА, г. Ростов-на-Дону).

Немало сил было затрачено на комплексную отладку систем. Как правило, процесс отладки начинали уже после монтажа всей аппаратуры на объекте. Это приводило к значительным потерям времени и было сопряжено с потенциальным риском аварий. В дело вмешался Вадим Александрович, который решительно настоял на необходимости создания отладочных стендов, воспроизводящих с помощью математических моделей режимы функционирования технологических комплексов (главной энергетической установки, комплекса маневрирования корабля в пространстве, электроэнергетической системы, боевой информационно-управляющей системы и других систем). Стенды изготовили, и процедура ввода в действие и предварительной отладки штатных систем была значительно упрощена.

Существенное сокращение численности операторов сопровождалось специальными мерами по усилению защиты от их ошибочных действий, что оказалось возможным только благодаря применению логических средств автоматизации нового поколения.

Проект АПЛ 705 был успешно завершен к 1971 г. Подводная лодка получилась уникальной. Это был быстроходный морской истребитель со скоростью хода порядка 40 миль/час (около 74 км/час). О лодке заговорили с опаской многие зарубежные СМИ.

Подводные лодки серии 705, названные на Западе «Альфами», могли часами висеть на хвосте у натовских подводных лодок, не позволяя им ни оторваться, ни контратаковать, благодаря преимуществу в маневренности и скорости. Уникальные характеристики АПЛ Проекта 705 были отмечены в книге «Рекордов Гиннеса»: высокая скорость и маневренность позволяла ей на полном ходу делать разворот на 180 градусов, на который уходило всего 42 секунды.

Опыт автоматизации АПЛ Проекта 705 кардинально изменил отношение руководства флота к проблеме комплексной автоматизации кораблей. Господствовавшее среди высшего офицерства недоверие к средствам автоматики сменилось на адекватное отношение к автоматизации как к одному из важнейших средств обеспечения боеготовности кораблей, включая устойчивость их динамики.

В результате Институт завоевал высокий авторитет у судостроительных организаций.

Какие же выводы можно сделать из рассказа о работах по Проекту 705?

Во-первых, вывод о том, насколько велика роль эффективных организационных механизмов и насколько значимо правильное понимание руководителями и исполнителями всей важности работы. Вадиму Александровичу удалось собрать

коллектив единомышленников, создать атмосферу сотрудничества, привить людям чувство предельной ответственности (чему сам он был ярким примером). В работе, которая шла как общеинститутская тема, участвовали примерно 10 лабораторий. Весь коллектив исполнителей был разбит на группы. Состав каждой группы формировался не по лабораторному, а по тематическому принципу.

Во-вторых, была выбрана правильная политика сотрудничества с организациями-соисполнителями по принципу «учимся сами – учим других». Это позволило добиться взаимного доверия и стабильного творческого сотрудничества со специалистами смежных организаций. Наиболее тесно Институт работал с проектными и научно-исследовательскими организациями Ленинграда, Москвы, Обнинска и Нижнего Новгорода.

В-третьих, было введено неукоснительно исполнявшееся правило обязательного обмена результатами исследований всех организаций-соисполнителей. За этим следовали обсуждение, подготовка проекта решения и утверждение этого решения соответствующим научным руководителем.

В-четвёртых, конкурсная, конкурентная организация разработок основных технических решений, особенно средств автоматизации, оказалась крайне действенным механизмом.

При этом Институт осуществлял научное сопровождение всех стадий испытаний опытной подлодки и первого её серийного образца.

Значительный вклад в автоматизацию АПЛ Проекта 705 внесли В.А. Трапезников, Д.И. Агейкин, В.Ю. Кнеллер, С.И. Бернштейн, Б.Г. Волик, М.Х. Дорри, М.М. Соловьёв, Г.Г. Гребенюк, С.М. Доманицкий, Г.Э. Острецов, М.Г. Тахтамышев, Б.Я. Коган, Ф.Б. Гулько, В.М. Дворецкий, Г.Г. Молчанов, А.И. Попов, В.П. Силанчев, А.Ф. Волков, В.А. Ведешенков, В.Д. Зенкин, Г.К. Сорокин, Г.Б. Семёнов, А.В. Лебедев, Т.А. Турковская, И.Е. Декабрун, Н.А. Шавыкин.

Работа была отмечена правительственными премиями и наградами. Среди них: Ленинская премия (В.А. Трапезников), Государственная премия (Д.И. Агейкин, А.Ф. Волков), орден Октябрьской Революции (Д.И. Агейкин), орден Трудового Красного Знамени (С.И. Бернштейн, Б.Г. Волик), орден «Знак Почёта» (В.А. Ведешенков, И.Е. Декабрун, Г.Э. Острецов), медаль «За трудовую доблесть» (Ф.Б. Гулько, Г.Г. Молчанов), медаль «За трудовое отличие» (М.Х. Дорри, М.Г. Тахтамышев).

3.4. Управление морскими подвижными объектами

Трудно переоценить ту роль, которую играет автоматизация управления морских подвижных объектов (МПО) для обеспечения эффективного функционирования кораблей в нормальных и аварийных ситуациях. Управляющие системы фактически являются «мозгом» корабля. Именно в них формируются сигналы, благодаря которым удается достичь поставленных целей посредством выполнения опреде-

лённой последовательности операций. В процессе управления, как правило, активно участвует человек-оператор, и роль его в этом процессе немаловажна. Человека от машины отличают важные способности: умение оценивать ситуацию по многим косвенным признакам, накапливать бесценный опыт управления, разумно изменять цели управления и, благодаря своим знаниям, принимать нетривиальные решения. Однако, увы, в стрессовых ситуациях человек не всегда способен принимать оперативные решения достаточно быстро. Операторы могут совершать ошибки, порой приводящие к трагическим последствиям, и тогда говорят, что в случившейся беде виноват «человеческий фактор». Впрочем, анализ показывает, что ошибки делают не только операторы, капитаны и командиры, принимая неправильные решения. Во многих случаях ответственность ложится и на проектировщиков управляющих систем, которые не смогли организовать взаимодействие человека с аппаратно-программными средствами МПО должным образом.

На этапе развития комплексной автоматизации МПО Институт проблем управления сыграл существенную роль в формулировке целей и задач автоматизации, а также выборе методов их реализации. Они были развиты в процессе построения систем управления и автоматизации атомной подводной лодки (АПЛ) Проекта 705.

После окончания Проекта 705 работы по разработке систем управления МПО были продолжены в лабораториях под руководством С.И. Бернштейна, Б.Г. Волика, М.Х. Дорри и в секторах под руководством Г.Э. Острецова и С.К. Даниловой. В эту работу активно включились многие сотрудники, ранее работавшие над созданием систем управления ПЛ и атомоходами (В.Г. Борисов, Г.Г. Гребенюк, С.М. Никишов, Н.Н. Тарасов, М.Г. Тахтамышев, А.А. Рощин, А.И. Шахорин).



Генрих Эразмович Острецов

По инициативе академика В.А. Трапезникова в 1969 г. был организован Межведомственный совет по управлению движением морских судов и специальных аппаратов. Основная задача, которая была поставлена перед Межведомственным советом, – координация научно-производственной деятельности в СССР в области автоматизации управления подвижными объектами. Бессменным секретарем совета являлся Г.Э. Острецов, ставший впоследствии заслуженным изобретателем России. Он организовал 40 Всесоюзных (Всероссийских) конференций, по результатам которых под его редакцией выпущено 40 сборников докладов. В ежегодных конференциях, которые проходили в разных городах страны, принимали участие специалисты более десятка ведущих организаций и предприятий Рос-



ИПУ РАН на 40-й конференции, прошедшей в Крыму

сии и обсуждались насущные проблемы автоматизации управления МПО.

По постановлениям Правительства СССР выполнен цикл работ по развитию идей автоматизации новых проектов кораблей. Разработана концепция иерархического построения и функционального взаимодействия подсистем управления. Выполнены исследования по улучшению маневренных характеристик надводных кораблей и подводных лодок. Дано теоретическое обоснование возможности повышения скрытности АПЛ за счёт коррекции законов управления механизмами. Работа по скрытности была доведена до практических испытаний на объекте (Г.Г. Гребенюк, С.М. Никишов, А.И. Шахорин, И.М. Рудько).

Ряд сотрудников Института привлекли для научного руководства процессом автоматизации новой серии атомных ледоколов («Арктика», «Сибирь»), а также новой серии танкеров и контейнеровозов (см. описание деятельности лаб. № 49 Института в томе «ИПУ РАН: лаборатории»).

С появлением современных вычислительных средств многие функции, ранее выполняемые человеком, удалось передать интеллектуальным системам управления. Информацию стали структурировать и предъявлять в наглядном и удобном виде, что упростило процесс принятия рациональных решений.

Новая техника требовала иной технологии разработки систем, базирующейся на широком применении средств автоматизированного проектирования и моделирования, позволяющих создавать рабочие программы для микропроцессоров и управляющих ЭВМ. Для этого потребовался тщательный анализ переходных процессов на стадиях разработки алгоритмов и программ функционирования регуляторов и логических элементов. Учитывались такие факторы, как квантование по времени и уровню, такт опроса датчиков, резервирования, загруженности магистралей и т.п. Существующие программные продукты не могли полностью удовлетворить проектировщиков систем управления. Новая технология требовала создания и совершенствования программного обеспечения.

Под руководством С.К. Даниловой и В.Г. Борисова были разработаны полномасштабные стенды для моделирования и исследования МПО.

В Институте созданы многие системы автоматического управления техническими средствами подводных лодок и других перспективных МПО. При этом решён ряд теоретических вопросов, связанных с расчётом динамических систем на вычислительных машинах и позволяющих обосновать иерархическое построение инструментальных средств автоматизации динамического анализа и расчёта систем управлении МПО. Предложены процедуры и алгоритмы исследования устойчивости, моделирования, оптимизации параметров и т.п. Усовершенствована технология разработки полномасштабных стендов, основанная на виртуальных моделях. Такие модели позволяют на ранних стадиях проектирования создавать алгоритмы управления и анализировать взаимодействие подсистем. Созданы теоретические основы построения специализированных инструментальных программных средств визуального интерфейса, опирающиеся на: блочно-иерархическое структурирование задач; объединение расчётов непрерывных и логических процессов, образное представление объектов; организацию многоуровневого взаимодействия блоков между собой и с системой; взаимодействие инструментальной системы с базами

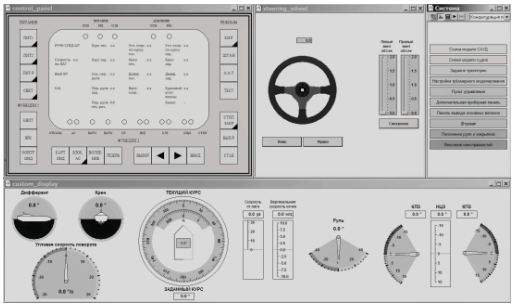
данных и модулями, которые имитируют исследуемые объекты и помогают легко реконструировать решаемую задачу.

Теоретические работы легли в основу разработки ряда программных комплексов («Расчёт динамических управляющих систем», «Экспресс-Радиус») для анализа и синтеза систем управления. Эти комплексы нашли практическое применение в ряде НИИ и вузов страны.



Разработчики программного комплекса РДС Манучер Хабибуллаевич Дорри (справа) и Александр Алексеевич Рощин

В настоящее время создан новый программный продукт РДС (расчёт динамических систем), который по ряду характеристик превосходит известные отечественные и зарубежные аналоги (типа известных комплексов PC-MATLAB, LabView). Его описание приведено в двух монографиях, изданных в 2018 г. Комплекс РДС дает возможность строить полномасштабные исследовательские стенды для анализа поведения МПО и других сложных объектов. Специализированные стенды в инструментальной среде РДС были построены для исследования алгоритмов управления подводными лодками ОАО ЦКБ МТ «Рубин» и судном на подводных крыльях ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева».





Интерактивная модель пульта управления «Комета-120М» и ходовые испытания судна в Крыму в 2018 г.

Пакет РДС хорошо приспособлен к решению динамических и логических задач и обладает такими возможностями, как визуальное создание иерархических блок-схем систем управления, задание логики работы блоков систем, групповое изменение характеристик блоков и т.п. Эти свойства позволили использовать пакет для совершенно нетрадиционных, нетипичных для него объектов, например, при построении мультиразмерной информационной модели теплоснабжения г. Москвы, а также в задачах моделирования бизнес-процессов и т.п.

Как показали исследования, выполненные в области построения систем управления движением и отображения процессов на пультах операторов, использование

РДС позволяет существенно сократить процесс проектирования и придавать системам управления многие новые качества не только в плане новизны законов управления движением, но и при комплексировании с энергетической системой и другими подсистемами корабля.

Программный комплекс помог выполнению исследований, в которых рассматривалась задача выбора оптимального сочетания используемых технических средств МПО. При этом для обеспечения требуемой точности стабилизации в различных режимах действия внешних возмущений, а также при формировании алгоритмов управления выбранными средствами учитывались ограничения по мощности и быстродействию. Эти алгоритмы годятся не только для нормальных режимов работы, но и в аварийных ситуациях или в режиме движения подводной лодки (ПЛ) без хода. Для переходов ПЛ по глубине без хода предложены новые оригинальные алгоритмы управления.

Анализируя состояние автоматизации морских подвижных объектов по материалам отечественных и зарубежных публикаций можно выделить следующие тенденции и направления развития автоматизированных систем управления:

- переход на архитектуру сетевых решений;
- развитие технологии разработки и отладки алгоритмического и программного обеспечения бортовых управляющих комплексов;
- использование в управлении методов искусственного интеллекта;
- использование для отображения информации мониторов и графических станций, управление с помощью визуального интерфейса;
- включение в управление информации от спутниковых навигационных систем;
- развитие методов сжатия информации и наглядного отображения ситуаций на основе методики выбора достоверной информации по анализу всех поступающих сигналов;
- существенное развитие информационной поддержки операторов центрального пульта управления движением;
- комплексный подход к управлению, включающий навигацию, энергетику и управление движением.
- совершенствование алгоритмов маневрирования ПЛ без хода, а также маневров по скрытности и уходу в безопасные зоны;
- совершенствование программ автоматического противоаварийного управления.

По всем этим направлениям в Институте сегодня ведётся активная работа.

Автоматизация систем управления МПО стала неотъемлемой частью проектов современных кораблей. В то же время она и сама иногда порождает ряд проблем, связанные с недостаточной продуманностью и надёжностью систем управления. Вот почему решению в настоящее время проблемы безотказности придают большое значение. При этом Институтом используются самые современные достижения в области структурных модификаций систем управления и создании надёжной элементной базы.

3.5. Групповое управление в условиях неполной информации

Успешная работа Института над Проектом 705 создания первой в мире автоматизированной подводной лодки стимулировала большой интерес ВМФ СССР к использованию научного потенциала ИАТа (ИПУ) для постановки и решения новых задач повышения эффективности существующих и перспективных образцов вооружения и военной техники. В частности, в начале 70-х годов были поставлены задачи, связанные с оптимизацией применения торпедного оружия в условиях постановки противником мобильных ложных целей. «Побочным» продуктом исследования этих задач должны были стать рекомендации по использованию ложных целей нашими лодками для срыва торпедных атак и слежения со стороны вероятного противника.



Евгений Петрович Маслов

Руководство Института приняло решение организовать эти работы на базе лаборатории «Управления по неполным данным». Возглавил работы Е.П. Маслов (ушёл из жизни в начале 2019 г.), ученик А.А. Фельдбаума. В это время лаборатория пополнилась выпускниками Физтеха и МГУ им. М.В. Ломоносова (Е.Я. Рубинович, В.С. Железнов, М.Н. Иванов), которые сразу же с энтузиазмом включились в работу вместе с молодыми сотрудниками Т.Г. Абрамянц и В.К. Ольшанским. Чуть позже к ним присоединились аспиранты Института И.И. Шевченко и Н.В. Линдер. Исследования проводились по классическому сценарию: изнурительные беседы с заказчиком (чтобы уяснить, что же ему, собственно, нужно); математическая формализация проблемы; решение поставленных оптимизационных и дифференциально-игровых задач; алгоритмизация и численное моделирование. Основная трудность при отработке этого сценария возникла на этапе математической формализации. Дело в том, что подобные задачи по своей сути требовали дифференциально-игрового подхода, однако в теории дифференциальных игр задачи с ложными целями на тот момент никем не ставились и не рассматривались. Пришлось «начинать с нуля».

Первым делом следовало понять, какие именно классификационные признаки, присущие истинной цели, имитирует ложная цель, насколько достоверной (в силу чисто технических возможностей) может быть подобная имитация в зависимости от состояния окружающей среды и других объективных причин. Вторая проблема – выбор критериев оптимальности преследования-уклонения при наличии мобильных ложных целей с учётом информационных и динамических возможностей преследователя.

Было предложено моделировать противодействие подвижных объектов дифференциально-игровыми и оптимизационными задачами преследования-уклонения групповой цели и дифференциально-игровыми и оптимизационными задачами по-

иска активно противодействующих подвижных объектов (поиск в условиях конфликта), а также в условиях искусственно организованной неполноты информации. Подобные задачи возникают в широко распространённых на практике ситуациях, когда одна из участвующих в конфликте сторон использует для срыва действий противника средства радиоэлектронного противодействия. Искусственная неполнота информации организуется, в частности, путём постановки ложных целей, имитирующих характеристики основного объекта, и/или подавлением каналов наблюдений.

В то время на вооружении флотов ведущих стран мира имелось два типа торпед: автономные (с примитивными элементами искусственного интеллекта на пороговых логических схемах) и телеуправляемые (управляемые по проводу телеоператором непосредственно с борта атакующей подводной лодки). Первые использовались по принципу «выстрелил и забыл», поэтому критерием их эффективного применения можно считать промах по истинной цели. Для телеуправляемых торпед критичным является выработка длины линии телеуправления или энергоресурса, а значит – времени преследования цели. В силу этих причин в качестве критериев оптимальности предлагалось использовать привычные в теории дифференциальных игр критерии типа «промах» или «время». Выбор того или иного критерия диктуется конкретной тактической ситуацией. В зависимости от тактической ситуации дифференциальные игры преследования-уклонения с ложной целью впервые было предложено разделить на два класса: игры *совместного* преследования и игры *поочередного* преследования.



Евгений Яковлевич Рубинович

В первом классе при заданных вероятностях классификации целей критерием оптимальности служит математическое ожидание промаха по истинной цели в некоторый терминальный момент, который заранее не фиксирован и выбирается преследователем в процессе преследования (В.К. Ольшанский, Е.Я. Рубинович). Физический смысл совместного преследования заключается в том, что при совместном преследовании осуществляется сближение с системой целей в целом, а значит, реализуется и сближение с истинной целью.

Во втором классе, характерном для применения телеуправляемого оружия, цели преследуются поочередно. Иными словами, определяется порядок преследования целей и, если первая по порядку преследования цель оказывается ложной (что определяется в момент контакта), то преследователь переключается (оператором) на преследование второй цели. Разумными критериями, в силу оговоренных выше причин, в данной тактической ситуации могут быть общее время преследования двух целей или математическое ожидание времени преследования истинной цели.

Было показано, что в дифференциальных играх поочередного преследования вектор управлений преследователя имеет специфическую структуру: он содержит собственно закон управления траекторией подвижного объекта и правило выбора очерёдности встреч с целями. Была предложена математическая формализация

схемы выбора и решены дифференциальные игры с программным (то есть в момент начала преследования на основании начальных позиций игроков – Е.Я. Рубинович) и позиционным (то есть в процессе преследования на основании текущих позиций игроков – Е.П. Маслов, Е.Я. Рубинович) выборами очерёдности. Во втором случае аналитическое решение задачи показало, что при определённых начальных условиях этапу поочередного преследования всегда предшествует этап совместного преследования, по окончании которого и принимается решение о порядке преследования. Физический смысл наличия этапа совместного преследования заключается в том, что в ответ на неопределённость, создаваемую убегающими (преследователь не знает какая именно цель является истинной), преследователь создаёт свою форму неопределённости (в течение этапа совместного преследования цели не знают предстоящий порядок преследования).

Еще одна возможная ситуация могла возникнуть тогда, когда оператор, осуществляющий наведение, в силу конструктивных особенностей информационных каналов терял из вида вторую цель в момент начала поочередного преследования. Если первая по порядку преследования цель оказывалась ложной, то в таком случае оператору необходимо было перенацелить преследователя в ту точку, где он видел вторую цель в последний раз и в окрестности этой точки произвести дополнительный поиск (допоиск) второй цели. По этой причине в качестве критерия оптимальности разумно принять промах по второй цели. Как показали аналитические исследования (Е.Я. Рубинович), в этой постановке также имеет место этап совместного преследования.

В 1980 г. за цикл работ по управлению наблюдениями и оптимизации движения динамических объектов в условиях неполноты информации и противодействия Е.Я. Рубиновичу была присуждена Премия Ленинского комсомола.

Начиная с 2000 годов, «морская» тематика получила свое развитие в задачах с более сложной динамикой игроков, а также в задачах планирования действий и прокладки маршрутов движения пилотируемых и автономных аппаратов при уклонении от обнаружения различными средствами. При этом учитывается конфликтность среды, образованной не только антагонистическими целями игроков, но и недостатком информации о самой среде движения, а также ошибками измерений в информационных каналах. Критериями оптимальности в такой постановке, помимо упомянутых выше, являются интегральные и суммарные уровни физических полей объекта в исследуемых условиях движения и поиска. В настоящий момент работы ведутся под руководством члена-корреспондента РАН А.А. Галяева коллективом учёных (П.В. Лысенко, Е.Я. Рубинович, В.П. Яхно). Развиваются методы оптимального управления и управления наблюдениями (сбором, анализом и обработкой информации) для создания оперативно-советующих систем поддержки принятия решений командиром, алгоритмов бортовых средств планирования миссий, тренажёров и имитационных полигонов для применения разнородных группировок



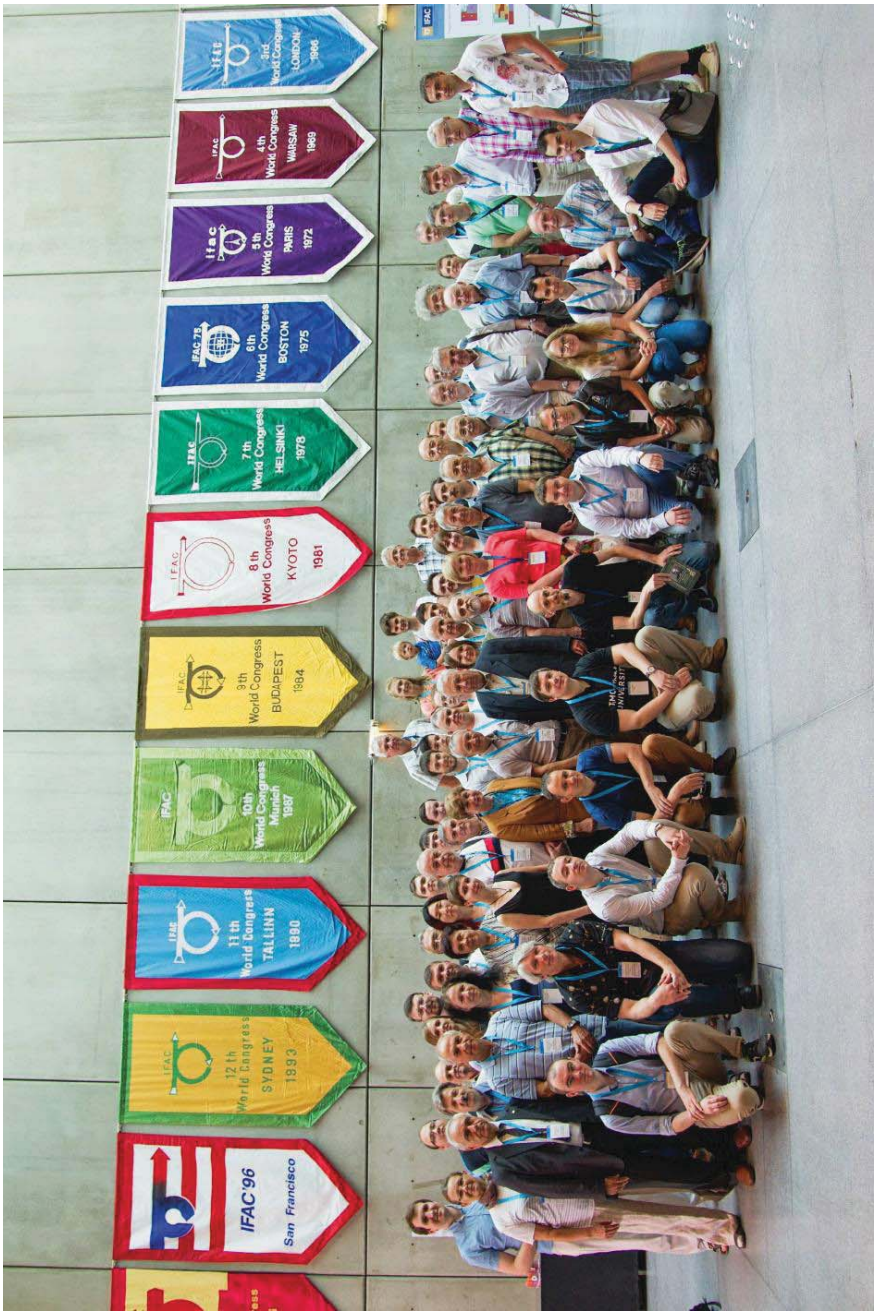
Андрей Алексеевич Галяев

автономных необитаемых подводных аппаратов. За вклад в решение задач в интересах ВМФ А.А. Галяев и Е.П. Маслов награждены медалью имени академика А.П. Александрова.

История лаборатории «Управления по неполным данным» циклически продолжилась с середины 2010-х годов, когда лаборатория вновь значительно пополнилась выпускниками МФТИ и МГУ. П.В. Лысенко (совместно с А.А. Галяевым и В.П. Яхно) в 2022 г. была присуждена премия РАН им. Б.Н. Петрова за цикл работ «Траекторное управление скрытностью подвижных объектов с неоднородной индикатрисой излучения». А.С. Самохин и М.А. Самохина являются неоднократными участниками и победителями соревнований GTOC (*global trajectory optimization competition*), проводимыми NASA в очень ограниченные сроки и включающие трудно-формализуемые дискретно-непрерывные задачи траекторной оптимизации, требующие для своего решения недюжинной смекалки и научной квалификации. М.Э. Бузиковым были разработаны алгоритмы перехвата одиночных и групповых целей в многоцелевой обстановке, которые стали основой его кандидатской диссертации и внесли значительный вклад в теорию и практику подобных задач.



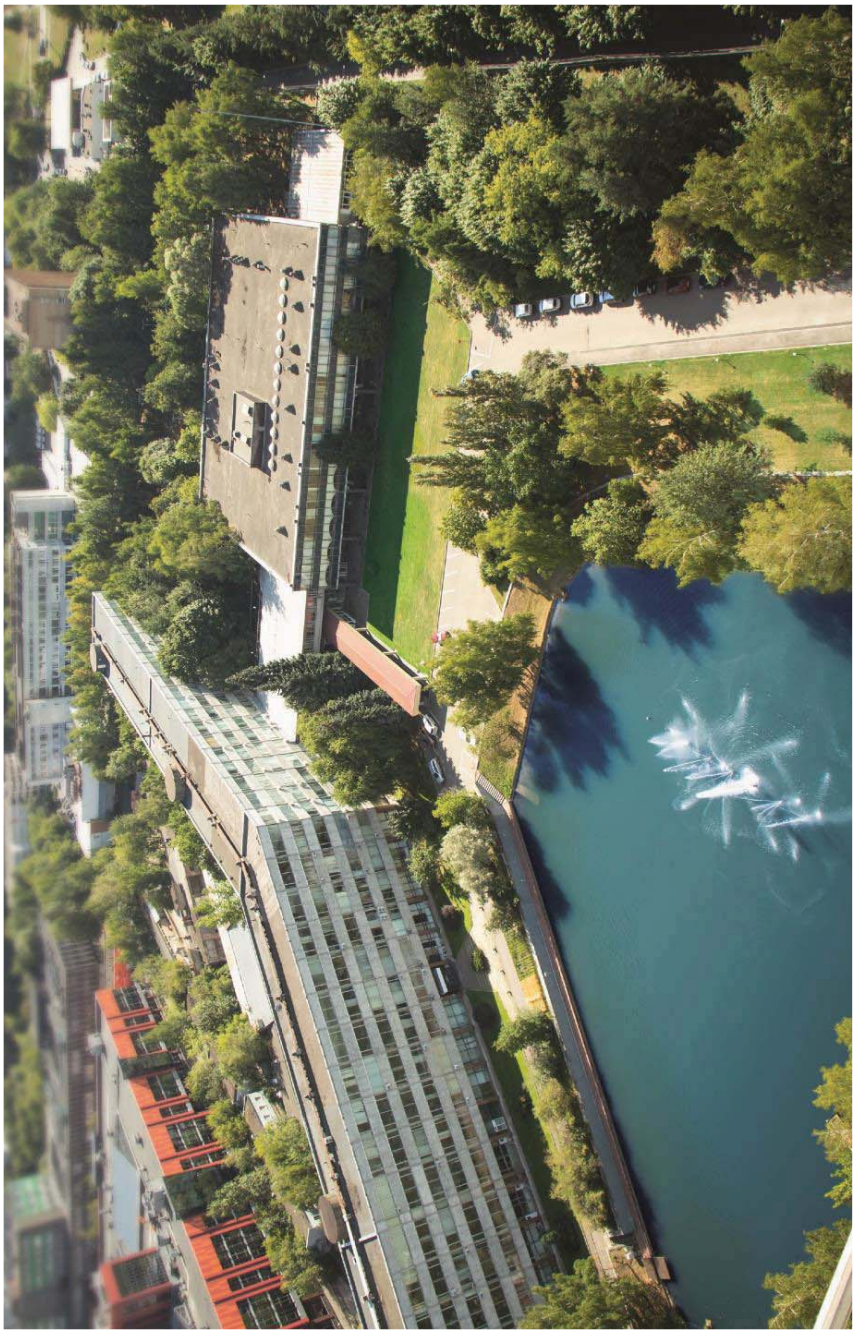
Большой конференц-зал Института способен принять более 600 гостей



Наша делегация на Конгрессе ИФАК в Тулузе, 2017 г.



**Российская делегация на XVIII Конгрессе ИФАК (Милан, 2011 г.)
и примкнувший» к ней Рудольф Калман (второй ряд, в центре)**



Институт проблем управления с высоты птичьего полёта



В Институте открывается Всероссийская конференция «Проблемы управления научными исследованиями и разработками»



В кулуарах международного семинара-презентации и выставки «Автоматизация. Программно-технические средства. Системы. Применения»

Симпозиум IFAC INCOM в Институте проблем управления, 2009 г.



Выступает председатель Программного комитета Александр Долгий (Франция)



Открытие INCOM



Выступает председатель Национального Оргкомитета Наталья Бахтадзе (Россия)



Регистрация участников



Пленарный доклад профессора Семёна Мееркова (США)

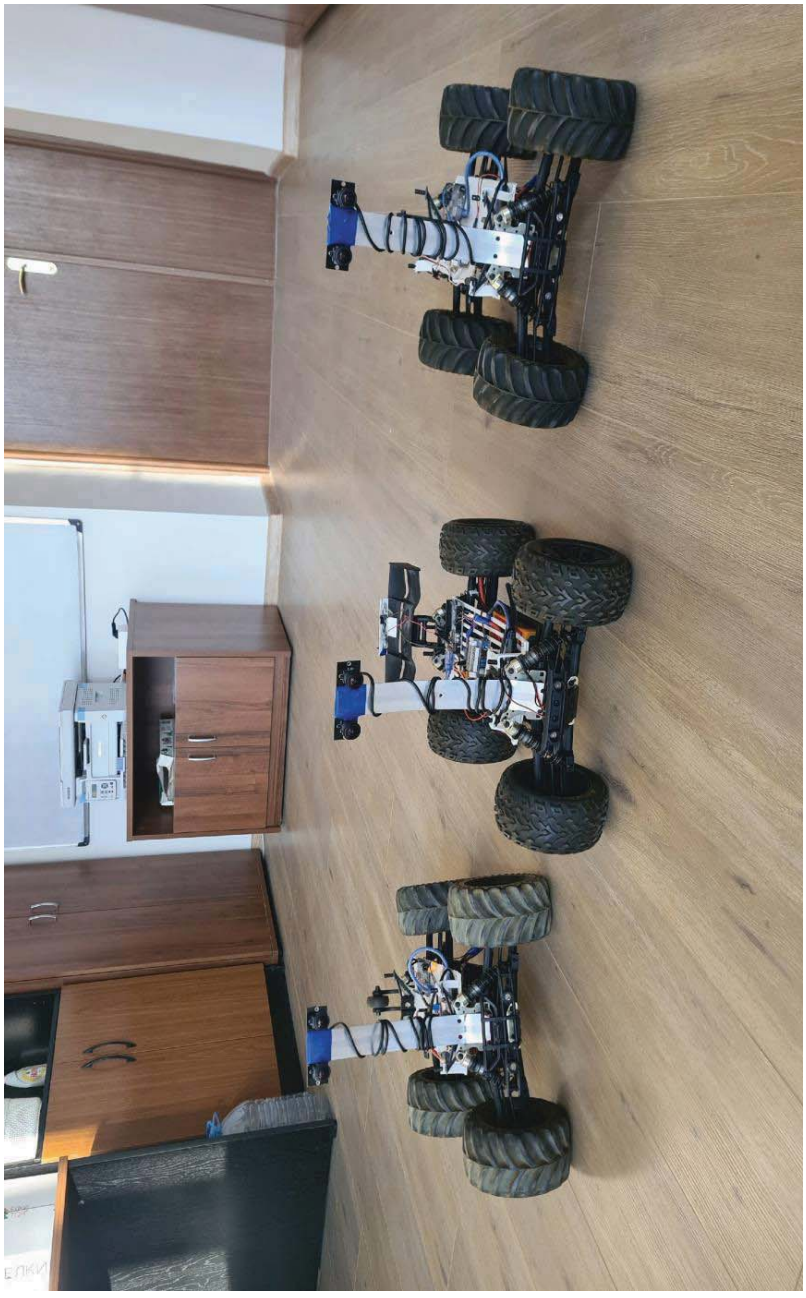




Секционные заседания



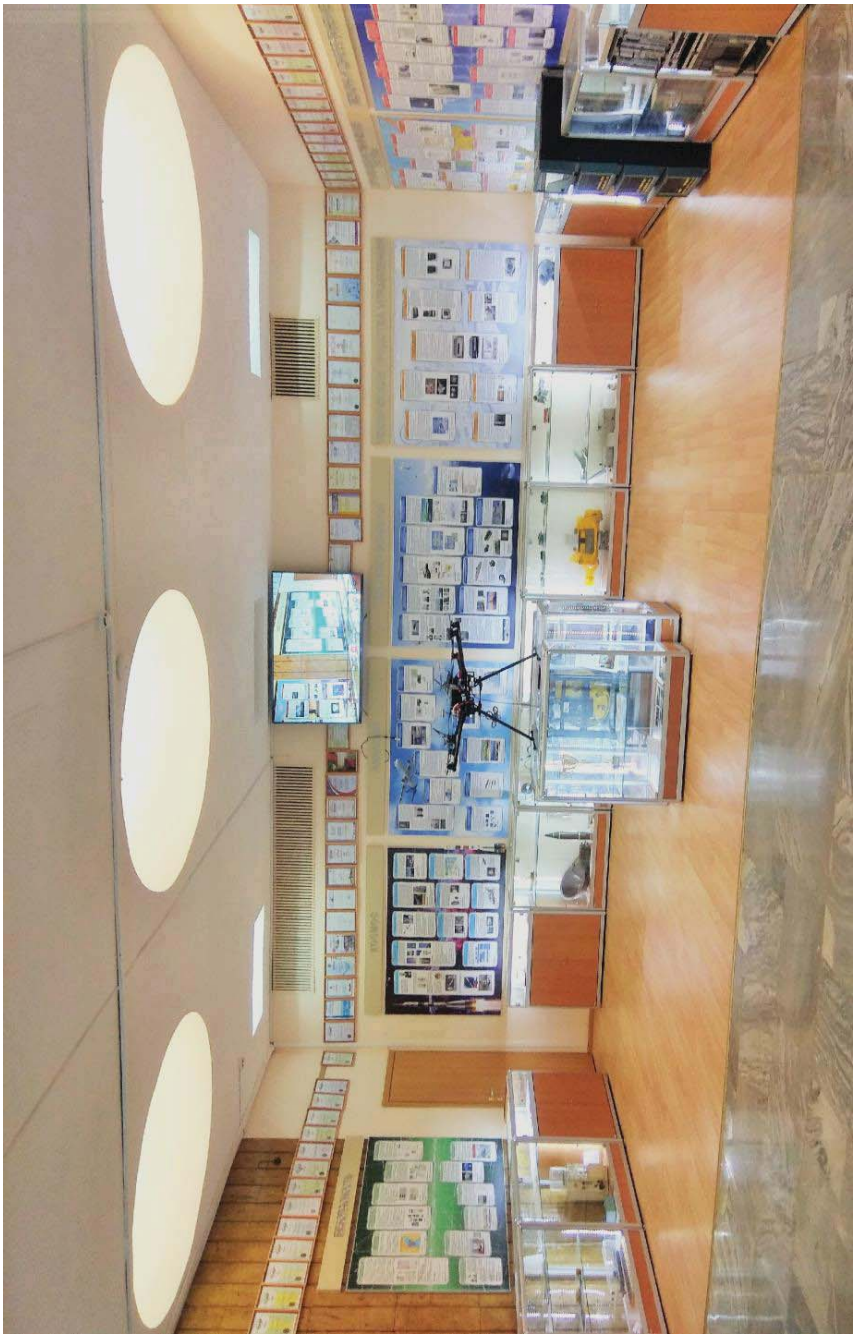
Открытие Международной конференции IEEE DCCN-2023



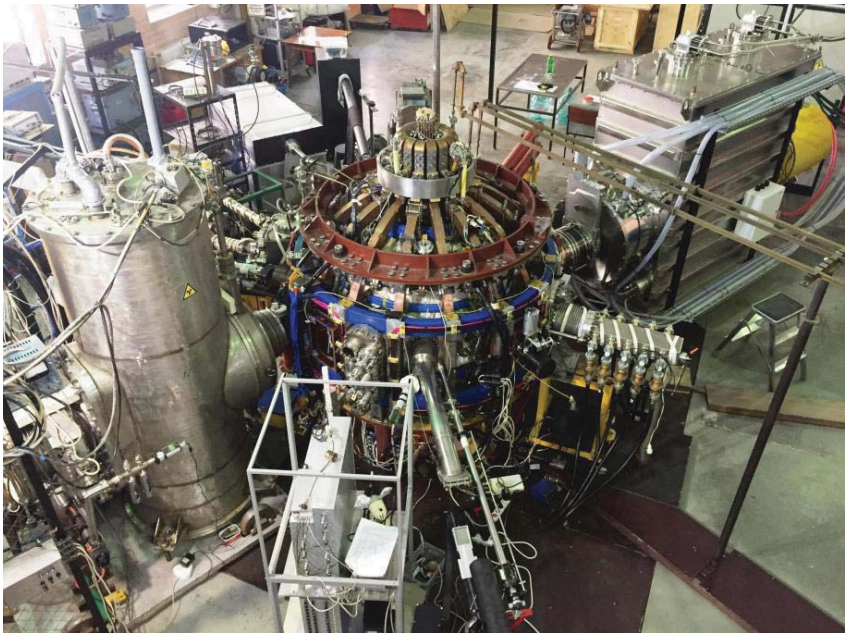
Группа колесных роботов для инспекции помещений



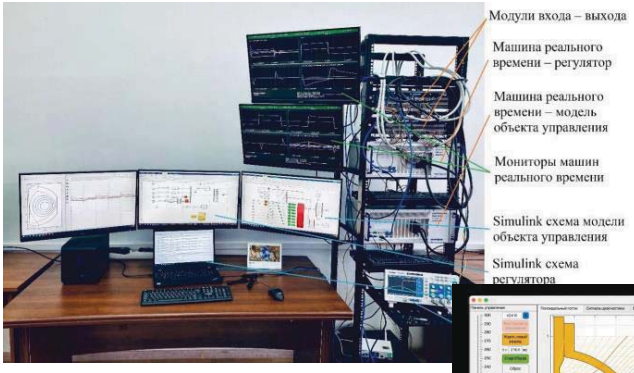
Концепт Операционного центра Министерства сельского хозяйства Вьетнама (лаборатория «Интеллектуальных систем управления и моделирования»)



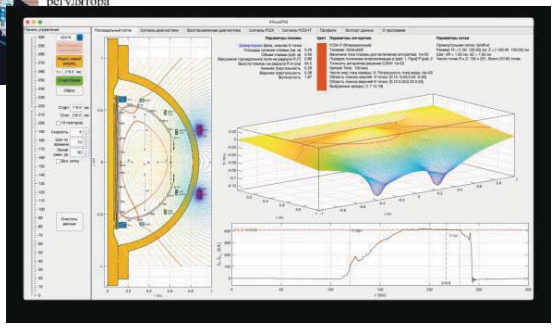
Уголок Институтской выставки



Действующий сферический токамак Глобус-М2

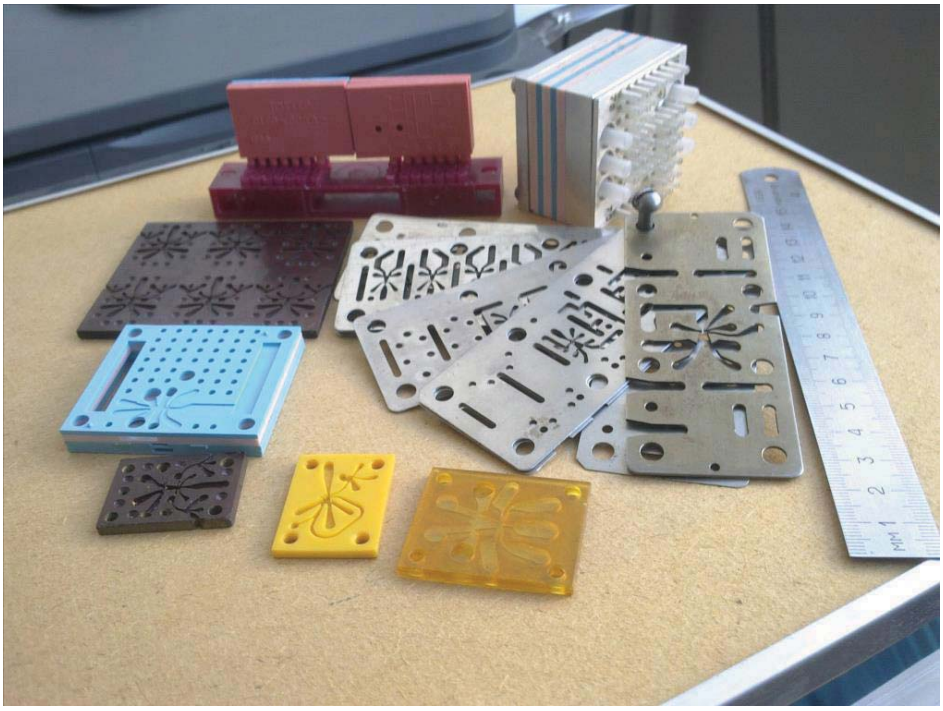


Цифровой стенд



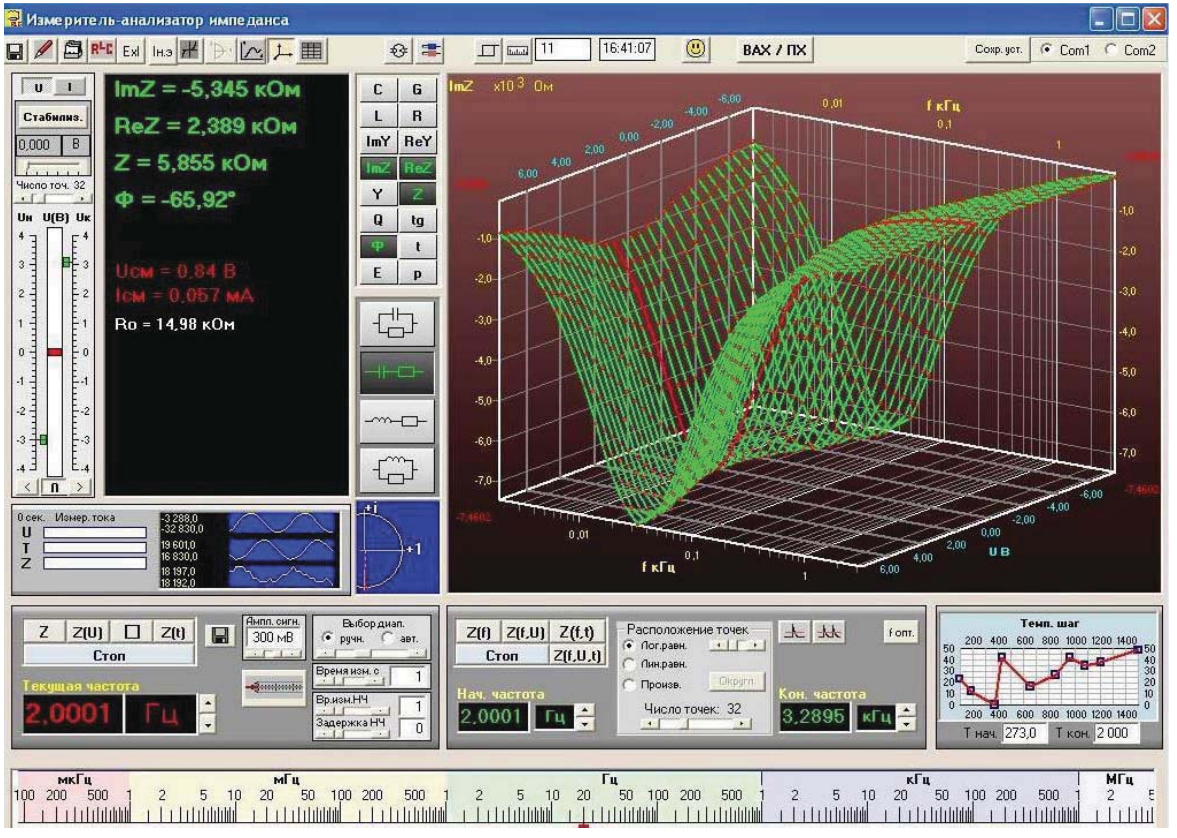
Восстановленные сепаратриса и магнитные поверхности

Работы по управлению плазмой в токамаках (лаборатория «Идентификации систем управления» им. Н.С. Райбмана)



Разработанные в Институте элементы и модули струйной техники (лаборатория «Технических средств управления»)

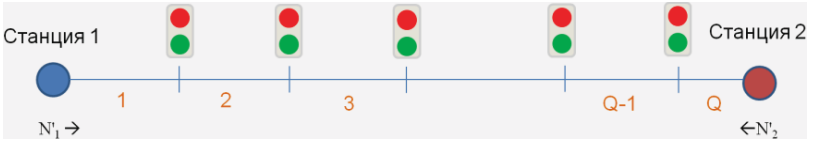


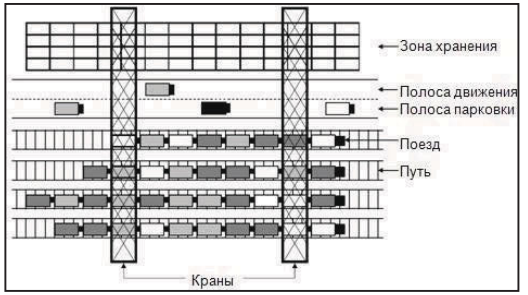


Виртуальный измеритель-анализатор импеданса для научных исследований и промышленного контроля (лаборатория. «Технических средств управления»)





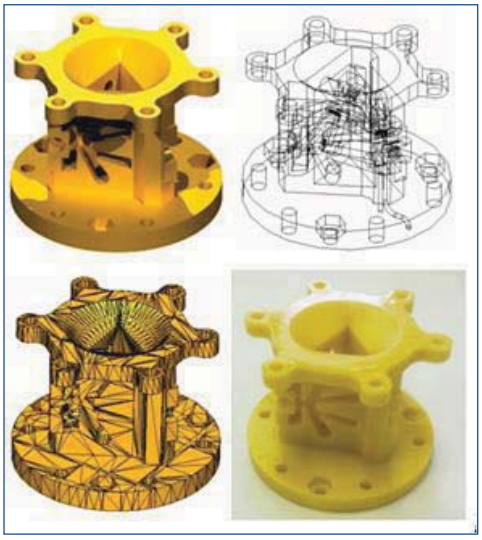


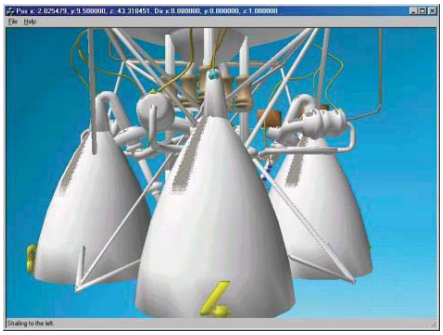


Составление расписания движения поездов и погрузочно-разгрузочных кранов (лаборатория «Теории расписаний и дискретной оптимизации»)

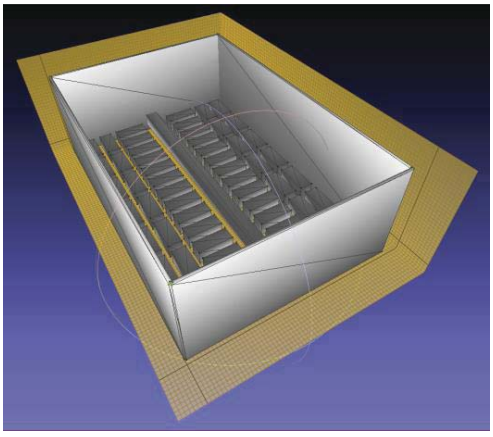


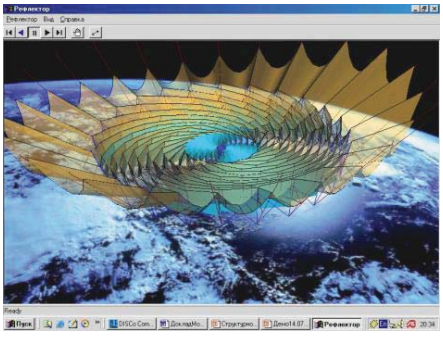
Необитаемый подводный аппарат «Водяной» (лаборатория «Эргатических систем»)

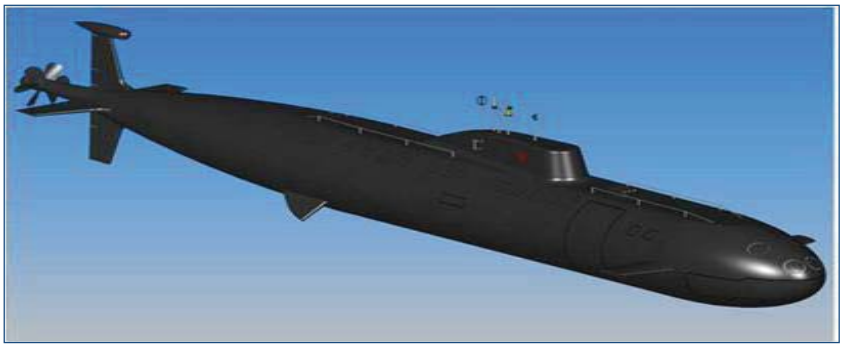




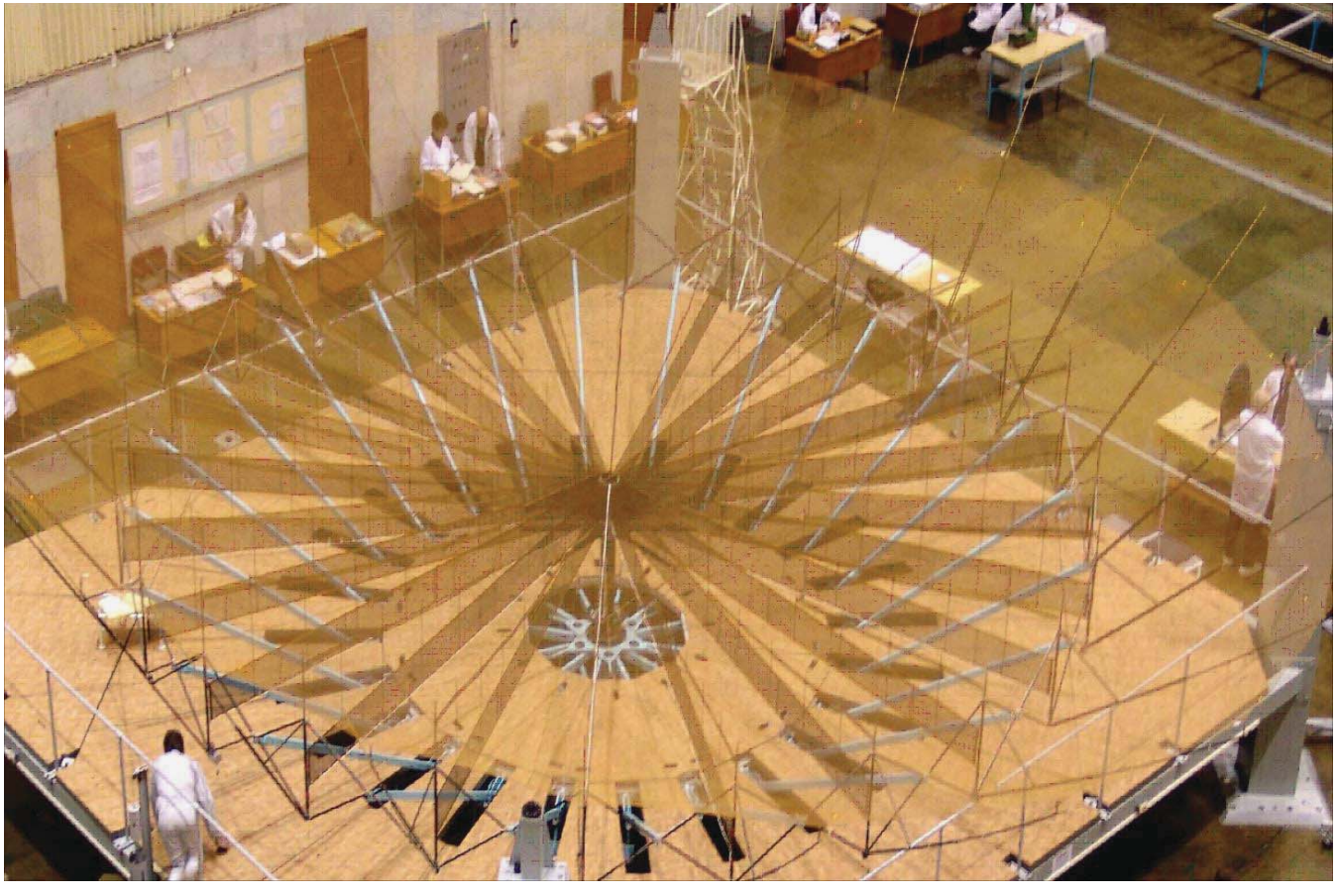




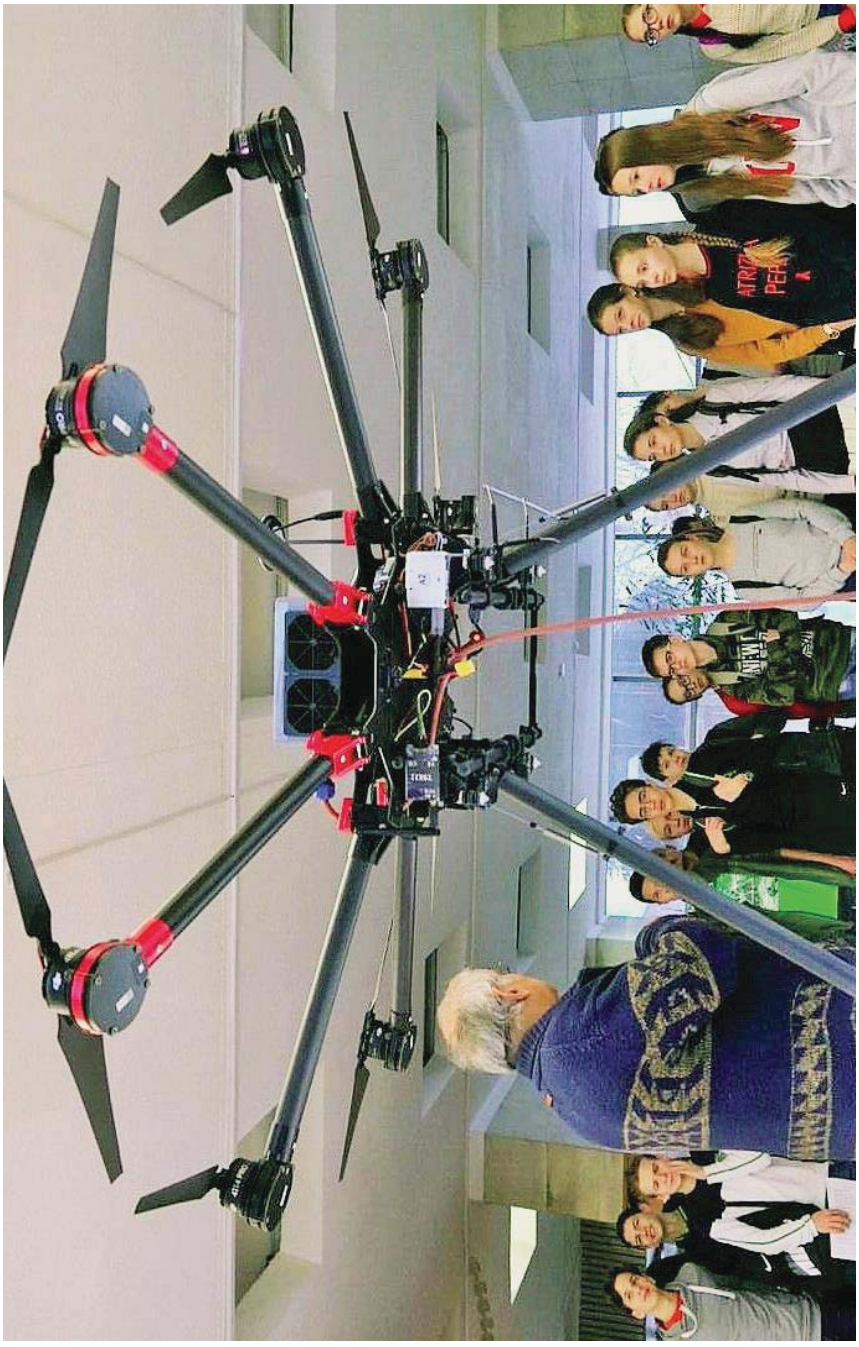




3D-моделирование сложных конструкций, обхода препятствий и живых систем (лаборатория «Компьютерной графики»)



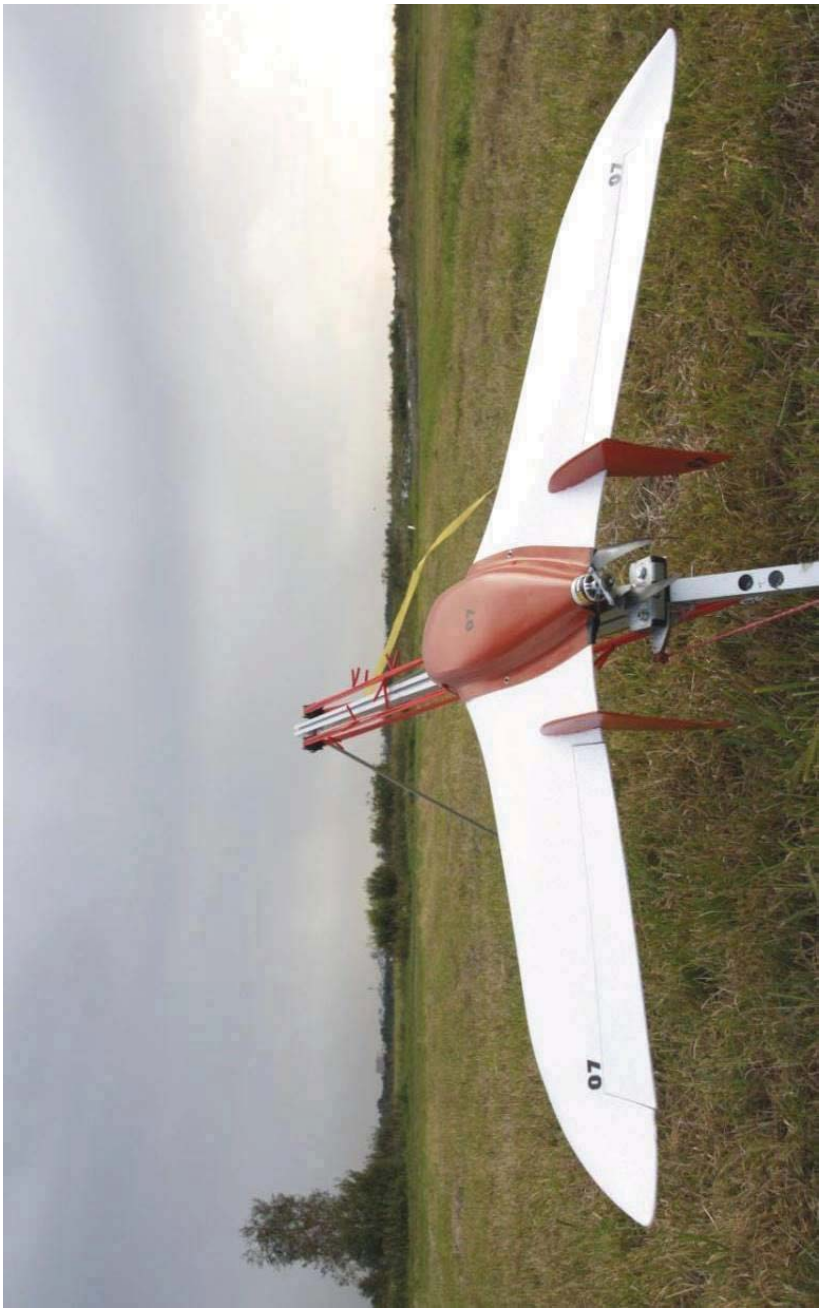
Сборка физической модели большого космического рефлектора



Беспилотная телекоммуникационная платформа
(лаборатория «Телекоммуникационных систем») на выставке Института



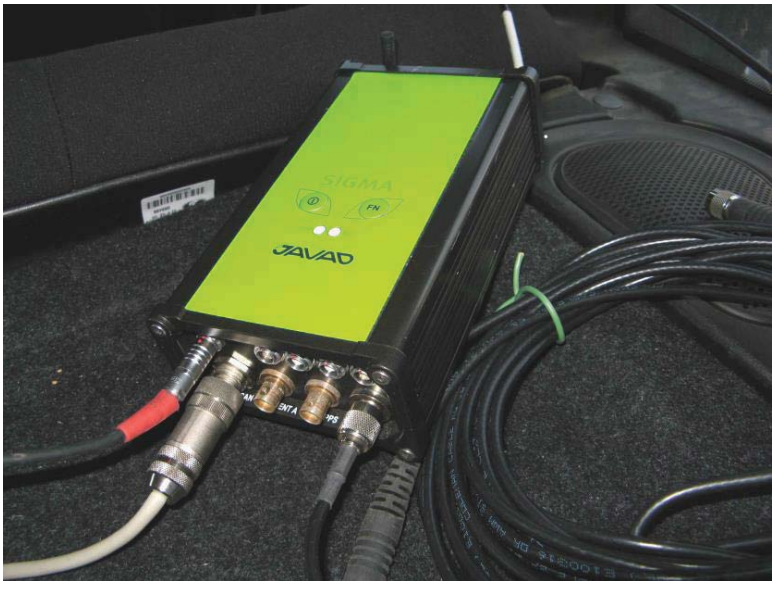
А вот та же беспилотная платформа и её разработчики во главе с В.М. Вишневским (второй слева)



Ещё один из созданных в Институте беспилотных летательных аппаратов



Подготовка к тестированию системы управления колёсным роботом, повторяющим ранее запомненный маршрут с сантиметровой точностью (лаборатория «Нелинейных систем управления» им. Е.С. Пятницкого)



Навигационный приёмник GLONASS / GPS



Базовая кафедра интегрированных киберсистем МФТИ в ИПУ РАН



Витраж у лифта. Выполнен специально для здания Института в 1967-1968 гг. художником-монументалистом Леонидом Полищуком в соавторстве со Светланой Щербининой



Наша смена уже присматривается, как бы нас заменить (школьники в Институте)

3.6. Бортовые измерения физических полей

Теория бортовых измерений пространственных физических полей создавалась для построения методов и алгоритмов обработки данных систем измерения параметров различных физических полей на борту подвижного объекта. В частности, она применяется при обработке данных авиационной гравиметрии, авиационной магнитометрии, аэроэлектроразведки, где, в отличие от магнитометрии, измеряется лишь переменная составляющая магнитного поля. При последующей обработке полученные значения могут использоваться для решения следующих задач в геофизике:

- построение карт аномальной составляющей пространственного геофизического поля;
- построение модели распределения физических свойств внутри земной коры;
- выделение аномальных по своим физическим характеристикам зон, которые, в частности, могут быть перспективными для обнаружения полезных ископаемых;
- выделение зон тектонических нарушений и уточнение геологических карт;

и в навигации:

- уточнение модели пространственного геофизического поля;
- решение навигационных задач корреляционно-экстремальным методом;
- решение задач относительного позиционирования — определение взаимного расположения и ориентации источника и измерителя пространственного физического поля;
- коррекция показаний бортовой инерциальной навигационной системы.

Таким образом, есть целый ряд актуальных частных задач, связанных с бортовыми измерениями пространственных полей. Несмотря на то, что перечисленные задачи кажутся принципиально разными, можно выделить общие моменты:

- все рассматриваемые поля потенциальны;
- внешнее поле (поле Земли) во всех случаях представляется суммой известной нормальной (глобальной) и неизвестной аномальной (локальной) составляющих, а также вариационной составляющей;
- измеренный сигнал складывается из внешнего и наведённого со стороны носителя поля, а также инструментальных погрешностей;
- для всех методов требуется выделение аномальной составляющей поля, необходимой для дальнейшей обработки;
- наведённая составляющая, связанная с движением носителя, много больше аномальной составляющей поля;
- для выделения аномальной составляющей поля требуется решение навигационной задачи;
- анализ данных измерений связан с решением обратных задач, которые относятся к классу некорректно поставленных.

Основной нагрузкой на разрабатываемые методы и алгоритмы является необходимость компенсации искажающего влияния возмущений, обусловленных, в первую очередь, движением объекта-носителя. Это искажающее влияние на практике во много раз превосходит значение полезного сигнала. Учёт параметров движения объекта связан с решением навигационных задач, в которых также должны приниматься во внимание пространственная и временна́я изменчивость измеряемого поля.



Борис Викторович Павлов

В Институте работы по данному направлению начались в 2005 г. под руководством Б.В. Павлова и А.К. Волковицкого. Сейчас по этой тематике работает около 10 сотрудников «Динамических информационно-управляющих систем» им. Б.Н. Петрова, в том числе аспиранты Института, а также несколько студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сегодня эти работы возглавляет зав. лаб. д.т.н. Е.В. Каршаков.



Андрей Кириллович Волковицкий

В основе разработанной теории лежит идея о том, что искажающее влияние, обусловленное влиянием объекта-носителя, может быть вычислено с привлечением соответствующей навигационной информации и исключено из показаний датчиков. Определение формы и величины искажающего влияния при измерениях различных физических полей может быть получено в процессе решения обратной задачи — задачи определения физических параметров по измерениям компонент поля. Такие задачи относятся к классу некорректно поставленных, для их решения требуется применение методов регуляризации. Наиболее эффективным оказалось использование Калмановского подхода, при котором неизвестные составляющие модели описываются случайным процессом, формирующие уравнения которого содержат белый шум в правой части. Введение ограничений на спектральную характеристику случайной составляющей является одним из способов регуляризации обратной задачи. В рамках разработанной теории Калмановский подход реализован как для линейных, так и для нелинейных систем.

Построенная теория бортовых измерений пространственных физических полей позволила не только решить задачи измерения параметров гравитационного, магнитного и электромагнитного поля, но и существенно повысить точность различных бортовых систем. Полученные результаты измерений в дальнейшем применяются для решения задач навигации, обнаружения, пеленгации, геолого-геофизического картирования и поиска полезных ископаемых.

В рамках теории бортовых измерений пространственных физических полей в Институте решен следующий ряд задач:

1. Линейные стохастические задачи оценивания для определения параметров влияния летательного аппарата при выполнении измерений различных параметров

магнитного поля Земли – вектора индукции, модуля вектора индукции, градиента модуля вектора индукции, тензора градиента индукции.

2. Линейная стохастическая задача оценивания для определения параметров влияния летательного аппарата при выполнении электромагнитных измерений.

3. Построены алгоритмы тесного комплексирования данных инерциальной и спутниковой навигационных систем для обеспечения высокоточного навигационного решения в задаче аэрогравиметрии.

4. Сформулирована постановка нелинейной стохастической задачи оценивания и разработаны алгоритмы решения обратной геофизической задачи – задачи определения физических свойств пород по измерениям параметров физического поля, – на основе Калмановского подхода.



Евгений Владимирович Каршаков

5. Задача позиционирования подвижного объекта в переменном магнитном поле на основе измерений вектора переменного поля (в линейной постановке).

6. Задача позиционирования подвижного объекта в переменном магнитном поле на основе измерений тензора градиента поля (в нелинейной постановке).

Теоретическая значимость работы заключается в том, что она основана на едином подходе к исследованию задач обработки бортовых измерений пространственных геофизических полей. Этот подход обобщает результаты, полученные для отдельных методов при решении геофизических и навигационных задач, и позволяет получить качественно новые решения для некоторых из них. Разработанная методика даёт возможность обоснованно выбирать алгоритмы решения конкретных задач, исходя из особенностей их постановки. Предложенный единый подход позволил выйти на новый уровень точности решения конкретных прикладных задач: списание девиации при аэромагнитных измерениях, учёт электрических и геометрических параметров бортовой системы при аэроэлектромагнитных измерениях.

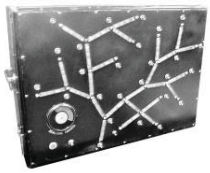
По результатам разработки этой теории и её практическому применению защищены две кандидатских диссертации в 2008 и 2013 гг., ещё две докторские и две кандидатские диссертации готовятся к защите. Работы проходят в тесном сотрудничестве с другими организациями: Институтом океанологии РАН, Институтом водных проблем РАН, ЦНИИ им. А.Д. Крылова, Лабораторией управления и навигации механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, АО ГНПП «Аэрогеофизика», Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А.П. Карпинского.

За выполненные работы в 2019 г. А.К. Волковицкому и Е.В. Каршакову Президиум РАН присудил Премию им. Б.Н. Петрова.

3.7. Робототехнические системы

Тема робототехники или, попросту говоря, роботов уже с 40-50-х годов прошлого века сильно волновала человечество.

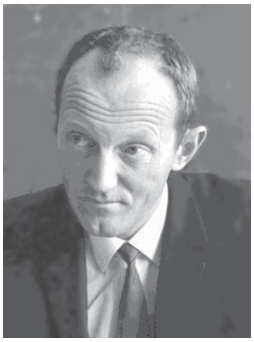
В начале 50-х годов в Массачусетском технологическом институте (МТИ) Г. Уолтер создавал роботов-зверюшек: ползающую по столу и не падающую с него электронную черепаху; робота-мышку, который бегал по лабиринту; и др. Не остались в стороне и учёные нашей страны, в том числе и иатовцы. В 1955–1957 гг. сотрудник М.А. Гаврилова (лаборатория «Дискретной телемеханики») к.т.н. В.И. Иванов создаёт свою «мышь в лабиринте» (фото справа). Она представляет собой релейно-контактную схему, предназначенную для демонстрации и исследования самообучающихся автоматов. Способность к обучению демонстрируется поиском цели в заданной конфигурации лабиринта с последующим запоминанием кратчайшего пути к этой цели. Путь «мыши» в лабиринте отмечается подсветкой, цель задаётся положением тумблеров, достижение цели отмечается световой индикацией. Эта «мышь» до сих пор находится в экспозиции Политехнического музея в Москве. Там же, в Политехническом музее, можно увидеть и сделанную в Институте в 1958 г. электронную черепаху* (два фото слева), которая умеет обходить препятствия и со стола тоже не падает. Эти пионерские поделки стали зародышем того, что гораздо позднее было названо робототехникой и искусственным интеллектом.







В 1957 г. в отдел академика Б.Н. Петрова пришёл новый старший научный сотрудник Георгий Петрович Катыс, который занимался оптико-электронными системами сканирования поверхности Земли и системами ориентации космических аппаратов и, по рабочим вопросам, тесно сотрудничал с С.П. Королёвым. В 1962 г. Г.П. Катыс защитил докторскую диссертацию по техническим наукам на тему «Автоматический контроль нестационарных полей» и организовал собственную лабораторию, которая осуществляла разработку различных сканирующих обзорно-поисковых систем. Кроме того, велись пионерские работы в области создания средств перемещения по другим планетам. Ну, а поскольку ближайшей целью был полёт на Луну, такие средства тогда назывались «луноходами». В 1972 г. Г.П. Катыс из Института ушёл,



Георгий Петрович Катыс

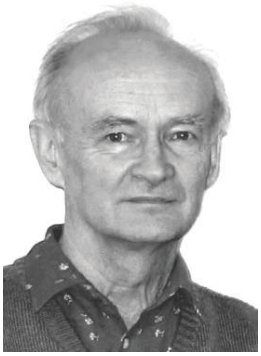
* Фильмы об этих разработках: «мышь в лабиринте» и «электронная черепаха», – размещены на сайте Института *www.ipu.rssi.ru*

перейдя со своей лабораторией в НИИ автоматических систем, и эти работы в Институте прекратились.

В начале 1970-х годов к.т.н. Андрей Александрович Петров, старший научный сотрудник лаборатории ««Методов, аппаратно-программных средств моделирования и полунатурных исследований систем управления»*, который к тому времени уже выполнил ряд блестящих исследований, разработав, по сути, новую модель распространения возбуждений по мышцам сердца, и начал заниматься разработкой руки-манипулятора с искусственным интеллектом. В итоге ему удалось сконструировать одного из первых в стране адаптивных роботов с техническим зрением, а также создать алгоритмическое и программное обеспечение для адаптивной роботизированной сварки. Были предложены оригинальные методы обхода препятствий роботами в неизвестной среде и разработан моделирующий комплекс для исследования робототехнических систем. В разработке участвовали ещё три кандидата наук из лаборатории «Методов, аппаратно-программных средств моделирования и полунатурных исследований систем управления»: И.М. Сирота, С.А. Кузьмин и В.Б. Тулепбаев.

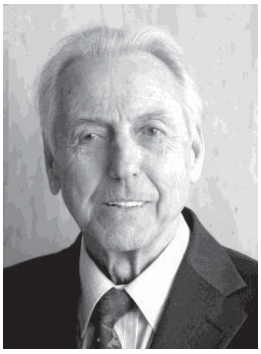


А.А. Петров (слева) показывает на выставке руку-манипулятор «ТУР-10»



Виктор Миньонович Суханов

Начиная с 80–90-х годов прошлого века под общим руководством зав. лаб. д.т.н. В.Ю. Рутковского и руководителя проекта д.т.н. В.М. Суханова начались работы по теории и созданию систем управления деформируемыми космическими аппаратами (ДКА). Сегодня это направление продолжает развиваться.



Владислав Юльевич Рутковский

В области теории ДКА в последние годы разработаны: специализированное математическое обеспечение; рекуррентно-поисковые алгоритмы оценивания координат и параметров различных классов ДКА и алгоритмы адаптации базового алгоритма дискретных систем

* Эта лаборатория была создана в 1959 г. под руководством д.т.н., проф. Бориса Яковлевича Когана, лауреата Государственной премии 1951 г.

управления движущимися объектами с нежёсткой конструкцией; различные способы демпфирования неустойчивых мод изгибных колебаний объекта. В качестве объектов управления рассматриваются большие космические конструкции, в частности, создаваемые в космосе солнечные энергетические станции, свободнолетающие космические робототехнические модули и дискретно развивающиеся структуры, собираемые на орбите с помощью этих робототехнических модулей. К последнему классу объектов относятся большие радиотелескопы с каркасной конструкцией антенных рефлекторов, орбитальные космические станции, будущие межпланетные корабли и др.



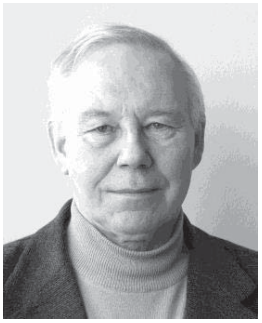
Ведущий эксперт НВО № 73 А.Н. Мигачёв демонстрирует квадрокоптер

В настоящее время среди подразделений Института необходимо отметить научно-внедренческий отдел (НВО) № 73, в котором Ю.Д. Воробьёв активно занимается практическим внедрением в народное хозяйство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных робототехнических систем.



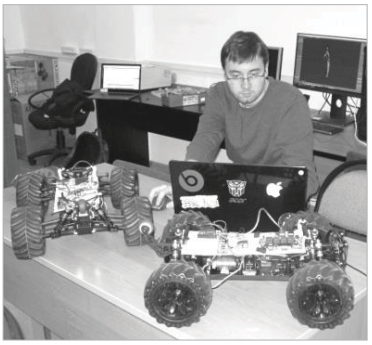
Юрий Дмитриевич Воробьёв

Несколько лет назад группой сотрудников Института: зав. лаб., к.т.н. Юрий Сергеевич Легович, к.т.н. Диане Секу Адель Кадер и к.т.н. Алексей Владимирович Рожнов – были начаты работы по планированию и распределению действий робототехнических группировок при решении многоэтапных прикладных задач с априорно неизвестным сценарием выполнения.



Юрий Сергеевич Легович

Сегодня осуществляются также: семантическое картографирование местности группой автономных мобильных роботов, патрулирование помещений с применением гетерогенных робототехнических группировок (функциональная гетерогенность: с одной стороны, требуется наблюдать за обстановкой с другой, поддерживать связь); автоматическое формирование обучающих выборок для настройки нейронных сетей в задачах визуального распознавания с применением биоинспирированных механизмов внимания; разработка унифицированных нейросетевых архитектур для решения задач классификации, прогноза трансформаций и генерации визуальных образов; автома-



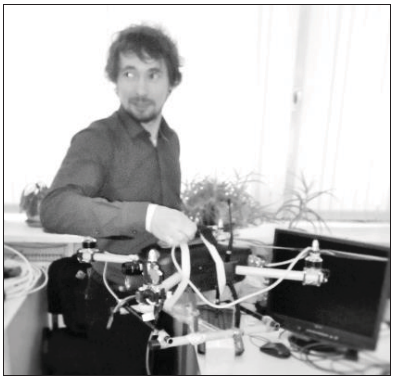
Отрабатывается семантическое картографирование

тический синтез целесообразных движений многозвенных манипуляционных и шагающих роботов с использованием прогнозирующих моделей на базе применения технологий нейронных сетей, ассоциативной памяти и имитационного моделирования, алгоритмы управления движением БПЛА и наземной станции в задачах мониторинга протяженных объектов и обеспечения энергетикой..



Маис Фархадов

Группа сотрудников Института под руководством зав. лаб. д.т.н. Маиса Паша Оглы Фархадова разрабатывают: методы визуальной одометрии, картографирования по изображению без глобальной навигационной спутниковой системы, навигации в неизвестном помещении. Сотрудниками лаборатории сконструирован уникальный подводный аппарат «Водяной» в нескольких вариантах исполнения, который занял 1-е место в конкурсе «Аквароботех» во Владивостоке в классе малых (лёгких) телеуправляемых подводных аппаратов (ТНПА). К созданию алгоритмов управления были привлечены сотрудники нескольких лабораторий Института.





А.В. Абдулов с ТНПА и с квадрокоптером

Команда сотрудников Института: научные сотрудники лаборатории «Эргатических систем» А.В. Абдулов и А.Н. Абраменков; научный сотрудник лаборатории «Киберфизических систем» К.Д. Русаков и старший научный сотрудник лаборатории «Моделирования и управления большими системами» к.ф.-м.н. А.А. Шевляков – заняла 1-е место на конкурсе ФПИ «Аэробот». Организатором соревнований был Научно-исследовательский институт робототехники и процессов управления Южного федерального университета (НИИ РиПУ ЮФУ). Поддержку оказывали Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Фонд перспективных исследований и Национальный центр развития технологий и базовых элементов робототехники. Главным судьей этого состязания был научный сотрудник Института Р.Р. Галин.

В лаборатории «Телекоммуникационных систем» под руководством заведующего лабораторией, д.т.н., проф. Владимира Мироновича Вишневского разрабатываются мобильные и стационарные многофункциональные привязные высотные



Владимир Миронович Вишневский

беспилотные платформы длительного функционирования. Получены научные результаты мирового уровня. Среди них необходимо отметить разработку математической модели динамики привязной платформы со сложным нагружением кабель-троса в условиях турбулентной атмосферы. При этом исследование турбулентной атмосферы становится основой для определения параметров автопилота и аэродинамических характеристик высотного винтокрылого модуля. Ещё один выдающийся результат – разработка комплекса моделей, методов и алгоритмов оценки надёжности на базе многомерных марковских случайных процессов для сравнительного анализа и выбора вариантов оптимального построения высотной платформы длительного функционирования. Имеются и другие достижения в области управления высоковольтным напряжением источника при изменении нагрузки и минимизации величины электромагнитного излучения при передаче энергии высокочастотным сигналом. Следует отметить, что привязная высотная платформа была реализована в мобильном исполнении на автомобильной платформе, а также отрабатывалась реализация на робототехнической платформе «Маркер», который реализуется по проекту Фонда перспективных исследований.

В Институте разработаны теоретические основы проектирования привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ длительного функционирования, обладающих обширными применениями как в гражданских, так и оборонных отраслях. На базе разработанной теории и новой технологии передачи энергии большой мощности с земли на борт созданы и испытаны в лабораторных и полевых условиях экспериментальные образцы беспилотных привязных высотных платформ, не имеющих мировых аналогов. Разработан комплекс слабо исследованных в мировой литературе моделей, методов и алгоритмов оценки надёжности на базе многомерных марковских случайных процессов для сравнительного анализа и выбора вариантов оптимального построения высотной платформы длительного функционирования. Разработан комплекс аналитических и имитационных моделей системы передачи энергии большой мощности (до 15 кВт) для:



Беспилотная летающая платформа на выставке Института

- выбора оптимальных параметров высокочастотных источников и приемников энергии большой мощности;
- решения задачи управления выходным высоковольтным напряжением источника при изменении нагрузки в бортовом приёмнике с использованием цифровой обратной связи;

– минимизации потерь в резонансных преобразователях сопротивлений между источником энергии, волновым сопротивлением проводной среды и бортовым приёмником.

Для определения параметров автопилота и аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата длительного функционирования разработана и исследована математическая модель динамики привязной платформы в условиях турбулентной атмосферы. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих функционирование привязной платформы в турбулентной атмосфере, позволяет определять требуемые значения мощности земля-борт в зависимости от высоты подъёма и величины ветровых нагрузок. На основе методов машинного обучения (нейронных сетей) разработан комплекс статистических моделей системы диагностики параметров высотного беспилотного модуля (вибрация, температура, напряжение и ток), передаваемых в режиме *on-line* по беспроводному каналу связи в наземную систему управления для автоматического контроля выхода этих параметров за допустимые пороговые значения. Разрабатываются принципы построения, математические модели и алгоритмы системы локального управления и стабилизации с использованием наземных маяков, обеспечивающей малые отклонения высотной платформы от точки зависания в условиях отсутствия или ослабления сигналов GPS/ГЛОНАСС.

На основе разработанной теории создан экспериментальный комплекс, обеспечивающий подъём на высоту до 150 м и длительное функционирование (до нескольких суток) полезной телекоммуникационной нагрузки (базовая станция сотовой связи, радиорелейная и радиолокационная аппаратура, аппаратура радиоэлектронной борьбы и т.д.). Оригинальность разработки подтверждена 8 патентами на изобретения и публикациями в ведущих отечественных и высокорейтинговых зарубежных изданиях (д.т.н. В.М. Вишневский, Ю.В. Целикин, А.Н. Горьков, Д.С. Винокуров, д.ф.-м.н. Д.В. Ефросинин, Н.С. Калмыков, д.т.н. К.А. Вытовтов).

В 2022 г. опубликована книга *В.М. Вишневский, В.В. Рыков, Д.В. Козырев, Н.М. Иванова. Моделирование надежности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. – М. Техносфера, 2022 г*. Книга переведена на английский язык и опубликована в издательстве *Springer International Publishing* в 2023 г.

Разработанный мобильный робототехнический комплекс «Альбатрос» демонстрировался на Международном форуме «Армия-2021» в составе экспозиции Минобрнауки РФ.

Ранее под руководством к.т.н. Сергея Александровича Браништова проводились теоретические работы по исследованию стратегий поведения автономных мобильных роботов в скоплении себе подобных и прочих динамических препятствий и практические работы по построению автономного мобильного робота, способного обходить препятствия и двигаться с заданной стратегией поведения. В настоящее время эти работы продолжаются под руководством д.т.н., проф. Алексея Вячеславовича Толока.

Несколько лет назад двумя теоретиками (зав. лаб. д.ф.-м.н. Павел Юрьевич Чеботарёв и в.н.с., д.ф.-м.н. Рафиг Паша Оглы Агаев) были разработаны ма-

тематические методы анализа многоагентных систем, в частности для достижения консенсуса агентами-роботами (фотография справа).





Роман Валерьевич Мещеряков

Лаборатория «Киберфизических систем» под руководством д.т.н., проф. Р.В. Мещерякова выполняет ряд перспективных исследований в области создания математического и программного обеспечения для управления робототехническими системами. Сотрудники лаборатории участвуют в проектах по разработке моделей, алгоритмов и программных средств обработки информации в сложных гетерогенных системах, а также в разработке протоколов, средств защиты и обмена данными в системах типа Интернет вещей. Развитие направления киберфизических систем охватывает широкий пласт работ, связанных с формированием новых методологических основ управления интеллектуальными робототехническими производствами «умных фабрик», а также взаимодействия окружающей среды с вычислительными ресурсами. Прогнозируемое распространение киберфизических производственных систем на сегодняшний день нуждается в разработке теоретической и методической платформ для организации взаимодействия физических и вычислительных компонентов, а также в создании аналитических методов, что и является ориентиром деятельности лаборатории. Создается полётный контроллер на отечественной элементной базе – ведущую роль в этой работе играет с.н.с. к.т.н. Данияр Александрович Вольф (работа ведётся совместно сотрудниками нескольких лабораторий Института).



Модель виртуального полигона

Выполняются хоздоговорные работы, в частности, по заказу НИЦ Институт им. Н.Е. Жуковского по созданию и моделированию беспилотной авиационной транспортной системы (ответственный исполнитель г.н.с. д.т.н. Алёна Александровна Захарова). Решается задача доставки грузов с формирующимся во времени потоком заявок с различными приоритетами в многоплечевой реализации. При выполнении работы были проведены лётные эксперименты на полигонах.

Среди сравнительных молодых направлений исследований, развиваемых в Институте, следует выделить работы по неинвазивным интерфейсам, которые ведёт в.н.с. д.т.н. и к.м.н. Ярослав Александрович Туровский. Полученные научные результаты позволяют использовать биологическую обратную связь для управления робототехническими системами.



Я.А. Туровский (второй справа) отрабатывает алгоритмы управления с использованием окулографии

В августе 2018 г. при ИПУ РАН создан Центр интеллектуальных робототехнических систем под руководством д.т.н., проф. Р.В. Мещерякова. В этом Центре сотрудники Института познакомили с робототехникой сотни специалистов из различных ведомств, включая ФСО России, ФСБ России, МО России, МВД России и служб гражданских направлений: ЖКХ, сельское хозяйство и др.

Под эгидой Центра г.н.с. лаборатории «Активных систем» д.т.н. Николаем Андреевичем Коргиным был инициирован проект по разработке экспериментальных платформ для апробации и внедрения интеллектуальных технологий управления силовыми установками транспортных средств с электрическим приводом в партнёрстве с одним из передовых отечественных предприятий в области разработки малогабаритного электрического транспорта – лабораторией электрического транспорта ЕМАХ. Это яркий пример успешного и динамично развивающегося межлабораторного взаимодействия, в работе участвуют сотрудники нескольких лабораторий Института, а также НВО 73.

В рамках этого сотрудничества в качестве пилотной платформы для апробации наработок молодых учёных ИПУ РАН был реализован проект ЗАПЭЛ – электрического автомобиля на базе ЗАЗ-965 1967 г. выпуска. Другой совместный проект по разработке перспективного облика опытной платформы малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову, так называемого *снегоцикла*, стал основой для целого ряда научных и прикладных междисциплинарных исследований, некоторые из которых получили поддержку РНФ, в частности, проекты «Арктический дизайн: методы технической эстетики в освоении и развитии территорий Российского Севера», осуществлявшийся Школой арктического дизайна, и «Распределённая сеть полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях» (совместно с САО РАН, КНЦ РАН и КБНЦ РАН).



Снегоциклы на склоне г. Эльбрус во время полевых испытаний совместно с коллегами из ИГРАН и КБНЦ РАН

Значительный импульс дальнейшему развитию проекта придает сотрудничество с МФТИ, по заданию которого промышленными партнёрами ИПУ РАН разрабатывается целая линейка опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, основой которой стали снегоциклы, для работы на Международной арктической станции «Снежинка» и в интересах МЧС России, а сам Институт создаёт программно-аппаратный комплекс для отработки алгоритмов управления и навигации соответствующих опытных платформ.

4. Технические средства управления

4.1. Технические средства автоматизации

Работы Института автоматики и телемеханики по созданию технических средств автоматизации начались ещё в годы Великой Отечественной войны, когда поступили государственные заказы на создание средств контроля размеров и чистоты обработки массовых изделий, выпускаемых отечественной оборонной промышленностью. Внедрение в производство разработанных в Институте контрольных автоматов позволило существенно сократить штат контролёров, что в военное время было особенно важно. Эта работа, сопровождавшаяся глубоким научным анализом общего состояния проблемы, быстро вышла за рамки интересов конкретного производства и была обобщена в выпущенной после войны коллективной монографии.

Первые послевоенные годы стали началом развития в стране электронной аналоговой вычислительной техники. Уже в 1949 г. в Институте создаётся первая отечественная электронная моделирующая установка ЭМУ-1. Комплекс работ по созданию таких установок был удостоен в 1951 г. Государственной премии СССР. В это же время активно ведутся исследования по разработке принципов и созданию средств непрерывного управления электродвигателями постоянного тока. В 1949–1960 гг. выпускается первая отечественная общепромышленная серия магнитных усилителей, а через год предлагается и экспериментально обосновывается идея магнитных элементов автоматики с прямоугольной петлёй гистерезиса. Создаются первые программные пневматические регуляторы, которые находят широкое применение в пневматических системах управления компрессорными скважинами на нефтепромыслах Баку.



Борис Степанович Сотсков

В 50-е годы, в разгар технологической революции, во всех отраслях отечественной промышленности интенсифицируются разработки новых средств автоматизации производственных процессов. В то время остро ощущалась необходимость в создании не отдельных приборов, а интегрированных систем, решающих комплексные задачи в целом.

В это время в Институте д.т.н. Б.С. Сотсковым выдвигается идея унификации средств автоматизации технологических процессов с помощью блочно-модульного прин-

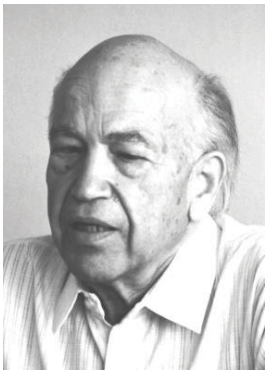
ципа их построения. Принцип оказался столь плодотворным, что на его базе были заложены основы построения агрегатной унифицированной системы приборов (АУС) (*Б.С. Сотсков. Основы расчёта и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.: Госэнергоиздат, 1953*). Таким образом, к началу 60-х гг. в Институте была инициирована разработка методов упорядочения и унификации средств автоматики.

Силами Института создаётся система автоматического управления технологическими агрегатами бетонных заводов непрерывного действия, использованная при строительстве Куйбышевской, Красноярской и других ГЭС. На базе АУС под руководством д.т.н. Д.И. Агейкина и д.т.н. Е.К. Круг в лабораториях Института разрабатываются схемы и конструкции основных модификаций малогабаритных показывающих приборов, электрических регуляторов и электронных усилителей. В тематической группе, возглавляемой будущей знаменитостью и доктором наук, а тогда к.т.н. В.А. Жожикашвили, выдвигаются принципы построения комплексных телемеханических устройств, сочетающих функции телеуправления, телесигнализации и телеизмерения. Примером использования подобных малогабаритных устройств явилась их установка на подмосковной станции подземной газификации угля. В это же время д.т.н. М.А. Гавриловым разрабатываются основы теории релейно-контактных схем, впоследствии систематизированные им в книге (*М.А. Гаврилов. Теория релейно-контактных схем. – М.: Изд. АН СССР, 1950*), которая стала первой в мире монографией на данную тему.



Михаил Александрович Гаврилов

Одним из плодотворных направлений исследований тех лет оказалось создание средств телемеханического управления с использованием серийно выпускаемых магнитных и полупроводниковых элементов. С 1958 г. начинается серийное производство разработанных Б.С. Сотсковым и его учениками д.т.н. М.А. Розенблатом и д.т.н. Н.П. Васильевой бесконтактных исполнительных устройств с магнитными усилителями, серии полупроводниковых элементов «Логика Т», магнитных логических элементов ЭЛМ-50 и ЭЛМ-400 (на Калининском и Симферопольском заводах).



Морис Аронович Розенблат



Дмитрий Иванович Агейкин

Начало 60-х годов характеризуется бурным развитием теории и практики приборостроения. В коллективе под руководством Д.И. Агейкина разрабатываются и исследуются новые принципы построения широкого спектра датчиков, в том числе термомагнитных газоанализаторов, электромагнитных и струйных расходомеров, датчиков неразрушающего контроля и концентратомеров на основе вихревых токов, струйных датчиков давления, дилатометрических

датчиков температуры, магнитострикционных датчиков перемещения, частотных и время-импульсных датчиков для централизованного контроля и ряда других. Выпущенная под руководством Д.И. Агейкина монография (*Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. Датчики автоматического контроля и регулирования. – М.: Машиностроение, 1965*), обобщающая и систематизирующая принципы построения датчиков тех лет, до сих пор является одной из лучших и широко используется специалистами.

Позже в Институте начались работы по созданию полупроводниковых средств восприятия и предварительной обработки оптической информации на основе новых явлений и эффектов в полупроводниковых структурах. Был разработан ряд новых принципов построения полупроводниковых фотоприёмников различных функциональных назначений. Одним из наиболее эффективных и глубоко проработанных полупроводниковых сенсоров этого класса послужили фотоприёмники с радиальным электрическим полем, которые много лет выпускались серийно заводом «Измеритель» (Москва). В ИАТе создаются принципиально новая система телеизмерения, самоприспосабливающаяся к потоку передаваемой информации; система управления нагревом металла; новые гидравлические устройства автоматики (следящий привод, регулирующая колонка и др.).

Созданы системы БАРС (для автоматического анализа) и ПАРУС (синтеза релейных устройств), а также устройства телеуправления с большим количеством элементов, предназначенные для управления наземным комплексом световых и радиотехнических средств посадки самолётов. Система БАРС разработана под руководством М.А. Гаврилова его учеником, впоследствии член-корреспондентом РАН П.П. Пархоменко. Она в своё время вызвала истинный восторг у посетившего Институт «живого классика» Клода Шеннона. В 1958 г. за цикл работ по теории релейных устройств Президиум Академии наук СССР присудил М.А. Гаврилову премию им. П.М. Яблочкова.



Алексей Алексеевич Таль

На базе результатов, достигнутых в области пневмоавтоматики, был предложен элементный принцип построения приборов пневмоавтоматики, на основе которого разработана унифицированная система элементов промышленной автоматики (УСЭППА). За разработку этой системы доктора технических наук М.А. Айзерман и А.А. Таль, кандидат технических наук А.А. Тагаевская, инженеры Т.К. Берендс и Т.К. Ефремова были удостоены Ленинской премии. УСЭППА в 60-х годах была признана за рубежом лучшей в мире. В развитие этих работ впервые в мире был выдвинут новый аэродинамический принцип построения приборов, что стало началом новых технических пневматических средств управления – струйной техники, обладающей высоким быстродействием и работоспособностью в экстремальных условиях окружающей среды. (*Струйная*



Агния Аркадьевна Тагаевская

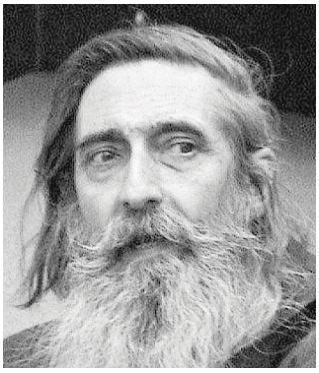
техника автоматического управления. Под редакцией Л.А. Залманзона. –Наука, 1965). Струйные средства автоматики эффективно используются в управлении параметрами авиационных газотурбинных двигателей.

Блочно-модульный принцип построения был использован при создании появившейся в те годы электрической агрегатной унифицированной системы приборов (ЭАУС), представляющей собой комплекс унифицированных регулирующих и функциональных устройств. Принятый в этой системе унифицированный электрический сигнал связи 0–5 мА обеспечивал совместимость работы её приборов с первыми промышленными машинами централизованного контроля и управления.

Начиная с середины 60-х годов, несомненным успехом стали создание и серийный выпуск нового класса средств электроизмерений – автоматических измерителей параметров комплексных величин (ёмкости, индуктивности, сопротивления, добротности и т.д.). Созданию этого класса сложнейших электроизмерительных приборов, в которых соединяются наивысшие достижения в области метрологии и автоматики, предшествовал период глубоких научных исследований и разработок. Своевременно оценив высокую перспективность автоматизации измерений параметров разнообразных объектов на переменном токе, учёные Института заложили теоретические основы построения таких приборов, разработав, в частности, не имевшие аналогов в автоматике методы быстрого поиска состояния равновесия измерительной цепи, так называемого координированного уравновешивания. Методология координированного уравновешивания позволила создать самые быстродействующие в мире автоматические мосты для измерения комплексных величин (Р5010, Р5058 и др.). В 1976 г. эта работа была отмечена Государственной премией СССР (д.т.н. В.Ю. Кнеллер и д.т.н. Ю.Р. Агамалов).



Владимир Юрьевич Кнеллер



Юрий Рубенович Агамалов

Работы в этой области продолжаются в Институте до настоящего времени. Это позволило решить многие принципиальные вопросы теории преобразования и измерения параметров двух- и многомерных объектов на переменном токе, а также разработать ряд оригинальных решений, позволяющих создавать конкурентоспособные приборы с метрологическими характеристиками мирового уровня и со всё более развитыми функциональными и адаптивными возможностями.

Работы в области создания приборов велись столь интенсивно, что возникла необходимость в систематизации результатов, полученных при разработке средств автоматизации с электрическим цифровым и аналоговым сигналами, а также сигналами на основе пневматики, пневмоники и гидравлики. Этой исследовательской задачей было положено начало созданию под руководством Института основ построения Государственной системы приборов и технических средств ав-

томатизации (ГСП).

Появление ГСП стало крупным событием в практике мирового приборостроения. Сложнейшая система взаимосвязанных технических средств была впервые реализована в общегосударственном масштабе на единых системотехнических принципах. Коллективом специалистов под руководством член-корреспондента АН СССР Б.С. Сотскова формировалась общая структура системы, позволяющей обеспечить единый подход к разработке средств автоматики с различными энергетическими носителями сигналов связи, вырабатывались принципы взаимной конструктивной, информационной и эксплуатационной совместимости технических средств, определялись предпосылки для разработки основополагающего стандарта ГОСТ 12997-67 «ГСП. Общие технические требования».

Второй этап формирования ГСП совпал с проведением работ по созданию первых автоматизированных систем управления в различных отраслях промышленности, что потребовало расширения номенклатуры технических средств. Теперь эти средства практически полностью создавались в рамках ГСП.

В 60–70-е годы коллектив разработчиков Института совместно с рядом приборостроительных организаций определяет теоретические основы построения ГСП. Тогда же, параллельно с решением общесистемных задач, развернулись работы по использованию системного подхода к созданию средств автоматизации новых классов. Разрабатывались новые принципы их построения, определялись технические требования к основным блокам электрической ветви, были достигнуты серьёзные результаты в области создания гидравлических средств автоматики, сконструированы и построены бесконтактные электрические исполнительные устройства, получившие широкое применение в автоматических регуляторах.

Третий период развития ГСП можно отнести к историческому этапу широкого внедрения идеологии АСУ с использованием средств вычислительной техники. На этом этапе вновь создаваемые технические средства реализовались в рамках унифицированных агрегатных комплексов, использовавших системотехнические основы и принципы построения ГСП, в том числе агрегатные комплексы средств вычислительной техники (АСВТ), телемеханической техники (АСТТ), локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС). Закрепление в государственных стандартах принципов унификации и сопрягаемости выпускаемых и вновь разрабатываемых средств позволило согласовать развитие средств промышленной автоматики, созданных в различное время.

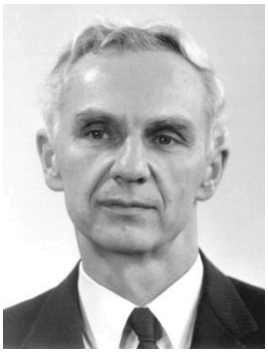
В этот период формулируется агрегатный принцип построения средств контроля и управления на основе базовых конструкций и модулей и, как следствие, расширяются работы по созданию приборов не только для общепромышленного применения, но и в условиях воздействия агрессивных и взрывоопасных сред.



Борис Яковлевич Коган

Все результаты третьего периода развития ГСП нашли применение в химии, нефтехимии, металлургии, энергетике, на транспорте. Важно, что практически все вновь разрабатываемые технические средства реализуются в рамках унифицированных агрегатных комплексов, использующих системотехнические основы и принципы построения ГСП.

Данный этап развития технических средств автоматизации совпал с широким внедрением новых средств



Дмитрий Евстигнеевич Полонников

контроля в промышленные системы автоматизации производственных процессов, построенные на базе аналого-цифровой техники. Под руководством д.т.н. Б.Я. Когана создаются гибридные вычислительные системы ГВС-100, а впоследствии – двухуровневая ГВС «Русалка».

Новый импульс созданию аналоговой техники дало появление микро-, а затем наноэлектроники. В Институте создаётся теория расчёта таких устройств, и в 1977 г. её автор, д.т.н. Д.Е. Полонников, становится лауреатом Государственной премии СССР. На базе микроэлектронной технологии были предложены новые принципы построения устройств обработки непрерывной информации, включая преобразователи различного назначения и класса точности, в том числе первичные. Разработки Института (операционные усилители серии 140, 740, 144, 744, 1108) были освоены на заводе ПО «Кристалл» (Киев, 1977), РЗПП (Рига, 1980) и на заводе им. Пегельмана (Таллинн, 1986).

Начало 80-х гг. ознаменовалось появлением нового поколения средств автоматизации в виде программно-технических средств и систем. К этому времени в Институте был накоплен определённый научный задел в области разработки систем автоматизации на программируемых микроэлектронных устройствах и созданы средства контроля на базе микропроцессоров. В это время появляются первые интеллектуальные датчики, умеющие учитывать дополнительные погрешности от изменения температуры, давления или других параметров окружающей среды. Средства переработки информации постепенно «сближаются» с объектом контроля, начинается использование специализированных процессоров. Всё это поставило перед создателями технических средств автоматизации принципиально новые задачи.

В 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС Институт проблем управления получил задание возглавить работы по созданию перспективной АСУ ТП для АЭС.

Проанализировав положение в области создания систем управления особо ответственными объектами и последние достижения в сфере методов управления и обеспечения надёжности, учёные Института сформулировали концепцию создания распределённой отказобезопасной системы управления, отвечающей требованиям МАГАТЭ по основным параметрам безопасности и уровню автоматизации. Концепция была принята на НТС Минатомэнерго, Минприбора и положена в основу проекта АСУ ТП Башкирской АЭС.

Одно из важнейших положений концепции заключалось в обосновании необходимости создания нового типа технических средств автоматизации – средств программируемой автоматики с параллельной структурой (СПА-ПС).

Разработанная концепция СПА-ПС опиралась на глубокие исследования по теории логического синтеза, процедурам логических вычислений и способам обеспечения отказобезопасности на базе схем с самоконтролем, начатые в Институте ещё в 40-е годы член-корреспондентом АН СССР М.А. Гавриловым и развитые его учениками и последователями.

Основные технические идеи, положенные в основу СПА-ПС, заключаются в распределённости, специализации и контролируемости процессов обработки и

коммуникации.

Средства СПА-ПС были серийно освоены в производстве в 1994–1997 гг. в АО НПК «Автоматика» (г. Омск) и сертифицированы Госстандартом РФ в качестве средств измерений и на соответствие требованиям ГОСТ Р по безопасности.

Принципы, заложенные в основу ГСП, оказались глубокими и перспективными. Поэтому уже в конце 80-х гг. при создании нового поколения технологических и программных средств автоматизации их удалось развить и обобщить применительно к меняющимся экономическим отношениям между предприятиями страны. В результате проведённых в Институте исследований были выдвинуты принципы построения ГСП-2, определившие программно-технический комплекс как новый вид системно-ориентированной приборной продукции.

Если раньше целью построения системы служило создание только технических средств для удовлетворения потребностей промышленности в автоматизации процессов управления, то теперь цель формулировалась как создание программно-технических средств нового поколения для удовлетворения потребностей хозяйства страны в целом.

В конце XX – начале XXI века в связи с практической ликвидацией отраслевой науки, Минприбора, многочисленных проектно-прикладных институтов и региональных ПО «Автоматика», АСУ и т.п., в условиях нарождающегося рынка сложилась практика передачи заказов на автоматизацию фирмам-интеграторам, деятельностью которых является перепродажа западных разработок, путем переложения функциональности действующих систем на новые более сложные и дорогие технические и программные средства. Кроме того, в силу экономических причин было ликвидировано опытное производство в Институте. Это создало, казалось, непреодолимые трудности в работе лабораторий направления технических средств и средств автоматизации. Однако научный потенциал лабораторий и связи с крупными предприятиями не дали угаснуть работе. На новом этапе задачи, стоящие перед Институтом по созданию новых приборов, объединены с задачами создания систем автоматизации.

Из работ, выполненных в последние годы, отметим:



Асим Мустафаевич Касимов

Предложены (д.т.н. А.М. Касимов, М.М. Беляев, А.И. Попов) новые компенсационные методы измерения расходов текучих продуктов с расширенными динамическими диапазонами для струйных, струйно-вихревых и роторных расходомеров. Ведутся исследования по автоматическому проектированию коммуникационных связей струйных элементов в сетях управления (к.т.н. А.В. Балабанов). Развитие струйной автоматики продолжено в модернизации регуляторов газотурбинных двигателей вертолёта Ми-38 для управления направляющих аппаратов и клапанов перепуска. Серийно выпускаются струйные бытовые счётчики газа для ЖКХ.

Под руководством д.т.н. С.И. Касаткина ведутся работы по наноэлементам магнитной спинтроники и стрейнтроники. Проведены исследования магниторе-



Сергей Иванович Касаткин

зистивных (МР) многослойных тонкоплёночных элементов (датчиков магнитного поля, запоминающих и логических наноэлементов и др.) и гибридных наноструктур магнитной стрейнтроники. Разрабатывается контрольно-измерительное оборудование для контроля технологического процесса изготовления и исследования этих наноэлементов. Сотрудники Института участвуют в разработке приборов на основе датчиков магнитного поля и тока совместно с рядом заинтересованных организаций.

Проведены теоретические исследования наноэлементов с позиции их применения в качестве запоминающих и логических элементов, датчиков магнитного поля; предложены новые методы управления и конструкции. В последние годы совместно с рядом организаций проводятся экспериментальные и технологические исследования спин-туннельного МР-перехода, являющегося основой подобных элементов. Получены переходы, обладающие СТМР эффектом.



Борис Васильевич Лункин

В классе радиочастотных методов разработаны алгоритмы измерения параметров многослойных сред в резервуарах и покомпонентного объёмного содержания слоистых и эмульсионных потоков в трубопроводах. Синтезированы чувствительные элементы с формированием нескольких каналов получения первичной информации в одном зонде и разработаны алгоритмы многопараметровых измерений (к.т.н. Б.В. Лункин, Н.А. Криксунова).

Получило развитие направление, связанное с использованием миниатюрных бесконтактных СВЧ радарных датчиков. Разработаны алгоритмы обработки доплеровских сигналов для измерения мгновенного вектора скорости и прямого перемещения по двум координатам для автономного позиционирования наземного транспорта (к.т.н. Д.В. Хаблов).



Александр Сергеевич Совлуков

Исследованы методы измерения параметров радиочастотных датчиков, основанных на алгоритмах стохастической аппроксимации, позволяющих находить оптимум даже при наличии помех. Предложен комбинированный алгоритм, обеспечивающий грубую и быструю настройку на экстремум и точное слежение за изменениями положения этого экстремума (В.Я. Фатеев).

Разработаны научно-технические основы построения радиочастотных приборов для высокоточного измерения количественных параметров сжиженных углеводородных газов (д.т.н. А.С. Совлуков). Освоено промышленное производство этих приборов.

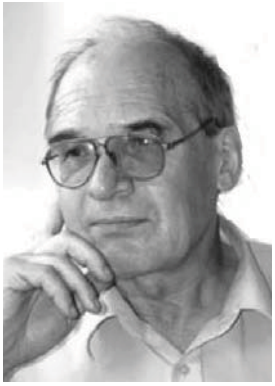
Под руководством д.т.н. В.Ю. Кнеллера в последнее время разработан ряд перспективных приборов – измерителей/анализаторов параметров импедансов на основе средств вычислительной техники, так называемых виртуальных измерительных приборов (к.т.н. Д.А. Бобылёв). Эти приборы, особенно удобны для исследования объектов разнообразной физической природы при воздействии на них переменным током с измерением параметров их схемы замещения. Такие приборы используются в ряде университетских, академических и промышленных лабораториях Российской федерации. Виртуальные приборы относительно дёшевы и, тем не менее, обладают метрологическими характеристиками на уровне дорогих автономных приборов, обеспечивая существенно большие возможности в плане хранения, отображения и обработки измерительной информации.

4.2. Многопроцессорные вычислительные комплексы серии ПС



Ивери Варламович Прангишвили

Ещё в начале 60-х гг. в микроэлектронике была выдвинута концепция однородных микроэлектронных логических и вычислительных структур, состоящих из однотипных функциональных элементов. Концепция разрабатывалась под руководством д.т.н., проф., академика АН ГССР И.В. Прангишвили. В работах сотрудников Института было показано, что использование избыточности, регулярности, параллельности и перестраиваемости однородных структур и связей является кардинальным принципом повышения надёжности и производительности логических и вычислительных устройств, их автоматической адаптации к выполняемым функциям. Результаты теоретических исследований и практических (тогда – только макетных) разработок Института легли в основу монографии (*И.В. Прангишвили, Н.А. Абрамова, Е.В. Бабичева, В.В. Игнатущенко. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических вычислительных устройств. – М.: Наука, 1967*), посвящённой систематизированному изложению проблематики однородных перестраиваемых структур.



Владислав Валентинович Игнатущенко

Первой «ласточкой» в материализации результатов теоретических исследований стала микро-ЭВМ ПС-300, созданная Институтом совместно с НПО «Элва» (Тбилиси,



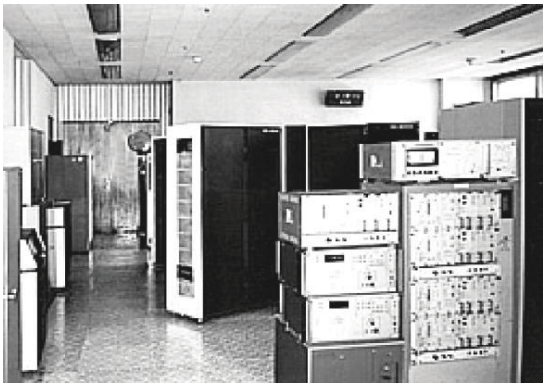
Сергей Яковлевич Виленкин

1976). Дальнейшее развитие нетрадиционных принципов динамической перестраиваемости вычислительных средств привело к разработке высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем (МВС) с перестраиваемой структурой (ПС) как с одним, так и со многими потоками команд и данных (*И.В. Прангишвили, С.Я. Виленкин, И.Л. Медведев. Параллельные вычислительные системы с общим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1983*).

Оригинальный принцип перестраиваемости МВС серии ПС заключается в способности МВС к динамическому перераспределению параллельных ресурсов каждого типа (устройств управления, процессорных элементов, памяти, устройств ввода-вывода) между задачами, и/или их параллельными фрагментами, и/или параллельными командами фрагментов, то есть к перераспределению, осуществляемому операционной системой или аппаратурными средствами по указаниям в программе или автоматически (посредством анализа процесса выполнения программ) в соответствии с текущими требованиями задач, их фрагментов и команд на ресурсы.

Другие принципы построения МВС серии ПС, широко реализуемые и в современных многопроцессорных вычислительных комплексах, требуют:

- параллелизма организации вычислительных процессов на нескольких уровнях – задач, параллельных фрагментов каждой задачи, параллельных векторов и скалярных задач каждого фрагмента;
- создания иерархии управления вычислительными процессами, децентрализации управления вычислениями и обменами информацией;
- модульности и регулярности структуры системы;
- использования специальных программ и аппаратурных средств распараллеливания и конвейеризации вычислений и управления ими.



Вычислительный комплекс ПС-2000

На этих принципах Институтом совместно с НПО «Импульс» были разработаны и освоены в серийном производстве следующие многопроцессорные комплексы:

- ПС-2000 класса ОКМД (1980), ориентированные на решение векторно-матричных задач большой размерности, в первую очередь, в геофизике, метеорологии, при обработке спутниковой информации и пр., с производительностью до 100 млн. операций с фиксированной запятой в секунду;

– ПС-3000 класса МКМД (1982), предназначенные для обработки данных на верхних уровнях иерархии сложных систем управления разветвлёнными технологическими процессами и производствами при прямом цифровом управлении сложными объектами, с производительностью до 15 млн. операций с плавающей запятой в секунду.

Принципиально важно, что по производительности комплексы ПС были соизмеримы с самыми мощными отечественными вычислительными системами соответствующих классов, и это при том, что МВС серии ПС создавались на серийной элементной и конструкторской базе самого общего применения (без использования новых технологий и специальных схем). Именно по этой причине машины серии ПС имели наилучшие значения соотношения производительность/стоимость среди всех отечественных МВС.

Немалую роль в создании и развитии МВС серии ПС сыграли работы Э.А. Трахтенгерца, связанные с развитием архитектуры и методов программирования высокопроизводительных вычислительных систем. Результаты этих исследований опубликованы им в 3 монографиях (1978, 1981, 1987). Предложенные методы нашли применение при разработке архитектуры и создании программного обеспечения для многопроцессорных высокопроизводительных вычислительных систем.



Эдуард Анатольевич Трахтенгерц

При разработке алгоритмического и программного обеспечения машин серии ПС был накоплен значительный опыт параллельного программирования и создан обширный алгоритмический багаж, применимый при решении больших вычислительных задач на современных параллельных вычислительных системах. Были также созданы методики разработки параллельного алгоритмического и программного обеспечения.

Большой вклад в развитие численных методов параллельных вычислений внёс д.ф.-м.н. Е.Г. Сухов. Им созданы быстрые параллельные алгоритмы синтеза трёхмерных изображений в задачах научной визуализации, разработаны новые параллельные методы восстановления ультразвуковых томографических изображений, основанные на численном решении обратной задачи рассеяния в приближениях Борна и Рытова. Численно изучена устойчивость полученных алгоритмов. Проанализированы методы решения нелинейной обратной задачи рассеяния акустики. Выполнено исследование рекурсивных структур и алгоритмов решения больших задач линейной алгебры, получены оценки сложности для плотных матриц различных типов. Построены параллельные алгоритмы декодирования Рида–Соломона, предложена параллельная архитектура декодера. Разработаны и исследованы методом Монте-Карло параллельные алгоритмы моделирования. Математические и численные алгоритмы могут быть использованы и для широкого спектра современных вычислительных систем массового параллелизма.

В дальнейшем были сконструированы (частично «в металле») новые, ещё более мощные комплексы ПС, однако их эволюция была остановлена распадом Советско-

го Союза.

Важно отметить, что при создании комплексов ПС сотрудниками Института был приобретён уникальный опыт, который может найти применение при создании оригинальных средств управления вычислительными процессами для систем реального времени ближайшего будущего.

4.3. Надёжность, живучесть, диагностика, отказоустойчивость

Первые работы по проблемам оценки работоспособности технических средств и систем на этапе их эксплуатации были выполнены в Институте в начале 50-х годов, исследования по этой тематике продолжаются и поныне. По мере углубления теоретических основ этих работ расширялись области прикладных исследований – от отдельных элементов до сложных управляющих систем типа АСУ атомными электростанциями.



Борис Степанович Сотсков

Исследования по проблеме надёжности были инициированы член-корреспондентом АН СССР Борисом Степановичем Сотсковым. Полученные тогда результаты сводились к обобщению экспериментальных данных и разработке математических моделей анализа надёжности элементов автоматики. В 50-е годы основное внимание уделялось надёжности таких элементов, как реле (электрические контакты) и другая коммутирующая аппаратура. Результаты этих исследований описаны Б.С. Сотсковым в его книгах: (*Б.С. Сотсков. Основы расчёта и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. – М.: Госэнергоиздат, 1953* и *Б.С. Сотсков. Электрические контакты – М.: Госэнергоиздат, 1956*). В 60-е годы в руководимой Б.С. Сотсковым лаборатории «Элементов автоматики» формулируется новое направление в исследовании проблемы надёжности – физические основы надёжности элементов автоматики, – в рамках которого создаются модели анализа влияния физических факторов процесса эксплуатации на показатели параметрических и катастрофических отказов элементов. Значительный вклад в это направление внесли И.Е. Декабрун, Б.П. Петрухин, С.Е. Ростковская, Н.А. Шавыкин.



Борис Петрович Петрухин



Ирина Евгеньевна Декабрун

Впоследствии результаты теоретических исследований вошли в инженерную практику в качестве стандартов и типовых методик расчёта надёжности элементов,

приборов и устройств, а также планов их испытаний. Эти методики с середины 60-х годов имели статус официальных документов в Минприборе и Минсудпроме.

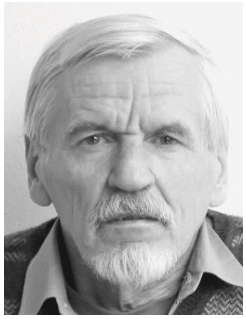
Начало 60-х годов открывает эпоху бурного развития автоматизации в стране, создания крупных автоматизированных комплексов в оборонной, химической и металлургической промышленности и других отраслях народного хозяйства.

Резко возросла цена отказов, особую актуальность приобрели методы прогнозирования и обеспечения надёжности систем на всех стадиях их жизненного цикла, особенно стадии проектирования. Наряду с ростом требований к достоверности оценок надёжности технических средств автоматизации возросли требования к достоверности оценок влияния выбора структуры и регламентов технического обслуживания на надёжность систем. В ряде лабораторий Института были развёрнуты теоретические и прикладные работы по исследованию проблем надёжности. Хорошим импульсом к развитию работ этого направления послужил доклад член-корреспондента АН СССР М.А. Гаврилова на I Международном конгрессе ИФАК «Структурная избыточность и надёжность работы релейных устройств» (Труды ИФАК, изд. АН СССР, 1961, т. 3). Выходят книги *А.Л. Райкин. Элементы теории надёжности для проектирования технических систем. – М.: Сов. радио, 1967*; *С.М. Доманицкий. Построение надёжных логических устройств. – М.: Энергия, 1971*.

Замечательная особенность этих работ – демонстрация предлагаемых методов на примерах реальных классов систем сложной структуры, в разработках которых авторы принимали непосредственное участие. Универсальное значение имели рекомендации по обеспечению отказоустойчивости систем посредством введения различных видов избыточности: структурной, временно́й, информационной. Одним из таких предложений оказалось исследование А.Л. Райкиным и А.С. Манделем нового класса методов введения избыточности – динамического резервирования аппаратуры. В это же время В.А. Лотоцкий, другой ученик А.Л. Райкина, впервые в стране рассмотрел оригинальные постановки задач одновременного управления запасами заменяемых частей и принадлежностей (ЗИП) и планирования технического обслуживания. Динамическое резервирование стало с тех пор одним из популярнейших направлений в теории надёжности. В Томском государственном университете возникла даже целая научная школа под руководством проф. Г.Г. Пестова (д.ф.-м.н. В.А. Томиленко и к.ф.-м.н. Л.В. Ушакова), которая до сих пор развивает новые модели и методы динамического резервирования. Не остался в стороне и ИПУ РАН: в 2023 г. д.т.н. А.С. Манделем совместно с магистром МГУ Ю.В. Кульгиным были получены принципиально новые результаты в области динамического резервирования технических систем в условиях неопределённости.



Александр Соломонович Мандель



Владимир Алексеевич Лотоцкий

Естественным развитием работ по проблемам надёжности стала постановка в 80-е годы вопроса об исследовании свойства живучести систем. Живучесть определяется как способность системы сохранять допустимый уровень работоспособности при поражающих внешних воздействиях. Специфическая особенность анализа живучести заключается в необходимости формирования моделей развития поражающих факторов и утраты стойкости элементов системы по отношению к этим факторам. Новые результаты по этой проблеме были получены А.В. Антоновым. Им разработаны детерминированный и статистический методы формирования оценок показателей живучести. В 1988 г. понятие «живучесть» было впервые включено в терминологию автоматики (*«Теория управления, терминология. Сборник рекомендуемых терминов», вып. 107. М.: Наука, 1988*). Анализ живучести позволяет оценить пространственную (топологическую) структуру системы, то есть изучить влияние пространственного размещения элементов системы на её стойкость к поражающим факторам внешней среды.

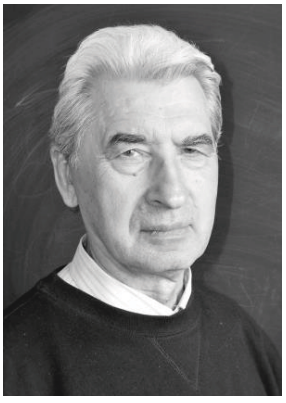
В последующие годы задача анализа надёжности становится неотъемлемым компонентом процесса проектирования: в число обязательных проектных и сертификационных документов при создании технических систем стали включать разделы «Проектный анализ надёжности», «Вероятностный анализ безопасности», «Обоснование эксплуатационной готовности». Резко вырос уровень требований к точности расчётов, понадобились новые методы, которые более полно учитывали особенности структур систем и снижение их работоспособности при отказе отдельных компонент. Ответом на эти вызовы стала разработка обширного класса статических и динамических моделей и методов анализа надёжности. Были получены следующие теоретические результаты:

– создан специальный метод и разработано программное обеспечение расчета показателей надёжности, безопасности, эффективности резервированных систем с восстановлением на основе аппарата марковских процессов с доходами;



Николай Васильевич Лубков

– предложена процедура ускоренного статистического моделирования состояний работоспособности систем сложной структуры (*Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков и др. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988*);



Борис Григорьевич Волик

– разработан подход к расчёту показателей безотказности и производительности систем на монотонных и немонотонных логико-вероятностных моделях;

– создана модель двухпараметрических марковских процессов для исследования готовности и производительности многофазных технологических систем с накопителями;

– предложена модель системного анализа техногенной безопасности технических объектов;

– проведено исследование нового класса вероятност-

ных распределений и обобщение графо-аналитического метода оценки параметров распределений для наработок объектов до отказа;

– исследованы стратегии технического обслуживания и осуществлена оптимизация параметров стратегий по критерию минимума эксплуатационных затрат;

– разработан подход к моделированию и оценке показателей контролепригодности авиационной техники на основе методологии анализа видов и последствий отказов;

– исследованы и разработаны модели и методы надёжностного анализа отказоустойчивых вычислительных систем сложной структуры с учётом характеристик контроля работоспособности и программно-реализованных процедур парирования сбоев;

– разработан подход к агрегированию логико-вероятностных и марковских моделей надёжности и способ алгоритмизации агрегированной модели на основе диаграмм двоичных решений (*В.С. Викторова*, *А.С. Степанянц*. *Модели и методы расчета надёжности технических систем. Изд. 2, исправленное. – М.: Издательская группа URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2016*).



Валентина Сергеевна Викторова

Теоретические достижения и созданное в Институте специализированное программное обеспечение востребованы промышленностью и внедрены в проекты важных для страны объектов:

– автоматизированная система анализа контролепригодности авиационной техники (проекты самолетов SSJ100, МС-21);

– анализ и обоснование надёжности, производительности, эксплуатационной готовности газотранспортных и газоперерабатывающих систем (проекты завода по сжижению газа Штокмановского газоконденсатного месторождения, газотранспортная система Сахалин-Хабаровск-Владивосток);

– анализ безотказности, готовности, ремонтопригодности поточных линий расснаряжения объекта уничтожения химического оружия;

– проектный анализ надёжности судовых энергетических установок, систем жизнеобеспечения атомных подводных лодок;

– проектная оценка надёжности системы безопасности 4-го блока Калининской АЭС;

– расчет показателей надёжности сбое-отказоустойчивых бортовых вычислительных комплексов;

– программное обеспечение марковского анализа в рамках макета комплекса ситуационного моделирования процессов создания и использования научно-технического задела в авиастроении.

Актуальность проблемы методологического обеспечения живучести изделий ракетно-космической отрасли определила разработку механизмов виртуализации инжиниринга функциональных модулей космических аппаратов. С целью повышения оперативности принятия решений при обеспечении функциональной надёжности бортовой аппаратуры в полёте поставлена проблема повышения эффективности адаптации системы управления к влияниям внешних воздействий. Предложена тех-

нология, ориентированная на интеллектуализацию управления с использованием анализа коммуникационной среды, определяющей возможности обеспечения живучести космических аппаратов. Коррекцию управления предложено проводить на сочетании результатов контроля технологических параметров и знаний экспертов, имеющих опыт в области выполнения полётных заданий. Предложена методология имитационной оптимизации механизмов управления стойкостью космического аппарата к электрофизическим воздействиям, построенных на основе информационного обеспечения компьютерных мультиагентных технологий при интерсубъектном взаимодействии экспертов (д.т.н. Е.В. Юркевич, д.т.н. А.Г. Полетыкин, к.ф.-м.н. В.Г. Промыслов, к.т.н. И.А. Степановская, Л.Н. Крюкова).

В 2016 г. на Международной выставке научно-технических и инновационных разработок «Измерение, мир, человек», совместно со специалистами АО «Корпорация ВНИИЭМ», за разработку «Информационно-аналитическая система оценки качества ракетно-космической техники» получена золотая медаль в номинации «Автоматизация и информатизация производства».



Виктор Алексеевич Ведешенков

Значительный объём теоретических и прикладных исследований выполнен в Институте по обеспечению надёжности отдельных классов элементов и систем (интегральных схем, элементов пневмо- и гидроавтоматики, блоков логических устройств и др.). Для этого класса задач основное внимание уделялось разработке идеи обеспечения отказоустойчивости с помощью встроенных в структуру системы схем или блоков самодиагностики. В конце 60-х гг. группа под руководством А.Ф. Волкова разработала вычислительный комплекс для важного оборонного объекта, в архитектуру которого было включено диагностическое ядро. С целью сокращения объёма тестовых программ был использован принцип диагностирующих подсистем переменной структуры. Результаты этой разработки изложены в книге *А.Ф. Волков, В.А. Ведешенков, В.Д. Зенкин. Автоматический поиск неисправностей в ЦВМ. М.: Сов. радио, 1968*.



Павел Павлович Пархоменко

Работы по технической диагностике, начатые в Институте в конце 50-х годов под руководством П.П. Пархоменко (впоследствии член-корреспондента РАН), стали новым направлением в теории обеспечения работоспособности систем. В 1981 г. вышла обобщающая монография *П.П. Пархоменко., Е.С. Согомонян. Основы технической диагностики. – М.: Энергия, 1981*. Влиянию диагностики на отказоустойчивость систем посвящено немалое число работ сотрудников Института. Достаточно полное представление о разработках этого направления можно получить по книге *Е.С. Согомонян, Е.В. Слабаков. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989*.

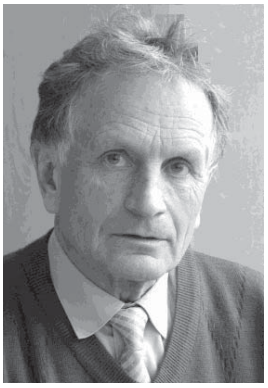
Стало возможным ввести понятие контура структурного управления, информационная часть которого включает средства контроля, самодиагностики и диагностики, центральная часть – средства, в основном, логические принятия решений и исполнительная часть – средства резервирования и реконфигурации алгоритмической и технической структур объекта управления, контуров координатного и параметрического управления. В такой, по сути, трёхконтурной системе может обеспечиваться компенсация не только координатных и параметрических возмущений, но и структурных.

С 1972 г. по инициативе П.П. Пархоменко, поддержанной десятками предприятий страны (и по примеру уже работавшей «школы» М.А. Гаврилова по теории релейных устройств), была организована Всесоюзная «школа» по технической диагностике. Ежегодные двухнедельные заседания «школы» в разных частях страны превратились в престижный форум передовых достижений новой технической науки. На лекциях анализировался мировой опыт технической диагностики и осуществлялся обмен накопленными результатами отечественных предприятий.

Публикации участников «школы» и сотрудников лаборатории «Технической диагностики» Института оказали большое влияние на внедрение этих достижений в технологические процессы производства электронной аппаратуры. Построение проверяющих и диагностических тестов, встроенный контроль, компьютерные системы моделирования цифровых устройств стали непременным атрибутом новых технологических процессов. Всё это позволило поднять на высокий уровень надёжность ответственных изделий вычислительной и управляющей техники. «Школа» пользовалась огромным авторитетом среди специалистов и была проводником новых идей на десятках предприятиях страны. «Школа» проработала до 1996 г.

Одним из достижений Института в это время стала разработка системы моделирования цифровой аппаратуры, которая началась ещё на ЭВМ ICL4-70, и в последующем на персональных ЭВМ. Одновременно разрабатывались компьютерные программы построения тестов, внедрённые для ЭВМ системы «Ряд» в НИЦЭВТ, НИИТ (г. Москва) и на многих других предприятиях.

В процессе обсуждений проблем технической диагностики родилось новое направление – отказоустойчивые системы. Было ясно, что в современных условиях техническое восстановление отказавшей аппаратуры из-за отказов (к слову сказать, совершенно неизбежных) затратно и сложно из-за необходимости привлечения высоко квалифицированного персонала, очень дорогой обслуживающей техники и программного обеспечения. Одним из примеров уже существовавших отказоустойчивых ЭВМ можно назвать многоярусные мажоритарные системы. Это специальные структуры для борьбы с одиночными сбоями и отказами. Но требовал решения более общий вопрос – что такое отказоустойчивые системы?



Михаил Фёдорович Каравай

Ответ был найден на базе инвариантно групповых исследований структуры многопроцесорных систем (М.Ф. Каравай). Было доказано, что отказоустойчивость – это свойство математической симметрии исследуемых структур. *N*-вершинная структура (граф) должна иметь по-

рядок группы симметрии не ниже *N*. Были найдены все структуры, удовлетворяющие этому условию. Это цикло-хордальные графы. Наибольшей симметрией обладает полный граф, его группа симметрии имеет порядок *N!*. Был разработан алгоритм реконфигурации и восстановления системы при возникновении отказов. *Сохранение логической структуры исходной задачи* после реконфигурации системы рассматривается как обязательное требование к процессу реконфигурации. Это требование влечет за собой минимальную перекомпиляцию, связанную с новыми физическими адресами некоторых логических ресурсов.

К этому же времени относятся исследования П.П. Пархоменко по построению гамильтоновых циклов для ряда семейств графов, представляющих интерес при проектировании многопроцессорных отказоустойчивых систем.

В период с 2019 по 2023 гг., в лаборатории «Надёжности, диагностики и отказоустойчивости» продолжились работы по развитию и, по-видимому, завершению структурной теории локальных вычислительных и управляющих сетей на базе квазиполных графов (г.н.с. М.Ф. Каравай, г.н.с. В.С. Подлазов). Структурные проблемы создания «идеальной» локальной сети оставались нерешёнными с 50-х годов прошлого столетия. Основные усилия были направлены на разработку такой архитектуры локальной сети, при которой в ней достигаются оптимальные характеристики по:

1) производительности, то есть параллельной пересылке информационных пакетов от всех передатчиков ко всем приёмникам (один к одному);
2) отсутствию конфликтов при параллельной передаче любой (из *N*!) перестановок пакетов по сети;
3) самомаршрутизации пакетов в сети, независимой от выбора маршрутов остальными абонентами сети;
4) достижению оптимальной процедуры отказоустойчивости – сохранению полной работоспособности вплоть до полного исчерпания резерва в сети, а при дальнейших отказах – с постепенной деградацией производительности вплоть до последнего оставшегося абонента сети.

К настоящему времени проблемы создания «идеальной» локальной сети на базе квазиполных графов и орграфов были доведены в лаборатории до своего логического конца. С точки зрения структурных характеристик этих локальных сетей достигнуты предельные возможности. Следует понимать, что сама по себе структура сети ничего не решает, но она открывает программному обеспечению возможность реализации предельно доступной производительности и отказоустойчивости за счёт параллелизма сети и отсутствия конфликтов маршрутизации информационных пакетов по сети. Доказано, что подобная сеть реализует самую сложную логическую функцию сети – бесконфликтное параллельное выполнение любой из *N*! возможных перестановок пакетов, где *N* – число абонентов. По сути, эта возможность является необходимым и достаточным условием существования «идеальной» параллельной локальной сети.

Исследования, проведённые группой сотрудников лаборатории М.Ф. Караваем, В.С. Подлазовым и с.н.с. А.М. Михайловым, позволили включить в новые результаты гетерогенные (неоднородные) сети, на которых в значительной степени базируется современная космонавтика, авионика, робототехника и др. информационные

сферы. В практическом плане здесь предложены новые архитектуры локальных управляющих сетей, обладающих значительными преимуществами по сравнению с современными мультиплексными сетями информационного обмена. Более того, эти сети по своим функциональным и структурным характеристикам превосходят интерконнект, используемый в суперкомпьютерах. В частности, были предложены возможности повышения числа абонентов и канальной отказоустойчивости отечественной системной сети «Ангара» разработки НИЦЭВТ. Сетей, подобных разработанным, нигде в мире ещё не было.



Алексей Михайлович Михайлов

Значительное продвижение получили работы по повышению характеристик известных сетей на основе свойств коммутаторов с топологией квазиполных орграфов. Исследования в этом направлении (совместно с с.н.с. В.В. Соколовым из лаборатории «Распределённых информационных, аналитических и управляющих систем» имени И.В. Прангишвили) показали, что, взяв за коммутационную основу базовый локальный коммутатор в архитектуре квазиполного орграфа, удаётся получить более простые решения для гетерогенных управляющих сетей и с лучшей масштабируемостью, чем в случае квазиполного графа. Фактически на этом направлении В.С. Подлазовым получены, можно сказать абсолютные, то есть не улучшаемые результаты топологических характеристик подобных сетей.



Виктор Сергеевич Подлазов

Построены неблокируемые коммутаторы со структурой трёхмерных гиперкубов и мультиколец с прямыми каналами (без промежуточной буферизации пакетов) (В.С. Подлазов). В них неблокируемость пакетов обеспечивается посредством их динамической самомаршрутизации. При динамической самомаршрутизации в каждом узле происходит коммутация пакетов на выходные каналы локально на основе информации о маршрутах пакетов в их заголовках и возникающих конфликтах на этих маршрутах. Начаты работы по построению оптических сетей связи на основе распределённых фотонных коммутаторов, в которых коммутация осуществляется на основе только оптических сигналов (без внешних электрических сигналов). Теоретически были построены структуры неблокируемых распределенных фотонных коммутаторов на базе оригинального дуального фотонного коммутатора, предложенного К.А. Вытовтовым и Е.А. Барабановой (лаборатория «Телекоммуникационных систем»).

Получил дальнейшее развитие комплекс работ по искусственному интеллекту в задачах классификации и распознавания образов (А.М. Михайлов, М.Ф. Каравай). В отличие от нейронных сетей, решающих тот же круг задач, А.М. Михайловым предложен индексный метод классификации, позволяющий практически в реальном времени выполнять и алгоритмы обучения, и классификацию образов. На этой основе, ставшей развитием классических задач технической диагностики, доминировавших в

лаборатории «Надёжности, диагностики и отказоустойчивости» в течение нескольких десятилетий, получены многочисленные результаты в самых разнообразных областях науки – от прогнозирования отказов авиационных двигателей до онкологических медицинских диагнозов по полному профилю экспрессии генов (около 20530 генов). Публикации по этой тематике у нас в стране и за рубежом не остались незамеченными. Большой интерес выразили учёные Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дм. Рогачева, Москва, Минздрав РФ. Этот центр обладает современной медицинской аппаратурой для генетических исследований и активно приглашает к сотрудничеству. Издательство *Springer* разместило на своём сайте английский вариант статьи из журнала «Автоматика и телемеханика», (№7, 2023 г.) под названием "*Machine Learning for Diagnosis of Diseases with Complete Gene Expression Profile*" (А.М. Михайлов, М.Ф. Каравай, В.А. Сивцов, М.А. Курникова). Американский учёный Скотт Криг, ознакомившись с английским переводом статьи из журнала АиТ (№ 3, 2022), а также с публикациями на различных конференциях за последние 5 лет, попросил разрешения включить эти результаты (по «мгновенному обучению») во второе издание фундаментального труда *Springer Nature* "*Computer Vision Metrics*", 2023 (Глава 12) и обещал подарить эту книгу Институту.



Геннадий Георгиевич Стецюра

Новые результаты получены г.н.с. Г.Г. Стецюрой при исследовании стационарных и мобильных систем управления взаимодействием распределённых активных объектов, работающих в режиме жесткого реального времени (ЖРВ). Рассматриваемые объекты используют широкий спектр средств управления, от суперкомпьютеров до простых контроллеров. Распределённые системы управления должны очень быстро реагировать на непредсказуемые события и в ответ выполнять управление, при необходимости перестраивая структуру системы. Такие действия требуется выполнять все быстрее из-за повышения требований к качеству управления при высоких скоростях движения объектов или при переводе объектов в новое состояние без их перемещения. Разработана быстрая децентрализованная синхронизация объектов – средство получения быстрой обратной связи для ответа действующим на систему событиям. Исследованы неоднородные и однородные системы. Неоднородные системы содержат управляемые объекты и группы ретрансляторов их сигналов. Системы отвечают самым высоким на текущий момент требованиям к точности синхронизации совместных действий объектов и скорости перестройки системы. Использование известных способов измерения времени переноса сигнала между объектом и ретранслятором обеспечивает ошибку начала синхронизации всеми объектами меньше пикосекунды. С такой точностью группа объектов начинает общие действия по команде других объектов, в частности одновременно воздействуя на внешний объект. В однородных системах ошибка в начале синхронизации не меньше величины T – времени переноса сигнала в пределах системы, но время измерять не требуется и система упрощается. При этом часть совместных действий объектов замедляется,

но для многих видов простых объектов (мобильных роботов, датчиков, исполнительных механизмов, объектов на чипе, печатной плате) задержка оказывается приемлемой. В обоих видах систем сетевые средства помимо переноса сообщений выполняют распределённые операции управления системой.



Леонид Юрьевич Филимонюк

За последние пять лет в.н.с. Л.Ю. Филимонюком проведен системный анализ проблемы обеспечения безопасности функционирования авиационных транспортных систем. В результате выполнена постановка задачи обеспечения безопасности авиационных транспортных систем в условиях критических сочетаний событий, разработаны методы и модели её решения. Проработаны основные положения причинно-следственного описания критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах. Предложен подход к формализации и классификация процессов функционирования авиационных транспортных систем. Выделены признаки критических сочетаний событий и их классы, использование которых позволяет облегчить анализ аварийных ситуаций в процессе функционирования авиационных транспортных систем, а также определить возможность возникновения маловероятных аварий и критических сочетаний событий. Разработаны математические модели, позволяющие определить вероятности возникновения критических сочетаний событий в процессе функционирования авиационных транспортных систем с помощью решения систем дифференциальных уравнений для различных классов критических сочетаний событий. Это позволяет обеспечить безопасность авиационных транспортных систем.

Результаты исследований были использованы при создании и модернизации Модели надёжности и безопасности, разрабатываемой в конструкторском бюро им. С.В. Ильюшина (ОАО «Ил») и были применены в рамках хоздоговорных работ с АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» и ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» по теме «Создание программно-математического обеспечения экспериментальной системы автоматического управления летающей лаборатории», а также Самарским государственным аэрокосмическим университетом им. С.П. Королёва по теме «Разработка математических моделей для повышения эффективности функционирования координатно-измерительных машин за счёт оценки степени влияния основных факторов на производительность и точность измерений».



Евгений Владимирович Юркевич

Группа г.н.с. Е.В. Юркевича (Е.В. Юркевич, н.с. Л.Н. Крюкова и м.н.с. А.А. Тутуров) ведёт работы по созданию теории функциональной надёжности эргатических систем. На примере разработки механизмов оценки рисков выполнения миссии космического аппарата рассматриваются задачи выявления особенностей применения технологий гибридного интеллекта, то есть механизмов принятия операторами экспертных решений на

основе информации из базы знаний, сформированной с помощью технологий искусственного интеллекта. С использованием предситуационного прогноза работы космических комплексов описаны алгоритмы обеспечения живучести бортовой аппаратуры космического аппарата при длительном сроке его активного существования в условиях воздействия внешних факторов. Разработаны модели социо-киберфизических систем, предложена оценка культуры коммуникаций как критерий функциональной надежности управления в организационных системах, а также механизмы управления формированием знаний, определяющие возникновение синергетического эффекта при использовании технологий гибридного интеллекта.

С помощью анализа статистики результатов экспериментов показано, что структурные схемы надёжности, содержащие непоследовательные соединения элементов бортовой аппаратуры, характеризуются распределениями, несоответствующими экспоненциальному закону, хотя такой закон адекватно отражает оценку времени до отказа для дискретного элемента или системы из последовательно подключенных элементов. Отличием данного подхода от классического является то, что вычисляемая функция рассматривалась не как одна экспонента, а как их композиция. Такое представление позволило более точно описывать резервированные системы.

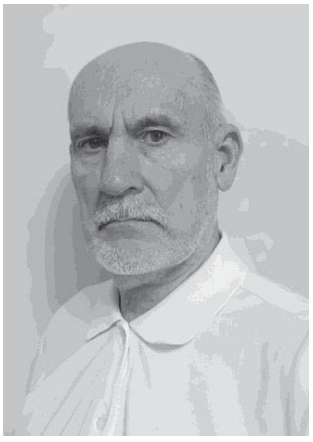
На современном этапе цифровизации управления предлагаемый подход позволил давать рекомендации по совершенствованию средств снижения рисков выполнения миссии космического аппарата. Группа ежегодно обсуждает получаемые результаты на Всероссийских мультиконференциях по проблемам управления, Международных конференциях по управлению в крупномасштабных системах, на Конгрессе молодых учёных, Гагаринских чтениях и др.

В области классических работ по надёжности систем в.н.с. Н.В. Лубковым выполнены исследования надёжностных моделей территориально распределённых комплексов (ТРК). В качестве конкретных приложений были выбраны инженерные инфраструктуры (ИнИ), имеющие большое значение как для социальной сферы, так и для промышленности. Территориальная распределённость объектов ИнИ не позволяет в полной мере обеспечить их защиту от внешних неблагоприятных воздействий, интенсивность которых, как правило, выходит за рамки нормативных требований к условиям эксплуатации. Предложенный подход к анализу работоспособности и устойчивости функционирования ИнИ на базе методологии надёжностного анализа технических систем позволяет учесть неблагоприятные внешние воздействия. Анализ последствий воздействий проводится по следующей схеме: воздействие – зона воздействия с распределением его интенсивностей – объекты в зоне воздействия, уязвимые в отношении к данному воздействию – набор отказавших объектов (определяется с учетом их уязвимости) – оценка последствий отказов объектов с учётом их положения в сетевой структуре ИнИ. Учитывая важность анализа работоспособности системы при учёте кратных отказов, предложен подход к оценке критичности кратных отказов на основе разложения структурной функции работоспособности системы по совокупности аргументов. Наиболее критичные наборы образуют минимальные сечения сетевой структуры ИнИ. Для поиска минимальных сечений разработан алгоритм вероятностного моделирования, в котором для построения вероятностных распределений используются «локальные» характеристики объектов (узлов сетевой структуры): центральность узлов, характеристики безотказности и уязвимости объектов и пр.



Александр Владимирович Антонов

Под руководством ведущего эксперта к.т.н. А.В. Антонова выполнен ещё один комплекс исследований по разработке и развитию методов анализа живучести сложных технических систем. Он включает разработку и модификацию моделей, методов и алгоритмов управления движением подвижных объектов при выполнении ими основной работы по результатам натурных испытаний при неполной информации (с использованием косвенных измерений), а также разработку моделей поражающих факторов и процессов неблагоприятных воздействий (НВ) на компоненты подвижного объекта и адекватного программного обеспечения для моделирования поведения подвижных объектов. Выработаны принципы построения системы хранения данных (СХД) для хранения и использования результатов испытаний различных объектов, ставшие базой разработки структуры СХД, а также программного обеспечения для решения задач администрирования СХД, заполнения СХД и выборки данных из СХД для Научно-испытательного центра ракетно-космической промышленности. Согласно этим принципам построена и программная реализация системы «Регистрации и архивации состояний, ремонтов и замен технологического оборудования и оборудования систем управления технологическим оборудованием на блоках АС» в составе СВБУ для энергоблоков АС «Кудамкулам». Для СВБУ энергоблоков атомных станций «Бушер» и «Кудамкулам» построены модели работоспособности сложных технических подсистем и систем из них, а также выполнен выбор видов показателей их надёжности. Практическая реализация работы осуществлялась для ЦКБ МТ «Рубин», Научно-испытательного центра ракетно-космической промышленности и для АС «Бушер» и «Кудамкулам».



Сергей Иванович Уваров

Математическая проблема оценки алгоритмической сложности задач класса *NP* отнесена международным математическим сообществом к числу наиболее важных фундаментальных теоретических проблем. Она давно заинтересовала нашего сотрудника ведущего инженера к.т.н. С.И. Уварова. Им получен ряд интересных результатов в этом направлении. Была разработана методика статистической эмпирической оценки 3-КНФ формул при большом числе переменных, что не допускает проведения полномасштабных вычислительных экспериментов. Экспоненциальный характер оценки алгоритмической сложности задачи выполнимости КНФ формул эмпирически подтвержден вплоть до 16000 логических переменных. На следующем шаге получена аналитическая характеристика области полиномиальной разрешимости случайных 3-КНФ формул.

5. Управление в промышленности, энергетике, транспорте и сельском хозяйстве

5.1. Системы управления в атомной энергетике

Институт всегда испытывал особый интерес к крупным государственным народнохозяйственным проектам. В 1960-е годы это были программы освоения космического пространства и создания современных систем управления подвижными объектами. Первые спутники Земли, первые пилотируемые полёты в космос, проект первой в мире автоматизированной атомной подводной лодки (проект 705), создание мощного арктического ледокольного атомного флота, современные АСУ ТП и АСУ в металлургии, химической, машиностроительных и других отраслях – во всех работах активно участвовали сотрудники Института.

В 1980-е годы таким же знаковым для Института проектом стали работы по автоматизации атомных электростанций (АЭС). Директор В.А. Трапезников очень хорошо осознавал всю необходимость участия Института в работе над крупными национальными проектами. Участие в таких масштабных работах укрепляло авторитет Института и привлекало сотрудников к решению новых и важных теоретических и прикладных задач. В 1981 г., по приглашению руководства «Союзатомэнерго», Институт проблем управления активно подключился к созданию систем управления АЭС. Наши учёные совместно со специалистами ВНИИАЭС, ЦНИИКА и ИАЭ подготовили и сделали ряд докладов на Всесоюзных совещаниях по интеллектуальным методам управления* на АЭС и ТЭС. В этих докладах были сформулированы предложения по новым методам управления и по созданию самоорганизующихся системам адаптивного управления оборудованием и технологическими процессами на основе прогнозирующих математических моделей.

* В то время эпитет «интеллектуальные» к системам управления ещё не «прикладывался», однако, по сути, создавались именно интеллектуальные системы управления.

В 1984 г., по просьбе руководства Минприбора СССР, Институтом была разработана первая концепция по созданию АСУ ТП АЭС (И.В. Прангишвили, Ф.Ф. Пащенко, Э.А. Трахтенгерц, В.В. Игнатущенко, Ю.М. Шурайц). В том же году Министерство приборостроения поручило Институту доработку Целевой комплексной научно-технической программы О.Ц.046 «Создание автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций».



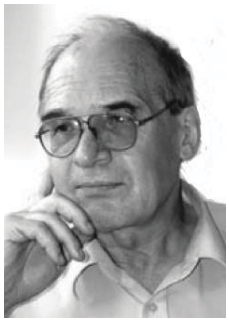
И.В. Прангишвили



Ф.Ф. Пащенко



Э.А. Трахтенгерц



В.В. Игнатущенко

В 1985 г. зам. директора Института академик Грузинской АН И.В. Прангишвили был назначен генеральным конструктором АСУ ТП АЭС по Минприбору. В Институте был создан Сектор автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Перед сектором были поставлены задачи работы, координации и научного руководства общесоюзными и международными программами по разработке и созданию систем автоматизации объектов атомной энергетики, Сектором, совместно с ЦНИИКА (В.И. Грицков, И.А. Егоров) и организациями 14 министерств и ведомств СССР, в 1985–1986 гг. была актуализирована и доработана Общесоюзная целевая программа по автоматизации атомных электростанций О.Ц.046; разработаны технические требования; концепция (в этой работе активное участие принимали д.т.н. А.А. Амбарцумян, к.т.н. А.И. Потехин и др.); эскизный проект и ряд основополагающих документов для реализации проекта «Создание систем управления технологическими процессами атомных электростанций».



А.А. Амбарцумян

Надо отметить, что большой вклад в развитие работ по автоматизации атомных станций внес министр Минприбора СССР М.С. Шкабардня. Михаил Сергеевич правильно оценил возможности организаций Минприбора и возложил статус головной организации по АСУ ТП АЭС на ИПУ. Научным руководителем работ был назначен академик В.А. Трапезников. Руководителем работ по атомной про-



Михаил Сергеевич Шкабардня

блематике от Минсредмаша СССР был Президент АН СССР академик А.П. Александров, которого с В.А. Трапезниковым связывала давняя дружба по совместным работам в оборонной промышленности.

После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. внимание к выполнению Программы значительно усилилось. Были поставлены задачи повышения степени интеллектуализации систем управления и технологического оборудования для АЭС, по разработке систем поддержки принятия решений оперативным персоналом и созданию тренажёров. Увеличилось финансирование работ и организации, работающие по Программам, были оснащены современной вычислительной и организационной техникой и новым технологическим оборудованием.

В 1986 г. Правительством СССР было принято решение по разработке Общесоюзных научно-технических программ и Комплексной научно-технической Программы стран-членов СЭВ. Институтом совместно с ЦНИИКА, ВНИИАЭС, ИАЭ, АЭП, ВНИИАМ и другими организациями Минприбора и организациями 14 министерств и ведомств СССР в 1986–1987 гг. была разработана новая Общесоюзная Программа О.80.060 «Создание автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций».

Программа была одобрена на совместном заседании НТС и коллегий Минсредмаша, Минприбора, Минэнерго, АН СССР и других министерств (председатель Совета – академик А.П. Александров) и представлена министром Минсредмаша Е.П. Славским и руководителями главка «Союзатомэнерго» В.П. Невским и В.А. Казаровым в Правительство СССР.

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР в 1987 г. зам. директора ИПУ И.В. Прангишвили был назначен Генеральным конструктором по АСУ ТП АЭС. Надо отметить, что в то время в СССР такой статус имели только 10 человек. Институт проблем управления стал по данной Программе головной организацией. Объектом внедрения первой (головной) АСУ ТП была определена Башкирская АЭС. В работах по Программе участвовало более 200 организаций из 14-ти союзных министерств и ведомств.



Нововоронежская АЭС

В развитие работ по Комплексной программе научно-технического прогресса стран-членов СЭВ в 1986 г. была разработана Программа «Создание и внедрение эффективных и надёжных АСУ ТП АЭС и соответствующих технических средств» на 1986–1990 гг. Координация работ была возложена на ИПУ (Ф.Ф. Пащенко). В 1987 г. Программа была согласована и подписана представителями всех стран-членов СЭВ. В работе участвовало более 100 организаций стран-членов СЭВ.

В 1987 г. для проведения работ по автоматизации АЭС и координации действий организаций-соисполнителей на базе сектора АСУ ТП АЭС в Институте была создана лаборатория «Интеллектуальных систем управления и моделирования»

(зав. лаб. Ф.Ф. Пащенко). К работе были привлечены ведущие специалисты из ИАЭ, ВНИИАЭС, ВНИИАМ и других организаций Минсредмаша и Минэнерго. Перед лабораторией были поставлены задачи координации и научного руководства общесоюзными и международными программами по разработке и созданию систем автоматизации объектов атомной энергетики, разработке современных эффективных систем управления в атомной энергетике, повышению интеллектуального уровня и надёжности систем управления, разработке интеллектуальных систем принятия решений и тренажёров для АЭС. В лаборатории образовали 2 сектора: «Моделирование технологических процессов АЭС» (зав. сектором Е.М. Сапрыкин) и «Представление и образное отображение информации» (зав. сектором В.Г. Гришин) и группу координации работ по АСУ ТП АЭС (рук. Д.А. Шалабаев).



Александр Михайлович Шубладзе

К работам по АСУ ТП АЭС были привлечены многие сотрудники Института. Особо надо отметить значительный вклад А.А. Амбарцумяна, Б.Г. Волика, М.А. Зуенкова, А.Г. Полетыкина, В.Г. Промыслова, Э.А. Трахтенгерца, В.Д. Зотова, В.И. Уткина, А.М. Шубладзе и др. Практически, в работах участвовали сотрудники более трети лабораторий Института.

В рамках этих Программ в 1986–1987 гг. был использован системный подход в применении как к разработке программ, так и созданию АСУ ТП АЭС и технических средств, были созданы принципиально новые Технические требования и концепция АСУ ТП АЭС, охватывающие не только системы управления и защиты, но и весь технологический процесс, включая все вспомогательные подсистемы и исполнительные механизмы. Концепция была направлена на синтез современной распределённой сетевой отказоустойчивой системы управления, отвечающей требованиям Госатомнадзора и МАГАТЭ по основным параметрам радиационной и технологической безопасности и повышенному уровню автоматизации и интеллектуализации, включающей системы поддержки оперативного персонала АЭС. В концепции обосновывалась необходимость создания нового типа технических средств автоматизации – средств программируемой автоматики с параллельной однородной структурой. Для обеспечения безопасности и отказоустойчивости предусматривалось создание более 70 подсистем функционально-группового управления**.** В результате выполненных работ было создано алгоритмическое и программное обеспечение, новые средства и приборы автоматизации, вычислительной техники и исполнительные механизмы, удовлетворяющие и превосходящие требования МАГАТЭ.



Блочный пульт управления АЭС

При разработке систем функционально-группового управления и низовой автоматики была использована концепция однородных микроэлек-

тронных логических и вычислительных структур, созданная под руководством И.В. Прангишвили. На базе этой концепции в Институте, совместно с НИИ УВМ, г. Северодонецк и др. предприятиями, были разработаны многопроцессорные вычислительные системы серии ПС (ПС-2000 и ПС-3000). По производительности комплексы ПС были соизмеримы с самыми мощными отечественными и зарубежными вычислительными системами соответствующих классов того времени. Эти комплексы характеризовались наилучшими значениями соотношения производительность/стоимость. Для низовой автоматики разработаны новые программно-технические средства СПА-ПС. Средства СПА-ПС серийно освоены в производстве в 1994–1997 гг. (г. Омск, АО НПК «Автоматика»).

В рамках перечисленных программ были созданы теоретические основы построения интеллектуальных систем управления производствами повышенного риска. В этой теории используются методы построения систем управления с идентификатором и теория экспертных систем. Разработаны методология и методы построения систем принятия решений для производств повышенного риска. Полученные теоретические результаты применены при создании систем информационной поддержки операторов АЭС и верхнего уровня АСУ ТП АЭС, ряда АСУ и АСУ ТП в других отраслях.

В области теории систем управления с идентификатором получен ряд новых важных результатов, опирающихся на использование априорной информации в форме профессиональных знаний о физических и конструктивных особенностях объектов; разработаны принципы построения экспертно-статистической системы конструирования алгоритмов моделирования систем управления; разработаны дисперсионные методы идентификации существенно нелинейных систем; построены оптимальные одношаговые и многошаговые адаптивные алгоритмы и получены условия устойчивости адаптивных систем с идентификатором и итерационных схем (Ф.Ф. Пащенко, к.т.н. Е.Е. Соколовский, к.т.н. В.М. Аксёнов, д.ф.-м.н. С.Д. Алгазин и др.); созданы быстродействующие и эффективные модели с настраиваемыми параметрами основных технологических процессов 1-го и 2-го контуров энергоблоков АЭС, в том числе модели распределения нейтронного поля и реактивности в активной зоне реактора (Е.М. Сапрыкин, С.А. Молчанов, В.А. Воронина, Ю.Н. Бриков, Е.Ф. Жарко, В.Д. Ильюков, А.В. Капитанов, В.Н. Судариков, Ф.Ф. Пащенко, Г.А. Пикина и др.).



Алексей Григорьевич Полетыкин

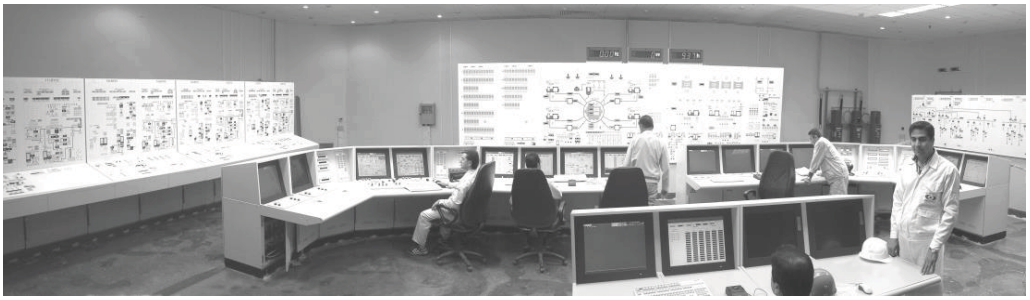
Создание принципиально новой системы управления верхним блочным уровнем (СВБУ) АЭС было поручено Институту. Общее руководство работами вёл директор Института И.В. Прангишвили, ответственными исполнителями стали кандидаты, но будущие доктора технических наук М.А. Зуенков и А.Г. Полетыкин, и старший научный сотрудник Н.Э. Менгазетдинов).

Был разработан математический аппарат, позволяющий создавать системы,



Михаил Анатольевич Зуенков

основанные на логике нечётких множеств, язык программирования ABIS, программы генерации правил по данным моделирования сложных технологических процессов и нечёткие базы знаний для качественного моделирования. Был разработан ряд новых информационных технологий, которые применимы для объектов с повышенным риском эксплуатации, включая предприятия ТЭК, химические и другие производства.



Блочный пульт управления АЭС с разработанной в Институте СВБУ

По результатам исследований была разработана АСУ ТП АЭС, содержащая интегрирующую часть – вычислительную систему верхнего блочного уровня, которая централизует информационные потоки и предоставляет оперативному персоналу АЭС удобные, надёжные и быстрые средства управления АЭС.



Надыр Энверович Менгазетдинов

На основе новых информационных технологий контроля, управления и диагностики для АСУ АЭС была разработана система «Оператор», в которую входят: операционная система, SCADA-система, САПР и ряд комплексов программ для разработки, внедрения, обучения и сопровождения сложных распределённых информационно-вычислительных и управляющих систем. Были разработаны и исследованы методы анализа характеристик детерминированных систем с очередью для определения предельных временных характеристик для АСУ ТП АЭС (к.ф.-м.н. В.Г. Промыслов). Была разработана методология верификации и валидации программного обеспечения для систем важных для безопасности АЭС (к.т.н. Е.Ф. Жарко).



Елена Филипповна Жарко

Был разработан гибкий моделирующий комплекс для энергоблоков АЭС с ректором типа ВВЭР-1000 (ГМК). ГМК содержит программные модули разной степени детализации, отражающие технологическую специфику оборудования и автоматики конкретных энергоблоков действующих или проектируемых АЭС. ГМК может применяться для цифровых двойников энергоблоков, тренажеров различного назначения, систем информационной поддержки, а также для отработки от-

дельных алгоритмов информационных задач СВБУ АСУ ТП АЭС (например, расчёт технико-экономических показателей энергоблока). (Е.Ф. Жарко).



Виталий Георгиевич Промыслов

Основное значение придается приоритету кибербезопасности на всех этапах создания и эксплуатации системы управления объектами, в частности АСУ АЭС. Научные результаты этих работ реализованы в действующих АСУ АЭС: Бушер (Иран), Куданкулам (Индия).

Выполнены анализ и критическая оценка состава и функций существующих и успешно работающих АСУ АЭС 1-го поколения. Проведён анализ стандартов СВБУ, и выявлены новые требования, которые должны быть реализованы в СВБУ 2-го поколения в полном объеме на основе использования современных технологий *Industry* 4.0. Проанализированы способы защиты от киберугроз. Предлагается расширенная дискреционная модель передачи прав доступа (*take-grant*) для формального описания киберзащищённости АСУ КВО. (А.Г. Полетыкин, В.Г. Промыслов).

Разработаны высоконадежные операционные системы семейства Linux, методы создания цифровых двойников АСУ ТП, (К.В. Семенков).



Кирилл Валерьевич Семенков

Большое внимание уделялось созданию теории и методов построения человеко-машинных систем информационной поддержки оперативного персонала производств повышенного риска. Как известно, развитие аварийных ситуаций на АЭС и др. крупномасштабных объектах примерно в 70 % случаев является следствием ошибок оперативного персонала из-за так называемой информационной триады: громадный объём информации, короткое время для принятия решений и высокая ответственность персонала. В рамках этого направления разработаны методы решения комплексной задачи оценки состояния и диагностика объекта, прогнозирования хода технологического процесса и возможных нарушений и выработки управляющих воздействий, в том числе в форме советов операторам. Разработаны и созданы алгоритмические и технические средства автоматизации (И.В. Прангишвили, Ф.Ф. Пащенко, Е.М. Сапрыкин, С.А. Молчанов, В.А. Воронина, Ю.Н. Бриков, Е.Ф. Жарко, В.Д. Ильюков, А.В. Капитанов, В.Н. Судариков, В.В. Игнатущенко, А.А. Амбарцумян, Е.В. Бабичева И.А. Степановская, М.А. Зуенков, А.Г. Полетыкин, В.Г Промыслов, М.Е. Бывайков и др.). Были разработаны новые принципы и методы создания АСУ с повышенной защитой от ошибок человека, методология и методы построения систем принятия решений для производств повышенного риска, составившие научную базу разработки АСУ для АЭС нового поколения с высокой степенью автоматизации, надёжности и качества управления технологическими процессами.

Результаты работ по АСУ ТП АЭС обобщены в нескольких монографиях:

- *И.В. Прангишвили, А.А. Амбарцумян. Научные основы построения АСУ сложными энергетическими системами. – М.: Наука, 1992.*
- *И.В. Прангишвили, А.А. Амбарцумян. Основы построения АСУ сложными технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1994.*
- *С.Д. Малкин, Ф.Ф. Пащенко, И.Д. Ракитин и др. Аналитический обзор состояния и тенденций развития автоматизированных систем управления технологическими процессами на атомных. – М.: Российский научный центр «Курчатовский институт», 1994. – 192 с.*
- *И.В. Прангишвили, Ф.Ф. Пащенко, Б.П. Бусыгин. Системные законы и закономерности в электродинамике, природе и обществе. – М.: «Наука», 2001. – 526 с.*
- *Ф.Ф. Пащенко, Г.А. Пикина. Основы моделирования энергетических объектов. – М.: Физматлит, 2011. – 464 с.*
- *А.Р. Аветисян, А.Ф. Пащенко, Ф.Ф. Пащенко, Г.А. Пикина, Г.А. Филиппов. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций. – М.: Физматлит, 2013. – 448 с.*
- *Бывайков М.Е., Полетыкин А.Г., Степанов В.Н., Сахабетдинов И.У. Программный интерфейс между верхним и нижним уровнями автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомной электростанции (АЭС). опт. диск (CD-ROM). М.: ИПУ РАН, 2021. – 113 с.*
- *Промыслов В.Г., Акимов Н.Н., Абдулова Е.А., Голубев П.А., Жарко Е.Ф., Жмайлов В.В., Лепехин И.Ю., Лобанок О.И., Исхаков А.Ю., Мещеряков Р.В., Полетыкин А.Г., Мусихин А.М., Пронин В.В., Семенков К.В., Цыренов Д.В. Оценка риска и обеспечение кибербезопасности атомных электростанций. М.: ИПУ РАН, 2022. – 193 с.*
- *Полетыкин А.Г., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф., Промыслов В.Г., Бывайков М.Е., Степанов В.Н., Байбулатов А.А., Семенков К.В., Акафьев К.В. Человеко-машинный интерфейс интеграционной платформы для АСУ ТП - Системы Оператор. М.: ИПУ РАН, 2023. – 127 с.*

Опубликовано более 100 статей, в том числе и в зарубежных журналах и более 10 книг (в сборниках трудов ИПУ и других организаций-участников Программы), получено более 30 патентов. В них изложены основные подходы к моделированию и оптимизации тепловых и гидродинамических процессов ТЭС и АЭС. При этом активно использованы современные методы теории систем и теории управления, в том числе сигнальные графы, двойное преобразование Лапласа, передаточные функции, адаптивные и генетические алгоритмы, нечёткие алгоритмы принятия решений и нейронные сети.

Полученные результаты по разработке методов управления сложными технологическими процессами позволяют перейти от управления по жёстким программным, логическим алгоритмам к управлению по моделям и текущему состоянию оборудования, событийным моделям технологических процессов и к предикторному управлению.

Перечисленные выше подходы и методы привели в 1988–1990 гг. к созданию теории построения систем на основе знаний, использующих: априорную информацию и знания о конструктивных и технологических свойствах и характеристиках

исследуемых систем; анализ состояний; событийные модели; эволюционные модели; прогнозирующие модели и методы предикторного управления (Ф.Ф. Пащенко, Е.М. Сапрыкин, В.А. Воронина, К.Р. Чернышёв, С.А. Молчанов, Е.Ф. Жарко, В.Д. Ильюков, А.В. Капитанов, Д.В. Кнеллер И.С. Дургарян и др.).

Большой вклад в координацию работ по АСУ ТП АЭС внесли сотрудники Института Д.А. Шалабаев, Е.В. Бабичева, В.С. Землянников, В.Н. Быков, В.Н. Сучкова, В.Н. Савушкин, и др.

К сожалению, в силу происходившей в стране перестройки и, как следствие, прекращения строительства Башкирской АЭС данный проект реализован не был. Однако разработанные в рамках Программы основные идеи, проектные решения и технические средства, были реализованы в ряде последующих проектов и разработок. В том числе при разработке АСУ ТП ТЭЦ «Насирия» (Ирак) (из «Интерэнергосервис» участие принимали Ю.В. Никонов и Р.А. Асфандияров), при создании АСУ ТП ряда тепловых и электрических станций в г. Москве, Московской и Рязанской областях и других регионов.

Работы по разработке АСУ ТП АЭС продолжаются и сегодня. Сотрудниками Института разработаны технические проекты АСУ ТП-90, АСУ ТП-НП (нового поколения), АСУ ТП Бушер (совместно с АО «Атомэнергпроект»), разработаны технический и рабочий проекты и программное обеспечение для систем управления верхнего уровня АСУ ТП АЭС «Бушер-1» (Иран) и «Куданкулам» энергоблоков 1,2 (Индия), разрабатывается программное обеспечение для систем управления верхнего уровня АСУ ТП АЭС Куданкулам» энергоблоков 3,4 (Индия), проводится модернизация программного обеспечения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС «Бушер-1» и «Куданкулам» энергоблоков 1,2 (Индия), разработана методология верификации и валидации программного обеспечения для систем важных для безопасности АЭС. Большой вклад в обеспечение работ для АСУ ТП АЭС атомных электростанций «Бушер-1» и «Куданкулам» энергоблоков1-4 (Индия) внесли М.А. Зуенков, Н.Э. Менгазетдинов, А.Г. Полетыкин, Е.Ф. Жарко, М.Е. Бывайков, В.Г. Промыслов, К.В. Семенков.

Защищены более 10 докторских и кандидатских диссертаций.

Предложенные методы и полученные результаты создают базу для повышения степени интеллектуализации производственных процессов в энергетике, реализации автоматического пуска, останова и изменения режимов энергоблоков и позволяют реализовать новые смарт-технологии для проектирования и разработки «умного» оборудования, строительства и повышения безопасности и эффективности эксплуатации электрических станций. Рассмотренные технологии могут быть также применены для создания систем управления и другими производствами повышенного риска и дают не только технический, но и социальный и экономический эффекты.

5.2. Логическое управление

Под логическим управлением понимается управление, основанное на преобразованиях двоичных (логических) сигналов. Теоретическими основами построения систем логического управления являются логика высказываний (булева алгебра), теория конечных автоматов и теория сетей Петри.

Основателем этого направления не только в нашем Институте, но и в СССР был Михаил Александрович Гаврилов. В 40-е годы XX века он, опираясь на теоретические работы К. Шеннона и В.И. Шестакова, разработал методы анализа и синтеза релейно-контактных схем, основанные на булевой алгебре, и активно занимался внедрением этих методов в инженерную практику. Эти результаты были подытожены в монографии «Теория релейно-контактных схем» (1950), которая стала первой в мире монографией в этом направлении и впоследствии была переведена на многие языки мира.

В конце 50-х годов в лаборатории «Дискретной телемеханики», бессменным руководителем которой был М.А. Гаврилов, сформировался молодёжный коллектив. Одновременно начались работы по теории конечных автоматов в лабораториях под руководством М.А. Айзермана и А.А. Таля. Основные результаты по логическому управлению были получены в этих коллективах в 60–70-е годы.

Теоретические результаты можно разбить на несколько тем.

1. ***Языки описания логических устройств***. Первые результаты принадлежат М.А. Гаврилову (таблицы включений для схем с памятью). А.А. Таль разработал анкетный подход к описанию конечных автоматов. Н.Н. Иванов, Г.И. Михайлов, В.В. Руднев, А.А. Таль предложили язык эквивалентных преобразований, основанный на идеях теории формальных систем. Определённым итогом этих исследований стала развитая О.П. Кузнецовым теория конечно-автоматных языков, в которой были предложены критерии и методы сравнения языков по выразительности и эффективности. Кроме того, был разработан ряд прикладных языков для САПР логических устройств (см. ниже).

2. ***Синтез и минимизация логических схем и автоматов***. Здесь первые результаты опять-таки принадлежат М.А. Гаврилову. Г.Н. Поваров улучшил оценки Шеннона по асимптотическому синтезу схем. Методы минимизации логических схем в различных базисах были предложены Л.А. Шоломовым и А.В. Марковским.

3. ***Методы программной реализации логических схем и автоматов*** с оценками быстродействия предложены О.П. Кузнецовым.

4. ***Методы синтеза однородных автоматных структур*** с оценками сложности были разработаны А.Я. Макаревским.

5. Ряд результатов в области ***структурирования сетей Петри*** получены А.А. Талем и С.А. Юдицким в 80-е годы.

Начиная с 70-х годов, всё большее внимание уделяется приложениям теории логического управления. Первым комплексом прикладных работ, инициированным М.А. Гавриловым, стали работы по автоматизации анализа и проектирования

логических схем. В 50-е годы, ещё до широкого распространения вычислительных машин и программирования, группа П.П. Пархоменко создала машину для анализа релейно-контактных схем. В начале 70-х годов были разработаны несколько программных САПР логических устройств. Группа О.П. Кузнецова разработала САПР ПРОЛОГ на основе языка ЯРУС; группа А.А. Амбарцумяна – САПР ИКАР на основе языка ФОРУМ, группа В.В. Девяткова – САПР на основе языка УСЛОВИЕ. Модифицированный язык ЯРУС-2 был использован в программном обеспечении серийно выпускавшихся в 80-е годы станков с ЧПУ; САПР ИКАР – для проектирования программно-логических устройств.

В 1986 г. Минприбор поручил Институту возглавить работы по созданию перспективной АСУ ТП для АЭС. Коллективом, объединившим ряд лабораторий Института, была разработана концепция создания распределённой отказобезопасной системы управления, отвечающей требованиям МАГАТЭ по основным параметрам безопасности и уровню автоматизации. Концепция была принята на НТС Минатомэнерго, Минприбора и положена в основу проекта АСУ ТП Башкирской АЭС. Одно из важнейших положений концепции заключалось в обосновании необходимости создания нового типа технических средств автоматизации – средств программируемой автоматики с параллельной структурой (СПА-ПС). Концепция СПА-ПС основывалась на глубоких исследованиях по теории логического синтеза, на логических вычислениях и способах обеспечения отказобезопасности на основе схем с самоконтролем. Основные технические идеи, положенные в её основу, заключаются в распределённости, специализации и контролируемости процессов обработки и коммуникации. Они освоены в 1994–1997 гг. в АО НПК «Автоматика» (г. Омск). Средства СПА-ПС до настоящего времени выпускаются серийно. Они сертифицированы органами Госстандарта РФ в качестве средств измерений и на соответствие требованиям ГОСТ Р по безопасности. С 1997 г. СПА-ПС используются в проектах важных для безопасности распределённых и сосредоточенных автоматизированных систем для объектов атомной и тепловой энергетики, газонефтедобывающей и перерабатывающей промышленности, металлургии и других производств – как с непрерывным, так и дискретным характером технологического процесса.

Разрабатывались модели и методы логического управления на производствах с потоковыми технологиями. В 1996 г. была разработана АСУ ТП для Бутурлиновского хлебокомбината в Воронежской области, существенно повысившая эффективность управления. В сотрудничестве с фирмой IBS были проведены исследования объектов в нефтедобывающей отрасли (типовые нефтедожимные насосные станции для Пермяковского и Хохряковского месторождений Тюменской нефтяной компании) и предложены механизмы управления структурой протекающих в них технологических процессов.

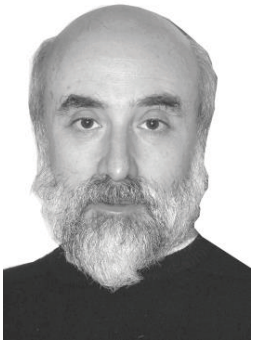
5.3. Управление технологическими процессами

Теоретические и прикладные разработки по автоматизации производства проводятся в Институте с начала 60-х годов в различных отраслях: энергетике, машиностроении, чёрной металлургии, нефтедобыче, нефтехимии и др.



Леонид Рафаилович Соркин

Разработки для предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) всегда занимали особо важное место, что и обусловило создание в 1991 г. проблемно-ориентированной лаборатории «Проблем оперативного управления и планирования предприятий ТЭК», которая в течение многих лет занимала в этой области лидирующие позиции. Руководителем лаборатории с момента её создания являлся д.т.н., проф. Леонид Рафаилович Соркин. Лаборатория просуществовала 29 лет, пока часть её сотрудников не ушла в бизнес, а оставшиеся в Институте перешли в лабораторию «Идентификации систем управления», ныне носящую имя её создателя проф. Н.С. Райбмана.



Виктор Михайлович Дозорцев

Проводимые в лаборатории «Проблем оперативного управления и планирования предприятий ТЭК» исследования и эффективное использование современных информационных технологий позволили создать условия для решения сложных междисциплинарных проблем планирования и управления в нефтегазовом комплексе, обеспечить принципиально более высокий уровень качества текущего и перспективного бизнес-планирования.

В первые 20 лет в лаборатории работали доктора технических наук Н.В. Шестаков, А.С. Хохлов, А.В. Карибский, В.М. Дозорцев, Е.Н. Хоботов, Ю.В. Митришкин; кандидаты технических наук Ю.М. Цодиков, Д.В. Кнеллер, Ю.Р. Шишорин и др.

Тематика исследований охватывала широкий спектр проблем:

- поддержка принятия решений для непрерывных и дискретно-непрерывных технологических процессов и производств;
- автоматизация сложных технологических объектов;
- моделирование и проектирование средств и систем управления;
- обучение операторов сложных технологических объектов.

В рамках основных направлений деятельности получены важные теоретические и прикладные результаты, связанные с исследованием и созданием:

- методологии построения компьютерных тренажёров реального времени для обучения персонала химико-технологических производств на базе совре-

менных методов математического моделирования и интерактивных вычислительных средств;
- комплексного подхода к решению задач размещения, переработки и поставок сырья и продукции для интегрированных компаний;
- методологии ведения и анализа процессов финансового планирования в интегрированных компаниях;
- методологии моделирования и оптимизации схем магистрального транспорта нефти;



Александр Сергеевич Хохлов



Александр Вячеславович Карибский

- оптимизационных моделей смешения бензинов, дистиллятов, мазутов и масел, учитывающих нелинейные эффекты смешения;
- методологии, моделей и методов формирования технологически и финансово согласованных проектов развития предприятий ТЭК.

Полученные результаты успешно внедрялись в процессе выполнения крупных российских и международных проектов в области планирования и управления ТЭК.

Группа сотрудников под руководством Ю.М. Цодикова выполняла исследования в области создания: оптимизационных моделей планирования производства предприятий нефтепереработки; методологии, моделей и методов формирования технологически согласованных и обоснованных экономически проектов развития предприятий ТЭК.

Группа сотрудников под руководством Е.Н. Хоботова проводила исследования по созданию моделей и методов планирования и построения расписаний работ на предприятиях машиностроения, а также моделей и методов выбора оборудования для производственных систем, участков и предприятий машиностроения при их модернизации и проектировании.

Эти задачи в последние годы вызывают во всём мире повышенный интерес, поскольку создание эффективных методов планирования и выбора расписаний работ будут в значительной степени способствовать успешной деятельности предприятий, а разработка эффективных методов выбора оборудования для производственных систем и участков позволит сэкономить значительные средства при модернизации производств.



Евгений Николаевич Хоботов

Планы и расписания работ должны строиться таким образом, чтобы они были согласованными между собой для всех подразделений предприятия. Необходимость их построения вызвана тем, что из планов и расписаний работ отдельных подразделений, систем и участков, пусть и весьма удачных, не всегда удаётся сформировать даже удовлетворительные планы работы предприятий, а без них вряд ли удастся повысить эффективность работы предприятий.

Такие согласованные между собой для всех подразделений предприятия планы и расписания работ в дальнейшем будем называть планами и расписаниями работ на уровне предприятий.

Ранее не существовало удовлетворительных методов для построения планов и расписаний работ на уровне предприятий. Сотрудниками группы Е.Н. Хоботова для построения подобных планов и расписаний работ был предложен новый подход, основанный на использовании методов агрегирования информации. Идеи агрегирования информации, предложенные для построения расписаний работ, оказались весьма продуктивными. С их помощью удалось предложить другую организацию изготовления комплектующих, когда их обработка производится группами, которые формируются по описанным выше принципам. Это позволяет:

- разработать методы, построения расписаний обработки комплектующих на уровне предприятий;
- организовать эффективную доставку деталей между производственными подразделениями;
- более эффективно управлять межцеховыми транспортными средствами предприятия;
- детализировать «каркасные» расписания до расписаний обработки отдельных деталей на всем используемом оборудовании.

Предложенные методы выбора оборудования для предприятий машиностроения также разработаны с использованием идеи агрегирования информации.

В настоящее время д.т.н., проф. Е.Н. Хоботов продолжает эти исследования в лаборатории «Идентификации систем управления» им. Н.С. Райбмана, где он является ведущим научным сотрудником.

Сегодня, на фоне широкого внедрения цифровых информационных технологий и технологий управления в самые разнообразные сферы человеческой деятельности, в развитии теории и методов управления наблюдается отчётливая тенденция их дальнейшей конвергенции с методами искусственного интеллекта. В особенности это относится к сфере производства – как в интегрированных системах управления, так и в специализированных системах на разных уровнях процесса производства. Активно внедряются аддитивные технологии, промышленные роботизированные комплексы, промышленный интернет вещей, гибкие технологии управления.

Современные системы управления в промышленности отличаются использованием таких методов искусственного интеллекта, как нейронные сети, интеллектуальный анализ данных, методы управления, основанные на знаниях. Базы знаний формируются в виде функциональной семантической сети и компонентов дедуктивного вывода.

В частности, для современных систем управления производственными процессами на разных уровнях управления на промышленном предприятии фундамент образуют интеллектуальное управление в сочетании с децентрализацией управления (например, в мультиагентных системах) и современными информационными технологиями.

В лаборатории «Идентификации систем управления» им. Н.С. Райбмана, которой руководит доктор технических наук, профессор Наталья Николаевна Бахтадзе,

разрабатываются алгоритмы идентификации, основанные на знаниях, формируемых и обновляемых по результатам интеллектуального анализа данных функционирования производственных процессов в виде выявляемых закономерностей. Алгоритмы, получившие название «ассоциативный поиск», осуществляют моделирование в реальном времени процесса принятия решений об управлении оператором технологической установки в системах управления реального времени. Разработаны методы нечёткого моделирования и нечёткой кластеризации. Предложены критерии устойчивости динамических объектов на основе исследования спектра кратно-масштабного вейвлет-разложения.



Наталья Николаевна Бахтадзе

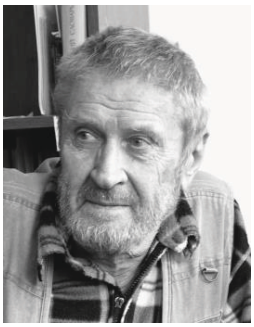
Осуществляется разработка интеллектуальных предиктивных моделей динамики состояния технологических процессов на несколько временных тактов вперед в условиях ограниченной неопределенности изменения параметров процесса. Разработаны методы проактивного управления на основе цифровых предиктивных смарт-моделей реального времени для систем управления с прогнозирующей моделью.

Созданы теоретические основы идентификационного анализа как интеллектуальной базы интегрированной информационно-управляющей структуры производства с использованием современных информационных технологий при учёте косвенных измерений производственных показателей в условиях единого информационного пространства. Предложены концепция и архитектура цифровой экосистемы промышленного предприятия на основе интеллектуального предиктивного моделирования и сценарного прогнозирования в реальном времени.



Цифровая экосистема промышленного предприятия

Сфера внедрения теоретических разработок лаборатории расширяется. В промышленности– это разработки энергосберегающих систем в металлургическом производстве с использованием интеллектуальных методов и алгоритмов управления прокатным и электросталеплавильным производством, идентификационных моделей технологических процессов химической, нефтехимической и других отраслей промышленности. Ведётся разработка методов управления уровнем автоматизации технологических процессов, включая оценку эффективности самовоспроизведения промышленных роботов.



Валентин Маркович Чадеев

Разработаны интеллектуальные алгоритмы идентификации нелинейных динамических моделей энергообъектов, основанных на индуктивном обучении. Создана методика синтеза системы интеллектуальной динамической оценки состояния энергосистем на основе мультиагентных технологий.

Разработаны методы автоматизации управления текущим коммерческим бюджетированием и ценообразованием продукции предприятий с использованием методов управления запасами. Созданы методы разработки программ стимулирования сбыта производимой продукции с применением моделей и алгоритмов оптимального планирования инвестиционных проектов.

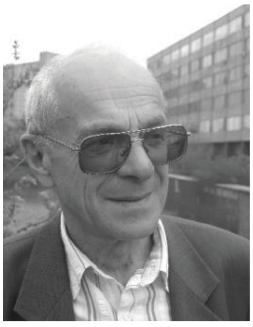
Разрабатываются методы создания многоагентных информационно-управляющих систем поддержки управления на основе прогнозирующего идентификационно-симуляционного моделирования с использованием систем автоматизации имитационных исследований облачного типа.



Зуфар Гарифуллинович Салихов

Созданы методы прогноза состояния ресурсов производства и прогнозирования нештатных ситуаций на основе интеллектуального анализа данных.

Осуществляется разработка и реализация проектов по созданию высокоэффективных самоорганизующихся систем управления с идентификатором для сложных технологических комплексов металлургических предприятий.



Эммануил Львович Ицкович

Группа сотрудников из бывшей лаборатории «Автоматизации производства» (её руководителем был д.т.н., проф. Э.Л. Ицкович), которая стала частью коллектива лаборатории «Идентификации систем управления» им. Н.С. Райбмана, продолжает исследования в области методов автоматизации производства. Научно-исследовательские работы этой группы разных лет были сконцентрированы на решении задач, которые в настоящее время наиболее актуальны и достаточно востребованы на предприятиях различных технологических отраслей. Назовём основные из них:

– Разработка методов обследования текущего уровня автоматизации производства, обоснования концепции ра-

ционального развития систем автоматизации, создания конкретных технических требований на перспективные системы автоматизации и на построение MES (интегрированной системы автоматизации производства).

- Создание методики и разработка концепции совершенствования системы технического обслуживания и ремонта основных фондов предприятий технологических отраслей.
- Синтез алгоритмов составления рациональных графиков планово-предупредительных ремонтов оборудования и графиков проведения анализов качества материальных потоков в лабораториях предприятий на базе теории расписаний.
- Разработка методов и алгоритмов формирования текущей и прогнозируемой оценок значений качественных показателей производства на базе измеряемых физических величин производства и редких лабораторных анализов качественных показателей.
- Разработка методических и алгоритмических основ создания компьютерной технологии поддержки принятия решений на основе анализа геолого-маркшейдерской информации на добывающих и обрабатывающих предприятиях, эксплуатирующих открытым способом месторождения твёрдого минерального сырья.
- Участие в разработке технологий построения интегрированных систем управления подвижными объектами и создания для них тренажёрных систем.
- Разработка научных и методических основ построения перспективных систем интеллектуального управления объектами горнодобывающей промышленности (в рамках международного гранта с Академией наук Вьетнама).
- Разработка алгоритмов контроля и учёта работы производства технологического типа на основе методов статистического анализа.
- Исследование путей повышения безопасности функционирования движущихся объектов с использованием новых подходов к управлению движением и интеллектуальных систем поддержки и принятия решений.

Разработанные этой группой методы и алгоритмы прошли апробацию и практическое внедрение при решении задач автоматизации производства (совместно с другими организациями). За последние годы выполнены:

- Консалтинг проектирования систем автоматизации всех уровней для железорудного карьера и горно-обогатительного комбината в провинции Хатинь, Вьетнам.
- Анализ стратегии развития в области АСУ ТП и метрологии на всех предприятиях «Татнефть».
- Сравнительный анализ поставщиков решений в области автоматизации нефтеперерабатывающего производства заводов «Башнефть».
- Обследование существующей системы контроля, учёта и управления работой производства на Новокуйбышевском нефтеперерабатывающем заводе и создание концепции её развития.
- Обследование инфраструктуры и бизнес-процессов оперативного управления производством на Куйбышевском нефтеперерабатывающем заводе и разработка технических требований на построение отдельных компонентов MES.

- Предпроектное обследование с целью создания автоматизированной системы мониторинга и управления энергоресурсами и разработка технических требований на систему на Комсомольском нефтеперерабатывающем заводе.
- Предпроектное обследование и разработка технических требований на автоматизированную систему мониторинга и управления энергоресурсами на Ангарском заводе полимеров.
- Работы по созданию и внедрению сетевого моделирующего комплекса и программного обеспечения для исследования перспективных систем управления движением подводных объектов.
- Разработка модельного комплекса для жидкостных ракетных двигателей с целью предотвращения развития аварийных ситуаций при проведении их огневых и лётных испытаний.

В течение нескольких последних лет проводился анализ современных АСУ производственных объектов и перспектив их развития. Соответствующий аналитический обзор опубликован в монографии, которая содержит следующие разделы:

- описание и сопоставление технических и программных средств автоматизации, выпускаемых ведущими производителями;
- сравнительный анализ вариантов программно-технических комплексов распределенных систем управления;
- анализ рациональных методов планирования, построения и функционирования АСУ;
- обзор направлений развития АСУ и его средств;
- содержание перспективных алгоритмов автоматического контроля, учёта и управления производственными объектами;
- обоснование и предложения по составу организационных мероприятий на предприятиях, способствующих эффективной эксплуатации АСУ.

Обоснованы необходимые изменения и расширения функций и структуры АСУ ТП, которые необходимо предусматривать при совершенствовании существующих и при планировании разрабатываемых АСУ ТП на предприятиях технологических отраслей для постепенного, эволюционного развития АСУ ТП всех агрегатов производства в соответствии с требованиями построения и функционирования цифрового предприятия.

Разработаны методы и алгоритмы развития лабораторных информационных систем (ЛИМС) технологических предприятий, повышающие информативность дискретных во времени лабораторных анализов качественных показателей материальных потоков производства и получающие уточнённые оценки текущих значений этих показателей и прогнозы их нахождения в заданных технологом диапазонах. Сформулированы и апробированы на конкретных промышленных примерах алгоритмы математической обработки последовательности результатов анализов показателей с помощью совместного использования двух программных модулей:

- комбинации статистической экстраполяции и скользящего среднего,
- специально отобранных контрольных карт.

Обоснована и показана на конкретных промышленных примерах повышающаяся информативность ЛИМС при использовании предлагаемых алгоритмов.

Разработка теоретических и методических основ системной интеграции средств управления с середины 90-х годов являлась основным направлением

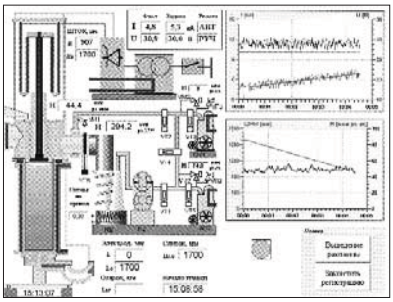


Юрий Сергеевич Легович

лаборатории «Системной интеграции», работавшей под руководством кандидата технических наук Юрия Сергеевича Леговича до последнего дня его жизни в 2022 г.

На основе современных подходов к формализации описания технико-экономических свойств основных составляющих систем управления сложными объектами в лаборатории «Системной интеграции» разрабатывались методы автоматизации процесса синтеза систем в соответствии с заданными обобщёнными показателями качества. Выполнялись теоретические и практические исследования современного состояния средств автоматизации управления за рубежом.

Первым шагом в направлении проверки эффективности разработанных в лаборатории методик было создание в 1996 г. системы управления промышленной рудотермической электропечью «Кремний» для выплавки кремния на Запорожском алюминиевом комбинате (ЗАЛК). По условиям, заданным ЗАЛК, лаборатории пришлось конкурировать с московским представительством такого известного мирового системного интегратора, как компания *Siemens AG*. В процессе создания системы основные проблемы были связаны с новизной объекта, жёсткими сроками реализации и очень большими электромагнитными помехами. Такой объект управления, как печь, оказался неустойчивым, что придавало особое значение не только алгоритмам управления, но и надёжности технических средств. Впервые в отечественной практике система прямого цифрового управления была с успехом реализована на основе индустриального компьютера, расположенного в непосредственной близости от печи. Это позволило доверить управление системой непосредственно плавильщику без участия специального оператора.



Система управления промышленной электропечью

В дальнейшем был создан ряд автоматизированных систем управления новыми электродуговыми печами:

- Информационно-регистрирующая система управления вакуумной дуговой печью ВДУ-52 «Регистр» на Ступинском металлургическом комбинате (1999).
- Система автоматизированного управления вакуумной дуговой печью ДСВ-4, 5Г2И2 «АВАК» на Ступинском металлургическом комбинате (2000).
- Система автоматического управления вакуумной индукционной печью на «Красном выборжце», Санкт-Петербург (2001).
- Система автоматического управления вакуумной дуговой печью на «Красном выборжце», Санкт-Петербург (2002).

5.4. Управление разработкой месторождений и добычей углеводородов

В настоящее время проектирование и управление разработкой месторождений углеводородов производится, главным образом, с использованием зарубежных программных средств для гидродинамического моделирования месторождений, которые, строго говоря, плохо адаптируются к условиям нефтегазовой отрасли России. Для реализации этих технологий в нашей стране необходимо проведение дополнительных дорогостоящих геологических и промысловых исследований для идентификации параметров гидродинамических моделей, а программные комплексы обеспечивают в лучшем случае возможность интерактивного прогнозирования процессов для принятия некоторых управленческих решений. Таким образом, для решения проблем управления разработкой любых месторождений в полном объёме необходимо разработать и создать новые методы гидродинамического моделирования и оптимального управления, основанные на новых принципах и подходах, удобных для поиска быстродействующих решений в реальном времени.

При постановке задачи оптимального управления разработкой крупномасштабных месторождений углеводородов основными управляющими воздействиями являются распределение режимов отбора продукции и закачки реагентов (для физико-химических, тепловых, волновых и др. воздействий на процесс вытеснения углеводородов) на всём множестве добывающих и нагнетательных скважин, а сама задача оптимального управления формулируется так, как описано в следующем абзаце.

На заданном интервале планирования на всём множестве скважин месторождения найти и выбрать такие режимы отбора углеводородов, которые обеспечивают необходимый максимум добычи при ограниченных суммарных ресурсах управления или минимум затрат суммарных ресурсов управления, обеспечивающих требуемый плановый уровень суммарной добычи. Для создания таких интегрированных математических моделей управления полным циклом технологических процессов разработки месторождений углеводородов (газовых, газонефтяных, газоконденсатных и газонефтеконденсатных, а также тяжёлой нефти и природных битумов) необходимо проведение полного объёма фундаментальных научных исследований в области моделирования и управления.

Для достижения этих целей в 2010 г. в Институте был создан научный коллектив из состава сотрудников лаборатории «Проблем качественного анализа и синтеза систем управления» им. А.Г. Бутковского (зав. лаб. А.Г. Кушнер) и лаборатории «Многосвязных систем управления» (зав. лаб. А.В. Ахметзянов) для решения задач моделирования и оптимального управления нелинейными, нестационарными и неизотермическими процессами многофазной фильтрации жидкостей и газов в пористых средах резервуаров природных залежей углеводородов (нефти, газа, газоконденсата, высоковязкой и/или тяжёлой нефти, а также природных битумов).



Атлас Валиевич Ахметзянов



Алексей Гурьевич Кушнер



Валентин Васильевич Лычагин

С момента создания этим творческим коллективом в рамках программ фундаментальных исследований Института, Президиума и Отделений РАН, а также частично проектов РФФИ и РНФ были исследованы и обобщены следующие модели фильтрации в пористых средах: Бакли-Леверетта, Рапопорта-Лиса, Маскета-Леверетта, Маскета-Мереса, а также композиционные модели при управлении процессами фильтрации с применением физико-химических, тепловых и волновых управляющих воздействий (руководители и основные исполнители: А.В. Ахметзянов, А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин). В частности, были получены следующие основные результаты:

– Для одномерной задачи Бакли-Леверетта было найдено преобразование Беклунда, которое позволяет свести исходную задачу моделирования к решению функциональных уравнений. На основании этих результатов предложен новый численный метод и создан программный модуль для построения модели Бакли-Леверетта с учётом ударных волн. Для создания двумерных и трёхмерных моделей предложен асимптотический метод решения задачи Бакли-Леверетта и найден конструктивный алгоритм нахождения начальных членов асимптотического ряда. Эти результаты использованы для построения алгоритмов решения не только задач управления и проектирования разработки, то есть оптимального выбора геометрического расположения и количества скважин.

– Для задач Рапопорта-Лиса и Маскета-Леверетта (капиллярная пропитка) найдены конечномерные динамики и на их основе предложены новые численные методы расчёта модели с поиском аттракторов и репеллеров моделей.

– Для паро-гравитационного метода (*steam assisted method*) добычи природных битумов разработаны модели управления разработкой с учётом влияния теплоты фазового перехода закачиваемого пара в воду на распределение температуры в насыщенной пористой среде и латеральной эволюции «паровой камеры».

В 2018 г. область и направление фундаментальных научных исследований научного коллектива была значительно расширена и сейчас формулируется следующим образом: «Модели оптимального управления процессами тепломассопе-

реноса с учётом ударных волн и фазовых переходов». Основное внимание уделяется сингулярным процессам теплопередачи и тепломассопереноса в сплошных средах, многофазной и многокомпонентной неизотермической фильтрации в пористых средах, а также течения многофазных и многокомпонентных жидкостей и газов в лифтах скважин и сложных нефтегазосборных промысловых трубопроводных сетях. Особенное детально исследуются процессы управления в критических состояниях с учётом фазовых переходов, ударных волн и др. В основу фундаментальных исследований положены дифференциально-геометрические методы, большинство из которых разработаны основателями научного коллектива (А.В. Ахметзяновым, А.Г. Кушнером, В.В. Лычагиным).

На базе этих результатов разработаны принципы построения математических моделей управления неизотермическими процессами фильтрации газожидкостных смесей в пористых средах с учётом сингулярных режимов и фазовых переходов в резервуарах месторождений углеводородов (нефтяных, газовых, газонефтяных и др.).

В перспективе научным коллективом планируется проведение фундаментальных научных исследований в двух направлениях (частично по проектам РНФ) для повышения эффективности разработки:

– Многопластовых газовых месторождений с применением каскадных струйных технологий, поскольку энергия одних пластов с аномально высокими давлениями может быть использованы для увеличения отбора газа из других пластов с низкими давлениями. Если геологические особенности породы залежей допускают возможность применения гидроразрыва и/или радиального вскрытия пластов, то эффективность использования каскадных струйных технологий сильно возрастает, поскольку значительно увеличивается диапазон регулирования струйных аппаратов (эжекторов), по существу, диапазон ресурсов управления. Исследования будут проводиться с участием д.т.н. А.В. Балабанова и д.т.н. А.М. Касимова.

– Газонефтяных месторождений за счёт использования горизонтальных стволов добывающих и нагнетательных скважин, обеспечивающих требуемые отборы из «нефтяной оторочки» при низких депрессиях, а также технологий закачки активных реагентов для ограничения притоков газа и воды на границах раздела «газ-нефть» и «нефть-вода». При совместной разработке «нефтяной оторочки» и «газовой шапки» могут быть использованы также газлифтные и струйные технологии.

– Газоконденсатных месторождений, что достигается за счёт оптимального перераспределения режимов отбора на всём множестве добывающих скважин, обеспечивающего минимизацию внутрипластового переноса флюидов и преждевременного выпадения растворённого в газе конденсата. При использовании «сайклинг-процесса» с закачкой «сухого газа» на некотором подмножестве добывающих скважин выпадение конденсата становится управляемым процессом и способствует значительному повышению эффективности добычи.

– Газонефтеконденсатных месторождений с использованием всего арсенала, указанных выше технологий и управляющих воздействий.

Научный коллектив планирует также проведение исследований в области применения волновых процессов тепломассопереноса в насыщенных пористых средах для разработки трудно извлекаемых запасов нефти с использованием модели, обобщающей классическую модель Френкеля-Био-Николаевского, которая описывает волновые процессы в насыщенных пористых средах и учитывает термодинамические свойства среды, а также её геометрические, геологические и физические неоднородности. Для построения такой модели будет найдена алгебра Ли симметрий системы нелинейных дифференциальных уравнений Френкеля-Био-Николаевского, построены точные и приближённые решения этой системы, проведена классификация термодинамических уравнений состояния насыщенной пористой среды, а полученные решения будут использованы для построения численных методов для расчёта распределения фильтрационных потоков. Применение волновых воздействий имеет огромные перспективы для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти, доля которых в балансе страны постоянно и неуклонно возрастает. Это обусловлено следующими причинами. В процессе нефтедобычи при вытеснении нефти водой или другими вытесняющими реагентами часть нефти удерживается в поровом пространстве пласта капиллярными силами и не принимает участия в фильтрационном процессе, что создаёт условия для образования мелкодисперсных капель углеводородов, занимающих поровое пространство и блокирующих фильтрационное течение и скопления их в неподвижные целики. В результате такие физические явления приводят к заметному снижению проницаемости коллектора и уменьшению коэффициента конечной нефтеотдачи природных залежей. Решение таких проблем достигается резонансными воздействиями продольных и поперечных (для массопереноса капиллярам, отрыва нефтяных фракций от скелета породы, вовлечения в фильтрационный поток мелкодисперсных фаз и изолированных целиков) волн, возбуждаемых в пористой среде через нагнетательные скважины. Применение волновых технологий особенно эффективно при разработке месторождений на поздней стадии, когда обычная закачка реагентов малоэффективна и требуются значительные усилия для ликвидации застойных явлений в насыщенной пористой среде. Для месторождений высоковязкой и тяжёлой нефти применение волновых технологий должно проводиться в комбинации с физико-химическими и тепловыми воздействиями на всех стадиях разработки. Результаты исследования будут заложены в основу разработки новых методов и устройств, предназначенных для волновой обработки призабойных зон скважин и межскважинного пространства месторождений с целью интенсификации добычи нефти и повышения коэффициента нефтеотдачи. Из научных источников по нефтяной отрасли следует, что применение современных волновых технологий на действующих месторождений может привести к повышению конечного коэффициента нефтеотдачи до 15 % для крупных месторождений Поволжья и Сибири, что равносильно открытию нового месторождения с уже готовой инфраструктурой.

Для практической реализации разработанных дифференциально-геометрических принципов построения моделей неизотермической фильтрации бу-

дут созданы соответствующие приближённые (численные и асимптотические) методы, для которых, в свою очередь, будут разработаны программные модули, необходимые при создании давно и чрезвычайно востребованного отечественного программного комплекса для оптимизации проектирования и оптимального управления термогидродинамическими процессами разработки месторождений углеводородов на всех этапах жизненного цикла. Разработанные методы и алгоритмы с многоуровневым иерархичеким распараллеливанием вычислений на высокопроизводительных вычислительных системах обеспечивают максимальное быстродействие при выборе оптимальных управляющих воздействий в реальном масштабе времени на всём множестве добывающих и нагнетательных скважин, общее число которых может составлять десятки тысяч. Создание такого программного комплекса даст возможность использования цифровых интелектуальных технонологий на месторождениях, особенно в труднодоступных нефтегазоносных регионах Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока, Арктического и Тихоокеанского побережья и шельфа России.

5.5. Информатизация системы жизнеобеспечения Москвы

Деятельность лаборатории «Проектирования автоматизированных систем управления многоцелевыми объектами»* до середины 90-х годов была тесно связана с разработкой и обоснованием структур систем управления атомных подводных лодок (АПЛ), включая проект 705, а также атомного ледокола. Изначально в задачу лаборатории входили разработка методов управления энергетической установкой, затем движением и, наконец, согласованного управления комплексом «реактор – винт». Основным инструментом исследований являлись методы математического моделирования процессов в агрегатах АПЛ (реакторах, теплообменниках, насосах, турбинах, в синхронных и асинхронных машинах). Проводимые комплексные исследования выработали у сотрудников привычку к системному подходу при анализе больших и сложных технических систем и их взаимодействий.

Полученный опыт был по достоинству оценён специалистами Департамента топливо-энергетического хозяйства (ТЭХ) Москвы на совещании, которое проводилось в Институте, и лаборатория была приглашена к выполнению работ по информатизации деятельности отраслевых органов Правительства Москвы. В то сложное время данное приглашение давало шанс сохранить коллектив, но вызывало беспокойство из-за новизны объекта исследования – системы жизнеобеспечения города, включающей деятельность органов власти по обеспечению города теплом, электричеством, газом и т.д.

Уже первая работа – создание концепции автоматизации наружного освещения Москвы – показала, что объект исследования характеризуется недостаточной

* Сейчас она переименована в лабораторию «Инфраструктурных систем».

структуризацией задач, процессов и технических объектов, а управление системами жизнеобеспечения, возложенное на отраслевые органы власти, затрудняется отсутствием должного информационного взаимодействия с предприятиями и осуществляется, как правило, в условиях неполной информации. Поэтому, в первую очередь, был проведен анализ основных задач управления и выполнена систематизация функций управления, процессов и технических объектов городского хозяйства. Результаты работы вошли в концепцию информационного обеспечения Комплекса городского хозяйства Москвы, утвержденную вице-мэром, а разработанный классификатор объектов ТЭХ в 2013 г. получил статус городского нормативного документа.

На основе выполненной систематизации удалось разработать систему показателей для оценки деятельности органов власти отраслевой компетенции и методы комплексной оценки состояния отраслей городского хозяйства. От технического состояния машин и оборудования зависит качество предоставляемых населению услуг. Решение этого вопроса в значительной мере определяется экономической эффективностью по схеме «затраты – эффективность». Заметное снижение показателя эффективности обусловлено накоплением явлений износа при одновременно возрастании эксплуатационных затрат. Особенно много средств бюджет теряет на ремонте подземных коммуникаций. С целью прогнозирования работоспособности в условиях плавного или скачкообразного изменения во времени характеристик были разработаны и внедрены на предприятиях специальные модели эксплуатации подземных коммуникаций и использование этих моделей позволяло оптимизировать сроки ремонта.



Информационные потоки объединённой диспетчерской службы

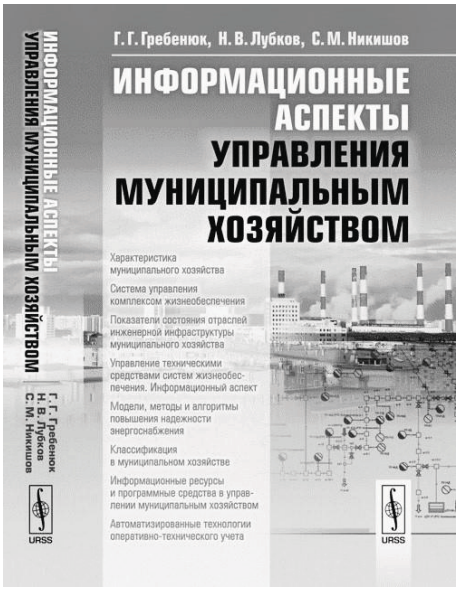
Многие технологические процессы в Москве выполняются с привлечением большого количества разнообразных машин и механизмов и сопровождаются значительными расходами материалов и топлива. Применяемые для этого средства учёта ориентированы на ручную обработку данных, достоверность которых обычно невысока. По этой причине Институтом разработан технический проект АСУ «Объединённая диспетчерская служба ДЖКХиБ», предполагающий максимальное использование автоматизированных систем контроля и учёта работ, расхода материалов, энергии и ресурсов в затратных для бюджета города, в том числе при уборке снега, применении противогололедных материалов и при выполнении других работ.

Все созданные и предложенные в лаборатории модели, методы, показатели реализации типовых функций отраслевых органов управления, методики их расчёта и принципы создания информационного обеспечения были применены Институтом при проектировании отраслевых автоматизированных систем.

Среди них системы: технического учёта, контроля энергетических балансов в теплоснабжении города, управления отраслями городского хозяйства в аппарате Руководителя Комплекса, распределения бюджетных средств в инженерную инфраструктуру города и ряд других систем. Все они были приняты в промышленную эксплуатацию.

Выполненные работы в высокой степени поспособствовали созданию единого информационного пространства для предприятий и органов городского управления, а также общего рабочего пространства, в котором в разные периоды времени решением системных задач по городу занималось до 10 лабораторий Института.

По результатам работ была издана монография *Г.Г. Гребенюк, Н.В. Лубков, С.М. Никишов. Информационные аспекты управления муниципальным хозяйством. – М.: URSS, 2011 г. – 320 с.*



Постановки многих научных задач, которые лаборатория решает в настоящее время, вытекают из работ, необходимых городскому хозяйству. Так анализ городских распределительных сетей выявил важность аналитической поддержки диспетчеров для изменения конфигурации сети с целью минимизация потерь энергии в линиях электропередачи или переключений при авариях. Указанные задачи требуют знания потоков мощности в сети, запасов устойчивости по напряжению и других характеристик, получаемых расчётным путем. В лаборатории разрабатываются необходимые для этого модели и методы.

Пространственный характер распределительных сетей электро-, водо-, тепло-, газоснабжения и др. поставил острые вопросы по обеспечению их безопасности, так как аварии в них приводят к непосредственным угрозам для горожан. Для решения этих задач в лаборатории разрабатываются модели и методы оценки уязвимости, поиска критических узлов для одиночных и гетерогенных сетей, взаимодействующих между собой с распространением каскадных эффектов, основанные на применении методов теории графов.

5.6. Управление электроэнергетическими системами

ИПУ-ИАТ всегда был тесно связан с электроэнергетической отраслью. Первым директором Института был Виктор Сергеевич Кулебакин – видный советский электротехник, заместитель директора и заведующий кафедрой главного отраслевого вуза – Московского энергетического института (МЭИ), член комиссии ГОЭЛРО, внесший свой вклад как в электрификацию страны, так и в создание электроэнергетики летательных аппаратов.

Поэтому нет ничего удивительного в том, что и следующим директором ИАТа также стал выпускник МЭИ Борис Николаевич Петров. Профессором МЭИ был и директор ИПУ РАН Вадим Александрович Трапезников, окончивший электромеханический факультет МВТУ и много лет посвятивший теории асинхронных электродвигателей во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) и Оргэнерго. Следующий директор Института Ивери Варламович Прангишвили окончил Грузинский политехнический институт по специальности «Электрические станции, сети и системы», работал в «Грузэнерго» и «Гидроэнергопроекте». С его именем связано одно из самых успешных прикладных направлений работы Института – разработка систем управления атомными электростанциями (АЭС). Его сменил академик Станислав Николаевич Васильев, работавший в одном из ведущих исследовательских центов отрасли – Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (в прошлом СЭИ СО АН СССР).



Елена Карловна Круг

В структуре РАН Институт относится к Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОЭММПУ).

Профессор Елена Карловна Круг – крупный специалист в области промышленной автоматизации, дочь Карла Круга – основателя московской школы электротехники, Её стараниями поддерживались многие годы тесные связи Института с академическим кругами Московского энергетического института.

И в наши дни в Институте проводятся фундаментальные исследования в области систем управления для электроэнергетики:

– разработаны методы и алгоритмы вычисления спектральных разложений грамианов и квадрата H_2-нормы резольвенты и/или передаточной функции системы на основе спектрального разложения резольвенты матрицы динамики непрерывной динамической системы;

– разработан метод решения дискретных алгебраических уравнений Ляпунова и Сильвестра для матриц с простым и кратным спектром;

– разработан метод энергетических функционалов и асимптотические модели исследования устойчивости линейных непрерывных динамических систем, функционирующих вблизи границы устойчивости;

– сформулирована и решена задача спектрального разложения решения дискретных матричных уравнений Ляпунова для линейных и билинейных динамических систем;

– разработаны принципы построения и алгоритмы иммунной интеллектуальной системы мониторинга статической устойчивости электроэнергетических систем на основе методов ассоциативного поиска, мультиагентного управления и грамианов;

– разработаны алгоритмы ассоциативного поиска на базе нечётких виртуальных моделей и крупномасштабных вейвлетов для решения задач динамической оценки состояния энергообъектов и задач сетевого управления Единой национальной электрической сетью (ЕНЭС) – для прогнозирования частоты по временным рядам частоты и мощности субъектов в энергосистеме.



Игорь Борисович Ядыкин

В результате удалось разработать теоретические основы метода грамианов для анализа статической и переходной устойчивости сложных электроэнергетических систем.

Институт ведёт важные прикладные работы в области управления электроэнергетическими системами:

– Сборный коллектив многих лаборатории Института участвовал разработке первой концепции и теоретических основ Интеллектуальных энергетических систем с активно-адаптивной сетью для ФСК ЕЭС по проекту «Интеллектуальные энергетические системы с активно-адаптивными сетями» для ФСК ЕЭС в 2010–2011 гг. В рамках этого проекта отметим разработку: концепции среды информационного взаимодействия элементов и кибербезопасности системы управления ИЭС АЭС; подходов к управлению режимами и противоаварийному управлению, управления территориально-технологическими кластерами мегаполисов; системы управления пропускной способностью сети; эталонной модели архитектуры; методики оценки эффективности капитальных вложений в развитие ИЭС АЭС; методики анализа надёжности ИЭС; схемы построения тарифных механизмов мотивации потребителей и управления спросом.

– Одновременно были разработаны методы идентификации и диагностики сложных энергетических систем на основе применения ассоциативного поиска для контроля участия агрегатов в общем первичном регулировании частоты. Разработан метод H_2-оптимального синтеза адаптивного регулятора для демпфирования опасных колебаний. Разработаны методы и модели для настройки регуляторов режимных параметров электроэнергетических систем. Разработаны алгоритмы и мо-

дели мониторинга степени статической устойчивости энергосистемы в реальном времени.



Михаил Владимирович Губко

– По заказу Института энергетических систем Сколковского Института науки и технологий ИПУ РАН реализован ряд проектов, руководителями которых являлись профессор Б.Т. Поляк, академик РАН С.Н. Васильев, профессор РАН М.В. Губко. Для задач оптимального потокораспределения с квадратичными ограничениями и критериями выпуклости и невыпуклости разработаны новые методы оптимизации. Предложены новые вычислительные методы решения задач достижимости в условиях неопределённости. Синтезированы вычислительные процедуры построения оракула принадлежности. Разработан гибридный метод анализа статической устойчивости электроэнергетических систем, основанный на совместном применении методов модального анализа и спектральных разложений грамианов. Разработан метод анализа переходной устойчивости на основе применения метода вектор-функций Ляпунова, кусочно-квадратичных функций Ляпунова, конструирования функций Ляпунова на основе линейных матричных неравенств. Создан эффективный алгоритм выбора схемы аварийного деления электрической сети. Разработан метод декомпозиции и маржинальных узловых цен на оптовом рынке электроэнергии. Предложены методы управления спросом на электроэнергию в среде теоретико-игрового моделирования, а также методики, сценарии и программно-инструментальный комплекс для проведения лабораторных занятий в форме деловых игр по теоретико-игровому анализу основ функционирования рынков электроэнергетики. Сотрудничество в области разработки и проведении деловых игр продолжается и в настоящее время.

Для развития компетенций Института в области приложений теории управления в электроэнергетике, выстраивания полной инновационной цепочки (от создания фундаментального задела до коммерциализации технологий) и адресной подготовки специалистов, 1 сентября 2018 г. был образован Центр интеллектуальной цифровой электроэнергетики, координирующий фундаментальные и прикладные исследования и разработки моделей, методов и технологий интеллектуального управления в электроэнергетических системах.



Алексей Григорьевич Полетыкин

Инфраструктурной основой деятельности Центра является Технологический полигон – цифровая сенсорная сеть сбора оперативной детальной информации о работе электрических и тепловых сетей Института, а также о микроклимате в помещениях для экспериментальных исследований потребителей, рынков, технологий «умного здания», идентификации моделей распределительных се-

тей. Полигон позволяет решать задачи:

- отработки технологий дистанционного сбора и интеллектуального анализа данных о функционировании сетей,
- поддержания референтной базы эталонных массивов данных для настройки алгоритмов управления,
- демонстрации технологических решений в области умных инженерных сетей,
- повышения энергоэффективности Института.

«Конёк» тематики нашего Института, его фирменная «фишка» – системный анализ и комплексный подход к проблеме автоматизации энергетических систем. В Лаборатории распределённых информационных аналитических и управляющих систем имени И.В. Прангишвили создаются информационные технологии и сложные программно-технические комплексы для интеграции АСУ ТП АЭС, включая внутренние и внешние связи с энергосистемами. Эти технологии позволяют комплексно решать задачи обеспечения человеко-машинного интерфейса, контроля, управления, диагностики, защиты информации при достижении высоких показателей по быстродействию, надёжности, ремонтопригодности и др. В Институте разработана и поддерживается интегрирующая программная платформа «Оператор», в 2019 г. принята её 6-я версия. Наши системы верхнего блочного и станционного уровня установлены на АЭС «Бушер» в Иране и «Куданкулам» в Индии. ИПУ РАН предлагает разработанные технологии для импортозамещения.



Виталий Георгиевич Промыслов

5.7. Управление плазмой в токамаках

Установки типа **токамак** – **то**роидальные **ка**меры с **ма**гнитными **к**атушками, являются наиболее перспективными устройствами для осуществления управляемого термоядерного синтеза и создания термоядерных электростанций. Они представляют собой тороидальные камеры, в которых горячая плазма (ионизованный газ) создаётся и удерживается с помощью сильного магнитного поля, создаваемого катушками токамака и током, протекающим по самой плазме. Плазма в токамаках является нелинейным многосвязным нестационарным объектом управления с распределёнными параметрами и неопределённостями, подверженным воздействию неконтролируемых возмущений.



Идеология современных D-образных токамаков

Группой специалистов под научным руководством д.т.н., проф. Ю.В. Митришкина развиваются методы, алгоритмы и системы идентификации и управления плазмой в токамаках. Разработан и реализован цифровой стенд реального времени на компьютерах *Speedgoat Performance* (Швейцария) с операционной системой *SimulinkRT* от компании *MathWorks* (США). В стенде с Host PC загружаются симьюлинк-схемы (конвертированные в *C*-код) в модели объекта и регулятора, соединённые по схеме обратной связи и реализованные на компьютерах *Speedgoat*. Конфигурация стенда защищена патентом РФ. Стенд позволил промоделировать системы магнитного управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в токамаке Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт») с использованием разработанной цифровой модели многоуровневого инвертора напряжения в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в качестве исполнительного устройства для достижения максимального быстродействия и точности управления. На многоуровневый ШИМ-инвертор напряжения получен патент. Моделирование проводилось на модели плазмы первого порядка, полученной идентификацией модели плазмы с распределёнными параметрами на плазмофизическом коде DINA (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»), совместно с обмоткой горизонтального управляющего поля.

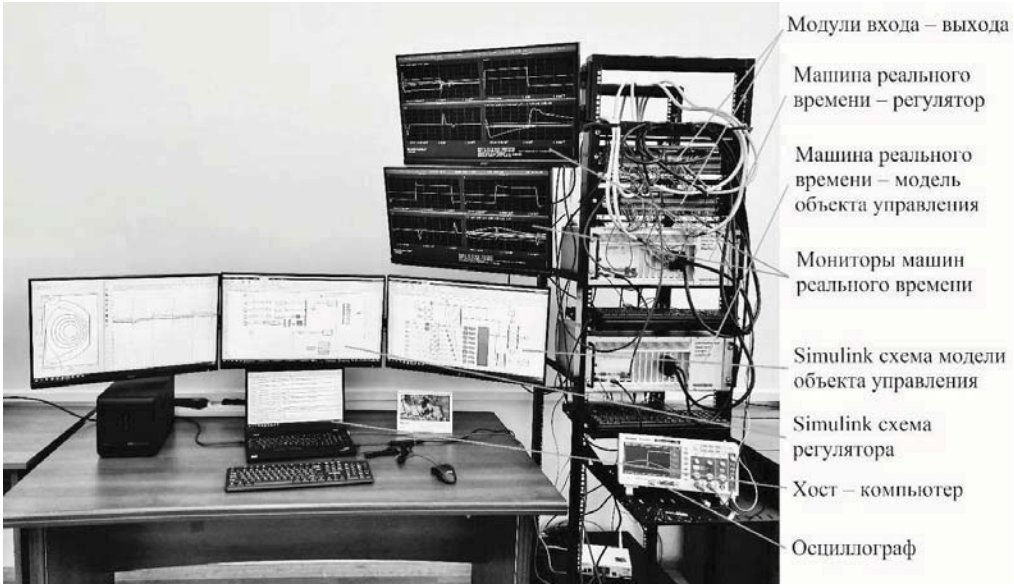


Юрий Владимирович Митришкин

Для повышения надёжности системы управления вертикальным положением плазмы в токамаке Т-15МД предложена и исследована на цифровом стенде реального времени система управления с резервной обратной связью, на которую си-

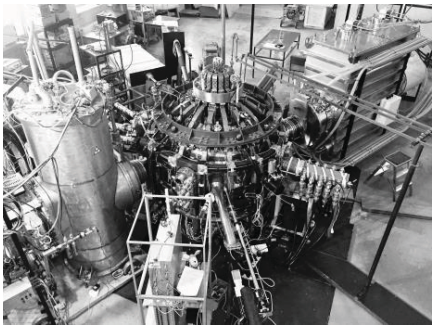
стема переключается, когда в основном контуре происходит сбой типа обрыва и сигнал обратной связи прекращает поступать на регулятор.

Для действующего сферического токамака Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) разработан и создан алгоритм восстановления равновесия плазмы по магнитным измерениям вне плазмы (*Flux and Current Distributions Identification*). Алгоритм FCDI может работать в двух режимах: FCDI-FF (*Fixed Filaments*), восстанавливающем равновесие плазмы методом неподвижных филаментов, и FCDI-IT (*Iterational*), итерационно восстанавливающем распределение плотности тока плазмы в виде полиномов от полоидального магнитного потока методом итераций Пикара при решении дифференциального уравнения Грэда–Шафранова в частных производных посредством функций Грина. Алгоритм внедрен в практику физических экспериментов токамака Глобус-М2 и после каждого разряда позволяет восстанавливать систему вложенных магнитных поверхностей, включая плазменную сепаратрису.



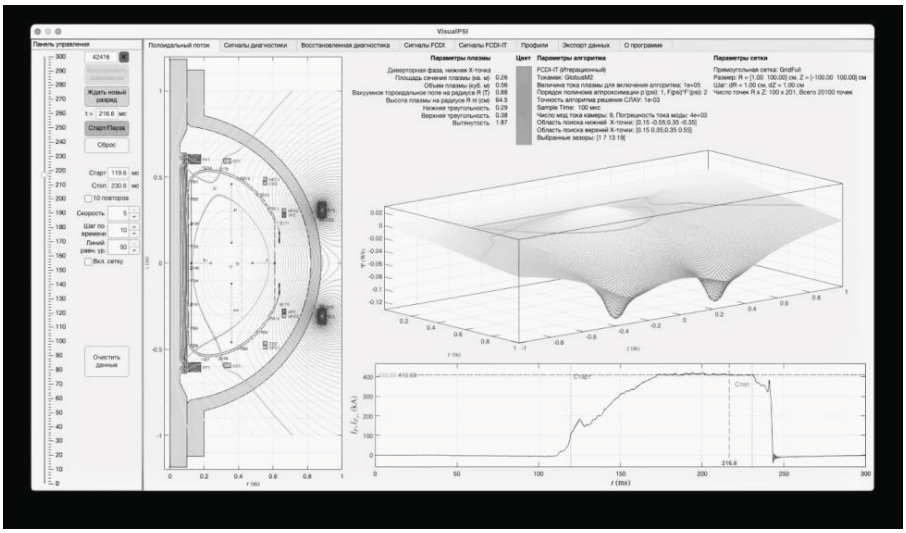
Цифровой стенд реального времени для моделирования систем управления плазмой в токамаках

Относительно восстановленных массивов равновесий плазмы в течение разрядов по экспериментальным данным токамака Глобус-М2 были построены массивы линейных моделей плазмы, которые при линейной интерполяции привели к линейным моделям с переменными параметрами (LPV – *Linear Parameter Varying*). На нестационарных моделях плазмы примене-



Действующий сферический токамак Глобус-М2

ны робастные матричные ПИД-регуляторы в многосвязной каскадно-иерархической системе для управления магнитными полями в *X*-точке и зазорами между сепаратрисой и первой стенкой. ПИД-регуляторы настроены посредством решения систем линейных матричных неравенств (LMI – *Linear Matrix Inequalities*). Системы были исследованы на цифровом стенде реального времени с одновременным применением линейных моделей, сценарных экспериментальных сигналов и алгоритма восстановления равновесия плазмы в обратной связи. На эту новую методику моделирования замкнутых систем магнитного управления плазмой в токамаках также получен патент РФ.



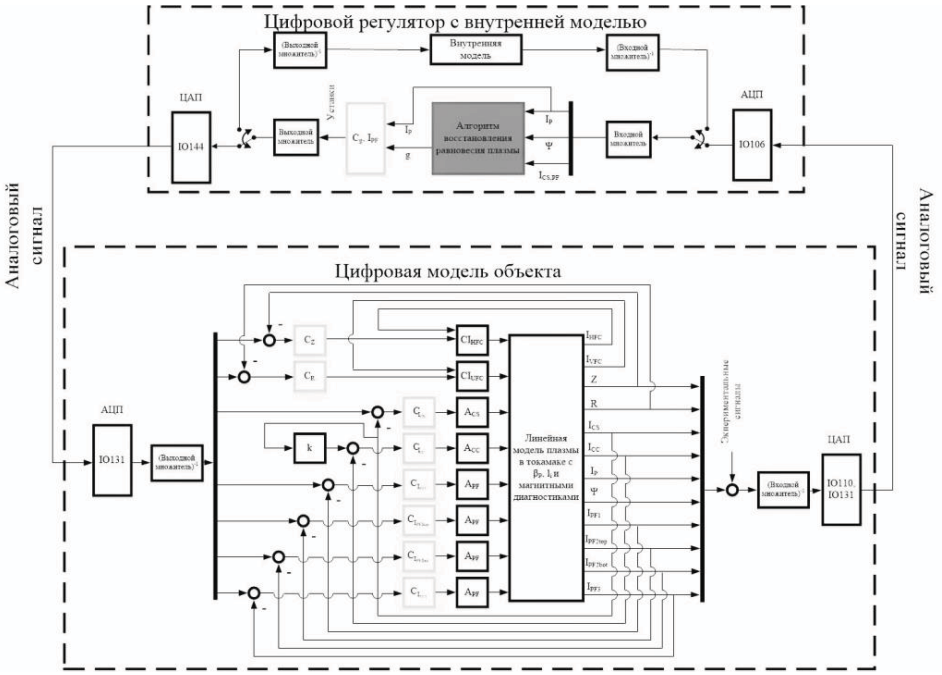
Восстановленные сепаратриса и магнитные поверхности плазмы, трёхмерное распределение полоидального магнитного потока в токамаке Ψ, измеренный I_P и восстановленный токи плазмы I_{Prec} в токамаке Глобус-М2. Разряд № 42416, момент времени 216,6 мс

Для улучшения качества управления плазмой как объекта с переменными параметрами при стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы в токамаке Глобус-М2 применен адаптивный ПИД-регулятор, где адаптация производится посредством *on-line* настройки параметров ПИД-регулятора нейронной сетью. Для настройки сети был использован массив линейных моделей. Настройка нейронной сети производилась с помощью адаптивного стохастического градиентного метода, а в качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная разница между уставкой и выходом модели.

Построены линейные динамические модели плазмы для различных конфигураций системы полоидальных управляющих катушек в международном проекте токамака ИГНИТОР. При помощи анализа величины областей управляемости по вертикали и переходных функций по горизонтали моделей плазмы определены оптимальные расположения новых катушек токамака вблизи его камеры для управления горизонтальным и вертикальным положением плазмы. Правомерность и эф-

фективность введения новых обмоток управления положением плазмы была подтверждена синтезированными системами управления положением плазмы с H_∞- и ПИД-регуляторами и моделированием на созданных линейных моделях плазмы.

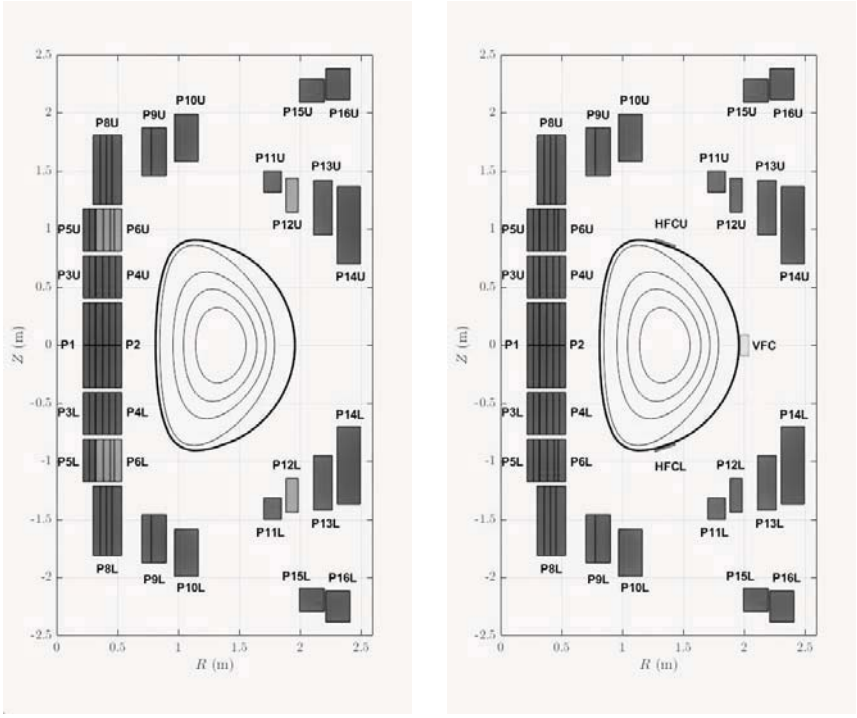
Разработан новый способ идентификации равновесия плазмы в токамаках, позволяющий достигнуть максимального быстродействия восстановления равновесия плазмы (масштаба нескольких мкс) по магнитным измерениям вне плазмы с апробацией на цифровом стенде реального времени. Способ защищён патентом РФ и признан в Роспатенте одним из лучших изобретений в РФ с демонстрацией способа на сайте Роспатента *https://rospatent.gov.ru/ru/news/patent-nedeli-03022023*.



Цифровая система магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2 с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи

На токамаке Глобус-М2 расчёт концентрации электронов производится при помощи микроволнового интерферометра. Прямое использование экспериментальной диагностики для построения систем управления линейной хордовой концентрацией электронов может служить источником возникновения ошибок, в частности, из-за её сбоев (например, скачки сигналов на интерферометрах) и низкой надёжности на некоторых разрядах. Предложена точная и быстродействующая численная модель плазмы для оценки концентрации в реальном времени на нейронной сети, обученная на данных разрядов при помощи алгоритмов глубокого обучения. На основе построенной модели синтезирована система управления концентрацией электронов при помощи алгоритмов обучения с подкреплением для достижения определённого значения концентрации как можно раньше после заданного момента времени. Управляющим устройством этой системы является кла-

пан газонапуска, амплитуду и длительность включения которого можно регулировать (кинетическое управление).



Конфигурации полоидальной системы токамака ИГНИТОР. Управляющая катушка: пара P6 & P12 (слева). Новые управляющие катушки HFC и VFC с оптимальным расположением вблизи вакуумной камеры токамака (справа)

Работа выполнена при поддержке двух грантов РНФ и трёх грантов РФФИ под научным руководством проф. Ю.В. Митришкина.

Основные достижения группы Ю.В. Митришкина в области магнитного управления плазмой в токамаках изложены в монографиях на стыке двух фундаментальных наук − физики высокотемпературной плазмы в токамаках и теории автоматического управления: *Ю.В. Митришкин. Управление плазмой в экспериментальных термоядерных установках: Адаптивные автоколебательные и робастные системы управления. М.: КРАСАНД, 2016. — 400 с. ISBN 978-5-396-00694-2* и *Ю.В. Митришкин, Н.М. Карцев, Е.А. Кузнецов, А.Я. Коростелев. Методы и системы магнитного управления плазмой в токамаках. М.: КРАСАНД, 2020. — 528 с.; цв. вкл., ISBN 978-5-396-01016-1*, а также в международных журналах высокого рейтинга: *Fusion Engineering and Design*, *Plasma Science and Technology*, *Technical Physics Letters (Pleiades Publishing Ltd)*, *Control Engineering Practice (IFAC)*, *Mathematics (MDPI)*, *Engineering Proceedings (MDPI)*, *Procedia Computer Science (Elsevier BV)*, *IFAC-PapersOnline (Elsevier Ltd)*, *Advances in Systems Science and Applications* и др. За последние пять лет получено четыре патен-

та Российской Федерации на способы и устройства идентификации и управления плазмой в токамаках.

Дальнейшая перспектива исследований связана с внедрением в практику физического эксперимента токамаков Глобус-М2, КТМ – Казахстанский Токамак Материаловедческий (Институт атомной энергии Республики Казахстан) и Т-15МД цифровых систем магнитного управления плазмой, а также в проект токамака ТИН −Термоядерный Источник Нейтронов (НИЦ «Курчатовский институт»).

5.8. Цифровые технологии управления в сельском хозяйстве



Директор ЦИЦСХ ИПУ РАН Сергей Иванович Антипин

Для более полного раскрытия инновационного и внедренческого потенциала Института и выхода на новый уровень поисковых и прикладных исследований и разработок моделей, методов и технологий интеллектуального управления в области цифрового сельского хозяйства в 2018 г. был создан Центр интеллектуального цифрового сельского хозяйства (ЦИЦСХ). Директором ЦИЦСХ был назначен Сергей Иванович Антипин.

ЦИЦСХ как центр компетенций осуществляет координацию и взаимодействие сотрудников структурных подразделений Института, а также сотрудников сторонних организаций, взаимодействующих с Институтом и осуществляющих фундаментальные и прикладные исследования и разработки в области интеллектуальных и цифровых систем для сельского хозяйства.

С момента своего создания ЦИЦСХ, в качестве научного партнера, принимал участие в нескольких проектах с выполнением полного комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе в таких знаковых проектах, как:

– «Внедрение программно-аппаратного комплекса по мониторингу состояния животных на основе использования машинного обучения на пилотном участке ООО «Белгородский свинокомплекс» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, робототехника, искусственный интеллект для животноводства)*;

– «Создание интеллектуального сервиса распознавания заболеваний зерновых культур на основе технологий машинного обучения и междисциплинарных знаний в составе цифровой платформы для сельскохозяйственных товаропроизводителей» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, искусственный интеллект для растениеводства)*;

- «Создание системы обнаружения и анализа аномалий поведения КРС[†] по видеоизображению на основе технологий машинного обучения и междисциплинарных знаний в составе цифровой платформы для сельскохозяйственных товаропроизводителей» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, робототехника, искусственный интеллект для животноводства)*;
- «Разработка нейросетевых моделей распознавания патологий яблонь с созданием прототипа сервиса мониторинга яблоневых садов» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, искусственный интеллект для животноводства)*;
- «Разработка системы беспилотного вождения трактора по карте с видеоконтролем обстановки для обработки яблоневых садов промышленного типа» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, робототехника, искусственный интеллект для растениеводства)*;
- «Разработка приложения для прогнозирования пространственно-временного распространения вредителей кукурузы на основе технологий искусственного интеллекта на примере кукурузного мотылька» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, робототехника, искусственный интеллект для растениеводства)*;
- «Создание сервиса автоматизированного распознавания патологий копытец крупного рогатого скота» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, искусственный интеллект для животноводства)*;
- «Модернизация системы машинного зрения для свинокомплекса за счёт создания тепловизионного канала наблюдения за животными и интеграции температурных данных с видеоданными» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, искусственный интеллект для животноводства)*;
- «Разработка и создание прототипа роботизированного мобильного комплекса мониторинга состояний кур-несушек для птицефабрики промышленного типа» *(машинное зрение, глубокие нейронные сети, робототехника, искусственный интеллект для животноводства)*.



Совместный проект ЦИЦСХ ИПУ РАН и ГК «Агро-Белогорье» «Внедрение программно-аппаратного комплекса по мониторингу состояния животных на основе использования машинного обучения на пилотном участке ООО «Белгородский свинокомплекс» был отмечен в докладе Министра науки и высшего образования Российской Федерации В.Н. Фалькова Президенту России В.В. Путину как пример сотрудничества науки и бизнеса по созданию отечественных наукоёмких технологий (*https://www.ipu.ru/press-center/59105*).

Некоторые проекты ЦИЦИСХ были представлены в рамках совместного стенда с Белгородским научно-образовательным Центром «Инновационные решения для АПК» на Конгрессе молодых учёных в Сочи в 2021 г. Директор ЦИЦСХ

[†] КРС – крупный рогатый скот.



С.И. Антипин представил результаты работ помощнику президента Российской Федерации А.А. Фурсенко.

ЦИЦСХ ИПУ РАН активно участвует в прикладных разработках по заказу Министерства науки и высшего образования, Министерства сельского хозяйства, организаций сферы АПК. В том числе разрабатывает технологии и комплексы машинного зрения для ферм крупного рогатого скота, свиноводческих и птицеводческих хозяйств.







Для реализации таких сложных и комплексных проектов ЦИЦСХ ИПУ РАН организовал кооперативные связи со многими научными организациями и организациями высшего образования в сфере сельского хозяйства в разных субъектах Российской Федерации, включая Белгородскую, Орловскую, Московскую, Ленинградскую и Воронежскую области, Республику Татарстан и др.

6. Информационные технологии в управлении

6.1. Искусственный интеллект и интеллектуальные технологии

Искусственный интеллект – это область информатики (наука в ряду других компьютерных наук – *Computer Sciences*), которая преследует две основные цели:

- исследование и моделирование интеллектуальных процессов мозга,
- разработка моделей и методов более эффективного (по сравнению с мозгом) решения интеллектуальных задач путём их формализации и алгоритмизации.

Сразу же возникают два вопроса – что такое интеллект вообще и, соответственно, какие задачи следует считать интеллектуальными?

Общепринятого определения понятия «интеллект» не существует. Чаще всего его понимают как набор определённых способностей, основные из которых выглядят так:

- способность классифицировать образы (в широком смысле слова – не обязательно визуальные образы) и другие объекты, то есть группировать неидентичные объекты в классы;
- способность к обучению;
- умение отличать существенное от несущественного, релевантное по отношению к чему-то от нерелевантного;
- умение рассуждать: находить причины и следствия, доказывать, обобщать, принимать разумные решения и т.д.;
- способность понимать: связывать воспринимаемое с предыдущими знаниями и опытом.

Краткий и упрощенный ответ на второй вопрос: *интеллектуальные задачи – это задачи, для решения которых у человека нет алгоритма*. Такие чисто алгоритмические процессы, как вычисления по заданным правилам, выполнение чётко описанной инструкции, поиск информации в массиве (слова в словаре, абонента в телефонной книге и т.д.) интеллектуальными не являются. Человек

решает интеллектуальные задачи, используя свои знания, опыт, умение рассуждать и сообразительность.

До конца XX века искусственный интеллект (ИИ) шёл в основном по второму пути – решению интеллектуальных задач. При этом преобладала точка зрения, что для получения решения таких задач нужно не моделировать процессы, происходящие в мозге, а конструировать процессы, удобные для алгоритмизации и, само собой, для программирования. Соответственно, в ИИ возникли направления, связанные с моделированием человеческих интеллектуальных способностей: представление знаний, машинное обучение, автоматизация рассуждений, интеллектуальная поддержка принятия решений.

Попытки идти по первому пути сводятся к построению нейроподобных систем – искусственных нейронных сетей. До начала XX века основные успехи на этом пути были в области распознавания и классификации образов. Однако после появления работ по глубокому обучению сфера применения нейросетевых методов резко расширилась. Именно они стали основным средством машинного обучения. Некоторые энтузиасты современных нейросетевых методов считают, что они способны решить все задачи ИИ. Однако, на взгляд других специалистов, это мнение следует считать очередными завышенными ожиданиями, которых в истории ИИ было немало.

Ниже рассказывается об основных направлениях ИИ, которые в разное время развивались в Институте проблем управления РАН.

6.1.1. Распознавание, классификация и машинное обучение

Это направление опирается на эвристические алгоритмы, и в качестве основного математического инструментария использует машинное обучение по прецедентам. Старт этому направлению фактически дал в 1958 г. Фрэнк Розенблатт изобретением *перцептрона* с одним скрытым слоем (как обобщения линейных статистических моделей) и Артур Самуэль, предложивший в 1959 г. понятие *машинное обучение*.

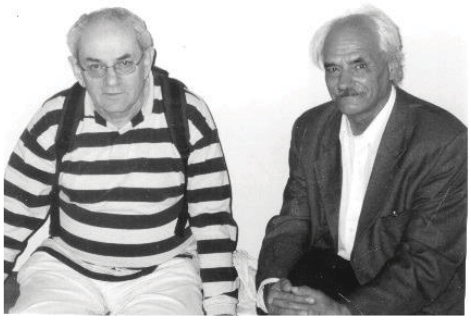


Эммануил Маркович Браверман

Эта тематика (первоначально в контексте «*теории распознавания образов*») быстро стала популярной в мире и в СССР. Уже в 1960–61 гг. Э.М. Браверман (сотрудник лаборатории М.А. Айзермана) предложил геометрический подход к распознаванию образов, выдвинув знаменитую «гипотезу компактности». В 1965–1971 гг. Э.М. Браверман, М.А. Айзерман и Л.И. Розоноэр разработали метод потенциальных функций, который стал классическим в теории машинного обучения. В 1962–1966 гг. Э.М. Браверман поставил задачу автоматической классификации (распознавания образов без учителя) и совместно с А.А. Дорофеюком предложил первые алгоритмы её решения. В 1966 г. он

опубликовал доказательство сходимости одного из рекуррентных алгоритмов автоматической классификации. Совместно с И.Б. Мучником он разработал лингвистический подход к распознаванию сложных объектов и в теории анализа данных – класс методов экстремальной группировки параметров.

Сотрудники лаборатории А.Я. Лернера В.Н. Вапник и А.Я. Червоненкис в 1962–1971 гг. разработали метод обобщённого портрета для распознавания образов и решения близких к распознаванию задач идентификации. В 1968 г. они опубликовали доказательство фундаментального результата – условий равномерной сходимости частот к вероятностям. Аналогичные условия были получены для равномерной сходимости средних к математическим ожиданиям по семейству случайных величин. Эти результаты широко известны в мире, а понятие размерности Вапника–Червоненкиса (*VC-dimension*) прочно вошло в международный научный лексикон. Условия равномерной сходимости позволили обосновать сходимость методов обучения, основанных на минимизации эмпирического риска, и получить оценки скорости сходимости. Разработанные методы широко применяются в задачах распознавания образов, восстановления регрессионных зависимостей и при решении обратных задач физики, статистики и других научных дисциплин. За участие в разработке системы оптимального автоматического оконтуривания руд по данным эксплуатационной разведки А.Я. Червоненкис в 1987 г. был удостоен Государственной премии СССР.



Владимир Наумович Вапник (слева) и Алексей Яковлевич Червоненкис

С 1990 г. В.Н. Вапник работает за рубежом, где на базе обобщённого портрета им была создана теория машины опорных векторов (*Support Vector Machine*). В 2012 г. он был награждён престижной американской наградой, медалью им. Бенджамена Франклина и, в том же году, – медалью им. Ф. Розенблатта. А.Я. Червоненкис с 2000 по 2010 г. был профессором Лондонского университета, продолжая успешно трудиться в Институте проблем управления. В Лондоне он вёл исследования по приложениям методов распознавания образов в генетике, а в России занимался применением математических методов в горном деле, биологии, конструировании самолётов.



Александр Александрович Дорофеюк

Исследования Э.М. Бравермана в области автоматической классификации были продолжены группой А.А. Дорофеюка. Е.В. Бауманом и А.А. Дорофеюком была поставлена и решена задача классификационного анализа данных, которая помимо автоматической классификации охватывала задачи экстремальной группировки параметров, кусочной аппроксимации сложных зависимостей, диагонализации матрицы связей и ряд других. На базе разработанного вариационного подхода были предложены эф-

фективные итерационные алгоритмы, проведены их теоретический анализ и компьютерное моделирование. В последние годы теория классификационного анализа была распространена на динамические данные.

Для решения некоторых типов задач с достаточно высоким уровнем неопределённости была развита теория размытого классификационного анализа, позволившая синтезировать оригинальные алгоритмы размытой классификации.

На базе методологии классификационного анализа активно развиваются теоретические, программно-алгоритмические и прикладные исследования методов структурного прогнозирования в крупномасштабных системах управления.

Среди основных прикладных результатов лаборатории А.А. Дорофеюка:

- создание знаменитой в 80-е годы «АСУ–Запчасть»;
- изучение и анализ экологической, социально-экономической и других видов обстановки в ряде российских регионов;
- работы по созданию современных интеллектуальных систем управления крупными профильными медицинскими учреждениями (в частности совместно с НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко РАМН);
- решение проблемы дифференциальной диагностики и выбор схем лечения для некоторых заболеваний в кардиологии, пульмонологии, онкологии, нейрохирургии и др.

Среди решенных технических задач – проблемы идентификации и автоматизации управления сложными технологическими процессами, в том числе каталитическим крекингом нефти, производством полиэтилена высокого давления, процессами неразрушающего контроля сложных изделий, управления мощными СВЧ-приборами и др.

6.1.2. Машинное и глубокое обучение

К концу 2010 г. глубокие нейронные сети начали постепенно выходить из инкубативного состояния, появились научные работы и результаты, по которым возможно было «прочувствовать» теоретический и прикладной потенциал глубокого обучения.



Андрей Викторович Макаренко

В 2011 г. Андрей Викторович Макаренко начал исследования в перспективной области глубоких искусственных нейронных сетей (ИНС), которые моделируют иерархические абстракции в данных, используя архитектуры, состоящие из каскадного множества нелинейных преобразований (фильтров).

К моменту признания Интернет-гигантами в конце 2014 г. высокой эффективности глубоких ИНС в задачах связанных с распознаванием изображений и голоса и началом активного внедрения нейросетевых решений в различные бизнес-процессы у команды исследователей под руководством

А.В. Макаренко уже был соответствующий теоретический и практический задел в данной области.

В 2016 г. Андрей Викторович впервые в мировой практике успешно применил глубокую свёрточную искусственную нейронную сеть как первичный классификатор сигналов в контуре обработки целевой информации квантовой волоконно-оптической системы охраны магистральных трубопроводов. Эта система принята ПАО «Транснефть» в промышленную эксплуатацию.

В 2017 г. А.В. Макаренко возглавил новую лабораторию Института (лабораторию «Вычислительной кибернетики»), в которой исследования проводятся под двум основным связанным направлениям: машинное и глубокое обучение и анализ феноменов дискретных нелинейных систем с хаотической динамикой.

В 2018 г. был завершён первый этап работ по исследованию механизма принятия решений глубокими свёрточными нейронными сетями в задаче классификации случайных последовательностей (основной исполнитель – сотрудник лаборатории «Вычислительной кибернетики» Р.В. Порцев). Продемонстрировано хорошее совпадение аналитического и численного решений. Была также оценена устойчивость сетей к загрязнению входных данных и показана способность обнаруживать при помощи классификатора преобладающий сигнал в смеси сигналов в условиях априорной неопределённости. В настоящий момент продолжается изучение механизмов функционирования глубоких ИНС в случае составных (сложных) случайных сигналов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ряд задач цифровой обработки сигналов можно более эффективно решать не статистическими методами с ручным синтезом алгоритмов, а методами глубокого обучения с автоматическим синтезом информативных признаков и решающих правил принятия решения. Кроме того, показано, что свёрточные и рекуррентные нейронные сети могут эффективно работать не только с сигналами, имеющими ярко выраженные паттерны, но и с реализациями узко- или широкополосных случайных процессов.

К 2019 г. впервые в мировой практике продемонстрирована высокая эффективность глубоких нейросетевых моделей в задачах идентификации хаотических режимов и оценивания их параметров по коротким наблюдаемым реализациям временных рядов.

В 2019 г. начато новое направление по исследованию механизма принятия решений глубокими нейронными сетями в задачах обработки многомерных полей.

К 2020 г. получен ряд результатов по применению глубоких нейросетевых моделей к обработке траекторных данных в части распознавания подвижных объектов по кинематическим характеристикам (основной исполнитель – сотрудник лаборатории «Вычислительной кибернетики» М.И. Костючек) и распутывания траекторий, формируемых сосредоточенной группой объектов.

6.1.3. Машинное зрение

Начиная с 2012 г. непрерывное развитие глубоких нейросетевых моделей существенно расширило практические возможности машинного зрения в части автоматического анализа фото- и видеоданных как в сторону повышения сложности решаемых задач, так и в сторону увеличения качества и скорости принятия решений.

В 2019 г. сотрудники лаборатории «Вычислительной кибернетики», с целью поддержания научного паритета, начали активные исследования в области механизмов принятия решений глубокими нейронными сетями в задачах обработки фото- и видеоданных. Полученные результаты позволили решить на высоком уровне ряд прикладных задач, в том числе:

- разработка алгоритмов и моделей интеллектуальной видеоаналитики по направлению точное свиноводство (основной исполнитель – В.А. Галкин);
- разработка алгоритмов точного оценивания прироста биомассы томатов по данным видеосенсоров (основной исполнитель – И.И. Журавлев);
- разработка моделей оперативного оценивания спелости плодов томатов по видеоданным в видимом спектральном диапазоне длин волн (основной исполнитель – А.Д. Кулакова);
- разработка технологии распознавания медицинских масок на лицах людей в сложных для принятия решения условиях (основной исполнитель – О.А. Милосердов).

Помимо работ прикладной направленности, коллективом лаборатории «Вычислительной кибернетики» активно ведутся и фундаментальные исследования, в их числе:

- исследование идентифицируемости и управляемости структурой латентных пространств нейросетевых моделей в задачах распознавания и сегментации экземпляров объектов;
- разработка конструктивных методов обучения и тестирования глубоких нейросетевых моделей, функционирующих в условиях сложных и зашумлённых входных данных (развитая граница объекта, вырожденная палитра, объектоподобный фон, скопления объектов, перекрытия объектов, размытие границ и текстур, вариация освещения и т.п.);
- разработка системных принципов построения и обучения глубоких контекстно-ориентированных нейросетевых моделей для задачи распознавания по видеоданным наблюдаемых объектов и их действий;
- разработка конструктивных методов выделения вложенных под-изображений пониженной сложности из высокоэнтропийных фото- и видеоданных.

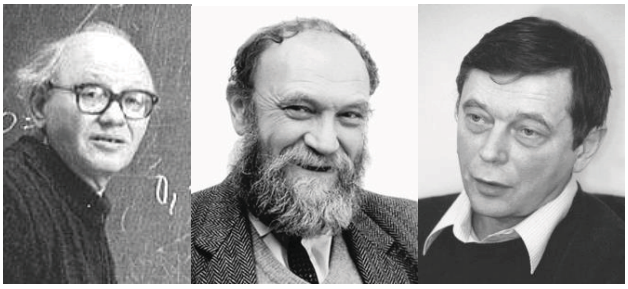
Кроме разработки собственно аналитических алгоритмов машинного зрения, ведутся также работы по совершенствованию методов предварительной и постобработки. Так в 2021 г. был предложен и апробирован оригинальный алгоритм автоматизированной калибровки широкоугольных видеокамер машинного зрения с использованием видеопотока.

6.1.4. Программирование игры в шахматы

В начале 70-х годов в Институте под руководством Г.М. Адельсона-Вельского, разработавшего метод сокращения перебора, и В.Л. Арлазарова, с участием М.В. Донского (ведущий разработчик), а также А.Р. Битмана, А.В, Ускова, А.А. Лемана, М.З. Розенфельд была разработана шахматная программа «Каисса». В августе 1974 г. на первом чемпионате мира по шахматам среди компьютерных программ в Стокгольме «Каисса» выиграла все четыре партии и стала первым чемпионом мира среди 13 шахматных программ из 8 стран мира.



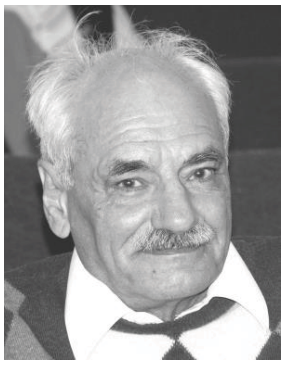
Гроссмейстер Юрий Авербах играет в Институте с «Каиссой»



Слева направо: Георгий Максимович Адельсон-Вельский; Владимир Львович Арлазаров; Михаил Владимирович Донской

6.1.5. Системы понимания естественного языка

В 1975-1982 гг. Л.И. Микуличем и А.Я. Червоненкисом были разработаны вопросно-ответные системы, использующие естественно-языковый интерфейс и способные работать с предметно-ограниченным естественным языком. Главная идея, положенная в основу семейства таких систем (известных под названием ДИСПУТ), заключалась в выборе примата прагматики перед всеми остальными стадиями анализа естественного языка: морфологией, синтаксисом и семантикой. Предлагалось сначала задавать весь предмет-



Алексей Яковлевич Червоненкис



Леонид Ильич Микулич

но-ориентированный словарь вместе с онтологией задач и только потом приступать к синтаксическому и морфологическому анализам. При узко ограниченной предметной области и сравнительно небольшом словаре надобность в полноценном морфологическом и частично синтаксическом анализах отпадала, что положительно сказывалось на скорости реакции системы.

В 2023 г. в ИПУ РАН началась интенсивная работа по концентрации компетенций в области интеллектуального анализа текстов. К этому времени в институте над такими задачами трудились несколько независимых команд из лабораторий «Сетевых моделей в нейроинформатике и многоагентных системах» (онтологический подход к управлению знаниями в научных организациях), «Эргатических систем» (разработка принципов интеллектуализации информационных и сервисных систем), «Активных систем» (разработка интеллектуальной системы анализа научной деятельности) и «Цифровых систем управления в агропромышленном комплексе» (разработка фундаментальных основ перспективных интеллектуальных систем управления и обработки информации). Выполнялись исследования по интеллектуальной обработке научно-технической документации и анализу поведения пользователей в социальных сетях, по проблемам построения образовательной траектории, задачам определения закономерностей в исторических текстах, задачам классификации в психологических исследованиях, а также задачи распознавания смыслов в художественных произведениях. К началу года была чётко поставлена задача анализа научно-исследовательской деятельности, которая стала основой для разработки интеллектуальной системы анализа научной деятельности (ИСАНД). Данный проект посвящён исследованию развития теории управления и аккумулирует деятельность всей экспертной среды Института для создания полной онтологии по теории управления. В рамках проекта исследуются задачи поиска рецензентов для научно-исследовательских работ, автоматизация составления обзоров и отчётной документации, автоматизация поиска журналов и конференций под конкретные научные результаты, выбор научной группы под конкретную тематику, тематическая классификация и другие.

6.1.6. Интеллектуальная поддержка принятия решений, основанная на когнитивных картах

Субъективные оценки человека, модели/схемы поддержки решения задач в контуре человеко-машинной системы управления традиционно исследовались в задачах управления сложными организационно-техническими системами и в тех задачах, где разработать системы автоматического управления невозможно. В те или иные периоды развития науки об управлении в Институте разрабатывались подходы к учёту человеческого фактора для повышения качества решений в сложных ситуациях по: надёжности, безопасности, достоверности, – которые позволяли ограничить влияние субъективных представлений специалистов, теоретиков и лиц, принимающих решения (ЛПР), на вырабатываемые решения по управлению

сложными организационно-техническими системами. В одних случаях за счёт разработки средств поддержки удавалось нивелировать влияние решений человека в узлах сложной системы управления, в других – за счёт построения модели действий человека в задачах оценки обстановки, диагностирования и выбора наилучшего действия с позиции выбранного критерия (применение этой модели при формировании средств компьютерной поддержки позволяло снизить возможную неустойчивость в оценках). Однако неопределённость в задачах управления в таких системах была прежде всего связана с неустойчивостью в выборе тех или иных предписанных действий, с возможной неоднозначностью в оценке обстановки оператором, тем не менее цели системы были заданы, модель функционирования определена и условия функционирования можно было представить в виде той или иной формальной модели.

Проблемы такого рода традиционно обсуждаются в рамках тематики «человеческий фактор в управлении», нивелирование влияния которого связано с применением соответствующего математического аппарата и алгоритмов автоматизированной поддержки для повышения объективности там, где необходимо включать в контур моделирования субъективные представления, оценки и выбор «правильных» воздействий на систему из числа допустимых. Вместе с тем в сложных, как правило, иерархических, организационно-технических системах стало важным учитывать модель субъекта управления. В результате становились всё более актуальными задачи выбора и управления, формулируемые на естественном языке, в том числе и потому, что ЛПР формулирует задачу, используя нечёткие критерии, и в необозримой системе не всегда понятно, что именно происходит. В 1980-х годах в Институте были получены серьёзные результаты по логико-лингвистическим методам многокритериального выбора, шли исследования по системам поддержке принятия решений на основе баз знаний – экспертным системам.

Очередным вызовом теории управления стала актуализация в 1990-х и 2000-х годах задач по управлению открытыми системами (междисциплинарной природы), при моделировании которых нельзя было абстрагироваться от влияния параметров внешней среды и стало сложным выявить все такие параметры. Чрезвычайно актуальными стали задачи так называемого стратегического управления, ориентированные на поиск управлений на горизонте принятия решений для достижения целей в будущем и с учётом возможных вариантов развития ситуации (прогнозов изменения внешней среды с классификатором степени нестабильности). При управлении такими системами сложной стала даже относительно понятная задача оценки обстановки и мониторинга изменений. Собственно, субъективные оценки, логико-лингвистические модели представления знаний, оценки возможности, степени уверенности и, в целом, оценки в терминах нечётких, интервальных множеств и стали выходом из положения и попыткой снизить влияние фактора неопределённости. При этом получение тех или иных решений по управлению системами было поставлено в прямую зависимость от понимания человеком ситуации пусть даже в терминах влияния тех или иных параметров – субъективным способом оценки причин и зависимостей в системе и соответственно описания проблемы. Традиционные методы формализации и недостаток

количественной информации о процессах, влияющих на изменение параметров системы, не позволяли строить адекватные математические модели функционирования и целенаправленного развития систем, которые бы давали возможность решать задачи управления. Решение такого рода задач сформировало целое направление Института по разработке подходов поддержки принятия решений в сложных ситуациях в условиях неопределённости, связанных с неполнотой информации и влиянием человеческого фактора.

Основная задача тогда была формализовать, построить логико-лингвистическую модель динамики системы с учётом наиболее полной совокупности факторов, параметров объекта и внешней среды (условий его функционирования) на основе имеющейся неоднородной качественной и количественной информации. Центральная идея в традиционной схеме моделирования была основана на гипотезе, что эксперт или ЛПР при управлении сложной системой оперирует знаниями о факторах и взаимосвязях между ними, представленными в виде сети причинно-следственных влияний, так называемых когнитивных карт (в западной литературе в этом смысле используется термин нечёткие когнитивные карты). И такого рода логико-лингвистическая модель позволяет в проблемных ситуациях (новых, более сложных) решать задачи мониторинга, диагностирования, прогнозирования и определения значимых параметров, то есть понимать «что происходит с точки зрения достижения целей» и «воздействие на какие параметры, приведёт к тому или иному эффекту» и т.п. Несмотря на то, что применение этого термина и основные идеи дискретного моделирования и решения задач управления с применением когнитивных карт сложились еще в 1960-х годах за рубежом, бум развития когнитивного управления в России и мире начался в 1990-х годах.

Именно в этот период, когда условия функционирования существенно изменились, а скорость изменений нарастала потребность в применении моделей на основе неоднородной информации, характеризующей исследуемую систему и сценарии развития ситуаций, стала чрезвычайно актуальной. В Институте на базе имевшегося существенного задела по разным направлениям сложилось целое направление, в рамках которого разрабатывался когнитивный подход в задачах системного анализа, обработки информации, подготовки и принятия решений в цикле управления.

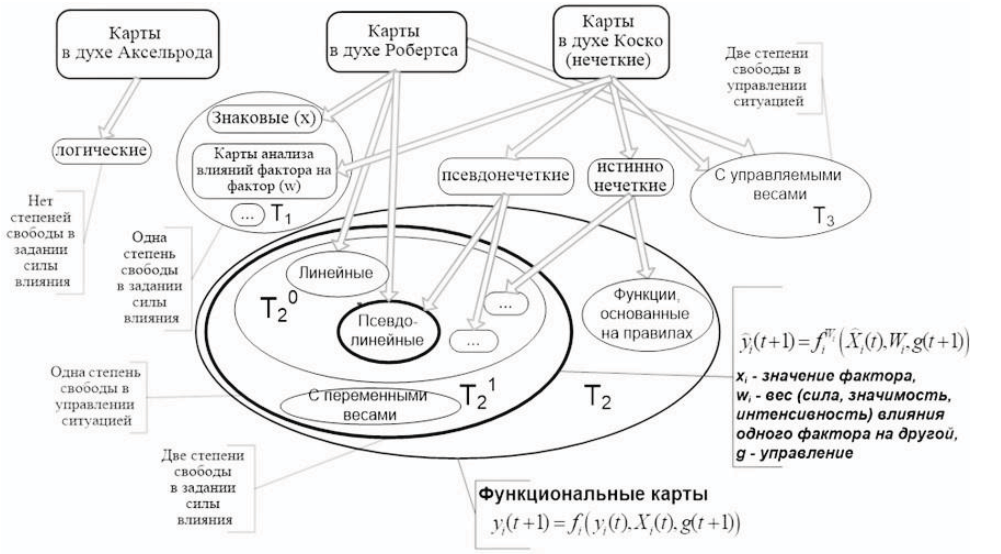
В целом когнитивный подход в науках об управлении[*] – это интенсивно развивающееся научное направление, относящееся к областям решения проблем анализа, моделирования, идентификации, оценивания, прогнозирования динамики и управления развитием слабоструктурированных объектов, систем и ситуаций. Процесс практического решения задач в рамках этого подхода рассматривается как познавательная деятельность людей и включает в себя не только этапы, предусмотренные формальными методами, но и такие субъектно-зависимые этапы, как структуризация и формализация первичных знаний и представлений человека о:

[*] Этот подход иногда называют когнитивным моделированием, что приводит к путанице: когнитивным моделированием общепринято называть моделирование когнитивных процессов мозга, о чём в данном случае речи не идёт. Правильнее говорить о когнитивном подходе к управлению или о когнитивном анализе ситуаций.

– неструктурированных проблемах, системах и ситуациях;
– целях, интересах и мотивах субъектов, вовлеченных в процесс решения проблем.

Основными инструментами при решении задач управлении в слабоструктурированных ситуациях на базе когнитивного подхода становятся модели представления знаний о развитии системы, мягкий системный анализ (в качестве основы схемы решения проблем), как правило, аппарат имитационного моделирования для генерации пространства альтернативных сценариев развития системы и методы ситуационного управления для систематизации возможных ситуаций во внешней среде. В последнее время стали привлекаться ещё методы и приёмы визуальной аналитики для поддержки задач чтения и понимания допустимых в рамках той или иной структуры типов динамики. Часто именно это и является основной задачей, решаемой в информационно-аналитических системах и в интеллектуальных системах поддержки принятия решений.

Когнитивные карты изучаются и применяются в качестве основного (но не единственного) формализма для представления знаний о сложных и плохо структурированных проблемах, системах, ситуациях при решении практических проблем. С формальной точки зрения когнитивная карта – это ориентированный граф, вершины которого соответствуют факторам, определяющим ситуацию, а ориентированные ребра – причинно-следственные связи между факторами. Значение фактора может характеризовать его величину или активность (интенсивность) изменения; значение (вес) связи – силу влияния этой связи или степень уверенности в оказываемом влиянии; знак веса связи – положительное или отрицательное влияние связи на величину фактора, в который входит данное ребро. Соответственно, динамическая модель на основе когнитивной карты включает функцию агрегирования влияний в узлах карты. В зависимости от типа функций (линейная, пороговая, нечёткая, определенная на дискретных лингвистических шкалах) на базе когнитивных карт выделяют разные семейства моделей.



Систематизация моделей на основе когнитивных карт†

Задачи анализа ситуаций и управления на основе когнитивных карт можно разделить на два типа: *статические и динамические*.

Статический анализ, включающий *анализ влияний прямых и опосредованных, анализ структуры и компонент связанности, сравнения карт разных реальных и виртуальных активных субъектов ситуации при построении коллективных карт, поддержку чтения такой структуры за счет методов визуальной аналитики*.

Динамический анализ – это генерация и анализ возможных сценариев развития ситуации во времени (в модельном времени). Необходимо учитывать при этом, что в таких графо-динамических моделях время представлено следующей метафорой «когда всё на всё повлияет», поэтому при построении таких моделей учитывается масштаб разных факторов. В обоих случаях целью анализа является формирование возможных альтернатив управляющих решений. Такими альтернативами становятся множества управляющих факторов, то есть факторов, на изменение которых ЛПР может непосредственно влиять. Цель управления – достижение определённых значений некоторых выделенных (*целевых*) факторов. *Внешние, или входные факторы* – это факторы, на которые не влияют другие факторы когнитивной карты. Анализ влияний выделяет факторы с наиболее сильным влиянием на целевые факторы, то есть позволяет определить наиболее эффективные точки приложения управляющих воздействий. Динамический анализ рассматривает развитие ситуации как смену её состояний в дискретном времени. При этом решаются две основных задачи. *Прямая задача* – это прогноз развития ситуации при заданных управляющих или внешних воздействиях (изменении значений некоторых управляющих или внешних факторов). *Обратная задача* – вычисление управляющих воздействий, приводящих ситуацию в заданное

† Н.А. Абрамова, З.К. Авдеева, А.А. Федотов.

состояние (например, в состояние, где целевые факторы имеют желаемые значения или близкие к ним).

Благодаря многолетним исследованиям коллективами разных лабораторий Института сегодня ИПУ РАН является одним из лидеров не только в России, но и заметной группой во всём научном мире как в области моделей, методов и технологий решения задач анализа, прогноза, управления на основе моделирования сложных ситуаций на базе когнитивных карт, так и в плане развития когнитивного подхода к решению задач управления в широком смысле. Это необходимо для повышения эффективности человеко-машинного взаимодействия, минимизации рисков из-за человеческого фактора в процессе формализации и с целью развития подходов и методов визуальной аналитики для поддержки процесса понимания в сложных, плохо определённых ситуациях, да ещё в условиях информационной перегруженности. Начало этим исследованиям было положено в первой половине 1990-х годов работами лаборатория «Сценарного управления» по моделированию ситуаций на графовых моделях и работами лаборатории «Когнитивного моделирования» по разработке технологии моделирования сложных ситуаций на основе когнитивных карт. С начала 2000-х годов исследованиям по когнитивному подходу стали заниматься и в лаборатории «Методов интеллектуализации дискретных процессов и систем управления» (сегодня она называется лабораторией «Методов интеллектуализации дискретных процессов и систем управления», где основное внимание было уделено нечётким когнитивным картам.

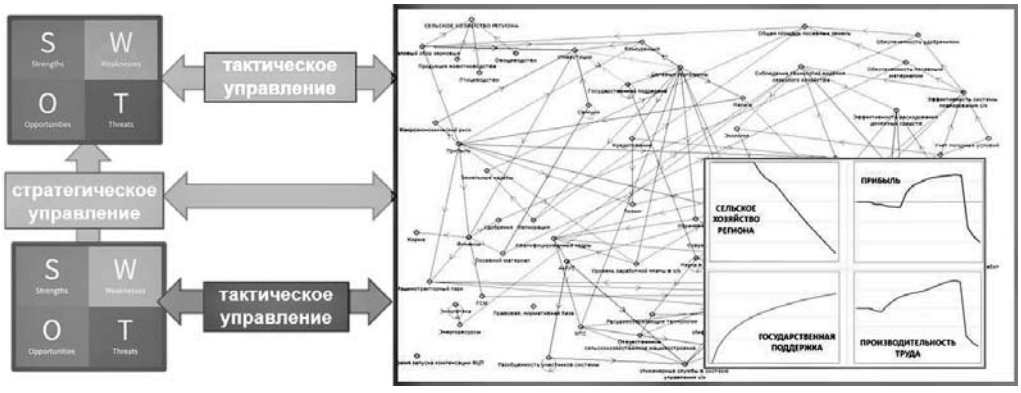
Центральной идеей применения когнитивного подхода в автоматизированной системе управления в слабоструктурированных ситуациях стала замена системы экспертных оценок важности и приоритетов в целях моделью представлений о ситуации «мульти-эксперта» для получения оценок ситуации. Выбор когнитивных карт в качестве модели формализации связан с тем, что на основе применения гибридных методов структуризации экспертной информации, информации о системе управления и методов построения многопараметрических моделей можно структурировать информацию в виде причинно-следственных связей между значимыми факторами в семантике знака и силы влияний. Иначе говоря, в качестве модели сложной системы применяется модель представления о ситуации коллективного субъекта управления, которая является объединением выявленных по многим источникам аналитической информации, знаниям экспертов и имеющимся количественным данным факторов и связей, характеризующим процессы во внешней и внутренней среде. Такая слабо формализованная модель ситуации не учитывает многие динамические свойства, но учитывает достаточно полный набор связей и факторов, которые в те или иные периоды стационарности влияют на динамические свойства системы. А для того, чтобы повысить достоверность, применяются процедуры проверки, верификации связей (подтверждения связей) между факторами в субъективных представлениях на доступных массивах информации и экспертных знаниях.

За более чем 30 лет с разной степенью интенсивности получили развитие: (а) конкретные модели и методы анализа и управления в сложных ситуациях на основе когнитивных карт; (б) методы структуризации знаний и информации на основе

когнитивных карт с включением процедур верификации факторов и связей по различным массивам информации; (в) методы построения шкал для разнородных факторов, измеримых качественными и количественными данными; (г) методы мониторинга изменений и диагностирования сложных ситуаций в контуре поддержки принятия решений индивидуальными и групповыми субъектами; (д) принципы и методики верификации когнитивных карт с применением определённых критериев проверки структурных и семантических соответствий; (е) комбинированные модели прогнозирования на горизонтах календарного времени. Полученные результаты находили применение при разработке методологических и аналитических основ информационно-аналитических систем управления геополитическими, военно-политическими, социально-политическими ситуациями, социально-экономическими и организационно-экономическими системами (такими, например, как регион, город, предприятие отрасль др.). За это время коллективами перечисленных лабораторий выполнено около 20 грантов РФФИ и РНФ, выполнено более 25 прикладных работ. Среди программных средств поддержки принятия решений на основе когнитивных карт следует отметить программный комплекс «Ситуация», ориентированный на линейную модель (В.И. Максимов, Е.К. Корноушенко, А.К. Григорян); комплексы «Компас» (А.А. Кулинич, В.И. Максимов) и «Канва» (А.А. Кулинич), ориентированные на нечёткую модель; программно-аппаратный комплекс ПАК САП сценарного анализа и прогноза (В.В. Кульба, И.В. Чернов, А.Б. Шелков), программный комплекс *MapConstructor* (Н.А. Абрамова, Р.В. Порцев).

Среди разработанных в институте методов анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивного подхода следует отметить:

– Сценарный подход к прогнозированию развития сложных ситуаций и принятию управленческих решений путём оценивания различных сценариев и выбора оптимального сценария по векторному критерию оптимизации (под руководством В.В. Кульбы, а сегодня и И.В Чернова) и методы сценарного анализа уязвимостей сложных систем.



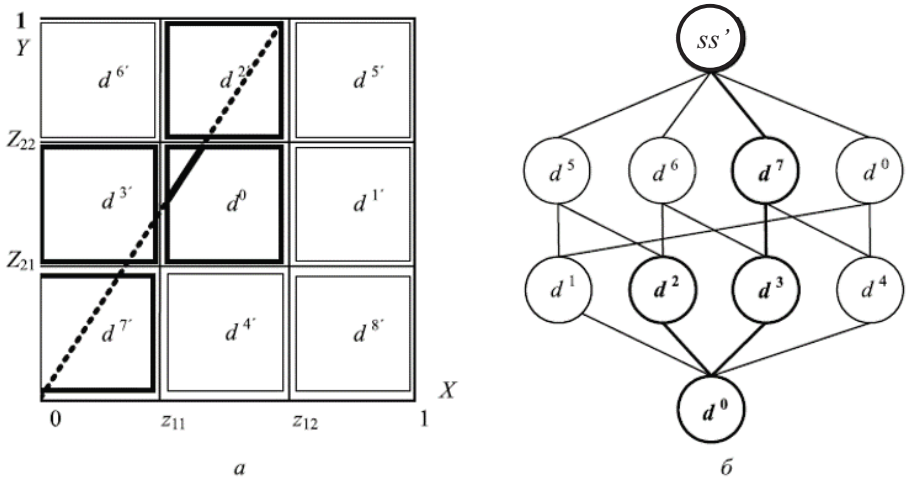
Управление возможностями регионального развития на основе сценарного подхода

– Модели и методы структурно-целевого и сценарного анализа в слабоструктурированных ситуациях, методы структурного анализа в задачах целеполагания, диагностирования, мониторинга, комбинированные модели прогнозирования на среднесрочном горизонте для нестационарных процессов (Е.А. Гребенюк, З.К. Авдеева, С.В. Коврига), методы стабилизации неустойчивых графовых моделей и решения обратных задач (В.И. Максимов и Е.К. Корноушенко).

– Модели нечётких когнитивных карт, интегрированная модель принятия решений, объединяющая когнитивную модель с иерархией Саати, оценивающей предпочтения ЛПР (О.П. Кузнецов, А.А. Кулинич, А.Н. Аверкин, Н.В. Титова – ВЦ РАН), доказательство *NP*-сложности обратной задачи для нечётких карт (А.В. Марковский).

– Моделирование ситуаций с многими активными субъектами: модель формирования и устойчивости коалиций в нечётких конфликтных ситуациях, алгоритмы аргументации на основе НКК (А.А. Кулинич); анализ возможности и целесообразности совместного использования теоретико-игровых и когнитивных моделей для описания сложных систем, а также предложена модель игры на линейной когнитивной карте (Д.А. Новиков); модель конфликтной ситуации в форме игры на когнитивной карте для двух случаев, когда представления агентов о ситуации: а) совпадают и заданы одной линейной когнитивной картой; б) не согласованы и заданы различными когнитивными картами (С.Г. Куливец); модели согласования интересов активных субъектов ситуации и управления в конфликтных ситуациях (В.И. Максимов, С.В. Коврига, З.К. Авдеева, Е.К. Корноушенко), методики структуризации ситуаций с многими активными субъектами и построение согласованных коллективных карт (З.К. Авдеева, С.В. Коврига).

– Гибридные методы построения модели системы ситуации на базе когнитивных карт, повышающие качество моделей этого типа за счёт анализа массива информации и процедур верификации, методы структуризации проблемной области и методики составления когнитивных карт (В.И. Максимов, Н.А. Абрамова, З.К. Авдеева, С.К. Коврига, Д.И. Макаренко). Под руководством Н.А. Абрамовой была разработана систематизация теоретических моделей когнитивных карт; поставлена и исследована проблема рисков из-за человеческого фактора; предложен экспертный поход к верификации когнитивных карт; развита концепция когнитивного тренажёра, учитывающая когнитивные особенности и типовые мыслительные ошибки субъекта (эксперта, аналитика) в сложных и слабоструктурированных ситуациях. А.А. Кулинич предложил метод верификации карт на основе объяснений получаемых прогнозов в виде трассы движения по дереву вывода. З.К. Авдеева и А.Н. Райков предложили методы организации информационных массивов и построение причинно-следственных моделей на основе верификации связей, определяемых по экспертной информации. Была предложена семиотическая модель когнитивных карт и алгоритм для построения интерпретирующего концептуального каркаса предметной области, направленный на поддержку процессов верификации и интерпретации причинно-следственных отношений в предметной области, заданных когнитивной картой (А.А. Кулинич).

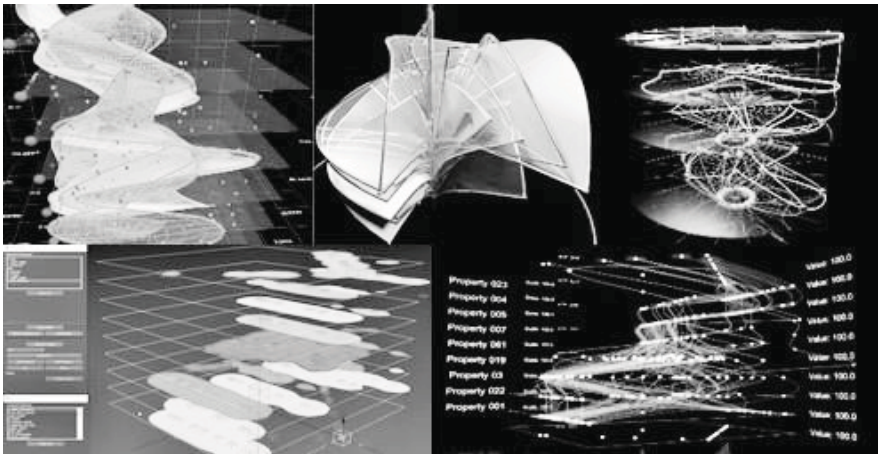


Представление когнитивной карты
в семантическом пространстве понятий предметной области

– Поддержка процесса понимания обстановки в сложной ненаблюдаемой системе. В современных условиях визуализация используется не только для передачи информации об объекте или процессе, но и как инструмент для поиска и принятия решений. Все данные и сигналы не только в аналоговом, но и цифровом виде имеют ценность только при условии анализа с заданной целью. Препятствием для формирования у исследователя целостного представления об имеющихся у него сведениях и получение оснований для необходимых выводов, соответствующих целям исследователя, является отсутствие формальной модели области знаний, неполнота данных или их значительный объём. В этой связи разработан комплекс методов и средств поддержки анализа динамики слабоструктурированных (геополитических, военно-технических, социально-экономических ситуаций) на основе когнитивных карт (Н.А. Абрамова, Д.И. Макаренко, Р.В. Порцев). Развитием теории и методов визуальной аналитики, созданием инструментов анализа данных в условиях слабой формализации задач и недостаточной полноты данных и знаний занимаются в под руководством А.А. Захаровой.



Характеристика комплекса методов и средств визуальной аналитики на основе когнитивной карты



Пример визуализации информации о сложной системе на основе гетерогенной иерархической модели

Основной тренд развития этого направления сейчас сосредоточен не на создании новых теоретических моделей формальных когнитивных карт, а на развитии: (1) методов структуризации и поиска в информационных массивах и технологий анализа качественных и количественных данных для поддержки когнитивного моделирования процесса решения проблем в условиях неоднородной, избыточной информации о процессах, в том числе с применением на разных этапах когнитивных карт, и (2) принципов построения гетерогенных моделей на основе качественной и количественной информации о распределённой сетевой организационной системе при решении задач мониторинга, прогнозирования и управления.

Если в начале причиной построения аппарата моделирования на основе когнитивных карт в рамках теории управления и ее приложений была нехватка информации, отсутствие качественных данных для построения математических

моделей систем, то следующий импульс развития эти модели получили благодаря важным прикладным задачам при разработке информационно-аналитических систем управления крупно-масштабными системами: страна, регион, город, отрасль, корпорация – в условиях огромного массива данных, неоднородно характеризующих рассматриваемые системы. Современные ситуации, несмотря на большой объём данных, по-прежнему, относятся к слабоструктурированным. Причины этого, связаны с:

- отсутствием информации и понимания ряда существенных факторов;
- неоднородностью информации о ситуации, обусловленной различиями в качестве и количестве информации о ситуации и затрудняющей применение типовых статистических методов анализа для выявления определяющих ситуацию факторов (например, политических, экономических, технологических и т.п.);
- большим количеством источников информации и мощным потоком информации от каждого из них, причём типичные инструменты, применяемые для мониторинга ситуации, позволяют выявлять тысячи факторов и взаимосвязи между ними из миллионов, но лишь часть из них может использоваться для анализа и моделирования развития ситуации.

Конечно такого рода слабо формализованные модели не являются панацеей и не должны рассматриваться как модель системы в сильном смысле (проблема с достоверностью модели, которая является композицией субъективных оценок, пусть и подтверждённых с помощью семантических и статистических процедур), но лишь в качестве обновляемой модели, упорядочивающей информационные массивы, позволяющей выстроить логику мониторинга, объясняющей происходящее, дающей возможность донести информацию о ситуации и возможных последствиях от выбора ЛПР тех или иных решений.

6.1.7. Методы работы со знаниями

Меры семантической близости в онтологии (2009–2011): К.В. Крюков, В.С. Суховеров, Л.Б. Шипилина, Л.А. Панкова, В.А. Пронина. На основе предложенных критериев семантической близости понятий разработаны модель профилей носителей знаний (специалистов или публикаций) и оценка степени близости различных профилей. С помощью модели профилей формализована задача выбора команды сотрудников для выполнения данного проекта. Разработана схема построения расширенного запроса, позволяющая получить список сотрудников, ранжированный по семантической близости профилей сотрудника и проекта. Предложены критерии соответствия (тематической близости, научной компетентности и др.) сотрудника проекту. Задача выбора команды проекта сведена к обобщенной многокритериальной задаче о назначениях.

Онтологический подход к управлению знаниями в научных организациях (2013–2019): К.В. Крюков, О.П. Кузнецов, В.С. Суховеров. Методы формирования профилей получили развитие при решении задачи определения компетентности науч-

ных сотрудников. Профили научных сотрудников формируются путём соотнесения терминологии их публикаций с терминами онтологии предметной области. Предметная область научного знания представляется в виде онтологии с двумя типами вершин: вершины-темы и вершины-термины. Вершины-темы образуют основной каркас дерева и связаны между собой отношением тема-подтема. Вершина-термин связана ровно с одной темой отношением тема-термин; предполагается, что все нижележащие вершины наследуют этот термин. Определяется понятие профиля для двух основных объектов задачи: профиль документа (публикации), характеризующий релевантность документа темам предметной области, и профиль сотрудника, характеризующий компетентность сотрудника в тех или иных темах предметной области.

Предложена формула, оценивающая релевантность документа конкретной теме онтологии. Формула учитывает три параметра: 1) общее количество упоминаний основных терминов темы в документе; 2) часть документа (объём), в которой встречались основные термины темы; 3) разнообразие терминологии темы (число различных терминов) в документе. Аналогично вычисляется релевантность группы документов. Профиль документа – это вектор его релевантностей всем темам онтологии. Профиль компетентностей сотрудника – это вектор релевантностей его статей всем темам предметной области.

Вычисленные компетентности можно использовать для подбора экспертов в различных областях научной деятельности (рецензентов, оппонентов и т.д.).

В 2013–2015 гг. разработаны онтология и словарь наук об управлении, в 2017 г. разработана первая версия программной системы, успешно опробованная на массиве статей в журнале «Автоматика и телемеханика». К началу 2019 г. разработана система определения компетенций сотрудников Института на основе базы публикаций сотрудников. Эти работы были положены в основу информационной системы автоматизации научной деятельности (ИСАНД), которая разрабатывается в ИПУ РАН с начала 2023 г.



Наталья Николаевна Бахтадзе

Метод ассоциативного поиска знаний (2007): Н.Н. Бахтадзе, В.А. Лотоцкий, Е.М. Максимов, В.В. Кульба. Принципиально новые преимущества при разработке идентификационных моделей систем и процессов предоставляют знания, формируемые на основе интеллектуального анализа данных (*Data Mining*). Эти знания, получившие названия *индуктивных* знаний (В.Н. Вапник и А.Я. Червоненкис, 1984), представляют собой формализованные закономерности, которые извлекаются из множеств данных, характеризующих динамику объекта/системы управления. К таким алгоритмам относится интеллектуальный алгоритм ассоциативного поиска, *моделирующий процесс принятия решений* человеком в определенной ситуации на основе его опыта и профессиональных умений. «Ситуация» описывается набором признаков (значений компонент вектора входов системы и др.). У лица, принимающего решение,

возникают ассоциации (констатация близости признаков по определённому критерию) с «ситуациями», извлекаемыми из памяти. Этим «ситуациям» соответствовали определённые значения выходных сигналов системы. Далее осуществляется прогноз текущего значения выходной переменной, например, методом наименьших квадратов для отобранного множества уравнений, характеризующих отобранные «аналогичные» ситуации. В случае выполнения условий Гаусса-Маркова оценки будут статистически эффективными и несмещёнными. В противном случае (например, в замкнутом контуре) дополнительно применяется техника псевдорешений.

Алгоритм позволяет получать оценки высокой точности, обладает высоким быстродействием, достигаемым за счёт предварительного обучения и кластеризации системы.

Логические методы обработки знаний (2006–2012). Академиком С.Н. Васильевым были предложены методы представления и обработки знаний в разработанном им формализме позитивно-образованных формул, включая методы алгоритмизации решения логических уравнений в этом формализме и алгоритмического поиска выводов и гипотез. Эти методы были использованы в оригинальном проекте интеллектуальной обучающей системы «Волга», разработанном С.Н. Васильевым совместно с его учениками (Н.В. Смирновой, А.А. Суконновой и др.). В этом проекте предполагалось использование методов автоматического доказательства теорем для поиска решений задач, предлагаемых обучаемому, для сравнения с ходом решения самим обучаемым.



Станислав Николаевич Васильев

6.1.8. Голографический подход к моделированию когнитивных процессов мозга

Цель исследований этого направления – выявить различия в механизмах обработки информации между компьютером и мозгом. Эта проблема важна и для когнитивных наук, изучающих работу мозга, и для искусственного интеллекта, занимающегося разработкой интеллектуальных систем. Дело в том, что многие задачи, связанные с обработкой информации, мозг решает эффективнее, чем компьютер. Краткий список некоторых таких задач выглядит так:

- быстрая обработка образов: категоризация, узнавание в разных ракурсах на основе сходства (а не тождества);
- целостное, «гештальтное» восприятие; восстановление целого по части; быстрое узнавание несходства («что-то не так»);
- определение релевантности, отделение существенного от несущественного;
- быстрый доступ к нужному содержанию (ассоциативный поиск);

– быстрые рассуждения на основе схем (а не формальной логики).

Малая эффективность решения этих задач компьютером (при том, что скорости компьютерных процессов в миллионы раз выше скоростей процессов мозга) говорит о том, что механизмы обработки информации в мозге принципиально другие. Поэтому необходим поиск подходов к построению моделей, близких к процессам мозга и отличающихся как от алгоритмических символьных моделей, на которых основано большинство известных интеллектуальных технологий, так и от современных моделей нейронных сетей, которые имеют простую архитектуру, мало похожую на сложную архитектуру мозга.

В начале 2000-х годов в лаборатории «Сетевых моделей в нейроинформатике и многоагентных системах» были разработаны две модели обработки и хранения образной информации. Эти модели основаны на голографическом подходе, который понимается не как традиционный физический, а как информационный принцип. О.П. Кузнецовым была предложена оригинальная модель псевдооптических нейронных сетей (ПНС), обладающих голографическими эффектами. В них информация передаётся с помощью аналоговых сигналов, имеющих волновую природу, а запись и считывание (восстановление) происходят по голографическим принципам. Л.Б. Шипилина разработала инструментальные средства для моделирования ПНС. Машинные эксперименты показали, что в ПНС возможна эффективная организация быстрых процессов узнавания и восстановления образов, а также высокая устойчивость к повреждениям. А.В. Марковский разработал квазиголографический метод распределённого цифрового кодирования изображений, допускающий восстановление изображений при повреждении значительной части его поверхности. Этот метод позволяет так закодировать цифровое изображение, что оно восстанавливается даже при утрате значительной части его поверхности (до 90% и выше). Результаты работы могут быть использованы для устранения помех при передаче графической документации по сетям связи, а также для защиты графической информации.

В 2012–2015 гг. были проведены исследования по проблемам когнитивной семантики. Они опираются на концепцию Дж. Лакоффа, представляющую собой проект решения двух проблем: категоризации и семантики. В основе концепции лежит тезис о том, что когнитивные структуры и механизмы человека существенно зависят от его сенсорных механизмов, а также физического и социального опыта. Важную роль в этой концепции играют понятия гештальта и образно-схематических структур, на которые опирается объяснение механизмов понимания и быстрых рассуждений. Отметим, что описанная выше модель ПНС может стать перспективным подходом к моделированию гештальта.

6.1.9. Моделирование нейронных сетей

Моделирование биологических нейронных сетей: О.П. Кузнецов, Н.И. Базенков, Б.Б. Болдышев, Л.Ю. Жилякова, С.Г. Куливец (2015–2019): разработка и анализ моделей химических (трансмиттерных) взаимодействий между нейронами в простых нервных системах.

В 2015 г. совместно с коллективом нейробиологов из Института биологии развития РАН была начата работа по созданию дискретных моделей химических (трансмиттерных) взаимодействий между нейронами в биологических нервных системах. В 2016–2017 гг. была предложена первая версия дискретной модели химических взаимодействий. Нейроны в этой модели находятся в едином внеклеточном пространстве (ВКП). Когда нейрон активен, он выделяет в ВКП некоторое специфическое вещество – трансмиттер. Нейроны разнородны в двух отношениях: а) каждый нейрон выделяет определённый вид трансмиттеров и имеет рецепторы, чувствительные к определенному типу трансмиттеров; б) каждый нейрон имеет один из трех типов электрической активности: осциллятор (периодически генерирует пачки спайков); реактивный нейрон (нейрон Маккаллока-Питтса – активен, только когда его возбудили извне); тонический нейрон (активен всё время, пока его не тормозят). Взаимодействия нейронов происходят через ВКП и не являются синаптическими: трансмиттер, выделенный каким-то нейроном, действует на все нейроны, которые имеют чувствительные к нему рецепторы, т.е. является широковещательным сигналом. При этом воздействие трансмиттера на рецептор может быть возбуждающим или тормозящим, в зависимости от типа рецепторов. С нейробиологической точки зрения нейроны вместе с ВКП образуют нейронный ансамбль, в отсутствие внешних воздействий генерирующий ритмическую активность. Этот ансамбль можно представить сетью, в которой ориентированная связь от нейрона A к нейрону B существует, если A выделяет трансмиттер, к которому чувствительны рецепторы нейрона B.

В 2018 г. была разработана новая, асинхронная версия модели, которая в большей степени соответствует биологическим реалиям. В ней введено понятие мембранного потенциала, который изменяет свое значение под действием трансмиттеров, существующих в ВКП. Нейрон активен, когда значение потенциала превышает некоторое значение, называемое порогом. Вектор активностей нейронов называется внешним состоянием нейронной системы. Скорость изменения мембранного потенциала является суммой двух скоростей: эндогенной скорости, зависящей от типа нейрона, и экзогенной скоростью, зависящей от концентрации трансмиттеров, к которым чувствительны рецепторы данного нейрона.

Нейроны функционируют в непрерывном времени, в котором происходят события. Событиями являются: изменение состояния любого нейрона; появление в ВКП нового трансмиттера; дискретное изменение концентрации существовавшего трансмиттера. События – это точки на непрерывной шкале времени, которая разбивается событиями на такты. Границы тактов (точки на шкале) последовательно нумеруются натуральными числами 0, 1, 2, … и называются дискретными моментами времени. Этими же числами нумеруются такты. Внутри такта никаких событий не происходит. Таким образом, система генерирует дискретную последовательность внешних состояний. Различие эндогенных скоростей у разных нейронов приводит к асинхронности нейронных взаимодействий и к значительной вариабельности длительностей тактов дискретной последовательности. Предложен алгоритм вычисления поведения модели и его программная реализация.

В 2020 г. О.П. Кузнецов предложил небиологическое обобщение этой модели, назвав её асинхронной многоагентной многосортной системой. В ней удалены биологические сущности; остается сеть из абстрактных агентов, обменивающихся сиг-

налами разных сортов. Её можно интерпретировать как социальную сеть с разными типами информационных обменов. Предложен метод определения границ устойчивости поведения при изменении значений параметров сети. В 2021 г. О.П. Кузнецов исследовал процесс распространения сигнала в цепи асинхронных пороговых элементов и описал условия прохождения сигнала через цепь.

По материалам работ 2015-2020 гг. совместно с сотрудниками Института биологии развития РАН написана монография «*Химические языки нервных систем*», которая вышла в начале 2024 г.

Моделирование спайковых нейронных сетей (2021–2023): Н.В. Чаплинская. В 2022 г. предложено новое правило обучения спайковых нейронных сетей, основанное на эффекте пластичности синаптических задержек. На его основе решена задача распознавания трёх контрастных образов спайковой нейронной сетью с тремя нейронами. Планируется исследовать возможности предложенного правила на сетях другой архитектуры для решения более сложных задач, а также модифицировать это правило путём добавления иных характеристик синаптической пластичности для повышения биологической правдоподобности исследуемых моделей.

Разработка теории стационарных ансамблей в искусственных нейронных сетях (2016–2018): О.П. Кузнецов, С.Г. Куливец. В 2015–2016 гг. была предложена и исследована модель стационарного нейронного ансамбля, которая строится на основе известной пороговой сети из обычных нейронов Маккаллока-Питтса. Такая сеть называется стационарным ансамблем, если она способна удерживать свое единичное состояние (состояние, когда все ее нейроны активны) при отсутствии внешних воздействий. Основной результат, полученный в этом исследовании, заключается в доказательстве необходимых и достаточных условий, при которых нейронная сеть является стационарным ансамблем. В 2017–2018 гг. разработана программная среда для построения моделей сети формальных нейронов, расчёта их поведения, обнаружения ансамблей, сетей из ансамблей и просмотра графа состояний каждого из ансамблей, представленного как граф состояний автомата.

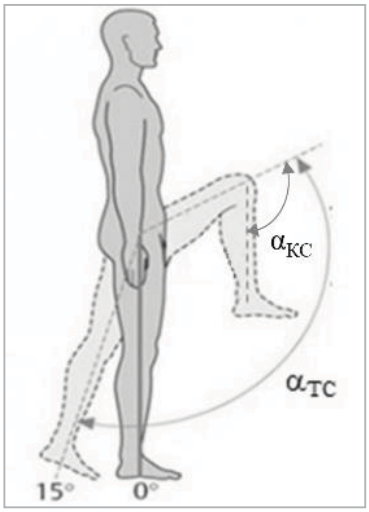
В программе реализованы:

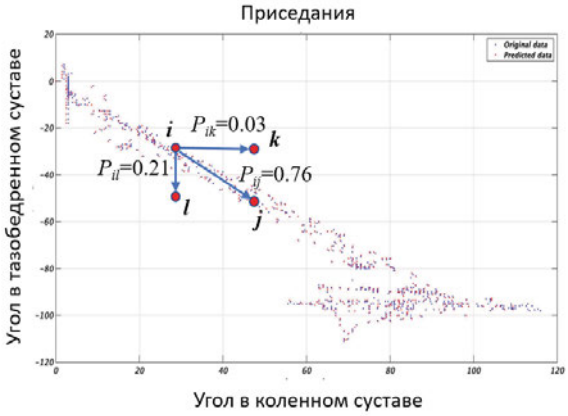
- просмотр графа сети формальных нейронов (заданного матрицей смежности);
- расчёт последовательности состояний сети для заданного начального состояния;
- поиск ансамблей в сети;
- анализ влияния входов ансамбля на состояние ансамбля.

6.1.10. Биологически правдоподобные модели управления движением

Начиная с 2021 г., в лаборатории «Сетевых моделей в нейроинформатике и многоагентных системах» проводятся работы по созданию биологически адекватной модели управления движениями, реалистично воспроизводящей переключения между разными движениями, и приложению полученных результатов к управлению бионическими протезами (Н.И. Базенков). Настройка модели проводилась с использованием методов обучения с подкреплением. Разработан программный комплекс для

прогноза движений человека марковскими моделями с нечёткими состояниями. Проведены эксперименты по построению модели движений пациента с бионическим протезом. Полученные результаты показывают хорошую точность модели.





Прогноз состояния бионического протеза с помощью марковской цепи в пространстве лагов

6.1.11. Групповое поведение роботов

Социальные модели формирования и функционирования команд роботов с реактивной архитектурой: А.А Кулинич (2016–2018). Исследованы вопросы коллективного поведения роботов на основе критериев, сформулированных в социальных теориях поведения людей в малых социальных группах. Это теория взаимной полезности Дж. Хоманса, позволяющая моделировать мотивации образования команд, и теория когнитивного диссонанса Л. Фестингера, позволяющая моделировать устойчивость команды через мотивации выхода роботов из команды. Были предложены следующие критерии командного поведения роботов: возможность самостоятельного достижения цели; взаимная полезность; взаимный когнитивный диссонанс. На основе этих критериев построены математические модели командного поведения роботов с реактивной архитектурой и предложены алгоритмы стайного поведения роботов, а также алгоритмы поведения «ленивых» и эгоистичных роботов.

Модели формирования и функционирования команд интеллектуальных роботов с BDI (belief-desire-intention) архитектурой. Основной особенностью предложенных моделей образования команд интеллектуальных роботов является модель представления среды функционирования роботов в виде вложенных подпространств системы «Группа роботов – Среда», которые образуют решётку классов состояний среды функционирования, каждому из которых присвоено имя-символ. Структуризация пространства состояний и её символьное представление формально определяет качественную онтологию предметной области – концептуальный

каркас среды. Разработана математическая модель интеллектуального робота с BDI архитектурой, все элементы архитектуры которого описаны в терминах имён классов состояний, представленных в концептуальном каркасе. На основе этой модели предложен алгоритм построения концептуального каркаса множеством роботов на основе обмена информацией об имеющихся у них ресурсах. Этот алгоритм позволяет представить убеждения (знания), желания (цели) каждого робота в терминах согласованных всеми роботами имён классов состояний концептуального каркаса. Сформулированы условия командной работы роботов, реализация которых поддерживается разработанными протоколами обмена между агентами информацией об их убеждения и целях, условиях совместной работы и координации действий. Предложенные модели, алгоритмы и архитектуры исследовались на имитационных моделях и показали свою корректность.

Развитие робототехнических систем различного назначения ставит задачи не только управления одиночными роботами, но их группами (группировками, коалициями, стаями и пр.). Движение колонной наземных роботов обеспечивается алгоритмами, разработанными в лаборатории «Цифровых систем управления в агропромышленном комплексе» С.А.К. Диане – движение осуществляется за ведущим и роботы ориентируются на дистанцию от впереди движущегося по светодиодным сигналам. Движению роботов «в толпе» встречными курсами посвящены работы А.В. Абдулова и А.Н. Абраменкова из лаборатории «Эргатических систем» – проводится математическое и натурное моделирование движения во встречных транспортных потоках. Модели рефлексии при принятии решений в конкретных случаях принятия решений роботами рассматриваются в работах научного сотрудника Д.Н. Федянина из лаборатории «Активных систем».

Киберфизические системы. Практический интерес представляют собой работы, выполняемые в лаборатории «Киберфизических систем» под руководством зав. лаб. д.т.н., проф. Р.В. Мещерякова по отработке группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов при выполнении транспортных миссий в много-плечевой авиационной транспортной системе с изменяющимся полем заявок места возникновения и их приоритезации. Основой системы является методическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной обработки заявок потребителей доставки грузов с учётом распределения центров перегрузок и складов. Работы выполняются по заданию проектного комплекса «Роботизированные авиационные системы» НИЦ Институт им Н.Е. Жуковского (директор В.П. Кутахов). Проведены не только вычислительные эксперименты, но и лётные.

6.2. Автоматизированные информационно-управляющие системы

Эта тематика активно развивалась в Институте с начала 70-х годов.



Акоп Гаспарович Мамиконов



Альберт Фёдорович Волков

Новизну, актуальность и высокую научную значимость темы обусловила крупномасштабность работ по созданию и внедрению автоматизированных информационно-управляющих систем (АИУС) в различных областях народного хозяйства. И это при полной непроработанности теоретических основ, моделей и методов формализации и автоматизации разработки оптимальных модульных систем обработки данных (СОД). Поэтому основной задачей исследователей стали создание общей теории и разработка формализованных моделей, а также методов анализа и синтеза оптимальных модульных систем обработки данных в АИУС различного класса и назначения.

На основе сформулированных в Институте принципов модульности и типизации была создана единая методология и технология анализа и синтеза структуры оптимальных модульных АИУС.

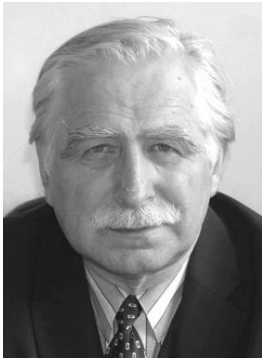
В основу предложенной технологии положен принцип последовательного использования адекватных моделей и методов анализа и синтеза на этапах технического и рабочего проектирования АИУС. Это позволило разработать и практически реализовать типовые задачи и модели анализа и синтеза оптимальных модульных АИУС, содержание которых определялось этапами и целями разработки. Типовые методы синтеза основаны на использовании графовых моделей, которые позволяют не только описать множество допустимых вариантов построения элементов системы и их взаимосвязей, но и обеспечить выбор оптимального варианта.

Принципы, технология, модели и методы анализа и синтеза оптимальных модульных СОД дают возможность формализовать, алгоритмизировать и в большинстве случаев автоматизировать основные этапы и процедуры создания оптимальных модульных систем обработки данных АИУС, включая:

- проведение формального анализа и структуризацию исходной информации, используемой для технического проектирования;
- синтез оптимальной модульной системы обработки данных;
- определение содержания межмодульного интерфейса и оптимального состава программных модулей при заданном информационном обеспечении;

- оптимальное построение информационного обеспечения, его основных частей и элементов;
- выбор логической и физической структуры банков данных, информационных массивов, способов их организации, размещения во внешней памяти и т.д.;
- выбор оптимальных методов контроля и обеспечения достоверности при обработке данных в АИУС различного класса и назначения.

Предложенная технология позволила минимизировать общую трудоёмкость и длительность разработки информационного и программного обеспечения информационно-управляющих систем; обеспечить высокое качество и надёжность разработанных комплексов программ и их информационного обеспечения; добиться унификации технологии разработки информационного и программного обеспечения уникальных и типовых АИУС различного назначения.



Владимир Васильевич Кульба

Применительно к проектированию типовых модульных АИУС были разработаны методы формализации анализа требований к алгоритмам решения заданного множества задач, методы оценки степени их информационной, процедурной и технологической общности, а также методы синтеза оптимальной структуры программного и информационного обеспечения. Разработаны также модели и методы анализа технологий решения заданного множества задач обработки данных одного класса. Созданные модели и методы обеспечивают выделение общих (типовых) частей заданного множества задач, его подмножеств, специфических частей каждой задачи и построение интегрированного графа технологии, включающего типовые и специфические части. Определение параметров типизации (общности) его элементов осуществляется путём последовательной кластеризации задач, представленных интегрированным графом, по критериям близости (подобия) информационных, процедурных и технологических характеристик решаемых в АИУС задач обработки данных. В результате выполнения процедур кластеризации формируются подмножества подграфов интегрированного графа, характеризующиеся различными уровнями типизации, и набор характеристик, которые являются исходными при синтезе типовой модульной АИУС по заданному критерию эффективности с учётом имеющихся ограничений. Использование предложенных методов позволяет ускорить процесс разработки и отладки программного и информационного обеспечения АИУС в среднем в 1,5–2 раза, сократить общее время и затраты на разработку типовых АИУС в 5–10 раз.

В качестве необходимого элемента предложенной технологии анализа и синтеза АИУС был использован созданный в лаборатории «Сценарного управления» метод формализованного представления результатов анализа и разработки АИУС, позволяющий с помощью набора стандартных форм документов представлять полученную информацию в удобном для использования виде.

Возросшие требования пользователей к оперативности обслуживания заявок в АИУС, улучшение характеристик средств вычислительной техники и передачи данных привели к выделению специального класса систем обработки данных,

работающих в режиме реального времени (АИУС РВ) и характеризующихся большим разнообразием и сложностью взаимосвязей составляющих их элементов в условиях обработки пользовательских заявок (поступающих в случайные моменты времени) при жёстких ограничениях на времена их обслуживания.



Анатолий Данилович Цвиркун

Для данного класса систем были поставлены и решены задачи оптимального синтеза модульных АИУС РВ, использующих различные дисциплины обслуживания заявок. На постановку и решение задач синтеза АИУС РВ данного класса накладывается ряд ограничений, продиктованных реальным масштабом времени работы системы и модульной организацией программного и информационного обеспечения. Основным ограничением является необходимость учёта динамики реализации программных модулей, обусловленной выбранной дисциплиной диспетчеризации, характеристиками потоков заявок, потерями от ожидания их обслуживания и наличием взаимосвязей между заявками и задачами обработки данных. Поставленные задачи решены при использовании критериев максимума производительности и коэффициента готовности АИУС РВ.

Для повышения сохранности обрабатываемых данных рассмотрены несколько вариантов использования в АИУС РВ информационной избыточности. Разработан метод синтеза структуры оптимальных модульных АИУС РВ по критерию максимума коэффициента готовности системы, что обеспечивается выбором необходимого уровня резервирования синтезируемых программных модулей и информационных массивов при учёте ограничений на число носителей информации и избыточность хранимых данных.



Олег Иванович Авен

В конце 80-х годов в связи с развитием вычислительных средств и технологий создания и использования баз и банков данных в Институте были разработаны модели и методы синтеза оптимальных логических и физических структур баз данных АИУС: локальных (ЛБД), сетевых (СБД) и распределённых (РБД).

При решении задач синтеза оптимальных логических ЛБД и СБД определяются:

- оптимальные характеристики логических структур ЛБД и СБД (состав и структуры логических записей и взаимосвязей, точки входа в структуры и другие характеристики);
- оптимальные структуры запросов и заданий на корректировки;
- оптимальные спецификации запросов и заданий на корректировки в архитектуре «клиент-сервер».

При синтезе логической структуры РБД группы данных канонической структуры РБД объединяются в типы логических записей и распределяются одновременно

с локальными базами метаданных (ЛБмД) репозитария системы по узлам вычислительной сети (ВС).

Основными критериями эффективности синтеза логических структур РБД являются достижение минимума:

- общего времени последовательной и параллельной обработки множества запросов пользователей, в том числе при наличии многопроцессорных серверов в отдельных узлах ВС;
- общего времени последовательного выполнения множества транзакций;
- стоимости функционирования корпоративной АИУС.

Задачи синтеза структур БД решаются при ряде технологических и структурных ограничений. При решении задач синтеза оптимальных логических структур РБД определяются:

- оптимальные характеристики логической структуры РБД (состав и структуры логических записей и взаимосвязей, структура размещения логических записей по серверам баз данных);
- структура размещения ЛБмД репозитария по серверам узлов ВС;
- оптимальные структуры реализации запросов и транзакций.



Виталий Николаевич Лебедев

Результаты, полученные на этапе синтеза оптимальных логических структур ЛБД, СБД и РБД, используются в дальнейшем при синтезе физических структур БД и модульного прикладного программного обеспечения с учётом особенностей реализации SQL-запросов.

Одним из направлений повышения надёжности АИУС явилась разработка единой методологии реализации системной отладки как основного этапа формирования качества комплексов программ АИУС, определяющего процедуры системной отладки и базирующегося на использовании моделей и методов оптимизации на многоэтапном итеративном процессе формирования комплекса программ заданного качества. Качество комплекса программ оценивается с помощью специально разработанной системы обобщённых показателей, перечень которых определяется технологией отладочных работ. Использование показателей качества в соответствии с последовательностью технологических процедур отладки обеспечивает эффективное применение методов оптимизации планирования и автоматизации отладочных работ.

В связи с возросшими требованиями к информационной безопасности АИУС были исследованы: проблемы её обеспечения на законодательном и организационном уровнях, проблемы информационного управления, методы защиты информации от несанкционированного доступа и методы обеспечения достоверности и сохранности информации. Целью исследований являлась разработка новых методов и способов резервирования и защиты информации на различных уровнях её представления, а также методических рекомендаций в области обеспечения информационной безопасности, включая рекомендации по защите от агрессивных информационных воздействий на различные структуры общества. Были разработаны

комплексы формализованных методов и средств обеспечения достоверности и сохранности информации при обработке данных в системах организационного управления. С использованием вновь введённых понятий «механизм контроля и защиты данных» и «стандартная схема обработки данных» была разработана методика оценки достоверности для различных структур обработки данных и законов возникновения и взаимодействия ошибок. Подробно рассмотрен широкий круг вопросов резервирования программных модулей и информационных массивов в АИУС как системного метода повышения сохранности данных. Выделены основные стратегии резервирования и приведены результаты анализа их эффективности по различным критериям, а также методы расчёта основных вероятностных, временных и стоимостных характеристик рассмотренных стратегий. Проведен анализ основных факторов разрушения модулей и массивов и даны рекомендации по использованию необходимых методов защиты от их воздействия. Поставлены и решены задачи выбора стратегий резервирования и оптимального числа копий и (или) предыстории (дампов) основного массива. Рассмотрены задачи оптимального резервирования программ и массивов данных в системах обработки данных, работающих в реальном масштабе времени.



Владимир Лазаревич Эпштейн

Важным направлением исследований является создание методов и моделей планирования и управления комплексами мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС). Разработаны методология, аппарат и прикладные методы создания систем и средств организационного управления комплексами мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий ЧС, возникающих на объектовом и региональном уровнях. Формализовано понятие сценария развития ЧС и исследованы методы его использования для моделирования процессов развития ЧС и ликвидации их последствий, включая формирование базовых (наиболее вероятных) сценариев развития на объектовом и региональном уровне, а также выделения их очаговых структур. Использование разработанных методов и моделей, алгоритмов и программ позволяет повысить оперативность процессов моделирования возможных сценариев развития ЧС, сконцентрировать ресурсы на наиболее опасных направлениях, повысить качество превентивных и оперативных планов противодействия ЧС, что, в свою очередь, существенно снижает общие конечные потери и ущерб от их возникновения и развития.

На базе результатов исследований было создано и успешно развивается новое научное направление, связанное с разработкой математических моделей и механизмов управления и функционирования сложных социально-экономических систем (СЭС) на основе сценарного подхода. Сценарный подход позволяет описывать процессы развития СЭС на различных уровнях детализации, учитывать динамику и дискретный характер изменений различных её элементов, формализовать ресурсные, технологические, логические и другие ограничения и решать на единой методологической основе широкий спектр задач стратегического управления. Сценарий является необходимым промежуточным звеном между этапами целеполагания и формирования конкретных планов работ и становится основным инструментом при

разработке моделей и методов выбора эффективных стратегических и оперативных решений по планированию и управлению функционированием СЭС.



Владимир Аронович Грузман

Эти результаты позволили в конце 90-х годов разработать основные положения и ряд программных комплексов промышленной технологии автоматизированного проектирования АИУС. Методология и соответствующие программные средства ориентированы на комплексное решение задач автоматизации этапов разработки, внедрения, сопровождения и модификации проектов систем управления на базе новейших достижений в области создания микропроцессорной техники, локальных и распределённых сетей ЭВМ, максимального использования принципов модульности и типизации.

Полученные теоретические результаты применялись при разработке и внедрении ряда АСУ, имеющих важное народно-хозяйственное значение: «Металл», «Метро», «Морфлот», «Обмен», «Почта», автоматизированная система Национального центрального бюро Интерпола при МВД РФ (ИВС Интерпола), ряда информационных подсистем АИУС МВД РФ.

В последнее время ранее полученные результаты были адаптированы применительно к АИУС РВ специального назначения. Разработаны модели и методы анализа, синтеза и отладки оптимальных информационно-управляющих систем специального класса объектов – долговременных орбитальных станций (ДОС). На основе исследования ДОС как специального объекта управления разработаны модели, методы и инструментальные средства создания модульного программного и информационного обеспечения АИУС РВ для космических систем.

6.3. Компьютерная графика и объёмно-геометрическое моделирование



Евгений Иванович Артамонов

Лаборатория «Компьютерной графики» была создана по инициативе директора Института академика В.А. Трапезникова 1 октября 1978 г. на основе группы сотрудников лаборатории «Электрических устройств автоматики», которой в то время заведовала д.т.н., проф. Елена Карловна Круг. Заведующим лаборатории до последнего дня своей жизни был её основатель – д.т.н., проф. Евгений Иванович Артамонов. С 2013 г. лабораторией руководит д.т.н., проф. Алексей Вячеславович Толок.

Теоретическая и практическая деятельность лаборатории связана с разработкой методов проектирования интерактивных систем (ИС), реализованных в виде технических или программных средств. Под интерактивными понимаются системы, взаимодействующие через устройства ввода-вывода с объектом или пользователем в реальном масштабе времени. В интерактивных системах из-за особенностей внешних устройств и систем используется большое разнообразие форматов обрабатываемых данных, в том числе графических, что существенно усложняет выбор структуры ИС. Разрабатываются методы объёмного геометрического моделирования, структур и программного обеспечения интерактивных систем на основе средств виртуальной реальности.

Виртуальный мир давно конкурирует с реальностью и средства визуализации вполне удовлетворяют своим качеством человеческому воображению. К тому же отработанный с годами метод конечных элементов (МКЭ) с применением современной компьютерной геометрии 3*D*-модели, казалось бы, позволяет эффективно справляться с любыми инженерными расчётами. Что можно привнести дополнительного в компьютерную графику объёмным геометрическим моделированием?

Однако всё не так радужно, как хотелось бы. Инженерное сообщество ставит перед собой такие задачи, в которых современные геометрические средства смогут занимать лишь малую нишу процессов компьютерного моделирования их решений. Возрастающие требования к цифровым технологиям приводят к пересмотру сложившихся традиций в процессе автоматизации проектирования и управления в целом. Если совсем недавно проблемы автоматизированного проектирования и автоматизации управления не имели ничего общего в подходах к их решению, то сегодня уже смело можно говорить о необходимости их интеграции. «*Проектировать управление, управляя проектированием*» – видимо, так следует охарактеризовать современный этап процесса автоматизации цифровых техноло-

гий. На фоне происходящего наработанный опыт компьютерной геометрии уже не может полноценно отвечать современным требованиям. Отсутствие обратной связи компьютерной полигональной 3*D*-модели с её математическим представлением приводит к усложнению вычислительной обработки и решению лишь 3*D*-ограниченных задач. Выход компьютерной геометрии за пределы своих пространственных рамок на описание многомерных математических моделей и обеспечение обратной связи с её математическим представлением позволит открыть новую – геометрическую – страницу в интегрированном подходе к процессу автоматизации в целом.

Поиск новых форм компьютерного графического представления геометрической модели приводит к изучению принципов организации мало изученных на сегодня воксельных структур как носителя многомерной графической информации (Воксель (от **vo**lumetric pi**xel**) – трехмерный аналог двумерного пикселя). Интерес к вокселю подкрепляется не только возросшими вычислительными возможностями современных компьютеров. Воксельные структуры основательно меняют принципы построения геометрической информации, приводя алгоритм обработки графических данных к последовательному перебору. При этом вычислительный блок такого алгоритма значительно упрощается.



Алексей Вячеславович Толок

Исследовательская работа сотрудников лаборатории «Компьютерной графики» над подходом, отвечающим требованиям современной компьютерной геометрии началась в 2016 г. на основе принципов, сформулированных в монографии А.В. Толока «Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании». В этой книге представлены научные основы компьютерного представления локальной геометрии объекта, описанного многомерной алгебраической функцией. Продемонстрирована согласованность компьютерной модели с её математическим представлением. Описаны арифметические действия над такими моделями, а также примеры оптимизационных постановок, способы решения систем уравнений и неравенств, нахождения интегральных и дифференциальных характеристик для поверхности и тела сложной формы, решены некоторые примеры простых дифференциальных уравнений (задача Коши) и т.п.

Дальнейшее развитие подхода потребовало изучения возможности переноса основных математических инструментов компьютерной геометрии на полученную воксельную геометрическую модель.

Исследования лаборатории показали применимость основных геометрических преобразований к полученной воксельной модели, что ставит её в один ряд с существующими полигональными моделями и открывает путь к развитию *локальной компьютерной геометрии*.



Михаил Александрович Локтев

Интересные результаты получены в работе к.т.н., с.н.с., М.А. Локтева над функционально-воксельным моде-

лированием алгоритмических средств для прокладки пути к цели с обходом препятствий. Эти результаты были отражены в его кандидатской диссертации (2017 г.) и показали эффективность применения локальной компьютерной геометрии в построении алгоритма трассировки градиентного спуска, а также определении основных особенностей формы рельефа поверхности функции.



Александр Михайлович Плаксин

Работа к.т.н. М.А. Плаксина (2022 г.) посвящена геометрическому моделированию тепловых характеристик при технологической обработке деталей, где разработана геометрическая модель пространственной изотропии на основе принципов обобщения локальной функции, применяемой в разделах локальной компьютерной геометрии. Сформулирован дискретный закон сферического распределения фронта тепловой нагрузки. Разработана модель теплового расширения на основе уровневого принципа построения локального изменения геометрии изотропного тела. Принципы, заложенные в работу, послужили основой для разработки дискретного закона механического напряжения с расчётом геометрии деформируемого тела.



Владислав Александрович Чеканин

Другое направление научных исследований лаборатории связано с развитием геометрических методов решения практических задач оптимизации, разрабатываемое в.н.с., д.т.н., доц. В.А. Чеканиным (2022 г.). Разработанные методы расстановки на основе применения модели потенциальных контейнеров и анализа дискретизированного представления размещаемых объектов обеспечили возможность быстрого решения задач компоновки объектов сложной формы внутри пространства произвольной геометрии заданной размерности.

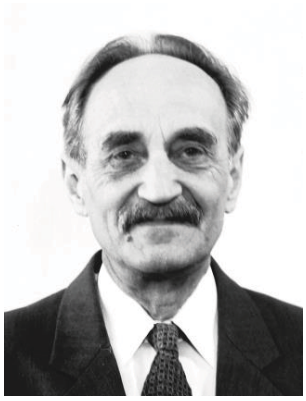
Одним из направлений исследований является применение локальной компьютерной геометрии в моделировании решений оптимизационных задач математического программирования. Применяя аппарат *R*-функционального моделирования (*RFM*), удалось построить математическую модель, позволяющую рассматривать сложные многомерные и многокритериальные постановки задач. При этом вычислительная процедура для такой модели сводится к автоматическому определению критических точек с применением многомерного алгоритма градиентного спуска.

Однако существует проблема применения аналитического моделирования в процессе конструирования. Перспектива описывать математическими функциями сложную геометрию проектируемого объекта не может радовать инженера-проектировщика, привыкшего моделировать поверхность наглядными интерактивными графическими средствами. Поэтому говорить о внедрении такого подхода в процесс автоматизированного проектирования можно лишь при наличии достойной альтернативы традиционным инструментам. В настоящий момент Институт вплот-

ную занимается этой проблемой. Уже наработана математика, позволяющая осуществлять переход от интерактивно моделируемых параметрических сплайн-функций к их алгебраическому описанию для построения функционально-воксельной модели.

6.4. Информационно-телекоммуникационные сети

Сети вычислительных машин, стремительное развитие которых началось в конце 70-х годов прошлого века, проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование и т.д. Интенсивное развитие телекоммуникационных сетей, их широкое использование в системах управления стимулировали также развитие нового направления в теории автоматического управления – сетевые системы управления (Network Control Systems), в которых контуры управления замкнуты через компьютерную сеть, а обмен сигналами управления и обратной связи между компонентами системы осуществляется в виде информационных пакетов через сеть.



Владимир Александрович Жожикашвили

В начале 80-х годов в Институте под руководством д.т.н., проф. Владимира Александровича Жожикашвили началась разработка первой в стране компьютерной сети «Сирена» для бронирования и продажи авиабилетов, охватившей в дальнейшем всю территорию бывшего СССР. В сети были реализованы новейшие для того времени методы пакетной коммуникации, адаптивная маршрутизация, управление информационными потоками и т.д. Сеть была реализована на полностью отечественных аппаратно-программных комплексах, выпускаемых заводами Минприбора СССР по конструкторским разработкам сотрудников ИАТа (ИПУ). В Институте был создан отдел внедрения, возглавляемый В.А. Кучеруком. Усилиями сотрудников этого отдела практически во всех крупных городах страны были реализованы вычислительные центры системы «Сирена» и узлы коммутации пакетов, объединённые выделенными телефонными каналами связи.

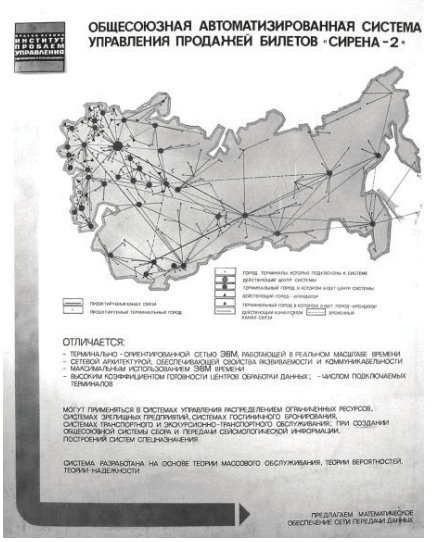
В рамках создания и развития сети «Сирена» были разработаны теоретические основы проектирования компьютерных сетей. Разработана теория топологического синтеза распределённых компьютерных сетей, базирующаяся на оригинальных результатах в области экстремальных графов, новые методы анализа и синтеза открытых и замкнутых стохастических сетей с ограниченными буферными накопителями и т.д. Защищено большое количество кандидатских диссертаций и 3 докторские диссертации: В.М. Вишневский (1988), В.Н. Силаев (1992), М.П. Фархадов (2012). Теоретические результаты и опыт практической реализации сети пакетной комму-

тации «Сирена» нашли отражение в монографии *В.А. Жожикашвили, В.М. Вишневский. Сети массового обслуживания. Теория и применение в сетях ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988, 302 с.*

Начиная с конца 1970-х годов по 1995 г. под руководством В.А. Жожикашвили проведены 17 всесоюзных конференций, объединивших ведущих учёных и специалистов в области компьютерных сетей, многие из которых впоследствии стали основными разработчиками российского сегмента Интернет и других крупных проектов. На базе сети «Сирена» были реализованы целый ряд крупномасштабных систем, включая: сеть регистрации атомных взрывов и землетрясений; компьютерная библиотечная сеть *Libnet* и др. Проведены теоретические и практические работы по шлюзованию разнородных компьютерных сетей. Приказом Министерства транспорта РФ в 1993 г. Владимир Миронович Вишневский был назначен Главным конструктором Единой Системы бронирования и продажи билетов на транспорте. В этот период разработана шлюзовая система для объединения двух крупнейших в РФ корпоративных сетей «Экспресс» (по продаже железнодорожных билетов) и «Сирена». Разработана информационно-справочная система «Маршруты» поиска оптимальных интермодальных маршрутов на пассажирском транспорте (авиационный, железнодорожный, автобусный, речной и морской транспорт). Её услугами воспользовались десятки миллионов пассажиров. Заключён контракт с корпорацией *Google* по использованию системы «Маршруты» на портале *Google*. Федеральной пассажирской компанией РЖД куплена лицензия на использования патента «Информационно-справочная система поиска оптимальных маршрутов на пассажирском транспорте». Проведенные исследования положены в основу фундаментальной монографии *В.М. Вишневский. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003, 520 с*.



Владимир Миронович Вишневский



Сетевые технологии во всём мире непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надёжности, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеоинформации. В области локальных сетей было создано семейство технологий *Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet*, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии *Frame Relay*, использованию стека протоколов *TCP/IP*, *ATM* и *Gigabit Ethernet*.

Период конца 1990-х – начала 2000-х годов ознаменовался также появлением и бурным ростом широкополосных беспроводных

сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн. В Российской Федерации, как и во всём мире, начались активные разработки широкополосных беспроводных сетей на базе радиомодемов с шумоподобным сигналом. Под руководством В.М. Вишневского при финансовой поддержке Миннауки РФ разработана и реализована первая в стране высокоскоростная распределённая беспроводная сеть *Radionet*, обеспечивающая подключение в Интернет порядка 6000 компьютеров организаций науки, культуры и образования г. Москвы. Аналогичные сети реализованы в наукограде Обнинск, Брянске, Якутске и других регионах страны. Создана теория динамического управления стохастическими системами циклического опроса. На базе этой теории разработаны методы, алгоритмы и программные средства, обеспечивающие минимизацию интерференции при передаче информации в региональных беспроводных сетях. Разработана серия отечественных радио и инфракрасных модемов, превосходящих по целому ряду параметров известные зарубежные аналоги. Выполнен цикл работ по исследованию беспроводных сетей нового поколения, завершившийся публикацией монографии *В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. Энциклопедия WiMAX. Путь в 4G. – М.: Техносфера, 2011, 470 с*. В 2012 г. на английском языке была опубликована книга *V. Vishnevsky, O. Semenova. Polling System: Theory and Applications for Broadband Wireless Networks. – London: Academic Publishing, 2012, 317 p*.

Одновременно с беспроводными сетями IEEE 802.11 интенсивно развивались мобильные сотовые технологии – одно из революционных достижений в области беспроводной связи, ставшее обыденным за последние 20 лет. Роль этой технологии в 2000-х годах столь же велика, как и бум персональных компьютеров в 1980-е годы. Мобильный телефон превратился в привычный предмет обихода, по стоимости приближающийся к обычному телефонному аппарату, а по распространённости значительно превзошедший число телефонных аппаратов фиксированной связи. В исторически короткий период происходит стремительная смена поколений сотовой связи: от сетей первого поколения до сегодняшних сетей четвёртого и пятого поколения, а в дальнейшем планируется внедрение сотовых сетей 6*G*.

В настоящее время во всём мире, включая Российскую Федерацию, уже широко используются сети четвёртого поколения на базе технологии *LTE Advances* (стандарт 3GPP, начиная с релиза 10), обеспечивающие в нисходящем радиоканале скорость передачи информации до 1000 Мбит/с, а в восходящем канале – до 500 Мбит/с. Однако с появлением таких технологий, как интернет вещей (технологии *LPWAN - SigFox* и *LoRa*), виртуальная и дополнительная реальность (*Virtual/augmented reality*) и т.д., наблюдается экспоненциальный рост трафика, появляются его дополнительные источники, большинство из которых подключается к сети Интернет посредством беспроводной связи. На трафик оказывает влияние также рост числа и качества передаваемых мультимедийных данных (видео высокого разрешения) и новые сервисы передачи таких данных от социальных сетей до различных сервисов передачи потокового видео, а также данных межмашинного взаимодействия (*Machine-to-Machine*, M2M).

В связи с указанными тенденциями и ограниченностью частотного спектра в сетях 4*G* уже в ближайшее время может возникнуть проблема нехватки мощностей для передачи огромных объёмов данных с различными ограничениями на задержку, ве-

роятность потерь, вариацию задержки и другие параметры. Активно внедряемые сети 5*G* ориентированы на решение этой проблемы за счёт более эффективного использования существующего частотного спектра, привлечения дополнительного спектра и новых технологий радиодоступа в миллиметровом диапазоне радиоволн, технологий D2D (*device-to-device*), мультивещания и широковещания и т.д.

Разработка теоретических основ построения и управления перспективными широкополосными сетями 5*G*/6*G* – основное направление исследований возглавляемой В.М. Вишневским лаборатории «Телекоммуникационных систем». Разрабатываются сверхвысокоскоростные, самоорганизующиеся сети миллиметрового диапазона радиоволн (71-76 ГГц, 81-86 ГГц) и гибридные сети на базе лазерной и радиотехнологий. Теоретические исследования нашли отражение в книге *В.М. Вишневский, А.Н. Дудин. Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях. – М. Техносфера, 2018 г, 564 с*. Книга переведена на аглийский язык и опубликована издательством *Springer International Publishing* в 2020 г. Важным направлением работ лаборатории является также разработка нового поколения систем управления безопасностью интеллектуальными транспортными системами с использованием *RFID*-технологий и новейших беспроводных средств. Разработан аппаратно-программный комплекс гибридной системы идентификации транспортных средств на базе *RFID*-технологии и существующих систем видеофиксации, превосходящий по основным характеристикам существующие мировые аналоги. Комплекс предназначен для реализации опытных зон новой системы повышения безопасности на автодорогах в Москве, Санкт-Петербурге и Казани в соответствии с постановлением Правительства РФ. Успешные полевые испытания гибридного комплекса прошли в 2022 г. на полигоне ГИБДД Республики Татарстан.



Демонстрация аппаратуры системы безопасности на автодорогах с использованием *RFID*-технологии и беспроводной связи. Выставка в Казани (2022 г.)

Ведутся разработки привязных высотных, беспилотных платформ, не имеющих мировых аналогов, и широкополосных беспроводных сетей на их основе. Разработаны теоретические основы проектирования таких беспилотных платформ, на базе которых создан мобильный робототехнический комплекс «Альбатрос». Комплекс демонстрировался на Международном форуме «Армия-2021» в составе экспозиции Минобрнауки РФ. Опубликована книга *В.М. Вишневский,*

В.В. Рыков, Д.В. Козырев, Н.М. Иванова. Моделирование надёжности привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ. – М. Техносфера, 2022 г. Книга переведена на английский язык и опубликована издательством *Springer International Publishing* в 2023 г.



Мобильный робототехнический комплекс «Альбатрос» на базе привязной беспилотной платформы

На основе полученных результатов В.М. Вишневским и Р.В. Киричеком была разработана международная рекомендация МСЭ-Т (*International Telecommunication Union, ITU)* сектора стандартизации Международного союза электросвязи. В июле 2021 г. на заседании сектора стандартизации *ITU* рекомендация была одобрена и опубликована в документе Q3060 «Архитектура сигнализации беспроводных телекоммуникационных сетей быстрого развёртывания». В рекомендации впервые в мировой практике дано строгое определение привязных высотных беспилотных платформ, функционирующих на высотах до 500 м и широкополосных беспроводных сетей на их основе.

Исследования лаборатории финансово поддержаны грантами Российского научного фонда (РНФ), Министерством образования и науки РФ, Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и рядом хоздоговоров с телекоммуникационными фирмами.

В рамках проведения научных и практических работ в области широкополосных беспроводных сетей пятого поколения (5*G*) лаборатория активно сотрудничает с ведущими зарубежными научными коллективами, включая: научную группу из США, возглавляемую проф. С. Чакраварти (Университет Кеттеринг); научную группу из Англии, возглавляемую проф. Д. Грейсом (Университет Йорка); научную группу из Индии, возглавляемую проф. А. Кришнамурти (Университет г. Кочин); научную группу из Кореи, возглавляемую проф. Б.Д. Чои (Университет Сеула) и ряд других научных коллективов из университетов Польши, Венгрии, Болгарии, Белоруссии и Молдавии.

За последние 10 лет лабораторией выполнены свыше 21 НИР и ОКР, в рамках грантов федеральных и отраслевых научно-технических программ, РНФ, РФФИ, по Программам РАН и хоздоговорам. Разработанные в лаборатории образцы новой техники и технологии неоднократно получали награды на международных и всероссийских выставках: *CeBIT* (г. Ганновер, Германия), *China Hi-The Fair* (г. Шеньчжень, Китай), *ITEX'13* (г. Куала-Лумпур, Малайзия) в составе экспозиции Минобрнауки РФ (золотые и серебряные медали); на выставках информационных и коммуникационных технологий *SofTool* (первое место в конкурсе лучших решений в области информационных технологий «Продукт года») и др.

Лаборатория является организатором ежегодной конференции *Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications* (DCCN). В 26-й конференции DCCN-2023, прошедшей в г. Москве в сентябре 2023 г., приняли участие более 180 ведущих учёных в области компьютерных сетей из 18 стран мира.



Открытие Международной конференции IEEE DCCN-2023

За последнее десятилетие сотрудниками лаборатории «Телекоммуникационных систем» опубликовано свыше 400 научных работ, включая 12 монографий, 27 патентов на изобретения и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

6.5. Геоинформационные системы

Создание Институтом геоинформационных систем (ГИС) для решения специальных задач с использованием информационных технологий начинается с 1995 г., когда Военно-техническим управлением Генерального штаба (ВТУ ГШ) была поставлена задача создания по аэрофотоснимкам трёхмерной модели местности с последующим оперативным отображением созданной модели в реальном масштабе времени с использованием специального процессора, разработанного в ИПУ РАН. Впервые в России удалось подготовить программный пакет «Полёты», который позволял строить маршрут движения летательного аппарата на заданной высоте с огибанием форм рельефа, высотных объектов с оптимизацией временных затрат и построением кратчайшего пути.

Однако поначалу ещё не были принципиально решены вопросы, связанные с оперативной обработкой информации большого объёма, не удовлетворялись требо-

вания по точности создаваемых трёхмерных моделей объектов местности, не была проведена классификация объектов и практически не решены вопросы отображения объектов местности в соответствии требованиями, предъявляемыми к топографическим картам (по составу отображаемых объектов и выводу на печать для использования при решении задач управления).

Появление крылатых ракет в ВС РФ обусловило необходимость обеспечения их цифровой информацией о местности. На первом этапе цифровая информация создавалась ручными методами по бумажным топографическим картам. Это была трудоёмкая работа, начинавшаяся в отсутствие эффективных средств контроля полученных результатов. Поэтому в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 1 февраля 2001 г. в ИПУ РАН были выполнены две научно-исследовательские работы: «Поисковые исследования и разработка новых алгоритмов и методов оперативной обработки космоаэросъёмки с визуализацией трёхмерной цифровой информации о рельефе местности и текстуре объектов» и «Создание трёхмерных электронных карт по стереоизображениям, полученным по космической или аэрофотосъёмке местности». Руководство Института возложило решение этих сложных и крайне важных информационных задач на вновь созданные лабораторию «Управления в геоинформационных системах» и научно-внедренческий отдел (НВО) № 73.

Чтобы использовать материалы аэрокосмической съёмки при решении задач управления, была разработана цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) «Талка». ЦФС «Талка» позволяет выполнять все необходимые математические расчёты и построения с последующей визуализацией модели местности по материалам аэрокосмической съёмки (полученной с применением всех типов камер).

Наиболее важным результатом, реализованным в ЦФС «Талка», является решение систем нелинейных уравнений блочной фототриангуляции с минимизацией четвёртых и шестых степеней невязок, что повышает робастность по сравнению с традиционными алгоритмами. В ЦФС «Талка» рельеф по взаимно ориентированным изображениям местности строится автоматически. Используется принципиально новый метод идентификации соответствующих точек двух изображений путём оконтуривания по Марру и преобразования типа «растяжения резины». Большой вклад в разработку ЦФС в части формирования её архитектуры и использованных математических средств обработки цифровой информации внесли сотрудники Института Д.В. Тюкавкин, Н.Д. Беклемишев, С.Э. Шаронов, В.В. Костин.

Мощности имевшихся в начале XX века компьютеров не позволяли выполнять полностью автоматический поиск соответствующих точек на разных снимках (как это имеет место в современных фотограмметрических системах типа *Agisoft*). Для расстановки связующих точек требовалась работа оператора в стереоочках. В целях упрощения была реализована идея расстановки линий. Это привело к наделению ЦФС «Талка» способностью создавать трёхмерные карты, контура которых используются для взаимной ориентации снимков. Тем самым ЦФС «Талка» постепенно превратилась в полноценную ГИС, позволяющую создавать трёхмерные (стерео) карты.

Трудоёмкая работа по созданию оригинала рельефа, включающая в себя сглаживание горизонталей, расстановку бергштрихов и надписей горизонталей,

в ЦФС «Талка» полностью автоматизирована и отвечает картографическим стандартам. Характерной особенностью алгоритмов и программ решения этой задачи является то, что они могут работать без использования цифровой модели рельефа, опираясь только на информацию о горизонталях. Эти алгоритмы могут использоваться для автоматического получения карт для систем навигации и управления движущимися объектами.



ЦФС "Талка"

По своим функциональным возможностям и оперативности обработки больших объёмов информации ЦФС «Талка» (это название было присвоено разработанным программным модулям впоследствии) является одним из лучших программных продуктов. Программа обеспечивает значительную степень автоматизации технологических процессов фотограмметрической обработки и составления карт. ЦФС «Талка» может быть установлена на обычных персональных компьютерах и не требует специального оборудования.

В ЦФС «Талка» используется специальный формат хранения регулярной структуры пространственных данных с поддержкой возможности хранения неограниченного объёма данных при уровневом хранении данных. Поддерживается быстрый доступ к данным каждого уровня и возможность хранения данных на заданную область территории произвольной формы.

В станции «Талка» применены компьютерные способы формирования изображения частей ломаной линии, лежащих внутри или вне многоугольной области, и границ областей, полученных в результате применения логических операций к двум многоугольным областям на основе отыскания отрезков ломаной линии, лежащих в ε-окрестности границы области. Эти способы обеспечивают надёжное формирование изображений.

Уникальна технология создания многооконного стереоинтерфейса, не требующая специализированных видеоконтроллеров (с применением режима клонирования видеоконтроллера и программного интерфейса, использующего первичную и оверлейную поверхности, в которые подаются изображения для разных глаз). Оверлейная поверхность накрывает только стереоскопическую часть экрана, что позволяет не тратить ресурсы на обработку окон других приложений.


Александр Иванович

Технические решения (по данным ФИПС – 18 патентов), реализованные в модулях пакета «Талка», в полном объёме ни в каком из известных программных продуктов не встречаются. Собранный в результате патентования опыт изложен авторами (А.И. Алчинов, А.В. Иванов) в монографии «Патентование изобретений в России: анализ законодательства и советы изобретателям».

Разработаны технологии рабо-


Анатолий Витальевич Иванов

ты с спутниковыми устройствами, позволяющие управлять измерениями приёмника и создавать в карте соответствующие объекты. При работе в режимах *Real Time Kinematic* или постобработки достигается высокая точность результатов, позволяющая улучшить управление движущимися объектами. Разработана технология работы с карманным компьютером одной рукой и на ходу (с использованием перчатки и кейса специальной конструкции).

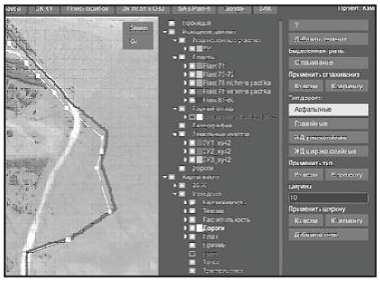
Разработанная Институтом ГИС «Талка-КПК» работает на наладонных компьютерах и используется для создания и обновления карт и планов. Она может работать с растрами, изображениями и векторными картами, производить съёмку местности с использованием геодезической аппаратуры: *GPS*- и ГЛОНАСС-приёмниками, а также тахеометрами. Фактически, это «ГИС на ладони», обладающая не только всеми возможностями навигации и просмотра материалов, но и развитыми средствами редактирования и сбора данных на местности и передачи информации на сервер сбора данных. Широко развитые средства редактора привязки растров в ГИС «Талка-КПК» позволяют редактировать координаты точек привязки как визуальным образом, так и через их численные значения.



Интерфейс ГИС «Талка КПК»

За высокий уровень разработки на Международных выставках изобретений, новых технологий и продуктов технические решения, представленные Институтом, награждены многими медалями, а также дипломами Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Институтом разработана также «Талка-ГИС», предназначенная для работы с растрами, векторными картами, *GPS*-аппаратурой и тахеометрами. Она имеет функции просмотра, создания, редактирования геоинформационных материалов, *GPS*-навигации, ведения геодезических измерений и контроллера устройств. Программа поддерживает как профессиональное оборудование фирм *Javad*, *Thalles Navigation* и др., так и популярные навигационные приёмники. Она позволяет управлять *GPS*-измерениями приёмника, создавая в карте объекты, соответствующие измерениям, или привязывая измерения к уже существующим объектам. Результаты обработки *GPS*-измерений принимаются средствами ПО «Талка-ГИС» и измеренные участки объектов карты обретают точные координаты.



Интерфейс ГИС *SUEK3D*

Все разработанные программы «Талка-КПК», «Талка-ГИС» и ЦФС «Талка» обладают схожим интерфейсом и обеспечивает оперативный обмен информацией для решения различных задач управления соответствующими программными средствами.



Юрий Дмитриевич Воробьёв

В развитие ЦФС «Талка» разработан аппаратно-программный комплекс ГИС SUEK3D для обработки и отображения трёхмерной информации с целью технологической поддержки процессов управления угольной компанией. В рамках этой работы в последние годы выполнены научные исследования по совершенствованию методов и технологий получения геопространственных данных с помощью беспилотных летательных аппаратов. Разработана технология обработки этих данных, которая реализована при создании и обновлении цифровых топографических карт и планов для Сибирской угольной энергетической компании.

ГИС *S*UEK3D имеет клиент-серверную архитектуру и предназначена для построения цифровой трёхмерной модели местности в режиме реального времени. Она позволяет строить модели рельефа и пластов по следующим данным: аэрофотоснимки, данные геологических скважин, стандартные геодезические ходы, наземные фотографии объектов местности. По построенным моделям программное обеспечение позволяет производить расчёты длин, объёмов выемок и остатков в режиме реального времени. Кроме того, в программной среде предусмотрена возможность работы с другими программными средствами потенциального заказчика через *API*. В формулировке требований к разрабатываемой ГИС *S*UEK3D активное участи принимал к.т.н., с.н.с. К.Ю. Жигалов. Была обеспечена возможность создания интерактивных моделей рельефа с перемещением моделей техники по охватываемой территории по заданным заранее траекториям и расписанию. В рамках работы над программным средством собрана большая база трёхмерных моделей основных видов техники, применяемой на открытых карьерных работах.



Кирилл Юрьевич Жигалов

Институтом разработана ГИС «НЕВА», которая успешно используется в учреждениях и организациях Министерства обороны РФ, в Главном штабе ВВС МО, МВД РФ, «Росреестре», российских телефонных компаниях и на картографических фабриках. При создании ГИС «НЕВА» основные задачи, решаемые ГИС, были сформулированы сотрудником НВО № 73 к.т.н. Ю.Д. Воробьёвым (совместно с представителями ВТУ ГШ).

В соответствии с Постановлением Правительства РФ о «Разработке комплекса автоматизированных рабочих мест по созданию и подготовке к изданию авиационных (топографических) карт» и с помощью ГИС «НЕВА» Институт совместно со специалистами ВТУ ГШ и Военно-картографической фабрики успешно решил задачу по подготовке карт к изданию.

ГИС «НЕВА» нашла широкое применение на военно-картографических фабриках и в частях военно-топографической службы. Она (в переводе на испанский язык) используется на картографических предприятиях республики Куба.

В ГИС «НЕВА» могут быть созданы различные трёхмерные модели местности: рельефа, рельефа с объектами местности, полутоновые по аэроснимкам и космическим снимкам.

Трёхмерные модели местности используются для решения различных прикладных задач. Так рельефные модели и модели рельефа с картографической информацией используются для детального изучения и оценки рельефа местности при планировании и организации боевых действий войск, макет местности – для отработки и уточнения боевых задач и организации взаимодействия войск. Полутоновые модели местности позволяют автоматизировать процесс проектирования сетей сотовой связи. Трёхмерные модели с реальной текстурой объектов используются при решении управленческих задач в рамках градостроительной деятельности и земельных отношений.

Для обеспечения кораблевождения и решения различных задач, связанных с деятельностью военно-морского, торгового и промыслового флотов также используется ГИС «НЕВА». С её помощью создаются и обновляются морские карты и навигационные карты для автомобилистов, туристов, рыбаков и охотников. ГИС «НЕВА» широко используется при издании карт, являясь главным инструментом редакционной подготовки различных атласов карт.

Развитие методов поддержки принятия решений для управления летательными аппаратами на основе геоинформационных технологий

Решение проблемы управления движущимися объектами на разных этапах развития было связано с исследованием общих принципов автоматического синтеза параметров управления. Для этого был выполнен анализ методов управления летательными аппаратами (ЛА), использующими для уточнения местоположения и коррекции траектории полёта при движении корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС). Проанализированы новые принципы построения бортовых алгоритмов, возможная их интеллектуализация и самоорганизация, современные типы съёмочных систем и варианты их комплексирования, а также уровни развития параллельных вычислений и специальных процессоров для реализации алгоритмов с единой параллельной структурой.

Установлено, что дальнейшее развитие и массовое внедрение систем автономной навигации указанного выше типа, как единственной альтернативы спутниковым навигационным системам для управления ЛА, в частности, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), в настоящее время может базироваться на предметно-ориентированных информационных технологиях.

Предложена концепция построения поисковой ГИС для моделирования КЭНС, которая позволит собирать модели большого спектра КЭНС и макеты технологий их настройки на работу с проведением необходимых вычислительных экспериментов. При этом для определения состава требуемых программных средств, структуры хранилищ и особенностей интерфейса построена общая математическая модель. Эта модель при сохранении всей специфики алгоритмов КЭНС охватывает не только известные алгоритмы совмещения изображений, но и включает схему синтеза алгоритмов КЭНС нового типа с реализацией методов распознавания образов и

анализа сцен, кластеризации, обучения нейросетей и облачных вычислений при обработке больших данных (А.И. Алчинов, К.Ю. Жигалов).

Разработаны математические модели стрессовых воздействий на съёмочные системы навигационной системы, обеспечивающие различные условия функционирования КЭНС: срыв определения местоположения ЛА, определение местоположения ЛА по ложным опорным ориентирам и т.д. Полученную при этом информацию предлагается использовать для совершенствования системы управления ЛА, использующих изображения местности в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения. Стрессовое тестирование при этом обеспечивает проверку выполнения повышенных требований к надёжности КЭНС и является важнейшим видом вычислительного эксперимента с моделями КЭНС (А.И. Алчинов).

Поисковые КЭНС решают свою задачу посредством проверки гипотез о значениях параметров движения методами совмещения текущего изображения участка местности, полученного бортовой съёмочной системой, с фрагментами эталонного изображения, заложенного в КЭНС. Проверяются гипотезы о равенстве искомых параметров и принимается гипотеза, для которой функция их близости максимальна. Применяются глобальные схемы поиска, являющиеся градиентными и относящиеся к арсеналу методов поиска экстремума числовой функции в различных их сочетаниях.

Актуальность ускоренного развития КЭНС значительно возросла в связи с интенсивным развитием беспилотных аппаратов различного назначения. Это обусловило более полное, чем в существующих решениях, раскрытие потенциала развития КЭНС. Поскольку геодезические спутники (ГЛОНАСС GPS) могут быть выведены из строя или просто уничтожены, это приведёт к бесполезности спутниковых навигационных систем управления. Здесь же нужно отметить, что на территории России есть территории, на которых спутниковые сигналы недоступны. Такая проблема присутствует и в условиях городской застройки, более того из-за высотных плоских объектов возможен приём искажённых сигналов.

В этих условиях ускоренное развитие данной предметной области может быть обеспечено расширением исследований и разработок с использованием предметно-ориентированного вычислительного комплекса. Такой комплекс может предоставить специалисту все необходимые средства для сборки моделей КЭНС и макетов технологий их настройки на работу из готовых программных модулей посредством специального интерфейса для хранилищ и для уточнения местоположения и коррекции траектории полёта программных модулей, а также проводить с ними вычислительные эксперименты.

Математические модели КЭНС и макеты технологий их настройки позволят создать облик бортовых систем управления ЛА, оснащённых средствами корреляционно-экстремальной обработки данных на борту, способных в условиях возможных помех выполнять свою задачу.

Предлагаемый предметно-ориентированный комплекс обеспечит пользователю доступ ко всем универсальным средствам работы с геопространственной информацией, то есть к функционалу общего назначения на базе средств расширения функционала «Талка-ГИС» разработки ИПУ РАН. Проверка указанного доступа была подтверждена использованием ГИС *ArcInfo*, *Mapinfo*, ГИС-Панорама, а также разработанной в Институте ГИС «НЕВА» (Е.В. Акифьева).

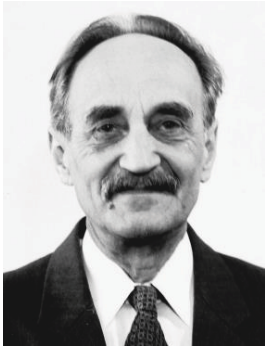
Обоснована структура предметно ориентированного комплекса моделирования поисковых КЭНС в форме прикладной ГИС, который позволит улучшить динамику систем автономного управления, используя принципы перенастраиваемых структур, включая использование нейронных сетей и искусственного интеллекта, облачных сред для работы с большими данными на основе организованных сетей доступа.

6.6. Речевые технологии в управлении

Система «Сирена» была первой в СССР действующей системой массового обслуживания населения (см. раздел 6.4) и в отечественной практике попросту уникальной системой.

Прогрессивные научно-практические решения, заложенные в основу системы «Сирена», позволили ей устойчиво развиваться и совершенствоваться на протяжении многих лет. В настоящее время успешно функционируют глобальная распределительная система (ГРС) «Сирена-Трэвел», ТАИС – Транспортная автоматизированная информационная система TAIS CRS (Сирена-2.3), возникшие в ходе совершенствования системы «Сирена-2».

Технологические и технические решения системы «Сирена» и её сетевые ресурсы были использованы для решения и других задач. Опыт разработки системы «Сирена» стал основой для создания теории построения нового класса распределённых компьютерных систем с мультидоступом к удалённым базам данных в реальном масштабе времени, получивших название «автоматизированные системы массового обслуживания» (АСМО). Решение возникающих практических задач потребовало выполнения целого ряда научных исследований, таких как: принципы построения таких систем, подходы и методы обеспечения надёжности систем, сохранность и восстановление ресурсов, принципы построения сети, протоколы передачи данных, топология сети, методы проектирования сети и расчёт характеристик обслуживания, управление ограниченными ресурсами и многих других. Были написаны и защищены десятки диссертаций.



Владимир Александрович Жожикашвили

Системы массового обслуживания с речевыми технологиями

В 1998 г. лаборатория «Автоматизированных систем массового обслуживания»* Института в составе её ведущих специалистов (В.А. Жожикашвили, Р.В. Билик, Н.В. Петухова, В.А. Вертлиб, М.П. Фархадов, З.П. Мясоедова) развернула новую программу, получившую название «АСМО нового поколения». Эта программа была направлена на то, чтобы информационное и сервисное обслуживание населения стало более дешёвым, открытым и доступным. Ключевую роль здесь были призваны сыграть компьютерные речевые тех-

* Сегодня она переименована в лабораторию «Эргатических систем».

нологии – распознавание и синтез речи, идентификация голоса, анализ речевого потока. Речевой портал, реализующий функции самообслуживания в интерактивном режиме и предоставляющий интеллектуальные услуги, способен значительно повысить эффективность центров обслуживания.

Области рационального применения речевых технологий практически неограниченны. Эти технологии применяются лабораторией, в первую очередь, в качестве надстройки над действующими АСМО («Сирена», заказы такси, банковские системы), но также и в инновационных проектах. Для этого созданы необходимые универсальные блоки распознавания, включающие грамматики, словари и акустические модели: чисел, дат, времени суток, номеров телефонов, адресов, городов и др. Разработаны также конкретные сценарии: для бронирования авиабилетов, заказа такси, управления денежным счётом в банке. Разработанная методология, включающая ситуационное и динамическое управление диалогом, позволяет сделать его компактным и удобным для пользователя.

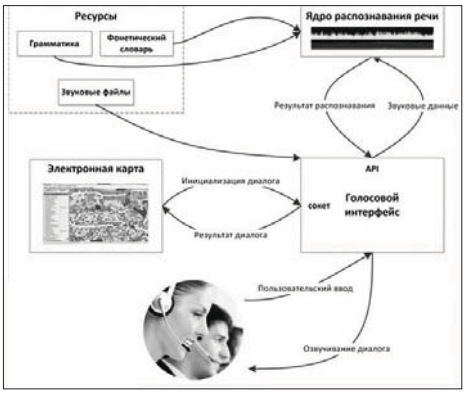
Русскоязычные речевые интерфейсы для автоматизированных систем массового обслуживания были разработаны Институтом впервые в России.

Помимо внедрений речевых интерфейсов в системы массового обслуживания, они могут использоваться и в других отраслях:

- речевое управление роботизированными комплексами,
- интеллектуальный речевой интерфейс для режимов *hands free*,
- ассистирующие системы для медицинского персонала,
- анализ речевых потоков для бизнес-аналитиков и систем безопасности,
- системы обучения на основе применения речевых и мультимедийных технологий, в том числе для людей с нарушением слуха.

Система речевого доступа к объектам электронной карты города для центра кризисных ситуаций

Работа предназначалась для поддержки действий оператора центра кризисных ситуаций города Баку, предоставляя оператору возможность указывать на электронной карте города нужный объект (улицу, дом, вокзал, аэропорт) с помощью речевого ввода: путём произнесения названия объекта в микрофон в ходе короткого интерактивного человеко-машинного диалога с системой управления речью.



Архитектура системы речевого доступа к объектам электронной карты

Проблема заключалась в том, что до начала этой работы не существовало компьютерного распознавателя для азербайджанского языка. Был выполнен анализ фонетической структуры близких языков и произведено сравнение структур этих языков с фонетикой азербайджанского языка. В результате для построения системы был выбран распознаватель для турецкого языка. Разработаны речевые блоки для распознавания объектов электронной карты Баку и других слов, произносимых в ходе диало-

гов. Созданы фонетические словари с учётом необходимых корректировок из-за расхождений в фонетике языков. Реализовано управление диалогом, преобразование текста в речь, логгирование диалогов.

Речевой интерфейс к электронной карте города обеспечивает дополнительный канал доступа к объектам карты, облегчает оператору работу и повышает эффективность оперативного наблюдения за чрезвычайными ситуациями.

Заказчиком системы была компания «Идрак Техноложи Трансфер», г. Баку. Система может быть интегрирована с электронной картой любого города путём модификации речевых блоков и языковых пакетов (при необходимости).

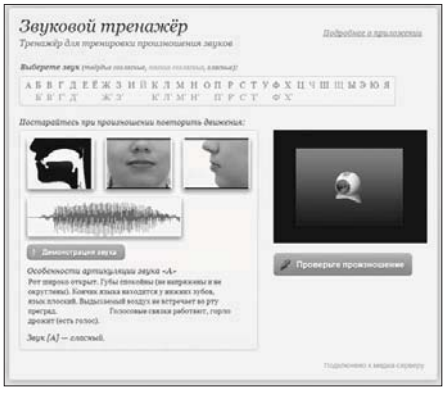
Анализатор речевого потока в режиме реального времени

С развитием цифровой экономики автоматизированные системы анализа речевых данных становятся неотъемлемой частью современных информационных, сервисных и управляющих систем. Интенсивный и зачастую очень информативный речевой обмен происходит в телефонных сетях, в пространстве Интернет, в общественных местах. Кроме того, различными компаниями, банками, госслужбами ежедневно записывается и сохраняется огромный объём аудио данных. Обработка этих данных дополняет картину происходящего в информационном пространстве и позволяет обнаруживать рисковые информационные элементы.

Основанные на технологиях распознавания речи системы речевой аналитики позволяют анализировать сохраненные аудио архивы и *онлайн* поток речевых данных, преобразовывать их в текстовую форму и вычленять смысл произнесённого. Разработка анализатора речевого потока, функционирующего в реальном масштабе времени, выполняется лабораторией совместно со специалистами ООО «Спич Драйв». Модуль декодирования анализатора речевого потока основан на модифицированной версии *open-source* продукта *Sphinx*. Разработана трифонная акустическая модель русской речи, языковая модель русского языка, набор лингвистических правил парсинга высказываний, модуль интеграции с источниками *онлайн* речевого потока. Осуществляется поддержка акустических моделей для телефонного тракта связи. Выполняется семантический анализ результата распознавания.

Потребителями системы являются коммерческие и государственные организации, сталкивающиеся с необходимостью фиксировать и анализировать большие потоки входящей и исходящей речевой информации: колл-центры, центры обслуживания населения, операторы мобильной и фиксированной связи, теле- и радиокомпании, службы безопасности.

Звуковой тренажёр



Разработка предназначена для помощи людям с нарушениями слуха или артикуляции, чтобы учиться правильному звукопроизношению. Для решения поставленной задачи использовано компьютерное распознавание речи в качестве анализатора поступающего от пользователя аудио-сигнала. Ядро распознавателя и соответствующие программы обработки и управления располагаются в центральной ча-

сти обрабатывающего комплекса, размещаемого на сервере. Пользователи получают на экран необходимые изображения, инструкции и подсказки. Специальная справочная информация предоставляет пользователям общие сведения о звуках и подробное описание способа произнесения каждого отрабатываемого звука. Внизу предыдущей страницы на рисунке представлен пользовательский интерфейс.

Поскольку наиболее важную информацию плохо слышащие люди получают, наблюдая за движением губ, было принято решение поместить на экран два окна, где демонстрируется движение губ при произнесении выбранного звука: вид анфас и вид в профиль. Имеется также окно, где можно наблюдать анимационное изображение работы артикуляционного аппарата для выбранного звука. Приводится текстовое описание работы речевого тракта и предоставлена возможность демонстрации звука путём нажатия соответствующей кнопки. Пользователю также обеспечена возможность контроля движений своих губ при произнесении им выбранного звука, если к его компьютеру подключена веб-камера. Для обеспечения обратной связи предусмотрена визуализация звука: на экран выводится изображение импульсно-кодовой модуляции эталонного и произнесённого звука. Большое внимание уделено привлекательности интерфейса. Оценка качества произнесения звука производится как в числовой форме по 100-балльной шкале, так и графическим методом путём вывода на экран смайлика (используется условная 5-балльная шкала). Разработка является новой и оригинальной. В России подобные тренажёры для русского языка отсутствуют.

В настоящее время все работы ведутся под руководством зав. лаб. М.П. Фархадова. Участники – Н.В. Петухова, А.Н. Абраменков, Е.В. Панкратова, З.П. Мясоедова, А.В. Абдулов, М.А. Мясоедова, С.В. Васьковский. Развиваются методы и технологии голосового управления, разрабатываются системы речевой аналитики и мониторинга информационного пространства. Проводятся эксперименты с глубокими нейронными сетями с открытыми фреймворками. Создаётся масштабная база данных телефонных разговоров. Ведётся работа по совершенствованию акустической модели. Осуществляется разработка языковых моделей на субсловных единицах (слоги, морфемы), эксперименты с шумоустойчивыми акустическими признаками.



Маис Паша-оглы Фархадов

Опыт лаборатории в речевой аналитике планируется в ближайшем будущем использовать в двух новых научных проектах. Один из них ведётся в настоящее время несколькими лабораториями ИПУ РАН совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики. В рамках данного проекта работа сотрудников лаборатории связана с разработкой моделей, методов, алгоритмов и интеллектуальных технологий извлечения и анализа информации в системах управления научными проектами. Модули обработки естественной речи планируется использовать для создания голосового помощника, предназначенного для составления и обработки контекстно-логических запросов к системе интеллектуальной обработки документов в рамках разработки человеко-

ориентированного и удобного интерфейса. Второй проект с Институтом медико-биологических проблем российской академии наук находится на стадии подготовки материала для первичного тестирования возможностей интеллектуальной системы обработки голоса и связан с автоматическим распознаванием степени утомленности людей по звучанию их речи. Для этого будет использоваться существующий опыт сотрудников лаборатории в распознавании эмоций по звучанию голоса, так как об эмоциональном состоянии и утомлении человека сигнализируют сходные признаки.

6.7. Моделирование и анализ бизнес-процессов (Теория бизнес-процессов)

Бурное развитие информационных технологий, возрастающая сложность и масштабность современных автоматизированных информационных систем управления предприятиями (корпоративных информационных систем – КИС) привело в начале 90-х годов к востребованности услуг в области ИТ-консалтинга, особенно на начальных, наиболее сложных и непредсказуемых этапах создания КИС – от анализа и моделирования бизнес-процессов до формирования требований по их автоматизации. Такой консалтинг получил название стратегического ИТ-консалтинга, в отличие от операционного ИТ-консалтинга, поддерживающего собственно этапы создания КИС в части настроек и программирования.

Однако применяемые в тот период подходы и методы стратегического ИТ-консалтинга регламентировали бизнес-процесс (БП) на интуитивном, слабо формализованном уровне, отсутствовали методики перехода от его текущего состояния к целевому, отсутствовали метрики и критерии целевого состояния, то есть было непонятно, к чему нужно стремиться и что могло бы быть достигнуто. Они обладали узкой предметной и проблемной ориентацией и, следовательно, их применение для предприятий любого типа было либо невозможно, либо крайне неэффективно. В этой связи стала очевидна актуальность разработки формальных методов, позволяющих обосновывать предлагаемые консультантом решения, а также оценивать их эффективность.

Следует отметить, что к этому времени в Институте имелся определённый задел в данном направлении, а именно, ряд результатов по применению *CASE*-технологий для проектирования программного обеспечения (Г.Н. Калянов), также сетей Петри для моделирования производственных процессов (С.А. Юдицкий), которые и легли в основу дальнейших работ в данном направлении.

В 1992 г. по инициативе С.А. Юдицкого в Институте была создана межлабораторная группа (в неё вошли Г.Н. Калянов и А.Т. Кутанов), которой была поставлена задача разработать метод имитационного моделирования БП, опирающийся на международные стандарты в области бизнес-моделирования. Задача была успешно решена с использованием двухуровневой модели «IDEF0-сеть Петри». Результаты были представлены на международной конференции *ADBIS'94*.

В последующие годы д.т.н. С.А. Юдицкий продолжил исследования в рамках развития данной модели. Под его руководством и при его непосредственном участии был разработан ряд подходов к имитационному (логическому) моделированию различных организационно-технических систем (от отдельных БП до систем рыночной экономики), основными из них являются следующие:

- метод построения и анализа логического портрета сложных систем (1997);
- сценарный подход к моделированию поведения сложных систем (2001);
- метод предпроектного анализа организационных систем (2005);
- сценарный подход к логическому моделированию поведения систем рыночной экономики (2015).



Семён Абрамович Юдицкий

В основе перечисленных подходов и методов лежит предложенная С.А. Юдицким триадная модель процесса (иерархическая структура целей, множество упорядоченных действий для достижения целей, множество взаимозависимых показателей процесса). В качестве математической основы используется аппарат расширенных сетей Петри.

В этот же период в рамках докторской диссертации Г.Н. Калянова (1999) был разработан комплекс моделей и методов реорганизации бизнес-процессов, позволяющих обосновывать предлагаемые решения по бизнес-реинжинирингу, а именно:

– формальная модель БП в виде смешанного графа с различными типами вершин (функции, ресурсы, исполнители) и различными типами рёбер, а также алгоритмы трансляции моделей на традиционных языках моделирования (типа *IDEF0* и *DFD*) в предложенную графовую модель;

– параллельная, атрибутная порождающая грамматика БП, позволяющая, с одной стороны, расширить число анализируемых вариантов выполнения бизнес-процесса вплоть до их полного перебора, а, с другой стороны, автоматически отсечь большую часть вариантов, неприемлемых по ряду объективных и субъективных критериев;

– метрики оценки качества декомпозиции БП, базирующиеся на общих свойствах «хорошей» системы – *сцепление* (механизм взаимодействия между компонентами БП) и *связность* (механизм внутренней структурной организации компоненты), типы которых были определены и ранжированы;

– метод оценки качества, обеспечивающий для любого БП определение типа его сцепления и связности, а также проектирование варианта БП с заданным типом сцепления и связности.

В 2005 г. было принято решение о переориентации одной из лабораторий Института на развитие методов стратегического ИТ-консалтинга. Возглавил эти работы заведующий лабораторией д.т.н., проф. Г.Н. Калянов, под руководством которого был создан новый комплексный подход к исследованию БП, позволяющий осуществлять их функционально-структурное проектирование, тестирование и вери-

фикацию. В рамках подхода на основе развития методов, применяемых при создании сложных программных систем (формальные языки и грамматики, теория тестирования программ, теория параллельных процессов, методы оценки качества программного обеспечения и др.), разработаны следующие методы:



Георгий Николаевич Калянов

- метод проектирования варианта бизнес-процесса на основе порождающей грамматики;
- комплекс моделей потоков данных и основанный на них метод тестирования, обеспечивающий обнаружение специфических для бизнес-процессов ошибок при обработке информационных ресурсов;
- метод статического анализа БП, обеспечивающий обнаружение ошибок определённых классов на ранних этапах проектирования;
- метод анализа качества структуры бизнес-процесса;
- метод перехода от моделей БП к требованиям по их автоматизации (фактически, к функциональным требованиям к КИС);
- унифицированный язык проектирования БП, базирующийся на диаграммах потоков данных, позволяющий отражать функциональные, информационные и поведенческие аспекты моделируемого процесса;
- аппарат смешанных грамматик, являющихся комбинацией графовых и обычных грамматик, для формального описания синтаксиса унифицированного языка.



Ольга Васильевна Лукинова

С 2007 г. в лаборатории велись исследования, связанные с безопасностью БП. В докторской диссертации О.В. Лукиновой (2014) были разработаны принципы и положения бизнес-процессного подхода к защите информационных систем, который даёт возможность:

- рассматривать организацию безопасности информационной системы комплексно, с учётом её архитектурно-функциональных особенностей;
- оценивать достаточность планируемых к использованию средств защиты;
- определять метрики и целевой уровень безопасности для защищаемых БП;
- соотносить жизненные циклы целевой информационной системы и системы её защиты;
- оценивать ущерб предприятия от взлома информационной системы как ущерб от нарушений функционирования БП.

На основе данного подхода предложена методология проектирования комплексных систем управления безопасностью БП и, соответственно, средой их реализации – информационных систем. В рамках этой методологии разработаны модели, процедуры и алгоритмы поддержки принятия решений при проектировании и эксплуатации/сопровождении системы безопасности, включая:

- модель влияния факторов безопасности, которая определяет критерии рационального выбора вариантов системы защиты;
- процедуры формирования целей безопасности на основе оценок ценности БП;
- алгоритмы анализа развития атаки и параметров оперативного реагирования для сдерживания атаки, ликвидации ее следов, восстановления функционирования бизнес-процессов;
- комплекс семантических моделей факторов безопасности.



Борис Васильевич Куприянов

На пути развития языков моделирования бизнес-процессов был введен новый класс БП – конвейерные процессы, являющийся расширением традиционных конвейеров (к.т.н. Б.В. Куприянов). Разработана графическая математическая модель конвейерных процессов на базе отношений временно́го предшествования, реализуемых примитивными рекурсивными функциями. Описаны основные свойства и характеристики данного класса процессов. Решена задача оптимизации распределения возобновляемых ресурсов конвейерного процесса. Разработан лабораторный вариант системы графического моделирования с вычислением характеристик и построением расписания процесса.

В последние годы в рамках данного направления разработана теория бизнес-процессов, целью являлось исследование моделей и методов создания и функционирования БП на всех этапах его жизненного цикла и оформление результатов в виде соответствующих знаний об объекте, представляющих собой систему утверждений и доказательств и содержащих методы объяснения и предсказания явлений в рассматриваемой предметной области.

В настоящее время разработаны следующие основные разделы теории БП:

1) визуальные языки моделирования БП;
2) технологии моделирования;
3) методы структурирования/декомпозиции;
4) методы инжиниринга/реинжиниринга;
5) методы анализа и верификации;
6) методы перехода от моделей БП к требованиям по автоматизации БП;
7) параллельные БП.



По результатам исследований опубликована монография «Теория бизнес-процессов».

Основные монографии: *Г.Н. Калянов. Теория и практика реорганизации бизнес-процессов // М.: СИНТЕГ, 2000. – 212 с.*; *С.А. Юдицкий. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем // М.: СИНТЕГ, 2001. – 112 с.*; *Г.Н. Калянов. CASE-технологии: консалтинг в автоматизации бизнес-процессов // М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 320 с.*; *А.Н. Калашян,*

Г.Н. Калянов. Структурные модели бизнеса: DFD-технологии // М.: Финансы и статистика, 2003. – 256 с.; *Г.Н. Калянов. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов // М.: Финансы и статистика, 2006. – 240 с.*; *Р.Б. Васильев, Г.Н. Калянов, Левочкина Г.А., О.В. Лукинова. Стратегическое управление информационными системами // М.: БИНОМ, 2010. – 510 с.*; *Г.Н. Калянов. Консалтинг: от бизнес-стратегии к корпоративной информационно-управляющей системе // М.: Горячая линия - Телеком, 2011. – 210 с.*; *Р.Б. Васильев, Г.Н. Калянов, Г.А. Левочкина.* Управление развитием информационных систем // *М.: Горячая линия - Телеком, 2014. – 376 с.*; А.М. *Блюмин, Г.Н. Калянов. Проектирование информационных систем // М.: Горячая линия - Телеком, 2022. – 361 с. Г.Н. Калянов. Теория бизнес-процессов // М.: Горячая линия - Телеком, 2023. – 296 с.*

6.8. Информационная безопасность

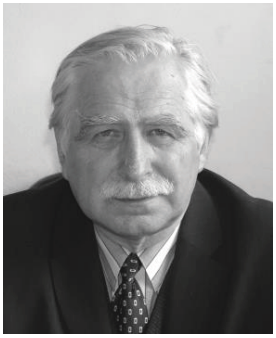
Приоритетной целью государственной политики на современном этапе является ускоренный переход к цифровой экономике. Данный переход характеризуется интенсивным внедрением и использованием перспективных информационных технологий в сферах экономики и финансов, промышленности и энергетики, транспорта и связи, государственного и муниципального управления, обороны и безопасности, науки и культуры, образования и здравоохранения и многих других. Однако, широкое и повсеместное использование информационных технологий немыслимо без повышенного внимания к проблемам их безопасности. О том, что важность указанной проблемы отчетливо осознаётся, в том числе на уровне Президента и Правительства РФ, говорит и ряд принятых несколько лет назад нормативных правовых документов: «Доктрина информационной безопасности Российской Федерации», «Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы», Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации», Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Исходя из положений настоящих документов, информационная безопасность (ИБ) представляет собой состояние защищённости объекта, системы или процесса*, обеспечивающее их устойчивое функционирование при воздействии на них внутренних и внешних, естественных и искусственных, преднамеренных и случайных информационных угроз (под которыми могут пониматься компьютерные атаки, деструктивные информационные и информационно-психологические воздействия и т.д.). Иными словами, можно сказать, что ИБ представляет собой состояние защищённости сложной системы в информационной сфере, и поэтому любые исследования и разработки в данном направлении должны носить комплексный характер. Именно такой, многогранный, комплексный, научный подход к решению проблем информационной безопасности уже много лет развивается в Институте и позволяет достигать значимых результатов как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях и разработках.

* Под объектом, системой или процессом можно понимать личность, общество, государство, технологические, организационные, социальные и экономические системы, информационные и телекоммуникационные системы и т.д.



Игорь Викторович Чернов

Одно из важнейших мест в работах по ИБ, проводимых специалистами Института (руководитель – к.т.н. И.В. Чернов), занимают исследования проблем обеспечения ИБ систем организационного управления (СОУ), в том числе на законодательном и организационном уровнях. Данные исследования были начаты ещё в 90-е годы прошлого века, когда эти работы возглавлял д.т.н., проф. В.В. Кульба. В рамках исследований предложены математические модели и прикладные методы обеспечения ИБ СОУ различных классов, использующих в своей работе комплексы средств вычислительной техники. Также рассматривается широкий круг проблем, связанных с обеспечением требуемых уровней достоверности и сохранности информации при её обработке, защиты данных от несанкционированного доступа, сохранности данных и программного обеспечения, оптимизацией отладки программного обеспечения и т.д.



Владимир Васильевич Кульба

В данном направлении разработаны комплексы формализованных методов и средств обеспечения достоверности и сохранности информации при обработке данных в СОУ. На основе предложенных понятий механизмов контроля и защиты данных и понятия «стандартная схема обработки данных» разработана методика оценки достоверности для различных структур обработки данных и различных законов возникновения и взаимодействия ошибок.

Подробно рассмотрен широкий круг вопросов резервирования программных модулей и информационных массивов в автоматизированных информационно-управляющих системах (АИУС) как системного метода повышения сохранности данных. Выделены основные стратегии резервирования и приведены результаты анализа их эффективности по различным критериям, а также методы расчёта основных вероятностных, временных и стоимостных характеристик рассмотренных стратегий. Выполнен анализ основных факторов разрушения модулей и массивов и даны рекомендации по использованию методов защиты от их воздействия. Поставлены и решены задачи выбора стратегий резервирования и оптимального числа копий и/или предыстории (дампов) основного массива. Рассмотрены задачи оптимального резервирования программ и массивов данных в системах обработки данных, работающих в реальном масштабе времени.

Разработаны формальные модели работы в распределённых системах обработки данных (РСОД), использующих копии и реплики массивов данных, размещённые в нескольких узлах системы. Сформулированы задачи поиска оптимального размещения в узлах системы копий и реплик массивов данных. Созданы формальные модели работы динамичных РСОД, использующих копии и реплики массивов данных, параметры работы которых со временем меняются (изменения в топологии системы, в характеристиках узлов системы, в трафике запросов к данным). Например, разработана формальная модель работы мобильной беспроводной сети

MANET, особенность которой заключается в том, что её топология может меняться случайным образом в произвольные моменты времени. Эта особенность мобильных сетей требует решения задачи передислокации реплик элементов данных между узлами сети. Предложен алгоритм решения такой задачи. На основе представленных формальных моделей сформулированы задачи поиска оптимального размещения в узлах распределённых сетей копий и реплик массивов данных. Разработаны алгоритмы решения данных задач, некоторые из которых реализованы в виде программных модулей.

В настоящее время работы по данному направлению ведутся под руководством д.т.н. В.В. Кульбы. Участники работы – В.О. Сиротюк, С.К. Сомов, А.Б. Шелков и др.

Основные монографии:

В.В. Кульба, С.К. Сомов, А.Б. Шелков. Резервирование данных в сетях ЭВМ. – Казань: Издательство казанского университета, 1987. – 175 с.;

А.О. Калашников, А.Е. Дёшина, М.В. Бурса, А.Г. Остапенко, Г.А. Остапенко. Управление информационными рисками мультисерверных систем при воздействии DDOS-атак. Воронеж: ООО Издательство «Научная книга», 2014. – 160 с.;

С.К. Сомов. Сохранность информации в распределённых системах обработки данных. Научное издание. – М.: ИПУ РАН. – 2019. – 254 с.;

В.В. Кульба, Е.А. Микрин, С.К. Сомов. Репликация данных в динамических распределённых информационных системах – М.: ИПУ РАН, 2022. – 211 с.

В последние годы решается проблема анализа и разработки сценарных технологий реализации активных информационных кампаний на разных уровнях (организация, регион, государство, межгосударственные отношения и т.д.). Строятся и исследуются сценарные модели формирования общественного мнения, которое способствовало бы достижению поставленных военно-политических и социально-экономических целей развития страны. Проводится сценарное исследование направлений и методов противодействия деструктивным внутренним и внешним силам.

В современных условиях формирование позитивного образа страны и её политической элиты с полным правом можно отнести к числу важнейших факторов успеха страны на международной арене, особенно в условиях протекающего в беспрецедентно острой форме геополитического комплексного информационного противоборства.

Проводится сценарное исследование направлений реализации информационной политики России как на международном уровне, так и внутри страны. Асимметричный характер противостояния (в первую очередь, информационного) с геополитическими противниками создает необходимость определения новых стратегических приоритетов в отстаивании национальных и экономических интересов страны на международной арене.

Одним из приоритетов сценарного исследования в настоящее время является повышение эффективности использования арсенала сил, средств и методов информационного управления с целью защиты национальных интересов Российской Федерации в условиях продолжающихся процессов глобализации, обострения межгосударственных противоречий на мировой арене, а также нестабильности мировой экономической системы.

Разработаны методы, алгоритмы и программные средства сценарной поддержки формирования и проведения активных комплексных информационных кампаний с использованием различных каналов передачи и распространения информации.

Сценарный подход является одним из наиболее действенных инструментов решения задач проведения в рамках государственной информационной политики целенаправленных активных информационных кампаний и комплексов мероприятий по противодействию внешним деструктивным информационным воздействиям.

В настоящее время в лаборатории «Сценарного управления» работы по данному направлению ведутся под руководством к.т.н. И.В. Чернова. Участники работы – д.т.н. В.В. Кульба, к.т.н. А.Б. Шелков, д.т.н. Д.А. Кононов, к.т.н. З.К. Авдеева, С.В. Коврига и др.

Основные монографии:

Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба и др. Информационная безопасность систем организационного управления. Теоретические основы: в 2 т./ Т.1. – М.: Наука, 2006. – 495 с.;

Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба и др. Информационная безопасность систем организационного управления. Теоретические основы: в 2 т./ Т.2. – М.: Наука, 2006. – 437 с.;

В.Л. Шульц, В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.Б. Шелков, И.В. Чернов. Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем. в 2-х книгах. – М.: Наука, 2012. – 304 с.;

В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков, И.В. Чернов. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. – М.: Наука, 2015. – 542 с.



Андрей Олегович Калашников

Подход к обеспечению ИБ является целевым, комплексным, сочетающим меры следующих видов: законодательно-нормативные (законы, нормативные акты, стандарты, требования, технические условия, положения, регламенты, инструкции и т.п.); административные (действия общего характера, предпринимаемые руководством организации); процедурные (меры безопасности, реализуемые персоналом); программно-технические (конкретные технические меры), поэтому с 2006 г. проводятся исследования, связанные с развитием теории управления ИБ и информационными рисками (ИР) в организационных системах (ОС) (руководитель – д.т.н. А.О. Калашников). В рамках этого направления были разработаны и исследованы теоретико-игровые и оптимизационные модели и методы эффективного организационного управления информационными рисками корпораций. В частности, для основных классов ОС на базе разработанных моделей информационных угроз (ИУ) и контрмер были построены модели организационного управления ИР, включающие мотивационные, институциональные и информационные механизмы управления ОС. На этой основе был сформирован набор моделей и методов эффективного организационного управления ИР: механизмы планирования (распределения ресурса), стимулирования, страхования, управления ограничениями и нормами деятельности и информационного управления, – и может быть успешно использован, чтобы противостоять всем основным классам ИУ, реализует

все основные классы контрмер, а также подходит для корпораций с различными организационными структурами. При этом был выделен комплекс основных (базовых) механизмов (планирования, стимулирования и страхования), которые образуют необходимый и минимально достаточный набор моделей и методов организационного управления ИР корпораций.

В настоящее время объектом исследований также являются сложные сети различной природы: технологические (АСУ ТП, промышленный Интернет и др.), киберфизические (сенсорные сети, Интернет вещей и др.), кибернетические (АИС и объекты критической информационной инфраструктуры РФ, Интернет и др.), социальные («Одноклассники», «В контакте», *Facebook* и др.).

Среди фундаментальных задач управления безопасностью сложных сетей можно выделить следующие: идентификация объектов окружения сети; моделирование деятельности объектов; выявление аномалий в деятельности объектов; прогнозирование развития ситуации. Эти задачи являются актуальными для сетей различной природы, их универсальная математическая постановка и решение (включая алгоритмическую и программную реализацию) позволяют подходить к вопросам управления безопасностью сложных сетей с единых методологических позиций. Решение указанных выше задач осуществляется сотрудниками лаборатории в рамках нескольких направлений.

Одним из таких направлений исследований является создание методов и средств управления распределённой обработкой и информационной безопасностью в сложных, неоднородных мульти-сетевых структурах. В рамках данного направления был предложен ряд новых методов решения таких проблем, как аутентификация, защита и маршрутизация информационных запросов, а также разграничение доступа к информационным ресурсам в распределённых системах, ориентированных на работу в мульти-серверных средах. Предложенные методы были заложены в основу ряда новых сетевых технологий и служб, специально ориентированных на обеспечение безопасности данных в условиях последовательной обработки информационных запросов в цепочке серверов, размещённых в различных, независимо администрируемых ведомственных и локальных сетях (к.т.н. Р.Э. Асратян, к.т.н. Е.А. Курако, к.т.н. В.Л. Орлов, А.Д. Козлов, Н.Л. Нога и др.).

Другим направлением является исследование проблем управления рисками и безопасностью сложных сетей различной природы. В рамках данного направления, в частности, исследуются вопросы управления рисками и безопасностью организационных систем с сетевой структурой (д.т.н. А.О. Калашников, к.ф.-м.н. А.А. Широкий), анализ и прогнозирование рисков объектов критической информационной инфраструктуры и объектов с повышенным уровнем риска (д.т.н. А.О. Калашников, Е.А. Абдулова), разработка моделей и алгоритмов мониторинга, оценки и управления информационными рисками сложных систем с сетевой структурой (д.т.н. А.О. Калашников, Е.В. Аникина), применение логико-вероятностного подхода в управлении информационной безопасностью (д.т.н. А.О. Калашников, К.А. Бугайский), комплексное оценивание рисков сложных сетей (д.т.н. А.О. Калашников, А.С. Рей) и ряд других.

Основные монографии:

А.О. Калашников. Организационные механизмы управления информационными

рисками корпораций. – М.: ПМСОФТ, 2008. – 175 с.;

А.О. Калашников. Модели и методы организационного управления информационными рисками корпораций. – М.: Эгвес, 2011. – 312 с.;

А.Г. Остапенко, Д.Г. Плотников, А.О. Калашников, В.Б. Щербаков, Г.А. Остапенко. *Атакуемые взвешенные сети. – М.: Горячая линия - Телеком, 2017. – 248 с.*;

А.О. Калашников, А.Г. Остапенко, Е.Б. Белов, В.П. Лось, А.А. Остапенко. Сетео-информационная эпидемиология. – М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 216 с.;

А.О. Калашников, А.Г. Остапенко, А.Л. Сердечный. Картография защищаемого киберпространства. – М.: Горячая линия-Телеком, 2022. – 372 с.



Виталий Николаевич Лебедев

С 1999 г. еще одним важным направлением работ Института становится создание защищённой информационно-вычислительной системы Национального центрального бюро (НЦБ) Интерпола при МВД России (ИВС Интерпола), представляющей собой корпоративную многоуровневую распределённую информационную систему, что позволило эффективно применить охарактеризованную выше методологию. ИВС Интерпола функционирует в НЦБ и его региональных филиалах. В создание ИВС Интерпола существенный вклад внесли к.т.н. В.Н. Лебедев, к.т.н. В.Л. Орлов, к.т.н. Р.Э. Асратян, к.т.н. И.Н. Мараканов, к.т.н. А.Г. Шинкарюк, В.Е. Москальков, А.В. Цуканов, В.Г. Волин, Е.А. Курако и др.

В международном проекте *TACIS* «Модернизация сети Интерпола в России» в 2008 г. разработано специальное программное обеспечение *NCB Web Manager* (прокси-анализатор). В соответствии с условиями контракта с Генеральным секретариатом (ГС) Интерпола разработка прошла испытания и была внедрена в промышленную эксплуатацию. Система *NCB Web Manager* обеспечивала управляемый доступ и регистрацию запросов (ответов) к информационным ресурсам ГС Интерпола (г. Лион, Франция) со 160 рабочих станций, размещённых в НЦБ Интерпола при МВД России (г. Москва) и в 41 его региональном филиале.

В 2013–2017 гг. были разработаны и внедрены в МВД России сервисы НЦБ Интерпола (СОДИ), работающие в составе Единой системы информационно-аналитического обеспечения деятельности МВД РФ (ИСОД МВД), которая базируется на Центрах обработки данных (ЦОД) с обеспечением защищённого доступа по всей территории страны. СОДИ предоставляет подразделениям МВД России возможность получения оперативных сведений из Центральной базы Интерпола (г. Лион) обо всех похищенных автомобилях, утраченных документах, разыскиваемых преступниках и занесения сведений по необходимости розыска в международные базы данных. Заметный вклад в разработку СОДИ внесли к.т.н. В.Л. Орлов, к.т.н. Р.Э. Асратян, к.т.н. Е.А. Курако, А.Д. Козлов, В.Е. Москальков, С.В. Владимирова и др.

Основные монографии:

А.О. Калашников, А.Г. Остапенко, Н.М. Радько, О.А. Остапенко, Р.К. Бабаджанов. Эпидемии в телекоммуникационных сетях. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 282 с.;

А.Д.Козлов, В.Л. Орлов. Методы и средства обеспечения информационной без-

опасности распределённых корпоративных систем. – М.: ИПУ РАН, 2017. – 156 с.

Следует отметить, что ряд работ поддержан грантами РФФИ и РНФ. По результатам выполнения гранта РФФИ «Разработка социо-киберфизической системы мониторинга разнородного Интернет-контента в целях противодействия проявлениям насилия, давления и других форм деструктивного воздействия на индивидуальное и групповое сознание пользователей» (руководитель – к.т.н. А.О. Исхакова) были рассмотрены вопросы обеспечения информационной безопасности социо-киберфизических систем за счёт анализа Интернет-контента на предмет наличия в нем различных форм деструктивных воздействий. Грант РНФ «Методы усиленной аутентификации в киберфизических системах на основе проактивных алгоритмов обнаружения атак» (руководитель – д.т.н., проф. Р.В. Мещеряков) содержит решение вопросов обнаружения атак за счёт сбалансированного анализа индикаторов векторов атак. Ряд научных результатов по проверке подлинности в объектах критической информационной структуры (КИИ) был получен по результатам выполнения гранта РНФ «Алгоритмическое обеспечение для усиленной проверки подлинности субъектов доступа в критически важных объектах» (руководитель – к.т.н. А.Ю. Исхаков). Расширению методов встраивания в различные информационные потоки был посвящён грант РНФ «Методы встраивания информации в данные беспроводных сенсорных сетей и цифровые изображения для обеспечения безопасности в «интернете вещей» (руководитель – к.т.н. О.О. Евсютин).



Роман Валерьевич Мещеряков

Основные монографии:

Е.Ф.Жарко, В.Г. Промыслов, А.Ю. Исхаков, Р.В. Мещеряков, К.В. Семенков, Е.А. Абдулова, А.А. Байбулатов, С.Ю. Исхаков. Кибербезопасность беспилотных транспортных средств. Архитектура. Методы проектирования. Монография / Под ред. Е.Ф. Жарко. – М.: Радиотехника. 2021. – 160 с.

В середине 90-х годов атомная промышленность России начала стремительный выход на мировой рынок. Ряд стран (Иран, Индия, Китай и др.) проявили заинтересованность в приобретении отечественных энергоблоков с реакторами на лёгкой воде типа ВВЭР-1000. Возникла потребность в разработках и создании автоматизированных систем управления верхним блочным уровнем (СВБУ) – АСУ ТП АЭС. На основе современных информационных технологий была разработана система контроля, управления и диагностики «Оператор», в которую входят операционная система, *SCADA*-система, САПР и ряд программных комплексов для разработки, внедрения, обучения и сопровождения сложных распределённых информационно-управляющих систем. Основное значение при этом придается приоритету ИБ (вместо ИБ специалисты часто используют термин «кибербезопасность») на всех этапах создания и эксплуатации системы. Проводимые работы обеспечивают комплексный подход к построению крупномасштабных высокоэффективных информационно-управляющих и вычислительных систем, отвечающих жёстким требованиям по

критериям энергоэффективности и кибербезопасности. Основная часть комплексов программ АСУ ТП АЭС прошла аттестацию и получила разрешение на применение в атомной энергетике, в системах, важных для безопасности. Научные результаты этих работ реализованы в действующих АСУ ТП АЭС: Бушер (Иран), Куданкулам (Индия).

Проблема обеспечения безопасности АСУ ТП АЭС является комплексной. Она связана с промышленной (энергетической, ядерной и радиационной), функциональной, а, в последнее время, из-за высокой степени централизации управления на основе компьютеризированных систем, с кибербезопасностью. Необходимость учёта взаимного влияния отдельных компонентов при обеспечении общей безопасности АЭС, в том числе влияние нарушения свойств информации (целостности, доступности, конфиденциальности) на промышленную безопасность определяет дисциплину кибербезопасности АСУ ТП АЭС. Кибербезопасность заключается в поддержании значений рисков для АЭС (экономических, экологических, социальных), связанных с возможными нарушениями доступности, целостности или конфиденциальности информации (алгоритмов, данных и сигналов) в АСУ ТП АЭС, в пределах допустимых уровней.



Алексей Григорьевич Полетыкин

Институт (руководитель работ по атомной энергетике – д.т.н. А.Г. Полетыкин) является разработчиком коммерческого программного обеспечения АСУ ТП АЭС, обеспечивающего интеграцию разнородных программно-технических комплексов (ПТК) и человеко-машинный интерфейс для супервизорного управления. Одной из задач при разработке является обеспечение кибербезопасности.

Первые системы защиты были созданы и внедрены на АЭС в начале 2010-х годов. Они соответствовали российским и международным нормам начала века. Однако резонансная кибератака *Staxnet* на иранские ядерные программы перевернула представления о киберугрозах. Ответом стало разворачивание научных и прикладных исследований с целью изучения имеющихся угроз, их оценки и применимости старых и новых технологий ИБ для защиты АСУ ТП.

Были получены следующие фундаментальные результаты:

- показано, что целью киберзащиты промышленных объектов является сохранение штатных функций и не допущение активизации скрытых функций (вредоносных), что отличается от целей ИБ в не промышленных областях;
- предложена общая методология достижения целей киберзащиты н этапе проектирования на основе нового понятия «кибеустойчисвость». Создана аксиоматика и математическое опасение критериев киберустойчивости;
- предложена «барьерная модель» киберзащиты для анализа защищённости, позволяющая учитывать специфику и синергию охранных систем, технологических защит, организационных мер и мер ИБ для промышленных систем на этапе эксплуатации;
- предложено использовать «связность» для выбора уровней защищенности (характеризуется набором мер защиты) для АСУ ТП, состоящих из иерархически

взаимодействующих ПТК.

Научно-методическая часть работы велась в тесном взаимодействии с ведущими предприятиями Российской Федерации, участвующих в разработке ПТК для АЭС. Результатом явилась монография (см. ниже, в списке), в которой рассматриваются проблемы оценки риска кибербезопасности для АСУ ТП критически важных объектов на примере АЭС. Анализируется применение формальных моделей безопасности для оценки риска.



Елена Филипповна Жарко



Виталий Георгиевич Промыслов

Деятельность по стандартизации ведется в рамках технического комитета 306 «Измерения, управление и автоматизация в промышленных процессах» (к.т.н. Е.Ф. Жарко – заместитель председателя технического комитета, заместитель руководителя работ по атомной энергетике) и подкомитета 7 «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АС» технического комитета 306 «Атомная техника» (к.ф.-м.н. В.Г. Промыслов – руководитель группы разработки специального программного обеспечения по атомной энергетике).

Международная деятельность (к.ф.-м.н. К.В. Семенков – руководитель работ по системному программному обеспечению для атомной энергетики, к.ф.-м.н. В.Г. Промыслов) ведётся в сотрудничестве с МЭК технический комитет 45 (АСУ ТП АЭС), результатом которой явился технический отчет по применению математических моделей для разработки архитектуры АСУ ТП АЭС, выпущенный в составе международной группы экспертов (см. ниже, в списке).



Кирилл Валерьевич Семенков

На основе имеющегося задела в области обеспечения кибербезопасности объектов критической информационной инфраструктуры под руководством Е.Ф. Жарко реализован грант РФФИ № 19-29-06044 «Разработка моделей и алгоритмов для обеспечения безопасного функционирования БТС в транспортной среде «умного города» и реализуется грант РНФ № 23-19-00338 «Моделирование динамических технических систем для обеспечения безопасности в интеллектуальной транспортной среде». В рамках гранта РФФИ № 19-29-06044 выпущена монография, посвящённая проблемам проектирования архитектуры безопасности для беспилотных транспортных средств в среде умного города, теоретические и методологические основы комплексного подхода к решению поставленной проблемы, архитектурного построения и проектирования систем защиты информации в сфере транспортных средств.

Основные монографии:

А.О. Калашников, Е.В. Ермилов, О.Н. Чопоров, К.А. Разинкин, Н.И. Баранников.

Атаки на информационно-технологическую инфраструктуру критически важных объектов: оценка и регулирование рисков. – Воронеж: ООО «Издательство «Научная книга»», 2013. – 160 с.;

В.Г. Промыслов, *Н.Н. Акимов*, *Е.А. Абдулова*, *П.А. Голубев*, *Е.Ф. Жарко*, *В.В. Жмайлов*, *И.Ю. Лепехин,* *О.И. Лобанок*, *А.Ю. Исхаков*, *Р.В.Мещеряков*, *А.Г. Полетыкин*, *А.М. Мусихин*, *В.В Пронин*, *К.В. Семенков*, *Д.В. Цыренов. Оценка риска и обеспечение кибербезопасности атомных электростанций. – М.: ИПУ РАН, 2022. – 193 с.*;

IEC TR 63415:2023. Nuclear Power plants - Instrumentation and control systems - Use of formal security models for I&C security architecture design and assessment.



Александр Гедеванович Чхартишвили

Представленные выше научные направления объединяет один общий момент: все они, в той или иной степени, решают проблему «защиты информации» от возникающих информационных угроз. Однако в области исследований проблем ИБ существует направление, в рамках которого рассматривается случай, когда сама информация представляет собой информационную угрозу! Данное направление в обеспечении ИБ, ключевыми элементами которого являются исследование процессов информационного влияния, управления и противоборства, можно условно именовать «защита от информации».

Исследования по данному направлению начались в Институте в середине 2000-х годов и в настоящее время проводятся сотрудниками различных лабораторий. Среди них – д.т.н. Д.А. Губанов, к.т.н. Н.И. Базенков, д.т.н., проф. В.В. Кульба, к.т.н. И.В. Чернов, к.т.н. А.Б. Шелков, д.ф.-м.н. А.Г. Чхартишвили, Д.Н. Федянин, д.т.н. А.О. Калашников и ряд других. Сегодня становится особенно очевидной актуальность комплексных междисциплинарных научных исследований, направленных на изучение сущности и разработки научно обоснованной методологии информационного влияния, управления и противоборства, а также многостороннего комплексного опережающего анализа в различных областях развития общества и государства, стратегического и тактического планирования и управления процессами противодействия информационной, политической, экономической и военной агрессии со стороны геополитических противников России.

Современное состояние и развитие процессов глобализации и информационного общества неизбежно привели к существенному повышению роли информационных процессов и технологий практически во всех сферах жизни современного человеческого общества, фактическому стиранию информационных границ и значительному росту открытости как мирового сообщества в целом, так и составляющих его субъектов. Это породило целый ряд принципиально новых и противоречивых по своим целям и средствам их достижения процессов и явлений, оказывающих существенное влияние на общественное развитие, и в том числе привело к тому, что в современном мире активное противоборство в информационном пространстве стало постепенно вытеснять с авансцены геополитических процессов военные кон-

фликты. Более того, если ранее (например, в XX веке) информационные процессы и технологии использовались в наибольшей степени для поддержки игравших главную роль акций военно-политического характера, то сейчас ситуация изменилась. Сегодня, с одной стороны, информационная политика стран Запада направлена на поддержку антироссийской политики сдерживания в военной, финансово-экономической, политической и дипломатической сферах, с другой – имеет чётко определённые деструктивные цели, связанные с целенаправленными попытками изменения массового (группового, индивидуального) сознания или психологии российских граждан; борьбой за умы; атакой на ценностные ориентации и поведенческие установки; попытками дестабилизации ситуации в стране и её регионах, а также провоцированием протестных движений и подготовкой базы для организации цветных революций или иных протестных религиозно-политических, националистических, сепаратистских, прозападных и т.д. движений с целью, не в последнюю очередь, насильственного свержения конституционного строя. Последнее в настоящее время представляет собой, пожалуй, наибольшую угрозу национальной безопасности России. В условиях, когда угрозы национальной безопасности носят комплексный и при этом формально невоенный и не силовой характер, резко возрастают требования к качеству и эффективности управления противодействием угрозам дестабилизации ситуации внутри России и её регионов.

В целом, механизм информационного влияния основан, прежде всего, на управлении общественным сознанием и внесением в это сознание целенаправленной, достоверной либо, напротив, недостоверной информации (в последнем случае это называется дезинформацией). Данный тип управления человеком, группой, массами связан со стремлением так сформировать сообщение о реальной ситуации, чтобы человек принимал его как само собой разумеющееся и поступал соответствующим образом. Что касается дезинформации, то она является одним из вариантов информационного воздействия, имеющего целью сознательное введение целевой аудитории в заблуждение, то есть навязывание превратного, искажённого, а иногда и просто откровенно лживого представления о реальной действительности.

Информационное управление направлено, прежде всего, на формирование или изменение общественного сознания (в менее сложных ситуациях – общественного мнения по тем или иным проблемам), либо непосредственное побуждение к определённым действиям выделенных целевых аудиторий в границах заданного временно́го горизонта. При этом, в последнем случае, информационное управление прямого действия в принципе может быть направлено и на побуждение человека или определённых групп людей к немедленным действиям в желательном направлении. Но на практике без достаточно длительного целенаправленного информационного воздействия это достигается достаточно редко, поскольку необходимо предпринять целый ряд мер по информированию, убеждению, напоминанию и т.п. для того, чтобы поставленная цель была реализована и большинство членов целевой аудитории действовали требуемым образом.

В свою очередь, информационное противоборство представляет собой совокупность современных методов и средств борьбы противодействующих сторон – субъектов международных отношений, основанных на широкой базе предоставляемых современными информационными технологиями возможностей внешнего влияния как на государство – объект воздействия, так и на общественное со-

знание его граждан.

Основные монографии:

В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б Шелков, Д.А. Кононов, И.В. Чернов. Информационное управление в условиях активного противоборства: модели и методы. – М.: Наука, 2011. – 187 с.;

В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б Шелков, И.В. Чернов. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. – М.: Наука, 2015. – 542 с.;

А.Г. Остапенко, А.В. Паринов, А.О. Калашников, В.Б. Щербаков, А.А. Остапенко. Социальные сети и деструктивный контент. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 274 с.;

Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: МЦНМО, 2018. – 224 с.;

Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. Social Networks: Models of information influence, control and confrontation. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. – 158 с.;

В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б Шелков, И.В. Чернов. Информационное управление обеспечением социальной стабильности как основы общественного и государственного развития. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 211 с.;

А.О. Калашников, А.Г. Остапенко, Г.А. Остапенко, О.А. Остапенко, Е.Ю. Чапурин. Социальные сети и риск-мониторинг. – М.: Горячая линия - Телеком, 2020. – 266 с.;

А.О. Калашников, А.Г. Остапенко, Е.Б. Белов, В.П. Лось, О.А. Остапенко. Социальные сети и психологическая безопасность. – М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 232 с.

7. Управление системами междисциплинарной природы

7.1. Человек в системе управления



Вадим Александрович Трапезников

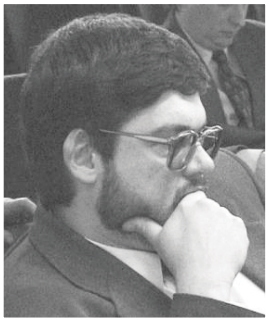
В середине 60-х годов в Институте возник новый раздел теории управления – управление большими системами, особенностью которых является то, что важнейшую роль в их эволюции играет так называемый «человеческий фактор». Как и во многом другом, инициатором развития этого раздела науки управления выступил В.А. Трапезников («Человек в системе управления» – доклад на V Всесоюзном совещании по проблемам управления, 4 октября 1971 г.). Значительную роль в развитии концепции и методов управления большими системами сыграли М.А. Айзерман и А.Я. Лернер.

В лаборатории А.Я. Лернера в конце 60-х годов были разработаны основы теории активных систем, суть которой сводится к формализации процесса синтеза эффективных механизмов управления в экономике и обществе (В.Н. Бурков). В 70–80-е годы был разработан и исследован набор базовых механизмов управления активными системами: распределения ресурсов, активной экспертизы, конкурсные, противозатратные, многоканальные и другие организационные механизмы, которые совершенствовались в соответствии с полученными результатами и практикой. С конца 80-х годов значительное внимание уделяется исследованию активных систем с неопределённостью (Д.А. Новиков).



Владимир Николаевич Бурков

За последние десятилетия теория активных систем трансформировалась в более широкое направление – теорию управления организационными системами,



Дмитрий Александрович Новиков

включающую такие новые разделы, как информационное управление, рефлексивные игры в управлении, управление структурой организационных систем, мотивационное управление, организационное управление с элементами искусственного интеллекта и др. (Д.А. Новиков).

В 70–80-е годы в лаборатории М.А. Айзермана были созданы основы теории выбора, рассчитанной на ситуации принятия решений в случаях, когда участники процесса имеют несовпадающие интересы (А.В. Малишевский, Ф.Т. Алескеров).

Другая группа сотрудников лаборатории М.А. Айзермана, которая в конце 80-х выделилась в самостоятельную лабораторию, разработала новые методы анализа больших объёмов социальной и экономической информации (А.А. Дорофеюк), в том числе и экспертного происхождения. В 2017 г. лаборатория А.А. Дорофеюка вошла в состав лаборатории им. М.А. Айзермана. Разработкой специальных методов интегрированной обработки информации объективного и экспертного происхождения – экспертно-статистических методов – занималась лаборатория А.С. Манделя, которая в 1999 г. выделилась из лаборатории «Идентификации систем управления», возглавлявшейся в то время В.А. Лотоцким, а в 2017 г. также вошла в состав лаборатории им. М.А. Айзермана.

Широкое развитие получило направление, связанное с принятием решений на базе экспертной информации (М.Б. Шнейдерман, И.Б. Семёнов и др.).

Значительное внимание уделялось задачам построения автоматизированных систем управления (А.Г. Мамиконов), проблемам управления развитием крупномасштабных систем, моделям и методам управления финансовыми проектами на предприятиях и в корпорациях (А.Д. Цвиркун) и управления безопасностью (В.В. Кульба).

Изначально все эти направления исследований были связаны между собой тем, что относились к управлению объектами одной природы – социально-экономическими системами и процессами. Полученные за прошедшие 50 лет результаты привели учёных к единому пониманию рассматриваемых ими объектов и методов их изучения. Благодаря этому сегодня возникли новые возможности взаимообогащения разных направлений теорий за счёт их совместного развития.

Результаты проведённых в Институте теоретических исследований широко применяются при создании эффективных механизмов управления экономическими объектами и системами различного масштаба: от стимулирования отдельных субъектов экономики до программ развития отраслей промышленности и регионов.

7.2. Исследование операций

Термин «исследование операций» появился в 1939 г. после того, как началась Вторая мировая война и обозначилось стремление ученых тех стран, что были затронуты войной, помочь в планировании и управлении военными операциями. По окончании войны произошла терминологическая «конверсия» и под операциями стали понимать все виды целенаправленной деятельности людей. Поэтому с конца 40-х – к началу 50-х годов под исследованием операций стали понимать набор математических инструментов, пригодных для того, чтобы помогать человеку принимать решения в самых разных областях: промышленности, технике, сельском хозяйстве, здравоохранении и др. Основными инструментами исследования операций стали теория игр, математические методы управления производством и запасами, математическое и динамическое программирование и методы комбинаторной оптимизации.

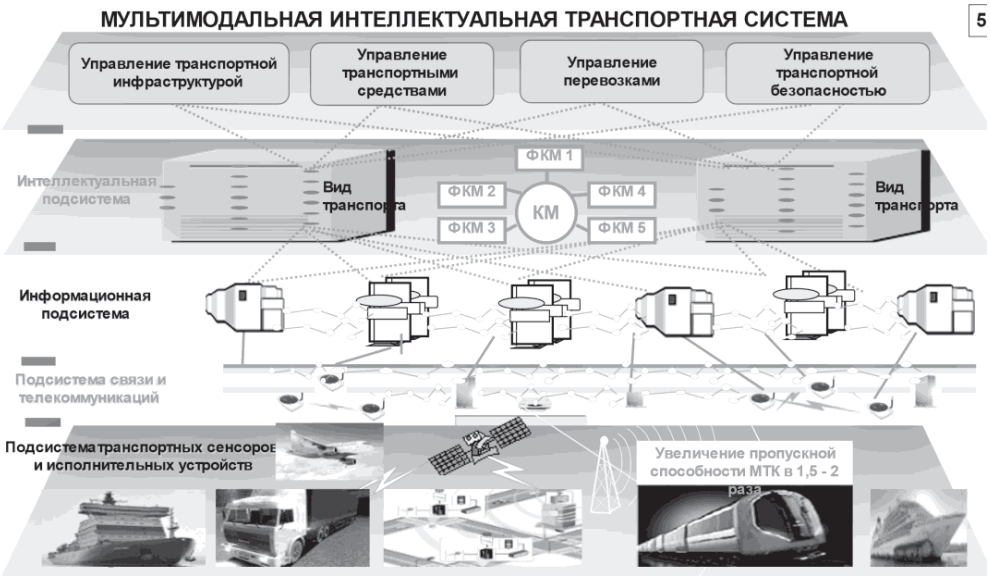
Как отмечено в предыдущем разделе, в начале 60-х годов прошлого века в лаборатории А.Я. Лернера группа В.Н. Буркова стала развивать теорию активных систем. Задачи, которые рассматривались в теории активных систем, были оригинальной разновидностью моделей теории игр. Разрабатываемые в теории активных систем математические модели позволяли результативно исследовать процессы выбора оптимальных или рациональных решений в ситуациях, когда активное участие человека в процессе принятия управленческих решений не игнорируется, а, напротив, становится главной интригой исследования. Одним из результатов первого периода работы группы В.Н. Буркова, которая в 1974 г. превратилась в лабораторию, стала формулировка принципа открытого управления. Этот результат, как и многие другие, полученные В.Н. Бурковым и его учениками, с полным основанием можно отнести к проблематике исследования операций.



Владимир Викторович Цыганов

В лаборатории В.Н. Буркова с 1979 г. В.В. Цыганов исследовал и разрабатывал адаптивные механизмы управления активными системами в условиях динамики и неопределённости. На основе полученных им теоретических результатов, разработаны механизмы организационного управления с элементами искусственного интеллекта. Эти механизмы позволяют согласовывать интересы активных элементов социально-экономических систем в условиях изменений и с учётом возможностей, порождаемых цифровизацией, интеллектуализацией и технологиями машинного обучения. Комбинации этих механизмов используются в качестве модулей для анализа и проектирования комплексных систем управления социально-экономическими системами разной природы и масштаба.

В частности, комбинации механизмов организационного управления с элементами искусственного интеллекта были реализованы в Комплексе моделей (КМ) управления стратегическим развитием крупномасштабной транспортной инфраструктуры (ТИ). КМ включает 5 функциональных комплексов моделей (ФКМ), позволяющих поддерживать процессы управления стратегическим развитием ТИ социально-экономических систем, безопасности ТИ и др. КМ и ФКМ лежат в основе концепции мультимодальной интеллектуальной транспортной системы.



Концепция мультимодальной интеллектуальной транспортной системы

КМ, ФКМ и эта концепция использовались для:

- анализа, сценарного моделирования и стратегического управления развитием ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики (см. рис. на следующей стр.), а также ТИ ОАО «РЖД»;
- при разработке и производстве на Экспериментальном заводе научного приборостроения РАН телекоммуникационного оборудования, систем управления и связи для ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики.

Достигнутый экономический эффект внедрения КМ – уменьшение затрат на проект реконструкции Восточного полигона БАМ на 5 млрд 280 млн руб. С использованием КМ разработано и поставлено на ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики телекоммуникационного оборудования, систем управления и средств связи на сумму 1 млрд 653 млн руб.

Социальный эффект внедрения КМ выражается в повышении связности территории России и доступности транспортных услуг для населения, а также безопасности ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики.

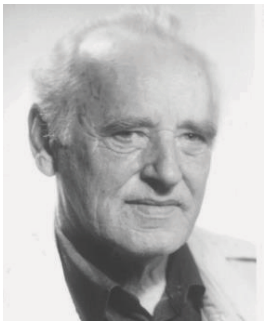
Разработка и использование КМ для поддержки управления стратегическим развитием ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики были отмечены премией Правительства РФ за 2022 г. в области науки и техники.



Схема стратегического управления развитием ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики

В конце 60-х годов другим источником задач исследования операций стало широкое распространение производственных автоматизированных систем управления (АСУ). В АСУ должны были решаться различные задачи оптимизации, включая задачи управления производством и запасами. Первым в Институте, кто проявил интерес к задачам теории управления запасами, был старший научный сотрудник лаборатории В.С. Пугачева к.т.н. Анатолий Львович Райкин, до этого занимавшийся задачами оптимизации надёжности технических систем (см. раздел «Надёжность, живучесть, техногенная безопасность, эффективность»). Его ученик к.т.н А.С. Мандель первым подметил аналогии между некоторыми задачами теории надёжности и теории управления запасами и на основе этих аналогий предложил несколько оригинальных моделей управления запасами для сложных складских систем. Именно в это время Институту было предложено выполнить разработку эскизного проекта всесоюзной АСУ «Металл» (см. раздел «Автоматизированные информационно-управляющие системы (АИУС)»). Одна из моделей, предложенных А.С. Манделем (которая стала развитием модели прикрепления поставщиков к потребителям, разработанной д.ф.-м.н. Б.С. Разумихиным) вошла в эскизный проект АСУ «Металл».

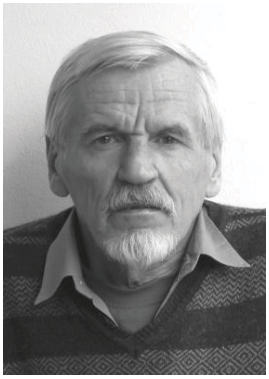
Д.ф.-м.н., проф. Борис Сергеевич Разумихин (сотрудник лаборатории А.М. Лётова) стал автором нового направления в исследовании процессов управления в социально-экономических системах. Используя аналогии между хорошо



Борис Сергеевич Разумихин

изученными физическими процессами (в механике и электротехнике), он развил принципиально новый метод описания и исследования систем экономической природы (см. *Б.С. Разумихин. Физические модели и методы теории равновесия в программировании и экономике. – М.: Наука, 1970*).

В это же время аспирант А.Л. Райкина В.А. Лотоцкий (впоследствии к.т.н, д.т.н. старший научный сотрудник лаборатории Н.С. Райбмана, ставший после ухода Райбмана из жизни заведующим этой лабораторией) впервые в мире исследует влияние ненадёжности поставщиков на выбор стратегий управления запасами. По сути дела, эта работа предвосхитила то направление исследования операций, которое активно развивается в последние 15 лет и называется управление цепями поставок (*Supply Chain Management*). Также В.А. Лотоцкому принадлежит исследование так называемых инвариантных стратегий управления запасами, основанное на применение методов теории групп в области специфических задач исследования операций. Этот и другие результаты, полученные В.А. Лотоцким (в частности, расширение прикладных возможностей теории управления запасами на системы с коррелированным многономенклатурным спросом и другими формами стохастической зависимости), можно найти в книге *В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель. Модели и методы управления запасами. – М.: Наука, 1991*.



Владимир Алексеевич Лотоцкий

В начале 70-х годов В.А. Лотоцкий и А.С. Мандель приступают к исследованию теоретических возможностей решения задач управления производством и запасами в условиях неопределённости. Разработаны оригинальные адаптивные алгоритмы управления запасами. Затем для решения задач управления производством и запасами ими привлекаются такие классические инструменты как фильтр Калмана и методы теории массового обслуживания. Исследования эти продолжаются и поныне.



Александр Соломонович Мандель

Среди новых инструментов решения задач исследования операций, разработанных в последние 15 лет, следует упомянуть метод аналогов в развитой А.С. Манделем теории экспертно-статистической обработки информации и исследованные им и его учениками (С.С. Гранин, В.А. Лаптин, А.С. Кожан) аналогии между задачами математической теории управления производством/запасами и задачами теории управляемых систем массового обслуживания. На основе

этих аналогий удалось синтезировать принципиально новые алгоритмы управления системами массового обслуживания.

В последние 30 лет термин «исследование операций» (*operations research*) несколько утратил ту популярность, которую он приобрёл со времён окончания 2-й Мировой войны. В те годы в мире появилось большое число научных журналов, посвящённых этой широчайшей тематике. Тем временем стали постепенно развиваться новые научные направления, которые включали в себя и обобщали некоторые из прежних разделов исследования операций. Часть научных журналов по исследованию операций в 80-е и последующие годы XX века закрылась, а вместо них появились новые издания для публикации результатов исследования по этим новым разделам науки об управлении. Многие учёные также разошлись по этим новым для них научным «квартирам» (направлениям). Именно поэтому в нашей книге некоторые из теоретических и прикладных результатов учёных Института, которые до 80–90-х годов прошлого века были бы отнесены к проблематике исследования операций, опубликованы в других разделах этой книги. Среди них: работы коллектива, возглавляемого А.А. Лазаревым, по дискретной оптимизации и её применениям при планировании деятельности организационных структур (см. раздел 2.18); работы Р.П. Агаева, Н.Н. Бахтадзе, В.Н. Буркова, И.В. Бурковой, В.О. Корепанова, В.А. Лотоцкого, Д.А. Новикова, П.Ю. Чеботарёва по многоагентным системам и также их применениям для управления организационной деятельностью (см. раздел 2.19); работы коллектива, руководимого А.А. Галяевым, по групповому управлению в условиях неполной информации (см. раздел 3.5); работы В.М. Вишневского и его сотрудников по теории массового обслуживания и её применениям к исследованию и оптимизации телекоммуникационных сетей (см. раздел 6.4) и др.

7.3. Принятие решений и теория выбора



Миндия Евгеньевич Салуквадзе

Первые работы в Институте по теории принятия решений восходят к академику Б.Н. Петрову и его аспиранту М.Е. Салуквадзе, которые предложили метод многокритериального выбора по близости к идеальной точке. Так как метод был разработан для выбора компонент специальной техники, он был засекречен на долгие годы.

Дальнейшее развитие этого направления связано с именами С.В. Емельянова и О.И. Ларичева. Обзор С.В. Емельянова и Э.Л. Напельбаума* о логике рационального выбора привлёк большое внимание учёных Института.



Олег Иванович Ларичев

В 1970 г. О.И. Ларичев, будучи в командировке во Франции, совместно с французскими коллегами участвует в разработке человеко-машинного метода принятия решений при многих критериях – метода *STEM* (*STEp Method*). В 1975 г. О.И. Ларичев защитил в Институте докторскую диссертацию «Проблемы и методы стратегического планирования научных исследований и разработок». В 1976 г. лаборатория будущего академика О.И. Ларичева в составе подразделения, руководимого в то время членом-корреспондентом АН СССР С.В. Емельяновым, переводится во Всесоюзный научно-исследовательский институт системных исследований (ВНИИСИ) Госкомитета СССР по науке и технике и АН СССР, незадолго до этого организованный Д.М. Гвишиани и С.В. Емельяновым (в настоящее время – Институт системного анализа Российской академии наук).

В 1970–80 годы в Институте сложились ещё две группы, активно занимающиеся задачами принятия решений. Первая группа, состоящая из Т.М. Виноградской, И.М. Макарова, А.А. Рубчинского и И.Б. Соколова, исследовала модели многокритериального выбора с учётом предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР). Ими были предложены модели выбора при различных функциях полезности ЛПР.

---

* *С.В. Емельянов, Э.Л. Наппелъбаум*. Методы управления сложными системами. 3. Принципы рациональности коллективного выбора. В книге Техническая кибернетика (Итоги науки и техники). – М: ВИНИТИ, 1978, т. 10. - С. 120-214.

Другая группа в составе Б.А. Березовского, В.М. Барышникова, В.И. Борзенко, Л.М. Кемпнера и С.М. Яковенко занималась в 1970–80 годы вопросами, связанными с проблемой выбора при многих критериях с учётом геометрии бинарных отношений. Исследовались вопросы структуры предпочтений ЛПР, построения алгоритмов выбора, оценки точности таких алгоритмов, проблемы выбора в условиях риска.



Марк Аронович Айзерман

В лаборатории, руководимой д.т.н., проф. М.А. Айзерманом, в середине 70-х годов были начаты исследования в области общей теории выбора и теории голосования. К этому времени в теории выбора сложились свои каноны и традиции, и создавалось впечатление законченности и полноты построенной теории. В основе этой теории – её по праву называют теперь классической теорией выбора – лежали три основные идеи:

1. Центральный вопрос теории связывался с обоснованием актов выбора. Была создана аксиоматика «рационального выбора», согласно которой в основе выбора лежит попарное сравнение вариантов, в частности – критериально-экстремизационные процедуры.

2. Разрабатывались методы описания результатов выбора в виде так называемых функций выбора, но они использовались для выделения и описания класса функций, порождаемых критериально-экстремизационными процедурами.

3. Отдельное направление составляло исследование действий коллектива; индивидуальный выбор изучался, главным образом, в связи с необходимостью при построении моделей коллективного выбора «заложить» в эти модели обоснованные предположения о действиях каждого члена коллектива.

В 1977 г. М.А. Айзерман, Н.В. Завалишин и Е.С. Пятницкий опубликовали работу, в которой был предложен новый подход, обобщающий классические представления о выборе. В основу построения теории было положено понятие о функциях выбора, то есть о внешнем описании выбора, процедуры же выбора рассматриваются как средства порождения тех или иных классов функций выбора (областей в пространстве функций выбора).

Далее, в работах М.А. Айзермана и А.В. Малишевского был предложен более общий подход к логическому описанию и анализу оснований выбора, не предполагающий заранее ни «парности» структуры отношений между вариантами, ни «доминантности» правила оперирования с ними. В результате была обнаружена скрытая «обобщённо-доминантная» логика выбора в ряде типовых «неклассических» схемах выбора. Была аргументирована возможность и необходимость выхода за рамки «парности – доминантности» в структурах и правилах выбора и пере-



Андрей Витальевич Малишевский

хода к «неклассическим» структурам и правилам. Было показано, что такой переход можно осуществить путем формализации понятия «множественных взаимовлияний» при определении лучших вариантов.

В 80-х годах в работах А.В. Малишевского был предложен логический подход к анализу абстрактной модели выбора, основанный на единообразном способе описания механизмов выбора в терминах предписывающих предикатов.



Фуад Тагиевич Алескеров

В монографии *М.А. Айзермана* и *Ф.Т. Алескерова* «*Выбор вариантов: основы теории*» (1990) основное внимание было уделено задачам индивидуального выбора. Здесь излагались классические представления о парнодоминантных и критериально-экстремизационных механизмов выбора вариантов, были рассмотрены примеры механизмов и функций выбора на выполнение условий классической рациональности, систематически исследованы неклассические функции выбора и рассмотрены более сложные структуры (гиперотношения). В частности, было обобщено понятие доминирования и показано, что в этих терминах могут быть описаны механизмы, которые генерируют все функции выбора, принадлежащие к «неклассическим» областям в пространстве функций выбора. В книге была полностью решена задача о замкнутости основных областей в пространстве функций выбора относительно таких операций, как «объединение», «пересечение» и «суперпозиция». В области коллективного выбора была решена задача синтеза операторов коллективного выбора, в которой как индивидуальные мнения, так и коллективное решение описывается функциями выбора. В последние годы Ф.Т. Алескеровым и В.И. Якубой эти модели выбора были использованы для построения новых индексов центральности в сетях.

В дальнейшем в лаборатории продолжались исследования в области общей теории выбора и теории голосования.

В работах Ф.Т. Алескерова были исследованы обобщения понятия «однокритериальный механизм выбора» – механизм выбора с нечувствительностью, надпороговый выбор и механизм выбора «m лучших» – и были получены условия представимости этих механизмов парнодоминантным выбором. Для моделей выбора с нечувствительностью были построены обобщения, в которых погрешность измерения зависит от пары сравниваемых вариантов, от множества вариантов, и, в самом общем виде, от пар сравниваемых вариантов и множества, в которое эти варианты входят.

Ф.Т. Алескеровым, Н.В. Завалишиным и Б.М. Литваковым была решена задача разложения функций выбора по Парето и функций Плотта по системе интервальных выборов и даны алгоритмы построения интервальных выборов – членов минимального разложения указанных функций выбора.

Ф.Т. Алескеровым и А.В. Владимировым рассмотрена классическая задача коллективного выбора: построение результирующих бинарных отношений по индивидуальным бинарным отношениям с помощью локальных операторов. Были

получены явные представления таких операторов с помощью теоретико-множественных операций объединения, пересечения и лексикографического произведения над исходными отношениями. Описаны операторы, нейтральные к избирателям, и приведены условия, при которых такие операторы выстраивают ациклические результирующие отношения.

Б.М. Литваковым для конструктивного описания функций выбора были введены и исследованы специальные графы, называемые множественными. Был определен класс функций выбора, описываемых множественными графами, а также вид множественных графов, соответствующих специальным классам функций.

В работах М.А. Айзермана, В.И. Вольского и Б.М. Литвакова были обобщены классические понятия «критерий» и «бинарное отношение». Соответствующие обобщения получили наименование «псевдокритерий» и «бинарное псевдоотношение» («псевдограф»), что позволило в явной форме учесть контекст сравнения. Этот язык оказался адекватным для описания ряда процедур голосования.

С.Г. Новиковым были рассмотрены динамические аспекты теории голосования в случае, когда в выборе последовательно предлагаемых программ участвуют два игрока, и показано, что множество предельных циклов, к которым сходится траектория игры, эффективно определяется положением идеалов игроков и одного определённого избирателя.

В монографии В.И. Вольского и З.М. Лезиной была проведена классификация и описаны наиболее употребительные процедуры голосования в малых группах, проанализирован ряд процедур голосования, а также изложена история применения процедур голосования для принятия коллективных решений с древнейших времен до наших дней.

В работах П.Ю. Чеботарёва был аксиоматически построен универсальный метод агрегирования неполных предпочтений, являющийся обобщением метода строчных сумм для неполных парных сравнений. Исследованы свойства полученного алгоритма. Использован нетрадиционный для задач агрегирования предпочтений подход, связанный с методами функционального анализа. Метод обобщённых строчных сумм использован для решения ряда прикладных задач.

В работах Р.П. Агаева исследованы механизмы обобщённо-интервального выбора (для однокритериального и многокритериального случаев), получены необходимые и достаточные условия представимости функций выбора такими механизмами, взаимные соотношения классов этих механизмов с классами механизмов псевдокритериального выбора, исследованы соответствующие парнодоминантно представимые функции выбора.

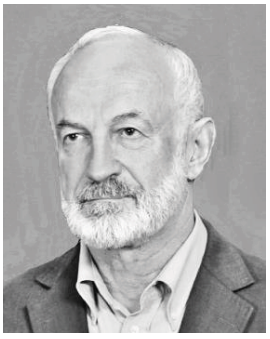
Ф.Т. Алескеровым впервые поставлен вопрос о степени манипулируемости процедур голосования в случае множественного выбора. Сейчас эта проблема активно исследуется, приведены известные и предложены новые схемы расширения предпочтений, позволяющие сравнивать всевозможные коллективные выборы для любого числа альтернатив. Такой подход дал возможность с помощью компьютерных экспериментов оценить степень манипулируемости и эффективность манипулирования схем агрегирования с учётом множественного выбора.

7.4. Управление проектами и программами

Управление проектами является синтетической дисциплиной, объединяющей целостную структуру управления планированием и процессом принятия решений в условиях неопределённости. Её грамотное использование требует полного анализа перспектив, применения здравого смысла, правильной организации, эффективного коммерческого и финансового управления, чётко организованного процесса документирования и всеобъемлющего понимания принципов управления. Она включает в себя весь комплекс вопросов управления различными функциональными областями (содержание проекта, сроки, стоимость, риски, персонал и др.).

В настоящее время управление проектами является признанной во всём мире методологией и особой профессиональной областью в бизнесе и предпринимательстве, эффективно работающей во всех сферах деятельности. Старт исследований в области управления проектами можно отнести ещё к началу 60-х годов. Тогда, в Советском Союзе, это направление называлось «сетевое планирование и управление» (СПУ). Институт проблем управления (в то время – Институт автоматики и телемеханики, ИАТ) сразу занял лидирующее положение в этой области. Была создана лаборатория под руководством академика А.А. Воронова, которая занималась задачами СПУ. В неё входили В.Н. Бурков, Б.Д. Ланда, С.Е. Ловецкий, А.И. Тейман, В.Н. Чернышёв. Достаточно сказать, что на первом конгрессе в 1967 г. в Вене, когда была создана Международная ассоциация по управлению проектами (тогда она называлась «ИНТЕРНЕТ») был представлен пленарный доклад А.А. Воронова и В.Н. Буркова о развитии методов СПУ в Советском Союзе. В том же 1967 г. вышла одна из первых книг по моделям СПУ «*Сетевые модели и задачи управления*» (авторы: *В.Н. Бурков, Б.Д. Ланда и др*.).

В 70-х, 80-х годах методы управления проектами широко применялись в ИПУ при выполнении хоздоговорных работ. В 90-х годах и в начале XXI века в Институте совместно с ведущими специалистами по стратегическому менеджменту (В.А. Ириков, В.Н. Тренев) была создана комплексная технология разработки систем управления развитием (технология СУР). Эта технология основана на трёх базовых принципах: программно-целевое управление, проектное управление и умное управление (В.Н. Бурков, Д.А. Новиков). Опытная проверка технологии СУР была осуществлена совместно с ведущими консалтинговыми фирмами (РОЭЛ-консалтинг и др.) на более чем 100 предприятиях и в десятках регионов. Эта технология применялась в разработке систем обеспечения безопасности при уничтожении химического оружия, программ обеспечения безопасности дорожного движения, систем управления развитием компетентностей преподавателей вузов и др. В настоящее время технология СУР развивается в



Валерий Алексеевич Ириков

направлении интеграции с современными цифровыми технологиями на базе оптимизационных моделей управления проектами и умных механизмов теории активных систем.

В XXI веке продолжились исследования по разработке методов решения задач в управлении проектами. В частности, И.В. Бурковой разработан новый эффективный метод решения оптимизационных задач управления проектами – метод сетевого программирования, обобщающий метод динамического программирования Беллмана и метод множителей Лагранжа.



Ирина Владимировна Буркова

Работы по оптимизационным моделям управления проектами ведутся в лаборатории «Активных систем» (В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.К. Еналеев, В.О. Корепанов, Д.Н. Федянин, А.В. Щепкин и др.), лаборатории «Управления развитием крупномасштабных систем» (В.В. Топка), а также в близком к управлению проектами направлении – в лаборатории «Теории расписаний» А.А. Лазарева.

В последнее время возродился интерес к зависимостям (между работами проекта или проектами программы) – важным элементам эффективного сетевого планирования. Хорошо известны жёсткие зависимости, обязательные к выполнению. Однако существуют еще и мягкие зависимости, выполнение которых не обязательно, но приводит к сокращению времени или снижению затрат следующего проекта (или следующей работы в проекте). Введённые ещё в начале XXI века они оказались разработаны достаточно слабо. Интерес к ним ввернулся совсем недавно (в 2023 г.), в результате получено несколько результатов, например, алгоритм определения критического пути с учётом мягких зависимостей (В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.В. Щепкин) позволяющих подойти к их использованию более продуманно. Параллельно в этом направлении появились и новые задачи для исследования.

7.5. Управление инновациями

Направление, связанное с управлением инновациями, организационно оформилось в Институте относительно недавно благодаря созданию в декабре 2010 г. лаборатории «Экономической динамики и управления инновациями». С 2006 г. в Институте проводится ежегодная международная научно-практическая конференция «Управление инновациями» и не реже двух раз в год проходит круглый стол «Друкеровские чтения», работает еженедельный общемосковский научный семинар «Информационная экономика и управление инновациями».

Исследования в области управления инновациями в качестве методологической основы опираются на информационную экономику – область экономической науки, предметом которой выступают процессы создания, овеществления, обращения и применения научно-технической информации. Применение научно-технической

информации в производственных процессах, а также в процессах принятия технологических и управленческих решений называется инновацией.

В рамках данного направления исследований разработана парадигма приоткрытых инноваций, исходящая из факта доступности технических и организационно-управленческих решений для «подхватывания» и копирования и внедрения лишь на определённых стадиях их жизненного цикла, тогда как другие стадии сопровождает и реализует сама фирма-инноватор, инициирующая данную инновацию.

Разработана зодиакальная модель жизненного цикла технологий, включающая 12 последовательных этапов. В рамках данной модели связь инновационных процессов с компетенциями агентов, осуществляющих каждый этап жизненного цикла, объясняет логику разделения труда между агентами, действующими в сфере наукоёмких производств.

В рамках исследования циклических процессов в экономике (*circular economy*) в лаборатории разработаны модели цикла принятия решений и цикла формирования маркетинговых стратегий. Эти модели, имеющие циклический характер, позволяют объяснить нелинейный характер зависимостей между изменением управляющих и управляемых переменных, наблюдаемый в реальной хозяйственной практике.

В лаборатории разрабатываются многочисленные модели взаимного замещения информации и других, неинформационных ресурсов. Эти модели применяются к анализу различных отраслевых рынков, в частности, в энергетике, авиационной промышленности, сфере услуг, оказываемых населению, и др. Значимые результаты в данной области получены д.э.н. А.Н. Шмелёвой, сотрудниками лаборатории д.э.н. С.В. Ратнер, д.э.н. И.Ю. Швец, д.э.н. В.В. Клочковым, д.э.н. Я.С. Матковской, а также ранее работавшими в лаборатории к.э.н. Н.П. Горидько, к.э.н. А.В. Каревым, д.э.н. М.Ю. Архиповой.

Мировой экономический кризис 2008–2009 гг. и последовавшая за ним коронакризис 2020–2021 гг., спровоцированный пандемией COVID-19, стимулировал исследования макроэкономических процессов и макроэкономических закономерностей управленческой экономики.

В области экономической динамики, макроэкономики и макроэкономической политики разработана парадигма макроэкономического неравновесия, исходящая из того, что неравновесные состояния макросистем (рецессионный и инфляционный разрывы) устойчивы и не устраняются под воздействием циклических колебаний экономической конъюнктуры, что макросистемы не стремятся стихийно к обретению равновесных состояний, что спрос и предложение на локальных рынках не совпадают, объём инвестиций не равен объёму сбережений, а валовой доход не распадается на инвестиции и сбережения.



Нина Павловна Горидько

В рамках парадигмы макроэкономического неравновесия разработаны модели, выявляющие немонотонные зависимости между важнейшими макроэкономическими параметрами в различных макросистемах. В частности, на примере нескольких десятков стран в различные временные

периоды исследована среднесрочная связь между объёмом денежной массы и темпом инфляции (*U*-образная кривая Горидько), позволяющая выявить объём денежной массы, при котором темп инфляции минимален. Разработана концепция NSEGRI (*non-slowing economic growth rate of inflation* – не замедляющий экономический рост уровень инфляции), позволяющая обнаружить связь между темпом инфляции и экономическим ростом и выявить годовой темп инфляции, при котором темп прироста ВВП максимален (для современной экономики России он составляет приблизительно 15,5 %). Исследуется влияние темпов инфляции на углубление межрегиональной дифференциации, для ряда стран построены среднесрочные модели, позволяющие оценить уровень инфляции, при котором дисперсия среднедушевых ВРП* регионов минимальна (в современной экономике России уровень инфляции составляет порядка 12,5 %).

Пионерские результаты в данной области получены сотрудниками лаборатории д.э.н. М.Ю. Архиповой, к.э.н. Н.П. Горидько, д.э.н. С.В. Ратнер, к.э.н. Н.А. Росляковой. В разработку данной проблематики активно вовлекаются докторанты и аспиранты.

Помимо результатов в области управления инновациями и экономической динамикой проводимые коллективом исследования внесли вклад в развитие различных направлений и областей экономической и управленческой науки: информационную экономику, общую теорию динамических систем, институциональную экономику, региональную экономику, маркетинг, экономическое прогнозирование, экономическую теорию риска, экономику и организацию отраслей и рынков, теорию компетенций, стратегический менеджмент.

В частности, в области стратегического менеджмента разработана матрица стилей руководства, применение которой к развитию конкретных организаций существенно облегчает диагностику проблем и даёт возможность выработать обоснованные решения в области мотивации и управления персоналом. Разработаны качественные модели управления изменениями, позволяющие проводить систематический анализ сильных и слабых сторон организации и выявлять ключевые звенья успеха, развитие которых способно принести желаемый результат.

При этом не только активно используются различные инструменты количественного и качественного анализа и моделирования: модели параметрической и непараметрической статистики (в частности, регрессионный анализ и анализ среды функционирования – *DEA*), когнитивное моделирование слабоформализуемых процессов, функционально-стоимостной анализ, методы стратегического менеджмента, включая контроллинг, и др., – но и делается вклад в развитие многих из этих методов. Особое внимание уделяется исследованиям, позволяющим обеспечить технологический и экономический суверенитет Российской Федерации.

С 2017 г. разрабатываются основы функционально-институционального анализа, позволяющего, в частности, верифицировать процесс принятия управленческих решений, в том числе – прогнозировать последствия реализации принятых решений и на основе применения аппарата институциональной экономики выявлять управ-

* ВРП – валовой региональный продукт.

ленческие дисфункции и ловушки, способные заблокировать реализацию этих решений либо её деформировать.

При помощи моделей функционально-институционального анализа исследовательский коллектив лаборатории проводит изучение управленческих ловушек, в частности, в управлении наукой и образованием (в том числе в системе аттестации научных кадров), в управлении качеством жизни населения, миграционными процессами, технологическими сдвигами.



Роберт Михайлович Нижегородцев

Предложенная схема функционально-институционального анализа позволяет обнаружить сферы, в которых необходимо обеспечить импортозамещение институтов, и своевременно выявить барьеры, вызывающие провалы институтов. В частности, во многих случаях формализация институтов вызывает ухудшающий отбор (*adverse selection*) на локальных рынках, что в полной мере проявляется в сферах управления наукой, образованием, здравоохранением и в других областях современной экономики России.

Исследования в данной области проводятся под руководством зав. лаб. д.э.н. Р.М. Нижегородцева.

7.6. Управление социальными и политическими системами

Одним из важных объектов управления являются социально-политические системы различного уровня (страна, регион, город и т.д.). Вопросы управления такими системами изучаются в Институте, главным образом, в рамках двух научных направлений (отчасти взаимосвязанных).

Истоки первого из этих направлений лежат в теоретических моделях принятия решений, которые разрабатывались в лаборатории выдающегося учёного д.т.н., проф. Марка Ароновича Айзермана, а ныне продолжается его учениками.

Развивались дескриптивный и аксиоматический подходы к агрегированию предпочтений и к формированию коллективного выбора, исследовались формальные структуры, используемые, в частности, при выборе и анализе политических решений. В основу построения теории положено понятие функции выбора, то есть «внешнее», «входо-выходное» описание выбора. При таком подходе процедуры выбора рассматриваются как средства порождения тех или иных классов функций выбора (областей в пространстве функций выбора). Описание алгоритмов выбора не ограничивается классическими методами, опирающимися на парные сравнения вариантов. Более того, анализом ряда примеров показана необходимость учёта групповых влияний вариантов, то есть всего «контекста выбора». Систематически

исследованы неклассические функции выбора. Области в пространстве функций выбора описаны при помощи механизмов, использующих гиперотношения и обобщённое понятие доминирования.

Были разработаны и исследованы многомерные индексы для анализа поляризации в политических органах. Представлено несколько версий индекса поляризованности в зависимости от разных функций расстояния. Рассмотрены основные свойства индексов. Численно изучено поведение индекса поляризованности в случае «равномерного» распределения групп в единичном квадрате и единичном трёхмерном кубе. С помощью построенного индекса исследована поляризованность в Государственной Думе Российской Федерации (1994–2003 гг.). При анализе была использована ранее разработанная на основании поименных голосований депутатов двумерная модель Российской Государственной Думы. Результаты применения многомерного индекса поляризованности согласуются с соответствующими политическими событиями. Показано, что поляризованность в Государственной Думе была сопряжена, главным образом, со степенью напряжённости в её взаимоотношениях с исполнительной властью. В частности, чем более выраженной была конфронтация между законодательной и исполнительной ветвями власти, тем менее поляризованной была Государственная Дума, и наоборот.

Ряд исследований был посвящён анализу индивидуальной и коалиционной манипулируемости известных схем агрегирования предпочтений, то есть индивидуального и коалиционного манипулирования избирателей. При оценке степени манипулируемости коллективного выбора возникает несколько проблем. Первая и самая главная – большая вычислительная сложность расчётов. Чтобы решить эту проблему, могут вводиться разные предпосылки, упрощающие исследования и расчёты. Одной из таких предпосылок может быть устранение несравнимости путём выбора одной из нескольких выигрывающих альтернатив. Было предложено устранять несравнимость в соответствии с алфавитным порядком, либо несравнимость альтернатив устранялась путём введения предпосылки о равновероятности появления каждой из выигрывающих альтернатив и дальнейшего случайного выбора одной из них. Впервые был рассмотрен множественный выбор альтернатив, то есть если при голосовании несколько альтернатив показывали наилучший результат, то все они входили в коллективный выбор.

Предложены новые модели сетевого анализа, в частности, новые индексы центральности. Эти модели были применены к анализу проблем международной миграции, экспорта/импорта вооружений, террористических актов и др. Миграционные процессы представлены в виде сети (взвешенного орграфа), в которой вершинами являются страны, а ребра соответствуют миграционным потокам между ними. На основании данных ООН о ежегодных миграционных потоках между странами (версии 2008, 2015 гг.) были обнаружены страны, вносящие наибольший вклад в сети международной миграции.

Разработана компьютерная система оценки качества условий жизни населения. Она предназначена для обеспечения органов управления различных территориальных образований инструментом для подготовки и анализа современной актуальной, надёжной и достоверной информации о процессах и результатах жизнедеятельности населения. Система даёт возможность рассчитывать прогностические модели оценки уровня жизни населения муниципальных округов, районов, городов и регионов.

Опубликованы 5 монографий по указанным проблемам в ведущих издательствах России и мира.



Фуад Тагиевич Алескеров

В настоящий момент работы ведутся под руководством зав. лаб. «Теории выбора и анализа решений им. М.А. Айзермана» д.т.н., проф. Ф.Т. Алескерова.

С начала XXI века в лаборатории «Активных систем» бурно развивается второе направление. В этой лаборатории традиционно изучались модели организационных систем, имеющим вполне определённую иерархию: управляющий орган (центр) – субъекты управления (агенты). При этом рассматриваются разные типы управления, в том числе – информационное управление, состоящее в формировании у агентов такой информированности, на основании которой они выбирают желательные для центра действия. В какой-то момент стало ясно, что информационное влияние, управление и противоборство в настоящее время часто осуществляются в рамках не иерархических, а сетевых структур. Важнейшими структурами, обеспечивающими информационное влияние, являются социальные медиа – онлайновые социальные сети (*Facebook*, *ВКонтакте*, *Одноклассники* и др.), форумы, блоги и т.п.

В 2010 г. вышла первая русскоязычной монография по данной теме *Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. – М.: Физматлит, 2010. – 228 с.*

В ходе исследований был разработан концептуальный подход к анализу онлайновых социальных сетей. В русле этого подхода социальная сеть понимается как структура, состоящая из множества агентов (пользователей, групп и сообществ) и определённого на нём множества отношений (информационного взаимодействия, знакомства, участия в группах и сообществах). В рамках этих отношений в сети происходят различные информационные процессы.

Для теоретических и практических целей необходимо учитывать, что разные типы связей имеют различное содержательное наполнение. В ходе исследования связей дружбы и связей комментирования пользователей русскоязычного сегмента сети *Facebook* выявлен ряд статистических взаимосвязей между ними. Показано, что связь комментирования встречается гораздо реже, чем связь дружбы; что если пользователи дружат, то лишь в одном случае из двадцати пяти между ними есть связь комментирования; что если пользователи дружат и у них имеется общий друг, то в одном случае из шести между ними есть связь комментирования. Менее чем в половине случаев комментирование означает наличие связи дружбы, для изучения распространения информации в сети через комментирование учёта связей дружбы недостаточно (Д.А. Губанов, А.Г. Чхартишвили).

Основными задачами информационно-аналитической поддержки пассивной и активной работы с социальными сетями являются мониторинг и анализ социальных сетей (для достижения понимания происходящих в них процессов), прогнозирование и управление (для приведения социальной сети в требуемое состояние). Важным элементом эффективного решения этих задач является расчёт влияния пользо-

вателей. Влиятельные пользователи во многом определяют распространение информации и формирование мнений, поэтому неудивительно, что ответ на вопрос «какие пользователи социальной сети самые влиятельные?» интересует как теоретиков, так и практиков. В ходе исследований разработан новый подход к определению влиятельности пользователей социальной сети, основанный на двух составляющих – модели распространения действий и учёте точки зрения центра. Этот подход был применен для расчёта влиятельности в реальных онлайновых социальных сетях (Д.А. Губанов, А.Г. Чхартишвили).

Для реализации предложенных методов и моделей были разработаны алгоритмы и программы анализа онлайновых социальных сетей, в том числе для выявления активных групп и сообществ, для расчёта влиятельности пользователей и оценки уязвимости пользователей к информационным воздействиям, для выявления инициаторов обсуждений в сети (Д.А. Губанов, А.Г. Чхартишвили).

Была предложена модель распространения активности в сети с разными типами агентов и активностей (Д.А. Губанов, Л.Ю. Жилякова).

Предложена новая метрика для количественного описания эффекта информационной сепарации пользователей онлайновой социальной сети – индекс бинарной сепарации. С его помощью можно установить, в какой степени пользователи находятся в «эхо-камерах» – лишены доступа к идеологически противоположной информации. Проведены сбор данных и расчёт индекса бинарной сепарации в социальной сети *ВКонтакте* (И.В. Козицин, А.Г. Чхартишвили).

Предложены модели для автоматического определения политических взглядов российских пользователей сети *ВКонтакте*, в основе которых лежат методология машинного обучения и микро-подход к анализу данных сети ВКонтакте. Рассмотрены различные сферы применимости построенных алгоритмов. Одна из них – мониторинг общественного мнения: в результате апробации обученных моделей к выборке, состоящей из 22 млн. цифровых отпечатков аккаунтов совершеннолетних пользователей.

В настоящий момент работы ведутся под руководством зав. лаб. д.ф.-м.н. А.Г. Чхартишвили.



Александр Гедеванович Чхартишвили

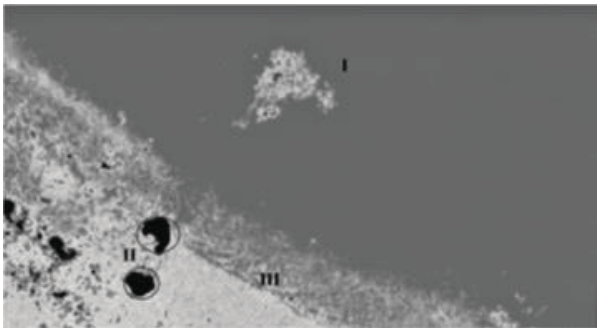
7.7. Управление экологической безопасностью

С 1991 по 2004 гг. Институт выполнял проект «Социальные, экономические и правовые механизмы управления безопасностью» в рамках подпрограммы «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учётом риска возникновения природных и техногенных катастроф» Федеральной целевой научно-технической програм-

мы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения».

В рамках этого проекта разработаны процедуры комплексного оценивания уровня экологической безопасности как отдельных хозяйственных объектов, так и прилегающих к ним территорий. Разработаны экономические механизмы управления экологическими рисками и проведен анализ функционирования хозяйственных объектов при действии этих механизмов.

На основе полученных результатов разработана комплексная информационная система экологического мониторинга, предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций на объектах региона экосистемы г Туапсе ОАО «НК «Роснефть-Туапсинский нефтеперерабатывающий завод» (ТНПЗ). Создан ряд типовых экономических и организационных механизмов обеспечения экологической безопасности с учётом минимизации критериев экологического риска для природной среды и здоровья населения. Решение проблемы обеспечения экологической безопасности в регионе г. Туапсе позволило прекратить поступление токсических веществ в подземные воды и выбросы в атмосферу, что оздоровило санитарно-эпидемиологическую и экологическую обстановку в регионе: на 20 % по выбросу загрязняющих веществ и на 25 % по снижению риска аварийной ситуации. Безвозвратные потери нефти на ТНПЗ – одни из самых низких в отрасли и в 2002 г. составили 0,8 %. В 2001 г. решением главного государственного санитарного врача России на ТНПЗ были сокращены размеры санитарно-защитной зоны с 1500 м до 500 м.



Нефть на водном полигоне

Совместно с Федеральным горным и промышленным надзором России и НТЦ «Промышленная безопасность» разработаны экономические и организационные механизмы в системе обеспечения промышленной безопасности. Применение этих механизмов позволило минимизировать суммарные затраты на обеспечение требуемого уровня безопасности (с учётом ожидаемого ущерба), и обеспечить достоверность отчётной информации о состоянии и развитии системы промышленной безопасности на предприятиях России.

Сотрудники Института приняли участие в подготовке проектов законов Российской Федерации «О мерах безопасности и защиты граждан от аварий, катастроф и стихийных бедствий» и «Об аварийно-спасательных службах России».

Результаты исследований опубликованы в многотомном издании «Безопасность России» и в трёх монографиях (см., в частности, *В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Щепкин*. *Механизмы управления эколого-экономическими системами. – М.: Физматлит, 2008. – 243 с.*).

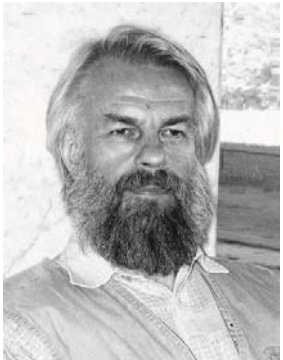
В Институте активно развиваются теории и методы построения систем экологического мониторинга объектов повышенной опасности, что позволило в 2003–

2008 гг. принять участие в работах по реализации Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации».

В рамках работ по этой программе проведены исследования и разработка структуры и состава комплекса программно-технических средств информационно-аналитического центра (ИАЦ) системы производственного экологического мониторинга (ПЭМ), беспроводной сети сбора информации от территориально распределённых автоматических пунктов контроля, включая каналы сбора и передачи данных. Выработанные решения явились типовыми для всех объектов уничтожения химического оружия (УХО), обеспечили безотказную работу систем ПЭМ в течение всего срока эксплуатации объектов УХО.

ИАЦ позволяет решать следующие основные задачи:

- сбор, обработка, накопление, отображение, анализ и документирование экологических и метеорологических параметров окружающей среды объекта УХО;
- оценка полученных результатов наблюдений на соответствие критериям контроля, установленным для данного объекта мониторинга на основании нормативных документов и соответствующих требований промышленной и экологической безопасности;
- оповещение о создающихся нештатных или аварийных ситуациях вредных или опасных для здоровья людей и других живых организмов;
- формирование и оперативная передача информации в установленном и утверждённом порядке персоналу объекта для принятия решений по снижению отрицательного влияния объекта УХО на окружающую среду, а также федеральным и региональным органам исполнительной власти;
- математическое моделирование процессов распространения отравляющих и загрязняющих веществ в атмосфере в штатных и аварийных ситуациях;
- формирование прогнозов вероятных последствий деятельности объекта УХО;
- формирование рекомендаций по выбору вариантов действий при возникновении нештатных и аварийных ситуаций.



Валентин Григорьевич Лебедев

Информация с автоматических стационарных постов контроля, химико-аналитической лаборатории, передвижных лабораторий, с метеостанции по проводным и беспроводным линиям связи в режиме реального времени поступала в ИАЦ, позволяя оперативно отслеживать происходящие изменения и вырабатывать решения, направленные на нормализацию экологической обстановки.

ИАЦ системы ПЭМ успешно реализованы на объектах УХО в п. Горный Саратовской области, в п. Марадыковский Кировской области, в г. Камбарка Удмуртской республики (д.т.н. В.Г. Лебедев, к.т.н. Ю.С. Легович, к.т.н. Е.Л. Кулида, А.Ю. Ефремов, И.П. Крюкова).

Потенциальная опасность технологического объекта УХО, сложность программно-аппаратного обеспечения систем управления технологическими процессами и ответственность за принимаемые решения создают зна-

чительные трудности в работе технологического и оперативного персонала и предъявляет исключительно высокие требования к уровню его подготовки.



Юрий Сергеевич Легович

Для объекта УХО, расположенного в районе п. Горный Саратовской области, сотрудниками Института был создан компьютерный тренажёрный комплекс (КТК), предназначенный для обеспечения компьютерного тренинга оперативного персонала, работающего с основными подсистемами АСУ ТП объекта УХО, для выработки у оперативного персонала навыков безопасного и эффективного управления технологическими процессами путём воссоздания и анализа ситуаций, которые могут возникнуть как в штатном режиме, так и при неполадках и аварийных ситуациях.

КТК создан на основе разработанной методологии обучения оперативного персонала управления технологическими процессами УХО с помощью компьютерных тренажёров и содержит динамические модели процессов, обеспечивающие адекватную реакцию моделируемого объекта на произвольные вмешательства участников тренинга.

В КТК реализованы:

- имитация рабочих мест оперативного персонала центрального пульта управления объекта УХО;
- различные режимы функционирования КТК, а именно: режим консультации обучаемых с системой, режим приобретения знаний, режим взаимодействия с инструктором, режим проверки знаний обучаемых, режим оценки знаний, режим создания тренировочных упражнений и др.;
- динамические модели процессов в химическом реакторе и модели основных технологических узлов и агрегатов;
- различные режимы работы обучаемых: общий (все обучаемые работают с общей моделью), индивидуальный (каждый обучаемый работает со своей моделью), групповой (участники группы совместно работают с одной моделью);
- различные режимы работы технологического оборудования (подготовка технологического узла к пуску, пусковые операции, штатная работа, контроль и регулирование узла во время работы, останов, аварийные ситуации);
- система поддержки инструктора, включающая автоматизацию составления сценарных алгоритмов тренинга, задания внутренних и внешних возмущений, взаимодействие с одним или несколькими обучаемыми, автоматический контроль за правильностью выполнения заданий с учётом отведённого интервала времени, автоматическую оценку знаний обучаемых по результатам выполнения тренировочных упражнений и тестовых вопросов и т.д.;
- полное протоколирование работы обучаемых, что позволяет воспроизвести любой сеанс работы КТК;
- изменение масштаба времени (реальное время, ускорение медленных процессов, замедление быстропротекающих процессов).

В основе создания КТК лежит построение общей формальной модели предметной области, отражающей специфику технологического процесса УХО, системы управления, механизмов функционирования основных элементов технологического процесса и т.д.

Созданный и успешно прошедший государственные испытания КТК является эффективным средством подготовки оперативного персонала управления технологическими процессами объекта УХО и их аттестации, так как позволяет отработать действия обучаемых в штатных и экстремальных ситуациях на программных моделях, восстановить профессиональные навыки и знания в условиях вахтового метода обслуживания производства, провести автоматический анализ действий обучаемых и оценить их профессиональную пригодность к работе по управлению технологическим процессом объекта повышенной опасности.



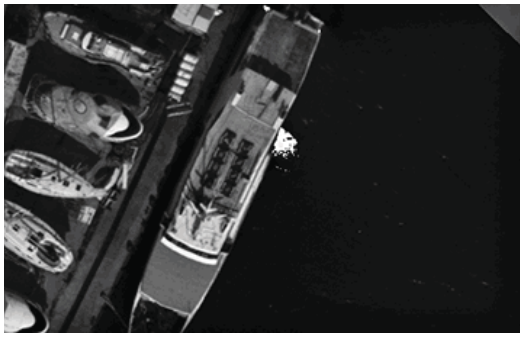
Елена Львовна Кулида

КТК внедрены для обучения персонала объекта УХО в ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологий» и в Саратовском военном институте радиационной, химической и биологической защиты (д.т.н. В.Г. Лебедев, к.т.н. Ю.С. Легович, к.т.н. Е.Л. Кулида, А.Ю. Ефремов, к.ф.-м.н. Д.Б. Рождественский, Д.Ю. Максимов, И.П. Крюкова).



Константин Анатольевич Вытовтов

С 2021 г. под руководством д.т.н. К.А. Вытовтова в Институте развивается новое направление – экологический мониторинг водоёмов с использованием беспилотных летательных аппаратов. В основе данных исследований лежит предложенный научной группой Института метод обработки изображений, позволяющий идентифицировать нефтепродукты на поверхности водоемов. Преимуществом предлагаемого подхода является высокая точность за счёт комбинации методов математического моделирования и машинного обучения, что позволяет определять не только толстые нефтяные пятна, но и тонкие нефтяные плёнки. Кроме этого, метод позволяет идентифицировать небольшие по размеру загрязнения за счёт более высокого разрешения мультиспектральных камер беспилотных летательных аппаратов по сравнению со спутниковыми снимками. Научной группой Института (д.т.н. К.А. Вытовтов, д.т.н. Е.А. Барабанова, к.т.н. Ю.Д. Воробьев, А.Н. Мигачев) проведены эксперименты на водных



Результат обработки в ГИС «Нева» слива с корабля

полигонах городов Анапа, Астрахань, Красный Яр и Новороссийск, а также лабораторные исследования спектров образцов с загрязнениями. На основе данных измерений создана база данных мультиспектральных снимков и спектров водной поверхности, полученных в разное время года, суток и при различных климатических условиях. Полученные изображения обрабатываются в геоинформационной системе «Нева», разработанной под руководством Ю.Д. Воробьева, а также в программе для поканальной обработки снимков мультиспектральной камеры.

Полученные результаты позволили в 2022 г. получить грант Фонда содействия инновациям на реализацию проекта «Разработка системы экологического мониторинга водной поверхности с помощью БПЛА методом мультиспектральной съемки с использованием модели искусственного интеллекта».

7.8. Управление в биологии и медицине

В настоящее время проблема управления сложными биологическими объектами и процессами в них – одно из наиболее актуальных направлений теории управления. В современных мировых индексах цитирования первые двадцать мест безраздельно отданы научным журналам в этой области.

Работы по применению методов теории управления в биологии и медицине стали вестись в Институте с начала 60-х годов. Сначала в ИАТе занимались математическим моделированием процессов управления в отдельных системах организма: в системе кровообращения, поджелудочной железы, – исследовали динамику развития патофизиологических процессов на уровне органов, организма, изучали механизмы восприятия. Затем приступили к анализу совместного функционирования естественных и искусственных систем, популяций и даже системы здравоохранения.



Марк Аронович Айзерман

Одним из первых в Институте, кто заинтересовался принципами управления в живых системах в начале 60-х годов, был Марк Аронович Айзерман. Для проведения работ этого направления М.А. Айзерман организовал специальную группу по «бионике», которая состояла, в основном, из инженеров-физиков, специалистов в области автоматического управления, одного физиолога и одного врача. Группа М.А. Айзермана изучала принципы управления в живых системах на примере управления движениями у развитых животных и человека. Для экспериментальных работ на Каланчёвской улице был создан виварий, где содержались подопытные кролики, кошки и крысы. В комнатах лаборатории стояли аквариумы с рыбками, на поведении которых в специальных экспериментах исследовались механизмы управления в такой «системе-коллективе».

Марк Аронович сосредоточил внимание на том, как в живых системах решают-

ся простейшие с инженерной точки зрения задачи управления – задачи поддержания неизменных значений параметров. При этом рассматривались как естественные системы управления мышечной активностью, так и искусственно созданные (посредством замыкания животного внешним контуром обратной связи). Постановка вопроса оказалась удачной: большая часть всей дальнейшей многолетней деятельности этой группы строилась как исследование процесса управления движениями. Этот этап работы позволил выбрать в качестве основного сюжета для дальнейшего изучения систему управления мышечной активностью человека. В дальнейшем эти исследования оформились в три основных направления:

- выявление механизмов управления мышечной активностью в условиях поддержания неизменными (заданными) значений параметров;
- выявление механизмов управления простейшими односуставными движениями;
- изучение нарушений в механизмах управления мышечной активностью, приводящих к двигательной патологии.

В качестве основной патологии рассматривались треморные отклонения от нормы, вызванные заболеваниями ЦНС (болезнь Паркинсона, эссенциальный тремор, идиопатическая цервикальная дистония и т.п.). Также изучалось влияние на человека электромагнитных полей различного диапазона, радиации и ультразвука. Для проведения исследований был специально разработан спектрально-статистический метод анализа электрической активности мышц. Работы этого этапа проводились совместно со специалистами НИИ неврологии РАМН, Московского областного научно-исследовательского клинического института им. М.Ф. Владимирского (ГУ МОНИКИ), Института биофизики Министерства здравоохранения; Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова (Санкт-Петербург); Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии.

С середины 70-х годов круг проблем управления в медико-биологических системах, которыми занимались в Институте, существенно расширился. Продолжались исследования по управлению мышечной активностью. В 1974 г. вышла монография *М.А. Айзерман, Е.А. Андреева, Э.И. Кандель и Л.А. Тененбаум. Механизмы управления мышечной активностью. Норма и патология*.



Ольга Ефимовна Хуторская

В настоящее время работы этого направления реализовались в виде аппаратно-программных комплексов, помогающих врачам ставить диагноз в сложных случаях и на ранней стадии заболевания, проводить мониторинг состояния больных и оценивать эффективность проводимых лечебных мероприятий. В группе под руководством О.Е. Хуторской разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), предназначенный для использования в неврологической клинике. Комплекс позволяет проводить дифференциальную диагностику заболеваний, имеющих схожую симптоматику (особенно на ранних стадиях заболеваний), проводить мониторинг состояния пациента в процессе лечения, оценивать эффективность различных форм лечения больных (медикаментозных, хирургических, электростимуляции и т.п.), а также выполнять оценку действия фармакотерапии на

различную симптоматику в процессе индивидуального подбора лекарственных препаратов. В результате исследований выявлены биомаркеры реакции центральной нервной системы на воздействие электромагнитных полей (О.Е. Хуторская).

Также разработан и использован при диспансерных обследованиях персонала Калининской и Ленинградской АЭС метод выявления доклинической реакции центральной нервной системы человека на различные воздействия малых доз (мощностей): радиацию, электромагнитные поля СВЧ и КВЧ диапазонов, ультразвук, компьютеры, имеющие широкий спектр излучений, а также сотовые телефоны. Метод позволяет проводить биологическую дозиметрию, оценку экологического состояния среды различных регионов и выявлять группы риска среди людей, профессионально связанных с радиационным фактором.



Никита Владимирович Позин

С конца 60-х годов в Институте в лаборатории Н.В. Позина начались исследования по математическому моделированию нейронных структур головного мозга. Впоследствии эти работы шли в двух направлениях: планомерное изучение поведенческих процессов и процессов слухового восприятия; разработка математических моделей нейронных полей и анализ распространения по ним волн возбуждения. Последнее направление стимулировало исследования волновых явлений, характерных для сердечно-сосудистой системы (эти работы велись в лаборатории Б.Я. Когана), и для пульсовой волны лучевой артерии. Работы по пульсовой диагностике выполнялись в лаборатории Д.И. Агейкина. Были получены новые результаты в пульсовой диагностике (А.А. Десова, А.А. Дорофеюк). В 1978 г. в издательстве «Наука» была опубликована книга *Н.В. Позин. Элементы теории биологических анализаторов. – М.: Наука, 1978*, посвящённая итогам его многолетних исследований.

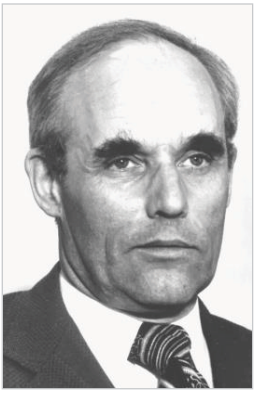
Вопросы, связанные с обработкой и анализом медико-биологической информации, нашли своё отражение и в лаборатории, основанной И.В. Прангишвили, традиционно занимающейся разработкой высокопроизводительных вычислительных систем. Сочетание высокой технологической культуры и широкого научного кругозора позволили ставить и решать разнообразные важные задачи по организации системы мониторинга состояния и процесса лечения больных, по группировке и обработке результатов наблюдений для решения задач диагностики, прогнозирования и управления лечебными процессами. В группе под руководством Г.М. Поповой проведены следующие работы:

- исследование и разработка информационной технологии построения сетевой распределённой системы анализа данных биомедицинских объектов;
- создана методология построения и анализа моделей классификации многомерных объектов медико- биологической природы для решения диагностических задач и, в частности, для ускорения анализа, распознавания и идентификации разных типов клеточных и тканевых структур;

– проведён анализ организации структуры медицинских знаний и методов извлечения знаний для диагностики и лечения заболеваний, а также мониторинга данных о состоянии пациента для управления диагностико-лечебным процессом.

Результаты исследований нашли применение в ряде специализированных организаций. Среди них:

– ФГУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» Росздрава (ФГУ РНЦРР, г. Москва);
– ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский Институт Экспериментальной физики (г. Саров);
– Медицинский Радиологический научный центр РАМН (г. Обнинск);
– Тихоокеанский Океанологический Институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН (г. Владивосток);
– Эндокринологический научный центр РАМН (г. Москва).



Александр Михайлович Петровский

В середине 60-х годов под руководством А.М. Петровского математические методы стали применяться для исследования действия лекарственных препаратов, моделирования работы поджелудочной железы, системы кровообращения, изучения проблемы управления искусственным сердцем.

В рамках этих исследований в 60-70-х годах был проведён анализ гомеостатических систем в организме человека и животных (В.Н. Новосельцев). Одновременно выполнялся цикл исследований по инженерной физиологии – математическому моделированию систем искусственного жизнеобеспечения (искусственное сердце, искусственная поджелудочная железа) и систем защитного снаряжения (терморегуляция у водолазов на континентальном шельфе).

Эти работы дали старт исследованиям в области гомеостаза организма и разработки искусственных внутренних органов. В 1968 г. в издательстве «Медицина» вышла книга *В.И. Шумаков, В.Н. Новосельцев, М.П. Сахаров и Е.Ш. Штенгольд. «Математическое моделирование физиологических систем организма»* – первая монография, отразившая результаты работ Института по изучению проблем управления в биологии и медицине.

С конца 60-х годов под руководством А.М. Петровского также начались работы по математическому моделированию процессов развития популяции опухолевых клеток. Работы проводились совместно с Медицинским радиологическим научным центром РАМН (г. Обнинск), Институтом экспериментальной химиотерапии Российского Онкологического научного центра РАМН, Институтом биохимической физики им. Н.М. Эммануэля РАН. В результате были созданы математические модели, адекватно описывающие развитие опухолевого процесса без лечения (к.т.н. Е.Л. Оркина), после лучевого воздействия (чл.-корр. РАМН В.К. Иванов) и после введения химиотерапевтических препаратов (к.б.н. Н.А. Бабушкина). Разработанные математические подходы позволяют получать зависимости «доза – эффект» для расчёта оптимальной стратегии лечения по различным критериям. Для оценки эффективности лечения были сформулированы критерии, учитываю-

щие не только действие препаратов на опухолевые клетки, но и степень токсического поражения организма. Разработанные математические модели развития опухолевого процесса используются для исследования стратегии лечения онкологических заболеваний новыми методами, основанными на применении магнитных управляемых наночастиц, покрытых противоопухолевыми препаратами, и вирусных вакцин, стимулирующих иммунную систему больного в борьбе с раком.

Проблематика управления здравоохранением была поставлена в 70-е годы самим А.М. Петровским и группой его сотрудников (А.А. Клементьев, И.И. Толмасская, В.К. Ольшанский, П.И. Кицул, А.И. Яшин). В частности, велась разработка обобщённых индикаторов регионального развития, создание медико-демографических моделей населения регионов, развитие диалоговой системы оценки факторов риска здоровью населения. Проблематика управления здравоохранением оказалась востребованной и на уровне международного сотрудничества. В течение ряда лет сотрудники Института изучали вопросы управления в здравоохранении в рамках проекта «Народонаселение» Международного института прикладного системного анализа (IIASA), г. Лаксенбург, Австрия. В то же время в лаборатории А.Я. Лернера, а затем в лаборатории А.М. Петровского, были разработаны новые методы анализа данных, давшие рождение эффективным алгоритмам распознавания образов, нашедшим применение в онкологической практике для дифференциальной диагностики рака (д.т.н. В.Н. Вапник, к.ф.-м.н. А.Я. Червоненкис).

Существенным прорывом в проблеме математического моделирования гомеостаза организма человека явилась монография *В.Н. Новосельцев. Теория управления и биологические системы. Анализ сохранительных свойств. – М.: Наука, 1978*. Институт принимал активное участие в пропаганде научных знаний в этой области. С начала 80-х годов при Большой медицинской энциклопедии был создан редакционный совет по медицинской кибернетике, во главе которого встал член-корреспондент АН СССР С.В. Емельянов (позднее – академик РАН). После избрания С.В. Емельянова действительным членом Академии наук его на посту председателя совета сменил член-корреспондент АН СССР О.И. Авен.



Василий Николаевич Новосельцев

В рамках международного сотрудничества в 1983 г. в Польше вышла монография А. Верыньского и В. Новосельцева, посвящённая моделированию физиологических систем (*Werynski A.*, *Novoseltcev V. Kompartmentowe modelowanie procesow sterowania w systemach fizjologicznych*.). Позже эти работы получили развитие в области токсикологии и анализа острых отравлений.

В 1989 г. в Новосибирске вышла коллективная монография «*Инженерная физиология и моделирование систем организма*» под редакцией *В.Н. Новосельцева*. В монографии подробно рассмотрены вопросы восстановления физиологических функций человека, их защиты от воздействий среды и проблемы моделирования взаимодействия организма со средой. В том же году *В.Н. Новосельцев* опубликовал книгу «*Организм в мире техники. Кибернетический аспект*».



Людмила Арнольдовна Дартау

По мере накопления опыта работы с объектами, включёнными в систему здравоохранения, и решения задач на уровне популяций, расширился круг проблем, исследуемых в Институте в направлении, которое можно сформулировать как управление в слабо формализованных системах. К данному кругу относится мониторинг группового здоровья и выделение групп повышенного риска по заболеваемости и потере здоровья (Л.А. Дартау).

Для целей мониторинга и оценки медико-социального благополучия населения в лаборатории были разработаны компьютерная технология и система «ЭДИФАР» («Экспертный Диалог для Исследования Факторов Риска»). Система установлена в ряде регионов РФ. В дальнейшем эти работы привели к разработке новых принципов организации управления здоровьем, характеризующихся тем, что сам человек становится активным элементом системы управления. По результатам работы этой системы в одной из клиник Москвы в 1999 г. была опубликована монография *Ю.А. Потанин, Л.А. Дартау и О.В. Белоконь «Компьютерная технология ЭДИФАР как средство сбора данных от населения»*. В настоящее время эти принципы практически внедряются в жизнь на муниципальном уровне.

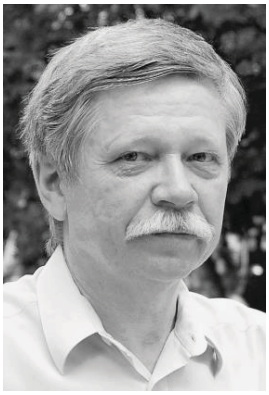
В конце 90-х была решена задача междисциплинарного моделирования сложных медико-биологических систем, нашедшая применение при анализе отравлений ядами (бледной поганки, газами хлор и аммиак). В данном случае основное внимание уделялось моделированию катастроф в сложных системах, причём в качестве одного из реальных вариантов математического понятия «катастрофа» рассматривалась и смерть организма.



Анатолий Иванович Яшин

В начале XXI века работы по управлению в медико-биологических системах расширились до уровня междисциплинарных исследований механизмов старения и смертности у различных видов животных (дрозофила, нематода, средиземноморская плодовая мушка) и у человека. Эти исследования возглавили А.И. Яшин, В.Н. Новосельцев и А.И. Михальский. Исследования ведутся в сотрудничестве с демографами, геронтологами и биологами из разных стран (Германия, США, Дания). В 2012 г. А.И. Яшину была вручена премии *Population Association of America* (PAA) за выдающийся вклад в математическую демографию и анализ популяционных данных. В России эти работы нашли отражение в программе «Наука против старения» общественной организации «За увеличение продолжительности жизни», опубликованной в 2008 г. Сотрудники Института стали авторами раздела «Математическое моделирование продолжительности жизни, долголетия и старения».

В Институте разрабатываются методы анализа здоровья популяции, или, в более широком смысле, её состояния (д.б.н. А.И. Михальский). Развитие теоретических методов, позволяющих корректно осуществлять индивидуальный прогноз на



Анатолий Иванович Михальский

основании наблюдений за популяцией, затрагивает область решения некорректных обратных задач, неклассическую статистику и оформилось в теорию анализа неоднородных популяций (А.И. Михальский, А.И. Яшин). Исследования в области моделирования и статистического анализа гетерогенных популяций легли в основу докторской диссертации к.т.н. А.И. Михальского, которую он защитил в 2010 г., став первым в истории Института доктором биологических наук.

Новое направление исследований, активно развивающееся в настоящее время, связано с междисциплинарным моделированием процессов жизнеобеспечения организма (Ж.А. Новосельцева), стохастическим моделированием течения заболеваний (А.И. Калинкин), анализом сигналов ЭКГ (В.П. Горлищев), поиском генетических закономерностей возникновения онкологических заболеваний (В.В. Цурко, И.В. Петров).

Современные достижения биологии и медицины ставят новые задачи, успешно решаемые в Институте. В настоящее время ведутся исследования, связанные с поиском факторов риска потери здоровья в пожилом возрасте, анализом эволюционно сложившихся механизмов сохранения жизнеспособности человека и других живых организмов. Задачи по оценке эпидемиологических рисков и рисков для здоровья при радиационном воздействии решаются при активном участии ведущих отечественных и зарубежных центров (Медицинский радиологический научный центр РАМН, г. Обнинск; Гейдельбергский университет, Германия). Получены результаты, демонстрирующие роль, необходимость и социальную значимость ранней профилактики здоровья, эволюционную оптимальность соотношения фаз развития и размножения живых организмов и воздействие изменения этого соотношения на продолжительность жизни.

Методы распознавания образов, разработанные в Институте, нашли применение в передовых исследованиях по геномике (А.Я. Червоненкис). Разработана новая концепция управления здоровьем с позиций теории управления (Л.А. Дартау). Развита методология популяционной оценки онкологической заболеваемости и инвалидизации населения, оценки демографических индикаторов (А.И. Михальский). Получено несколько патентов в области исследования речевых сигналов (А.С. Колоколов), управления качеством воздуха на объектах с искусственной средой обитания (А.Ю. Мещеряков). Междисциплинарность проводимых в Институте исследований по управлению в медико-биологических системах, позволила расширить исследования на область продуктивного животноводства (Ж.А. Новосельцева, А.И. Михальский). Формализована и решена задача управления стадом с учётом гетерогенности в длительности продуктивной жизни животных.

Современное развитие средств хранения и обработки информации внесло новое направление исследований в области управления в биологии и медицине, проводимых в лаборатории «Управления по неполным данным», созданной А.М. Петровским и руководимой сегодня чл.-корр. РАН А.А. Галяевым. Возникла

возможность привлекать большие объёмы реальных данных и информации для моделирования и прогнозирования. В частности, в настоящее время активно развивается анализ исторических трендов в продолжительности жизни людей различных специальностей. Одним из крупнейших международных проектов является «*A cross-verified database of notable people, 3500BC-2018AD, Франция*», содержащий более двух миллионов персонализированных записей о выдающихся людях, живших до 2018 г. С 2015 г. совместно с геронтологами и специалистами по демографии, биомедицине в лаборатории анализируются исторические тренды продолжительности жизни человека на основании данных различных справочных и энциклопедических изданий, а также Википедии. Была создана база данных «Личности энциклопедии», содержащая в настоящее время более 700 тысяч записей о выдающихся людях, живших с XVI века, зарегистрированная в Реестре Роспатента. Опубликован ряд статей, посвящённых методологическим вопросам использования данных из справочников и энциклопедий для анализа продолжительности жизни (А.И. Михальский). Ведётся работа по выявлению связи между профессиональным занятием и продолжительностью жизни человека (А.И. Михальский). Также продолжаются работы по математическому моделированию развития заболеваний, выработки оптимальных стратегий лечения, моделирования иммунного ответа (Н.А. Бабушкина), по оптимизации управления носимыми медицинскими приборами на примере инсулиновой помпы (А.И. Михальский, Ж.А. Новосельцева).



Дмитрий Олегович Мешков

Начиная с 2019 г. в новой лаборатории ИПУ РАН «Управления общественным здоровьем» (зав. лаб. д.м.н. Д.О. Мешков) ведутся работы, позволяющие сложить калейдоскоп разрозненных исследований по управлению индивидуальным и популяционным (общественным) здоровьем населения в единую систему, дающую возможность определять, в режиме реального времени, текущие и потенциальные риски здоровью населения, а также необходимость, целесообразность и востребованность разработок новых технологий здравоохранения.

Результатом этих исследований стала концепция проактивного риск-ориентированного управления общественным здоровьем (Д.О. Мешков). Общественное здоровье формируется под воздействием образа жизни, факторов внешней среды, наследственности и системы здравоохранения. В настоящее время основное внимание привязано к системе здравоохранения, хотя её вклад в совокупное здоровье населения составляет не более 10 %. Управление здравоохранением практически во всём мире осуществляется путём реактивного административного перераспределения ресурсов. В настоящее время сформировалась технологическая и инфраструктурная возможность доказательной экспертной поддержки управленческих решений в здравоохранении и смены реактивного управления на наиболее эффективное проактивное риск-ориентированное управление общественным здоровьем. Данная концепция основана на использовании уже

разработанных или разрабатываемых технологий и существующей инфраструктуры для мониторинга и прогноза показателей общественного здоровья, факторов риска и социальных детерминант здоровья, синхронизированных по времени с мониторингом и прогнозом технологий здравоохранения, что позволяет существенно расширить возможности и эффективность управления здоровьем населения в рамках интегрированной социальной системы. Анализ связей между факторами риска и социальными детерминантами здоровья, которые могут способствовать или, наоборот, снижать вероятность развития заболеваний, показал возможность моделирования динамики обращаемости за медицинской помощью (С.Н. Черкасов, А.В. Федяева) больных с сердечно-сосудистыми и онкологическими заболеваниями в зависимости от демографических показателей региона и таких социальных детерминант здоровья, как пол, возраст, образование. Аналогичный подход (мониторинг и прогноз) требуется для технологий управления здоровьем населения, что позволяет обеспечить рациональных подход к разработке новых вмешательств (устройств, лекарств), избежать дублирования и своевременно убрать барьеры доступности (технологические, финансовые, административные) для вывода на рынок именно тех медицинских технологий, которые нужны в настоящее время, могут, с высокой вероятностью потребоваться в краткосрочном или среднесрочном прогнозе, а также повлиять на факторы риска. Поэтому комплексная оценка технологий здравоохранения (ОТЗ) (Д.О. Мешков), моделирование и прогноз медицинских, социальных и экономических результатов их применения необходима для экспертной поддержки управленческих решений в управлении здоровьем населения в современных условиях. Интегрированный подход к мультидисциплинарной и межведомственной задаче управления здоровьем населения позволил обосновать принципиально новые подходы к лечению отдельных пациентов и обосновать возможность рационального и экономически обоснованного лечения ряда системных заболеваний с высоким медицинским, экономическим и социальным бременем. Разработанная в лаборатории «Управления общественным здоровьем» модель мультиморбидности, ориентированная на заболевание (А.В. Лобанов, Е.Д. Макеева), позволяет оценить направленную условную вероятность развития заболеваний, отражающие патогенетические механизмы развития комплекса заболеваний и обосновать применение высокозатратных инновационных генно-инженерных биологических препаратов для лечения комплекса заболеваний, что устраняет экономические барьеры доступности для этих препаратов и открывает новые возможности для управления общественным здоровьем.

8. Научно-организационная и прикладная деятельность Института

8.1. Учёный совет

Учёный совет всегда играл важную роль в жизни Института, формируя и реализуя его научную политику. Важнейшие решения по направлениям научно-организационной деятельности и структуре Института, подготовке и проведению международных и российских совещаний, конференций и семинаров, кадровым и хозяйственным вопросам, присуждению учёных званий, оценке деятельности Института и его подразделений, присуждению премий и стипендий имени выдающихся учёных Института, грантов для поддержки молодёжных научных школ, проведению конкурсов лучших работ Института и научных работ молодых учёных по теории управления и её приложениям – всё это сфера деятельности Учёного совета. Среди членов Учёного совета были и/или есть академики АН СССР и/или РАН А.А. Андронов, А.И. Берг, С.Н. Васильев, А.А. Воронов, С.В. Емельянов, Н.А. Кузнецов, В.С. Кулебакин, А.Б. Куржанский, О.И. Ларичев, А.А. Лебедев, Н.Н. Лузин, И.М. Макаров, Е.А. Микрин, Б.Н. Наумов, Д.А. Новиков, Б.Н. Петров, Ю.С. Попков, В.С. Пугачёв, В.А. Трапезников, Я.З. Цыпкин, академик ГАН И.В. Прангишвили, члены-корреспонденты АН СССР и/или РАН О.И. Авен, М.А. Гаврилов, А.А. Галяев, В.И. Коваленков, А.М. Лётов, П.П. Пархоменко, Е.С. Пятницкий, А.Ф. Резчиков, Б.С. Сотсков и др.

На заседаниях Учёного совета обсуждаются актуальные вопросы современной теории и практики управления. Учёный совет активно взаимодействует с учёными советами научных институтов, вузов и других организаций.







На Учёном совете Института обсуждается работа молодёжных научных школ (МНШ)

8.2. Диссертационные советы

При Институте действуют три диссертационных совета по присуждению учёных степеней докторов и кандидатов технических и физико-математических наук по следующим специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (физико-математические и технические науки);
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки);

– 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

– 2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

С 2023 г. действует объединённый диссертационный совет на базе Института и РГУ им. Н.А. Косыгина, где рассматриваются диссертации на соискание степеней докторов и кандидатов экономических наук по специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика.

8.3. Экспертиза

С момента, когда наука перестала быть уделом одиночек и превратилась в отрасль народного хозяйства, не утихают споры о том, как именно должен нормироваться и оцениваться труд и результаты работы учёных, особенно тех, кто занимается фундаментальными научными исследованиями. Два традиционно противопоставляемых друг другу подхода связаны с применением объективных (обычно, наукометрических) показателей и с использованием менее формализованных экспертных процедур, основанных на оценке специалистов специалистами.

Именно такой экспертно-оценочный подход, предложенный группой сотрудников – О.А. Коссовым, А.В. Кортневым, А.Б. Шубиным, Р. Хаировым, К.Б. Норкиным и др., – использовался с середины 60-х годов для оценки научной эффективности сотрудников и подразделений Института.

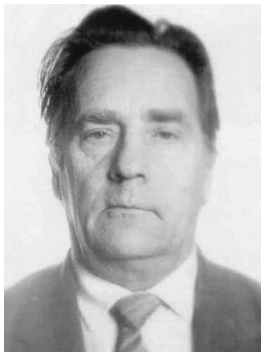
В основу системы был положен демократический принцип максимального привлечения к экспертным оценкам научной общественности – составы 10 тематических экспертных комиссий рассматривались и утверждались дирекцией и партбюро с учётом мнений членов Учёного совета и руководства его секций из числа выдвинутых лабораториями кандидатов (1 кандидат на каждые 5 сотрудников).

Хотя дирекция обещала не принимать немедленных мер по результатам первой экспериментальной экспертизы всех выполнявшихся в Институте тем научных исследований, опытная экспертная «сессия» вызвала неподдельный интерес: заседания экспертных комиссий нередко приходилось переносить в более просторные аудитории.

Экспертиза вызвала неоднозначную реакцию научной общественности. Так, М.А. Гаврилов и А.М. Лётов говорили о «неконституционности» оценок, а Я.З. Цыпкин и М.А. Айзерман, напротив, высказывали своё одобрение и поддержку. Тем не менее, эксперимент состоялся. Впоследствии с подачи С.В. Емельянова разработка системы экспертных оценок эффективности научных исследований была включена в план важнейших работ Минприбора.

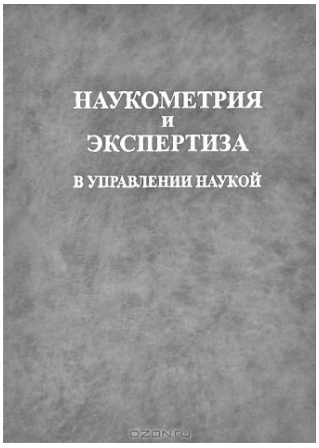
В 70-х – начале 80-х годов на волне нарастающего интереса к экспертным, многокритериальным и им подобным оценкам усилия ряда научных подразделений Института были сосредоточены на исследованиях проблем оценки объектов различной природы (технических, социально-экономических и т.д.). В 1988 г. было

организовано самостоятельное подразделение – лаборатория «Методов и средств управления НИР» во главе с к.т.н. И.Б. Семёновым.



Игорь Борисович Семёнов

Сегодня Институт использует и развивает систему комплексной оценки деятельности подразделений с учётом современных реалий для повышения эффективности научной и прикладной деятельности путём: информирования дирекции о состоянии исследовательской деятельности лабораторий, выявления недостатков в работе лабораторий и выработки рекомендаций по их устранению, стимулирования по результатам оценки. Если система комплексной оценки подразделений в большей степени учитывает «коллективные» результаты, то давно используемая и непрерывно совершенствуемая система рейтинговых оценок вместе с основанной на экспертизе системой аттестации научных сотрудников отражают индивидуальные достижения сотрудников, способствуя повышению результативности их деятельности и помогая руководству в принятии управленческих решений. Обе эти системы сегодня интегрированы на единой методологической и технологической основе – соответствующими данными, в том числе, электронной библиотекой и библиографической базой Института, пользуются как сотрудники, так и его руководство.



В Институте проводятся ежегодные научные конкурсы: на премии имени выдающихся учёных, на лучшую научную работу за последние 5 лет, на соискание стипендий им. академика И.В. Прангишвили и им. академика В.А. Трапезникова для молодых учёных, на соискание грантов для поддержки молодёжных научных школ Института, всероссийский конкурс научных работ молодых учёных по теории управления и её приложениям. Как и прежде, подведению итогов предшествуют бурные дискуссии на заседаниях экспертных комиссий, Учёного совета Института и его секций.

Многолетний успешный задел Института в теории и практике использования комплексных оценок служит надёжной базой фундаментальных и прикладных исследований в этой области. Институт выпустил 500-страничный сборник статей «Наукометрия и экспертиза в управлении наукой», главный итог которого таков: только профессиональная экспертиза может дать всестороннюю объективную оценку научных результатов, а наукометрические показатели являются инструментом для поддержки принятия решений экспертами.

В настоящее время в Институте разрабатывается Информационная система анализа научной деятельности (ИСАНД). В ней будет использован специализированный классификатор научных направлений теории управления, составленный ведущими учеными Института.

8.4. Научные журналы

Как полагается лидеру российской науки управления, Институт издаёт большое число профильных научных журналов, в которых публикуются последние результаты отечественных и зарубежных авторов по теории управления и её приложениям.

Журнал «Автоматика и телемеханика»



Самым старшим и авторитетным остаётся имеющий более чем 80-летнюю историю журнал «Автоматика и телемеханика» (АиТ).

История. Журнал был основан в 1936 г. как печатный орган Комиссии по телемеханике и автоматике Академии наук СССР. Первым редактором журнала был академик А.А. Чернышёв. В то время (да и долгие годы впоследствии) это был единственный в мире журнал, специально посвящённый автоматике. После создания Института автоматики и телемеханики (ИАТ) в 1939 г. журнал стал его печатным органом, ответственным редактором был назначен член-корреспондент АН СССР В.И. Коваленков. Журнал выходил 6 раз в год вплоть до начала Великой Отечественной войны. Издание возобновилось с 1946 г., вскоре возросли периодичность (с 6 до 12 номеров в год), объём (с 5 до 9 печатных листов) и тираж (с 2500 до 8500 экземпляров).

Начиная с 1956 г. журнал переводится на английский язык в США. В 1960-е годы журнал стал одним из наиболее авторитетных научных изданий по автоматическому регулированию в мире. Долгие годы главным редактором журнала был директор ИАТ АН СССР (впоследствии ИПУ РАН) академик Вадим Александрович Трапезников, а затем академик Н.А. Кузнецов. С 2009 г. главным редактором стал академик Станислав Николаевич Васильев, возглавлявший Институт с 2006 по 2016 гг. С октября 2020 г. главный редактор журнала – член-корреспондент РАН Андрей Алексеевич Галяев.

Редакционная политика. На протяжении многих лет журнал сохраняет высокий научный уровень, оставаясь эталоном и примером для подражания для других научных изданий Института.

Журнал издаётся под руководством Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОЭММПУ) Российской академии наук на базе Института проблем управления. Выпускается 12 номеров журнала в год, средний объём номера – 15 печатных листов. Журнал переводится на английский язык с 1956 г. и издается под названием *Automation and Remote Control*. Издатель англоязычной версии журнала — ИПУ РАН.

АиТ является одним из лидеров Российского индекса научного цитирования и *Russian Science Citation Index* по тематике «Автоматика. Вычислительная техника». Англоязычная версия входит в *Web of Science Core Collection* и индексируется *Scopus*. Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых изданий ВАК, публикующих основные результаты диссертаций.

В АиТ публикуются исследовательские статьи по различным областям теории управления (детерминированным, адаптивным и робастным, стохастическим, дискретным системам, системам массового обслуживания, интеллектуальному управлению), а также её приложений (автоматизации проектирования и программирования, автоматизированным системам управления и автоматизации производственных процессов, техническим средствам и применению вычислительной техники в управлении, технической диагностике и теории надёжности, управлению в социально-экономических и медико-биологических системах).

Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние основных проблем, сообщения о наиболее интересных научных конференциях, материалы научных дискуссий, рецензии на новые книги.

Сайт журнала – *ait.mtas.ru*. Полный электронный архив всех номеров АиТ с 1936 г. находится в открытом доступе на сайте Общероссийского математического портала Mathnet.ru (за исключением последних трёх лет, доступных по подписке). Архив англоязычной версии журнала с 2001 г. по 2022 г., размещён на сайте *SpringerLink*. С 2023 г. выпуски и русской, и английской версии публикуются в свободном доступе на сайте журнала.

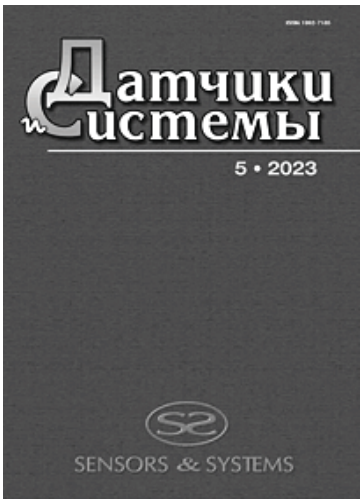
С конца 2018 г. статьям АиТ присваивается *Digital Object Identifier* (DOI) для удобства доступа к текстам статей через сеть Интернет.

Обе версии журнала входят в «Белый список» – перечень авторитетных научных изданий, отобранный и утвержденный межведомственной рабочей группой Минобрнауки России, в состав которой вошли представители Российской академии наук, Российского центра научной информации, крупнейших отечественных вузов и научных организаций.

В марте 2023 г. журнал «Автоматика и Телемеханика» занял 24-е место среди всех журналов и 1-е место по тематике: «Автоматика. Вычислительная техника.» в новом рейтинге российских научных журналов *Science Index*, размещённом на сайте Научной электронной библиотеки *eLibrary.ru* (НЭБ). При расчёте показателей учитывалось также цитирование английской версии журнала.

Осенью 2023 г. обе версии журнала были приняты в Список журналов с открытым доступом *Directory of Open Access Journals* (DOAJ), который определяет журналы с открытым доступом как научные и академические журналы, предоставляющие весь свой контент бесплатно, без задержек или требований регистрации пользователей и отвечающие высоким стандартам качества, в частности, посредством рецензирования или редакционного контроля качества.

Журнал «Датчики и системы»



История. Появление нового журнала в 1999 г. пришлось на самое неблагоприятное время, когда исчезали печатавшиеся под эгидой министерств периодические научные издания в области автоматизации, приборостроения и систем управления. Однако за своё первое десятилетие научно-технический и производственный журнал «Датчики и системы» стал одним из ведущих научно-периодических изданий России в области разработок и создания измерительных устройств, приборостроения и информационно-управляющих систем.

Большую поддержку молодому журналу оказал Институт, и прежде всего его директор И.В. Прангишвили, который с 2002 по 2006 гг. был главным редактором журнала «ДиС». Сотрудничество с Институтом продолжается и сегодня. Сегодня главный редактор журнала – д.т.н., проф. Ф.Ф. Пащенко, которого связывают с журналом годы участия в работе «ДиС» вместе с И.В. Прангишвили. Большой вклад в создание журнала внесли сотрудники МИЭМ.

Редакционная политика всегда была направлена на консолидацию сил научного сообщества: инженерно-технических работников и учёных в области автоматизации и систем управления, приборостроения, микроэлектроники, машиностроения, робототехники, а также биологов, физиков, химиков, медиков, экологов и других специалистов, нуждающихся в современных приборных и системных средствах.

Журнал прилагает все усилия, чтобы своевременно информировать потребителей о новой отечественной продукции, знакомить с новыми идеями, разработками, проектами. Для этого, помимо центральной редколлегии, созданы активно взаимодействующие с журналом региональные редсоветы в крупных промышленных и научных центрах России, опирающиеся на ведущие НИИ, промышленные предприятия и вузы.

Главной опорой «ДиС» являются многолетние профессиональные связи со многими учёными, разработчиками, производителями и потребителями датчиков, приборов и систем управления России и стран СНГ.

Основные разделы журнала:

- Теория и принципы построения датчиков, приборов и систем.
- Информационно-измерительные системы.
- Конструирование и производство датчиков, приборов и систем.
- Создание новых приборов.
- Интеллектуальные системы измерения и управления.
- Научно-техническая публицистика.
- Хроника.

Лучшие статьи журнала «Датчики и системы» отбираются для публикации на английском языке в журнале *Automation and Remote Control* (индексируется Web of Science и Scopus).

По результатам общественной экспертизы журнал из года в год уверенно входит в десятку наиболее авторитетных журналов раздела «Электроника» Российского индекса научного цитирования. ДиС включен в *Russian Science Citation Index* и в Перечень ведущих рецензируемых изданий ВАК.

Сайт журнала – *www.sensors-and-systems.ru*. Названия и аннотации статей доступны в электронной библиотеке *elibrary.ru*.

Журнал «Проблемы управления»



История. Для адекватного отражения в научной печати исследований в области управления социально-экономическими и медико-биологическими структурами, автоматизированных систем организационного управления и обработки данных, программного обеспечения систем управления и других научных направлений в 2002 г. Институт учредил научно-технический журнал «Проблемы управления». Инициатива его создания принадлежит дирекции, главным редактором стал директор Института академик НАН Грузии И.В. Прангишвили, который руководил журналом до ухода из жизни в 2006 г. С 2006 г. по настоящее время пост главного редактора занимает директор Института академик РАН Дмитрий Александрович Новиков.

Предполагалось, что журнал будет выходить 4 раза в год – ежеквартально начиная с 2003 г. Однако первый номер увидел свет только в мае 2003 г., поскольку «портфель» редакции наполнялся с трудом. Но журнал всё-таки вышел!

Появление нового журнала было встречено неоднозначно. Многие вполне обоснованно отнеслись к этому скептически – зачем нужен ещё один журнал, когда есть профильный, авторитетный, издающийся с 1936 г. журнал «Автоматика и телемеханика». Действительно, тематика этих двух журналов во многом схожа, но есть и отличия. В журнале «Проблемы управления», как показало его развитие, наряду с традиционными вопросами автоматики, информатики и вычислительной техники, большое внимание уделяется междисциплинарным проблемам, в том числе – управлению в социально-экономических и организационных системах, проблемам системного анализа, задачам информационного управления, принятия решений, анализа данных и обработки больших массивов информации, проблемам решения управленческих задач в слабо структурированных и плохо формализуемых ситуациях. Журнал стремится быть понятным и интересным широкому кругу читателей; существенное внимание уделяется опыту практического применения научных результатов.

Включение в 2004 г. журнала в список ВАК способствовало повышению его престижа и пополнению портфеля. С 2005 г. журнал стал выходить 6 раз в год, круг его сторонников расширился, появились собственная ниша в мире научно-технической периодики и стремление к освещению актуальных вопросов теории и практики управления. В число авторов журнала входят и маститые, и начинающие учёные, аспиранты. Расширилась география авторов: не только Москва, но и многие регионы России, страны ближнего и дальнего зарубежья. Поддержанию связей с коллегами из регионов способствует широкая сеть региональных редакционных советов.

В 2006 г. журнал получил международный индекс периодического издания ISSN, вошёл в Российский индекс научного цитирования (а с 2017 г. – и в «ядро» РИНЦ, *Russian Science Citation Index*) и с тех пор уверенно входит в десятку рейтинга *Science Index* по тематике «Кибернетика», имея один из самых высоких импакт-факторов в своей категории. Его электронная версия представлена на платформе Научной электронной библиотеки *elibrary.ru* и на общероссийском математическом портале *Math-Net.ru*. Все полнотекстовые выпуски журнала находятся в открытом доступе на сайте журнала *pu.mtas.ru*. С 2018 г. статьям присваивается *Digital Object Identifier* (DOI). С 2021 г. статьи переводятся на английский язык и составляют англоязычную версию журнала под названием *Control Sciences*.

Периодичность журнала – 6 номеров в год. В номере 8–10 статей, объём – 84 страницы формата А4. Среднее время выхода статьи – 6 месяцев.

Основные разделы журнала:

- системный анализ;
- математические проблемы управления;
- анализ и синтез систем управления;
- информационные технологии в управлении;
- управление в социально-экономических системах;
- управление в медико-биологических системах;
- управление техническими системами и технологическими процессами;
- управление подвижными объектами и навигация;
- обзоры, прогнозы;
- философские вопросы управления;
- краткие сообщения;
- хроника.

Журнал «Автоматизация в промышленности»



История. Журнал «Автоматизация в промышленности» издаётся с января 2003 г.

К моменту создания журнала в Институте уже более 10 лет ежегодно проводились популярные международные семинары-презентации по созданию и применению программно-технических средств промышленной автоматизации, на которые регулярно съезжались более 200 специалистов. Наиболее интересные доклады этих семинаров необходимо было публиковать в специализированных изданиях, чтобы с ними ознакомилось как можно большее число заинтересованных лиц. К тому же стала актуальной информация о появлении новых продуктов, промышленных стандартах, результатах проведения испытаний и т.д. Всё это явилось предпосылкой создания ежемесячного научно-технического и производственного журнала «Автоматизация в промышленности», ориентированного на специалистов в области промышленной автоматизации.

В редколлегию нового журнала вошли постоянные участники семинаров-презентаций в ИПУ РАН – руководители инжиниринговых компаний, ведущие специалисты отделов автоматизации НИИ и конструкторских организаций, преподаватели вузов. Главным редактором стала к.т.н. Наталья Игоревна Аристова, которая в 2023 г. защитила докторскую диссертацию по техническим наукам.

Круг читателей журнала – сотрудники промышленных предприятий (заказчиков средств и систем автоматизации), производители программных и технических средств автоматизации, фирмы-интеграторы, проектные и конструкторские организации, учебные заведения. Всё это организации, специализирующиеся на разработке, усовершенствовании, внедрении и производственной эксплуатации компонентов, необходимых для создания современных и модернизации действующих систем автоматизации производства.

Журнал ориентирован на прикладную область промышленной автоматизации, обязательно представление в статьях практических результатов научно-технических достижений и описание инноваций с позиции применимости их на конкретных производствах. В журнале публикуются концептуальные, научно-практические и внедренческие статьи по разделам: «Промышленные автоматизированные системы», «Системы управления бизнес-процессами», «Программное и алгоритмическое обеспечение», «Технические средства автоматизации». Позднее добавились разделы «Цифровые технологии для промышленных предприятий», «Информационная безопасность в промышленности» и «Подготовка специалистов по промышленной автоматизации». Одним из наиболее интересных является раздел «Обсуждаем тему», в котором поднимаются актуальные вопросы рынка промышленной автоматизации. К обсуждению приглашаются специалисты отечественных

и зарубежных фирм, наиболее сложные и спорные темы обсуждаются за виртуальным круглым столом. Так, в разные годы были рассмотрены проблемы создания и/или применения интегрированных АСУ, АСУ ТП, систем класса MES, EAM, ERP, АСКУЭ, распределённых систем управления, систем управления качеством выпускаемой продукции, промышленных тренажёров, современных методов и алгоритмов управления и моделирования, коммуникационных средств, контроллеров, человеко-машинного интерфейса, встраиваемых компьютерных технологий, веб-технологий, числового программного управления, виртуальных приборов, пневмоавтоматики, беспроводной связи, методов автоматической идентификации, современных методов измерения физических величин, датчиков и т.д.

Вниманию читателей предлагаются подборки по автоматизации отдельных отраслей промышленности: металлургии, химии, нефтегаза, энергетики и т.д., а также по автоматизации зданий.

В разделе «Клуб журнала» публикуются отчёты о круглых столах, презентациях, интервью. Все желающие могут поделиться опытом, информацией или задать вопросы коллегам.

Журнал «Автоматизация в промышленности» включён в список ВАК журналов, рекомендованных для публикации основных результатов кандидатских и докторских диссертаций, и в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

За годы своего существования журнал участвовал во многих отраслевых выставочных проектах и оказывал информационную поддержку различным специализированным выставкам и конференциям по промышленной автоматизации, проходившим в России и странах СНГ: в Москве, Санкт-Петербурге, Минске, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Ижевске, Воронеже, Набережных Челнах, во Владивостоке и др.

С 2009 г. началось сотрудничество журнала «Автоматизация в промышленности» и российской рабочей группы всемирной некоммерческой ассоциации разработчиков, системных интеграторов, экспертов и пользователей решений для промышленных предприятий *MESA International* (*Manufacturing Enterprise Solutions Association*). Журнал стал генеральным информационным партнёром международных научно-практических конференций «Эффективные технологии управления производством», ежегодно проводимых российской рабочей группой *MESA* в различных городах России.

С 2010 г. журнал «Автоматизация в промышленности» сотрудничает с ведущим периодическим изданием Института проблем управления РАН – журналом «Автоматика и телемеханика». Сотрудничество предполагает опубликование избранных статей журнала «Автоматизация в промышленности» на английском языке в журнале *Automation and Remote Control* (английская версия журнала «Автоматика и телемеханика»).

На сайте журнала «Автоматизация в промышленности» *www.avtprom.ru* представлена вся оперативная информация о деятельности издания, включая тематические планы, архивы вышедших номеров, содержания последних выпусков, планы редакции по участию в выставках и конференциях. Здесь можно подписаться на

еженедельную рассылку новостей, оформить подписку на журнал или его электронную версию. Журнал выходит ежемесячно. Формат – А4, объём – 64 полос.

Журнал «Управление большими системами»



История. С 1998 г. Институт выпускает периодический сборник трудов учёных, занимающихся разработкой и исследованием математических моделей управления большими социально-экономическими, организационными, организационно-техническими и другими системами.

Первый выпуск сборника «Управление большими системами» (УБС) был всего лишь собранием избранных докладов Международной научно-практической конференции по управлению большими системами, проведённой в 1997 г. Российской академией наук, Институтом проблем управления РАН и Российским комитетом по автоматическому управлению.

Второй выпуск сборника вышел в 2000 г. под названием «Управление социально-экономическими системами: сборник трудов молодых учёных». В то время главной целью сборника было дать возможность молодым учёным – специалистам по теории управления – показать свои научные результаты. Изначально тематика сборника соответствовала в основном интересам учёных, работающих в области теории активных систем – направления, родившегося в лаборатории «Активных систем» ИПУ РАН. Общую редакцию сборника осуществлял д.т.н. Д.А. Новиков, впоследствии ставший его главным редактором.

С 2003 г. сборник превратился в настоящее периодическое издание: вышло три выпуска, а начиная с 2004-го – четыре. Время показало актуальность формата сборника, его востребованность учёными, работающими в области теории управления и её приложений. Постепенно расширялась и география авторов, захватывая всю территорию «большой лаборатории активных систем» – российской научной школы, развивающей математическую теорию организационного управления.

С 2005 г. сборник «Управление большими системами» стал одним из печатных органов организованной ИПУ РАН совместно с ведущими вузами России сети научно-образовательных центров (НОЦ) по проблемам управления. Некоторое время (12–15-й выпуски) сборник издавался на ротационной основе этих центров.

В 2006 г. УБС обрёл новый статус, став одним из первых официально зарегистрированных электронных научных изданий России и первым электронным журналом Института, хотя электронная версия выходила параллельно с бумажной ещё с 2004 г. (выпуск бумажной версии прекращен с 2010 г.). С того же 2006 г. сборник УБС включён в Российский индекс научного цитирования, РИНЦ (а с 2017 г. входит в «ядро» РИНЦ – *Russian Science Citation Index*), с 2007 г. – в список ВАК.

Все статьи УБС проходят рецензирование ведущими специалистами по теории управления, поэтому в последние годы он стал одним из авторитетнейших российских журналов, уверенно входя в десятку по двухлетнему импакт-фактору РИНЦ и в двадцатку по рейтингу *Science index* в категории «Математика».

Периодичность сборника – 6 раз в год. Среднее время выхода статьи – 3–6 месяцев. В сборнике нет «пухлого» редакционного портфеля: все статьи, прошедшие рецензирование, выпускаются сразу. Поскольку сегодня сборник является чисто электронным изданием, его объём и аудитория практически не ограничены. Сайт сборника *ubs.mtas.ru* ежемесячно регистрирует более 90 000 скачиваний статей: такой «подписке» может позавидовать любое печатное научное издание.

Основная тематика публикаций Сборника – использование математических моделей для постановки и решения задач управления сложными системами. Рубрики Сборника включают практически почти все направления современной теории управления: системный анализ, математическую теорию управления, анализ и синтез систем управления, информационные технологии и сетевые модели в управлении, управление в социально-экономических, медико-биологических и экологических системах, управление техническими системами и технологическими процессами, подвижными объектами, технические и программные средства управления, надёжность и диагностика средств и систем управления, программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления.

Принципиальным моментом является то, что издание остается свободным для доступа через Интернет – полные тексты всех статей и выпусков журналов доступны на сайте журнала *ubs.mtas.ru*, в электронных библиотеках *elibrary.ru*, *MathNet*, Киберленинка и др. С 2017 г. статьям журнала присваивается *Digital Object Identifier* (DOI).

Лучшие статьи сборника «Управление большими системами» отбираются для публикации на английском языке в издаваемом ИПУ РАН совместно с Международным институтом общесистемных исследований (США) журнале *Advances in Systems Science and Applications* (индексируется *Scopus*).

Хорошей традицией стали специальные выпуски, посвящённые актуальным проблемам современной теории управления и её приложений: «Сетевые модели в управлении», «Проблемы управления на железнодорожном транспорте», «Наукометрия и экспертиза в управлении наукой» – каждый из них стал важной вехой в развитии соответствующих областей исследований.

Журнал «Advances in Systems Science and Applications»

История. Журнал *Advances in Systems Science and Applications* (ASSA) выпускается с 2000 г. Международным институтом общесистемных исследований (*International Institute for General Systems Studies*, IIGSS) – некоммерческой исследовательской организацией, располагающейся в США (штат Пенсильвания). IIGSS ведёт исследования и реализует образовательные проекты в области системного анализа, общей теории систем, исследования операций, кибернетики и теории управления с приложениями в самых разных областях науки, техники, экономики и менеджмента, и его директор – профессор Джеффри Форрест – занимал одновременно

и пост главного редактора ASSA. По его предложению с 2012 г. в редколлегию ASSA вошел академик РАН Дмитрий Александрович Новиков.

В 2017 г. Д.А. Новиков принял предложение проф. Д. Форреста стать соредактором ASSA, и с этого момента Институт издаёт журнал совместно с IIGSS. С этим связано принципиальное изменение редакционной политики – журнал открыл архивы с 2010 г. в полный бесплатный доступ на своем Интернет-сайте *ijassa.ipu.ru*, был осуществлён перенос сайта и переход на новую редакционную систему на базе открытой платформы *PKP Open Journal System*.

Журнал ASSA – международное электронное научное периодическое издание; он не имеет печатной версии и подписки, распространяясь только через сеть Интернет. Он индексируется библиометрическими базами *Google Scholar*, *ResearchGate*, *SCImago*, EBSCO, включён в Российский индекс научного цитирования, а также с 2009 г. индексируется *Scopus*.

Периодичность журнала – 4 раза в год. Среднее время выхода статьи – 6–12 месяцев. Корпус авторов и читательская аудитория журнала покрывает все страны и континенты, и все статьи ASSA проходят рецензирование ведущими мировыми специалистами по теории систем и системному анализу. Редакция журнала неустанно работает над повышением научного уровня и репутации журнала. Сегодня ASSA – единственный по-настоящему международный журнал Института, который дает возможность авторам подавать статьи сразу на английском языке, являясь самым быстрым способом ознакомления мировой научной общественности с последними результатами теории систем и теории управления.

Тематика журнала чрезвычайно широка; она включает в себя все разделы системного анализа, исследования операций, общей теории систем, теории управления, в том числе, проблемы компьютерного моделирования, интеллектуальные системы, большие данные, сети, а также их приложения к производственным, энергетическим, транспортным, биологическим, экологическим и социальным системам.

Публикация в журнале бесплатна для авторов, при этом статьи находятся в открытом доступе на сайте журнала; также читателям и авторам предоставляется статистика просмотров статей за последний год.

8.5. Семинары и конференции

3 октября 1934 г. состоялось совещание представителей приборостроительных заводов и научно-исследовательских институтов при Комиссии телемеханики и автоматики АН СССР (КТА). В числе обсуждаемых вопросов и принятых решений были особенно важные, актуальные и по сей день, а именно:

«*2. ...б) провести Всесоюзное совещание лабораторий и*
научно-исследовательских институтов,
работающих в области автоматики,
для определения общих направлений и координации плана.
3. Считать необходимым принятие срочных мер по... повышению

квалификации работающего на предприятиях инженерно-технического персонала…

8. *Считать необходимым усиление изучения иностранного опыта путём увеличения командировок за границу…*»

Уже тогда осознавалась необходимость проведения научно-организационной работы, созыва совещаний, организации конференций, участия в зарубежных мероприятиях, пропаганды передового опыта и достижений в научных исследованиях.



Александр Владимирович Храмой

В 1935 г. под эгидой КТА состоялась Первая Всесоюзная конференция по автоматике, телемеханике и диспетчеризации. Среди молодых участников конференции были А.И. Берг, М.А. Гаврилов, Б.С. Сотсков.

В 1938 г. при КТА был образован Сектор общих вопросов автоматики (СОВА). Заведующим сектором назначили к.т.н. Александра Владимировича Храмого – человека, ставшего первым институтским летописцем.

1939 г. – официальная дата создания Института автоматики и телемеханики. И вскоре Институт становится ведущей организацией страны в области теории и прикладных задач управления. А уже в 1940 г. прошло Первое Всесоюзное совещание по автоматическому регулированию, организованное и проведенное Институтом автоматики и телемеханики. Хроника этих совещаний (они проходили раз в 3 года) отражена в институтском буклете[1] 80-х годов. Последнее, одиннадцатое, Всесоюзное совещание было проведено в 1989 г. в Ташкенте. С 2014 г. эта традиция была продолжена: началось проведение Всероссийских совещаний по проблемам управления, и первое из них, в знак продолжения традиции, получило номер двенадцатого, а в 2019 г. прошло тринадцатое Всероссийское совещание по проблемам управления.

С началом Великой Отечественной войны зарубежные командировки прекратились, но проходили институтские научные семинары, а один из них, «андроновский», начавший работу в 1944 г., считается прародителем всех знаменитых иатовских семинаров.

В последующие годы во многих ведущих лабораториях Института возникали постоянно действующие научные семинары, многие из которых почти сразу превращались в общемосковские. Работавшие в ИАТе (будущем ИПУ) ведущие учёные страны становились инициаторами ряда профессионально ориентированных конференций и симпозиумов, некоторые из которых перерастали в международные форумы учёных. К концу войны поездки за рубеж возобновились. Командированные фактически шли вместе с наступающими советскими войсками, а иногда впереди них – в разведке.

Послевоенное десятилетие, по мнению специалистов, принесло науке управления крутой подъём[2], в ИАТе начинается заметное оживление научно-организационной жизни.

---

[1] *Ордена Ленина Институт проблем управления. М.: ИПУ, 1984. С. 77–83.*

[2] *Автоматика и телемеханика. 1982. № 6. – С. 5–8.*

В 1959 г. молодёжь Института провела в Москве I Конференцию молодых специалистов по автоматическому управлению. Увесистый том её трудов (под редакцией Я.З. Цыпкина) был выпущен в 1961 г. Ключевую роль в организации конференции сыграл будущий заведующий лабораторией № 62, будущий доктор наук и профессор В.Ю. Кнеллер.



Значок участника I Конгресса ИФАК в Москве (1960 г.)

В 1960 г. 27 июня – 7 июля в МГУ на Ленинских горах был проведён Первый Конгресс ИФАК (Международная федерация по автоматическому управлению). Председателем ИФАКа был тогда проф. А.М. Лётов, председателем Национального комитета по автоматическому управлению (НКАУ), представлявшим СССР в ИФАК, – академик В.А. Трапезников[3]. Начиная с I Конгресса ИФАК, в традициях Института активное участие в международных мероприятиях ИФАК, одной из самых престижных научных организаций мира. На последнем, XXII Конгрессе ИФАК, проходившем в 2023 г. в г. Иокогама (Япония), сотрудники Института также принимали участие как в очном, так и в *online*-режиме.



Давид Михайлович Беркович

Начиная с 60-х годов заметно совершенствовались и вспомогательные иатовские службы, задачей которых было помогать учёным в организации и проведении научных конференций и семинаров. Главной такой службой стал упомянутый в начале раздела Сектор общих вопросов автоматики. В 1963 г. СОВА возглавил Давид Михайлович Беркович. Именно его следует считать главным инициатором, автором и редактором первого буклета об ИАТе[4].

В 1986 г. СОВА был преобразован в Отдел научно-технической информации (ОНТИ).

С 1986 по 1993 гг. отдел возглавлял кандидат физико-математических наук Владимир Иосифович Венец.

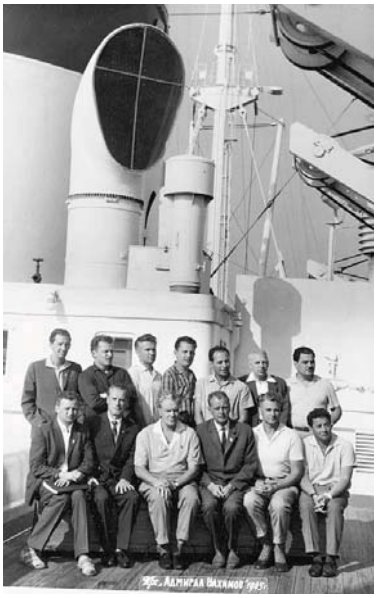
Период конца 50-х – конца 80-х годов был «золотым веком» организуемых Институтом научных мероприятий: совещания, конференции, симпозиумы, семинары и школы по множеству ключевых теоретических и прикладных проблем управления – всё проходило на высшем уровне. Большие и малые города СССР гостеприимно принимали наши научные форумы: Москва и Одесса, Тбилиси и Минск, Таллин и Ереван, Ленинград и Суздаль, Фрунзе и даже борт теплохода «Адмирал Нахимов».

---

[3] С 1994 по 1997 г. Национальный комитет возглавлял академик Яков Залманович Цыпкин. Нынешний председатель – академик Александр Борисович Куржанский.

[4] *Ордена Ленина Институт проблем управления - М.: Ордена Ленина Институт проблем управления, 1973. – 120 с.*

Представительные делегации, в состав которых входили многие сотрудники Института, стали обязательными участниками всех значительных научных акций, проходивших по линиям IFAC, IFORS, IEA, IMECO и других авторитетных международных организаций. Постоянными были и научные командировки (для передачи опыта, проведения совместных работ, стажировки и экспертизы) в ведущие мировые научные и производственные центры.



Участники совещания на борту теплохода «Адмирал Нахимов»

В 70-е годы прошлого века конференции наших молодых учёных по управленческой тематике приобрели статус всесоюзных школ.

Тогда же для планирования и регулирования загранкомандировок и приёма иностранных специалистов была создана группа зарубежных связей. Затем группу переименовали в Отдел международного научно-технического сотрудничества (ОМНТС). Именно они совместно с Национальным комитетом по автоматическому управлению курировали командировки учёных Института, оказывая им помощь и поддержку.

15 апреля 1994 г. из двух институтских отделов ОНТИ и ОМНТС был образован один: Отдел научно-технической информации и зарубежных связей (ОНТИ и ЗС). Заведующим отделом был назначен к.т.н. В.М. Бабиков, руководивший им до 2004 г.

Период 90-х годов в России стал большим испытанием для страны. Надо было сохранить квалифицированное научное ядро, и руководство Института повело себя достаточно гибко. Инициатором и вдохновителем новой организационной политики стал тогдашний директор Института И.В. Прангишвили. В те годы он был председателем программных комитетов ряда научных конференций, проводившихся по планам и под эгидой Российской академии наук.



Марина Валентиновна Пятницкая

В 2004 г руководителем ОНТИ и ЗС была назначена Марина Валентиновна Пятницкая. В нынешнюю структуру отдела входят группы научно-технической информации и международных связей.

С конца 1990-х до середины 2010-х годов Российский фонд фундаментальных исследований сыграл значительную роль в поддержании научных связей. Значительная часть командировок сотрудников Института осуществлялась при финансовой поддержке РФФИ, что позволяло не только содействовать участию специалистов ИПУ в работе зарубежных научных форумов, но и организовывать пред-

ставительные институтские делегации на такие важные научные мероприятия, как конгрессы ИФАК и другие.

С 2006 г., с приходом академика РАН С.Н. Васильева на пост директора Институте, стали развиваться новые научные направления, по которым организуются и проводятся регулярные общемосковские семинары, собираются всероссийские и международные конференции. Вместе с тем проводятся традиционные для Института конференции, некоторые из которых возрождаются после длительного перерыва и выходят на новый современный уровень.

Знаковым событием для Института стала организация и проведение в июне 2014 года XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014)[5], посвящённого 75-летию Института, в котором приняли участие более тысячи учёных, занимающихся самыми разнообразными задачами управления. В июне 2019 г. Институт провёл очередное XIII Совещание по проблемам управления, приуроченное к 80-летнему юбилею Института и собравшее более 1000 участников.

В 2016 г. директором Института становится член-корреспондент РАН (ныне академик РАН) Д.А. Новиков, и информационная поддержка научных мероприятий выходит на новый уровень. Традиционная для Института конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого) проходит при информационной поддержке российской секции IEEE. Труды конференции публикуются в электронной библиотеке *IEEEXplore* и индексируются в базах данных *Web of Science* и *Scopus*. С 2017 г. информационную поддержку от IEEE имеют также ежегодные институтские конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD), «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA) и «Распределённые компьютерные и коммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN).

Ежегодно Институт проводит более десятка научных конференций, в том числе и организованные молодёжными научными школами (школы «Управление большими системами» и «Современная экономическая наука: методы, модели, проблемы и перспективы»). Из вновь организуемых конференций отметим конференции «Друкеровские чтения», «ГрафиКон», *IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability* (TECIS).

Обо всех организованных Институтом и/или проводимых в его стенах научных конференциях и семинарах можно прочитать на нашем сайте в Интернете: *https://www.ipu.ru/*.

Приведём далеко не полные списки наиболее известных традиционных конференций Института. После названия каждой конференции (все они ежегодные или двухлетние) через косую черту приводится число уже проведённых конференций.

[5] После одиннадцати Всесоюзных совещаний по автоматическому управлению (последнее в Ташкенте в 1989 г.) присвоение новому Всероссийскому совещанию по проблемам управления 12-го номера символично. ВСПУ-2014 продолжило традиции Всесоюзных совещаний по автоматическому управлению в масштабах России и стран СНГ.

Научные конференции:

- Международная конференция «Распределённые компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN) / 26.
- Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD) / 16.
- Международная конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого) / 15.
- Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем» / 31.
- «Друкеровские чтения» / 36.

и другие.

Молодёжные научные конференции:

- Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Управление большими системами» / 18.

и другие.





Фотографии с XVIII школы-конференции молодых учёных «Управление большими системами» (Воронеж, сентябрь 2023 г.)

Постоянно действующие научные семинары Института:

- Автоматическое управление (руководитель – д.ф.-м.н., профессор РАН М.В. Хлебников).

- Экспертные оценки и анализ данных (руководители – д.т.н., проф. Ф.Т. Алескеров и академик РАН Д.А. Новиков).
- Теория управления организационными системами (руководитель – академик РАН Д.А. Новиков).
- Информационная экономика и управление инновациями (руководитель – д.э.н. Р.М. Нижегородцев).
- Проблемы авиационно-космической электроэнергетики им. акад. В.С. Кулебакина (руководитель – д.т.н., проф. С.П. Халютин).
- Проблемы управления автономными робототехническими комплексами (руководитель д.т.н., проф. РАН Р.В. Мещеряков).
- Модели сложных сетей (руководитель – д.ф.-м.н. А.Г. Чхартишвили).
- Интеллектуальная цифровая электроэнергетика (руководитель – к.т.н. А.Ф. Пащенко) и др.

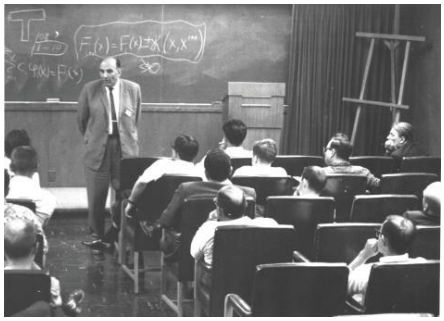
Следует отметить, что последние годы стали испытанием для научных мероприятий. Однако требования противодействия пандемии не смогли остановить общение учёных, для которых регулярный обмен идеями и результатами жизненно необходим. Во времена строгих ограничений конференции и семинары ушли в *online*. И, как это ни странно, такая форма научного общения выявила очевидное преимущество: существенно расширилась география участников мероприятия, ведь участвовать в конференции, не покидая рабочего места, а то и просто из дома, стало гораздо проще (и дешевле). Ныне, когда практически все ограничения сняты, а учёные, соскучившиеся по живому общению, с удовольствием восстанавливают привычки очного участия в конференциях, многие мероприятия все же сохраняют смешанный или *online* формат.

8.6. Система обучения в Институте

С самого начала перед Институтом автоматики и телемеханики была поставлена задача проведения фундаментальных исследований в области автоматического управления. Для этого требовались высококвалифицированные научные кадры, но в то время в стране ещё не существовало организованной системы подготовки специалистов в области автоматики. Поэтому Институту пришлось создать собственные курсы для обучения иатовских сотрудников и привлекать крупных учёных, заинтересованных новой отраслью науки. В 1940 г. в ИАТ был приглашён для исследовательской работы известный математик Н.Н. Лузин. Благодаря лекциям этого блестящего преподавателя интерес к математике в ИАТе значительно вырос. Участие Лузина в работах по теории управления способствовало тому, что в её формальный аппарат прочно вошли теория матриц и многие другие математические дисциплины.

В 1944 г. в Институт пришёл известный физик академик А.А. Андронов, один из создателей теории нелинейных колебаний. Вокруг него собралась группа молодых энтузиастов, будущих корифеев теории управления. Особая роль отводилась организованному Андроновым семинару, где царил дух коллективного творчества и обсуждались научные результаты не только сотрудников Института, но и других учёных.

Атмосфера творчества и терпимость к научной критике стали основополагающими и в других организованных в ИАТе научных семинарах. Подтверждение тому – знаменитая «гавриловская школа» по логике и теории автоматов, существующая более 30 лет. В 70-е годы Совет молодых учёных организовал в Институте циклы лекций по теории автоматов (М.А. Айзерман), теории нелинейных отображений и топологическим методам (М.А. Красносельский), теории вероятностей (В.С. Пугачёв). Эти лекции были невероятно популярны.



Лекция Марка Ароновича Айзермана

8.6.1. Базовые кафедры и практики студентов

Система обучения и сегодня остается одним из приоритетов деятельности ИПУ РАН. Подготовка научных кадров начинается со студенческой скамьи, и Институт многие десятилетия тесно сотрудничает с ведущими вузами через организацию научно-исследовательских практик и стажировок студентов, а также базовых кафедр, на которых читаются специальные курсы для старшекурсников.

Учёные Института возглавляют кафедры МГУ (А.А. Галяев), МФТИ (Д.А. Новиков), Высшей школы экономики (Ф.Т. Алескеров и В.Н. Афанасьев) и др., выпускники которых затем поступают в аспирантуру ИПУ и пополняют ряды научных сотрудников Института. Многие ведущие сотрудники в той или иной мере совмещают научно-исследовательскую работу с преподавательской деятельностью в ведущих московских вузах: МГУ, МФТИ, МИФИ, МГТУ, МАИ, МЭИ, МТУСИ, МИРЭА и др.

Отдельно стоит отметить роль ИАТа в становлении легендарного «Физтеха». Московский физико-технический институт (МФТИ) был создан с целью подготовки научных и инженерных кадров для передовых отраслей науки и производства. в «Записке об организации МФТИ», направленной в Правительство инициативной группой учёных 23 октября 1945 г., говорилось: «Для того, чтобы в возможно короткий срок подготовить кадры для самых важных отраслей физико-математических наук, мы предлагаем создать особое учебное заведение «Москов-

ский физико-технический институт» на базе наших сильнейших научно-исследовательских институтов».

Базовая кафедра проблем управления факультета радиотехники и кибернетики (ФРТК) МФТИ под руководством В.А. Трапезникова была организована в ИАТе в 1955 г. В соответствии с тогдашним названием Института она именовалась кафедрой «Автоматики и телемеханики». Первый выпуск состоялся в 1958 г. Всего подготовлено более 500 дипломированных специалистов, более 100 из них сегодня работают в Институте, большинство – доктора и кандидаты наук.

Многие нынешние и бывшие заведующие лабораториями Института – выпускники МФТИ: В.Н. Бурков (многие годы заведовавший кафедрой), А.А. Галяев, Г.Н. Калянов, В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель, Е.С. Пятницкий и др. Выпускники Физтеха разных лет сформировали костяк большого числа лабораторий Института, например, лаборатории «Активных систем» и лаборатории «Управления по неполным данным», а также научной части дирекции Института – выпускниками МФТИ являются директор Института академик РАН Д.А. Новиков и заместитель директора по научной работе к.ф-м.н. И.Н. Барабанов.

Выпускники кафедры д.т.н., проф. В.Н. Бурков и академик Н.А. Кузнецов являются лауреатами Государственной премии. В 1980 г. Е.Я. Рубинович, А.П. Серебровский, Б.М. Миллер и В.А. Овчинкин стали лауреатами премии Ленинского Комсомола.

В 2016 г. на ФРТК МФТИ (ныне это подразделение называется Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий, ФРКТ) создана Кафедра интегрированных киберсистем путём присоединения кафедры технической кибернетики (базовое предприятие – российское представительство компании *Honeywell*) и кафедры информационных бизнес-систем (базовое предприятие – компания IBS) к кафедре проблем управления с её последующим переименованием. Такое объединение позволяет готовить передовые научные и инженерные кадры по следующим направлениям:

- теория управления;
- управление в социальных и экономических системах;
- технические средства автоматики и вычислительной техники;
- управление технологическими процессами;
- программное обеспечение систем управления;
- автоматизированные системы организационного управления;
- управление подвижными объектами;
- управление энергетическими системами;
- безопасность магистральных нефтепроводов;
- корпоративные информационно-управляющие системы.

Кафедра интегрированных киберсистем – одна из крупнейших базовых кафедр ФРКТ МФТИ, её возглавляет директор Института академик РАН Д.А. Новиков. В настоящее время кафедра выпускает около 10 человек в год.



Дмитрий Александрович Новиков

Кафедра даёт студентам фундаментальные знания в области современной теории управления и её актуальных приложений в технических, организационных, социальных, информационных и биологических системах, предоставляя возможность участия в исследовательских и консалтинговых проектах для Минобороны, МОН, МЧС, Газпрома, Газпромнефти, ЛУКОЙЛа, Роснефти, РЖД, РКК «Энергия», местных администраций и гарантируя устойчивую карьеру в научных и образовательных учреждениях, органах власти, реальном секторе.

На сайте кафедры *mipt.ipu.ru* доступны учебные материалы и видеолекции всех читаемых студентам специальных курсов.



Нина Александровна Бабушкина

Много лет в стенах Института работала кафедра «Биомедицинская электроника» Московского института радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА) под руководством к.б.н. Н.А. Бабушкиной. Уже несколько лет в МИРЭА учатся студенты, которые поступили в рамках целевого набора: они планируют строить научную карьеру в ИПУ РАН.

Научно-исследовательские практики в стенах ИПУ также проходят студенты МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московского инженерно-физического института, Московского авиационного института, Высшей школы экономики, Московского государственного социального университета и др.



Станислав Николаевич Васильев



Андрей Алексеевич Галяев

В 2009 г. академик С.Н. Васильев, в то время директор Института, организовал и возглавил кафедру «Физико-математические методы управления» на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Кафедра готовит специалистов, способных решать задачи управления объектами самой разнообразной природы. В составе профессоров кафедры – сотрудники Института доктора наук В.Н. Афанасьев. А.Г. Кушнер, А.А. Лазарев, А.С. Мандель, Н.Б. Филимонов. С 2018 г. кафедру возглавляет зав. лаб. Института член-корреспондент РАН А.А. Галяев. Выпускники кафедры уже работают в Институте и других организациях страны.

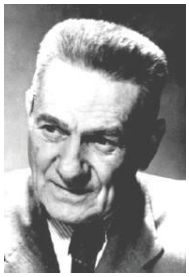
Результаты исследований ИПУ РАН не только отражены в специальных монографиях, но и вошли в учебники, ставшие настольными книгами для студентов технических вузов страны, готовящих специалистов в области теории управления. В их создании в разные годы участвовали видные учёные – сотрудники Института: М.А. Айзерман, Я.З. Цыпкин, В.С. Пугачёв, А.А. Фельдбаум, М.А. Красносельский, А.В. Покровский, М.А. Гаврилов, Б.С. Сотсков, Г.М. Уланов, А.Я. Лернер,

А.М. Лётов, М.В. Мееров, О.П. Кузнецов, Р.Ш. Липцер, Б.Т. Поляк, Н.А. Бобылёв, В.С. Климов, П.С. Щербаков, В.Н. Бурков, Д.А. Новиков и многие другие авторы. В 2019 г. вышли два новых учебных пособия по теории управления для студентов вузов «Математическая теория автоматического управления» (Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, Л.Б. Рапопорт) и «Теория управления (дополнительные главы)» (большой коллектив авторов, в основном – сотрудники Института). В 2024 г. вышли два новых учебные пособия: М.В. Хлебникова, М.В. Балашов, А.А. Тремба «Оптимизация и управление» и Ю.Л. Словохотов «Физика общества». Найти эти издания можно на сайте Института *https://www.ipu.ru/*.

8.6.2. Аспирантура и докторантура



И.В. Уткин



Н.П. Хрунов

Особую роль в подготовке научных кадров сыграла иатовская аспирантура. Уже в 1939 г. состоялся первый аспирантский набор. Первым руководителем аспирантуры и до последнего дня своей жизни (1960) был Н.П. Хрунов, ставший буквально «вторым отцом» для всех иатовских аспирантов.

Когда в 1969 г. Институт награждали орденом Ленина, среди главных заслуг ИАТа была названа подготовка высококвалифицированных научных кадров. В те годы аспирантуру возглавлял к.т.н. И.В. Уткин (он же –председатель профкома).



С.П. Хлебников

Долгие годы аспирантурой успешно руководил к.т.н. С.П. Хлебников – незаурядная яркая личность, в послужном списке которого было и участие в работах группы по созданию цветомузыки, и (в юности) выступления на оперной сцене.

Впоследствии отдел докторантуры и аспирантуры возглавляли д.т.н., проф. В.Д. Малюгин и д.т.н. Г.Н. Ахобадзе, к.т.н. З.К. Авдеева, сегодня отделом руководит д.т.н. Л.Ю. Филимонюк.



В.Д. Малюгин



Г.Н. Ахобадзе



З.К. Авдеева



Л.Ю. Филимонюк

За прошедшие десятилетия около полутора тысяч человек окончили аспирантуру Института, многие успешно защитили кандидатские и докторские диссертации и стали ведущими специалистами по теории управления в России и за её пределами.

В работе аспирантуры и в сложившейся в Институте системе обучения прослеживается преемственность поколений. Так, академик Б.Н. Петров был аспирантом В.А. Трапезникова (считая своими учителями также Н.Н. Лузина и В.С. Кулебакина). Аспирантом Б.Н. Петрова был будущий академик С.В. Емельянов. Академик Я.З. Цыпкин фактически был учеником А.А. Андронова, а аспирантами Я.З. Цыпкина – будущие академики Б.Н. Наумов и Ю.С. Попков. Аспирантом А.А. Андронова был будущий профессор М.А. Айзерман, в свою очередь воспитавший плеяду замечательных учёных. В аспирантуре у А.М. Петровского учился академик Н.А. Кузнецов, аспирантами М.А. Гаврилова были директор ИПУ РАН с 1987 по 2006 гг. академик Грузинской академии наук И.В. Прангишвили и член-корреспондент РАН П.П. Пархоменко. Список можно продолжать долго.

Являясь одним из ведущих научных центров страны, ИПУ РАН и сегодня уделяет немалое внимание подготовке высококвалифицированных кадров в области управления. Институт имеет государственную лицензию и аккредитацию на право ведения послевузовской профессиональной образовательной деятельности по всем образовательным программам. Обучение ведётся через систему очной и заочной аспирантуры, а также через докторантуру по следующим специальностям:

- 1.1.2 Дифференциальные уравнения и математическая физика
- 1.1.4 Теория вероятностей и математическая статистика
- 1.2.1 Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 1.2.3 Теоретическая информатика, кибернетика
- 1.2.4 Кибербезопасность
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.2 Вычислительные системы и элементы
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 2.3.4 Управление в организационных системах
- 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
- 2.3.8 Информатика и информационные процессы
- 5.2.2 Математические, статистические и инструментальные методы в экономике
- 5.2.3 Региональная и отраслевая экономика
- 5.2.6 Менеджмент

Циклы лекций ведущих учёных, научные семинары, регулярные школы молодых учёных, внутрироссийские и международные стажировки – всё это создает для аспирантов и докторантов Института условия для быстрого научного роста.

8.6.3. Дополнительное профессиональное образование

Получив в 2017 г. лицензию на осуществление образовательной деятельности в области дополнительного профессионального образования (ДПО), Институт начал развивать систему курсов повышения квалификации для исследователей, преподавателей, профессионалов в других отраслях. Среди разработанных и действующих в настоящее время программ перечислим следующие:

- «Формирование навыков работы с аудиторией в цифровой среде» (автор – м.н.с. Л.М. Бойко). Курс предназначен для подготовки лекторов к чтению и записи *online* курсов.
- «Методы и принципы датасетов для обучения нейросетей по распознаванию заболеваний и патологий заболеваний и патологий копытец КРС» (автор – с.н.с. к.т.н. А.В. Макаренко).
- «Управление инновациями» – программа повышения квалификации в форме стажировки (автор – зав. лаб. д.э.н., профессор. Р.М. Нижегородцев).
- «Управленческая экономика и основы принятия решений» (автор – зав. лаб. д.э.н., проф. Р.М. Нижегородцев).
- «Формирование навыков подготовки постерной и видеопрезентации на английском языке» (автор –м.н.с. Л.М. Бойко). Курс повышения квалификации для аспирантов и молодых учёных.
- «Методы и принципы формирования датасетов для обучения нейросетей по распознаванию заболеваний и патологий плодовых культур» (автор – с.н.с. к.т.н. А.В. Макаренко).
- «Введение в технологию автоматической идентификации крупного рогатого скота» (автор – с.н.с. к.т.н. А.В. Макаренко).
- «Принципы и методы формирования датасетов для обучения и тестирования нейронных сетей для персональной идентификации собак» (автор – с.н.с. к.т.н. А.В. Макаренко).
- «Модели и методы синтеза и анализа систем автоматического управления (САУ)». Программа повышения квалификации в форме стажировки (авторы – г.н.с. д.т.н., проф. Н.Н. Бахтадзе, г.н.с. д.т.н., проф. С.А. Краснова, с.н.с. к.т.н. А.Ф. Пащенко, г.н.с. д.ф.-м.н., проф. М.В. Хлебников).
- «Подготовка полётных заданий для БПЛА с использованием программно-картографического комплекса» (автор – н.с. А.Н. Мигачёв).
- «Кибербезопасность промышленных систем. Особенности обеспечения кибербезопасности в международных проектах» (автор – в.н.с. к.ф.-м.н. В.Г. Промыслов).

С 2021 г. в Институте запущена линейка *on line* курсов по теории управления и её приложениям:

- «Основы теории автоматического управления» (автор – г.н.с. д.т.н., проф. С.А. Краснова).
- «Теория многоагентных систем (Часть 1)» (автор – в.н.с. д.ф.-м.н. Р.П. Агаев).
- «Методы анализа экстремальных событий» (автор – в.н.с. д.ф.-м.н. Н.М. Маркович).
- «История математики в истории человечества» (автор – с.н.с. к.ф.-м.н. Г.А. Зверкина).
- «Введение в спутниковую навигацию» (автор – д.ф.-м.н. Л.Б. Рапопорт).
- «Основы экономики инноваций» (автор – зав. лаб. д.э.н., проф. Р.М. Нижегородцев).
- «Управленческая экономика и основы принятия решений» (автор – зав. лаб. д.э.н., проф. Р.М. Нижегородцев).

В ближайшее время также будут запущены следующие *online* курсы:

- «Основы дискретной математики» (автор – г.н.с. д.т.н., проф. О.П. Кузнецов).
- «Математические основы теории управления» (автор – г.н.с. д.ф.-м.н., проф. М.В. Хлебников).
- «Оптимальное управление в динамических системах» (автор – г.н.с. д.т.н., чл.-корр. РАН А.А. Галяев).
- «Теория управления организационно-экономическими системами» (автор – г.н.с. д.т.н., проф. Н.А. Коргин).
- «Дополнительные главы теории вероятностей и основы математической статистики» (автор – г.н.с. лаб. д.т.н., проф. Е.Я. Рубинович).

8.6.4. Молодёжные научные школы

Ещё одной формой обучения, способствующей повышению потенциала молодых учёных ИПУ РАН, является создание молодёжных научных школ (МНШ). Под МНШ понимается творческий коллектив, состоящий из научного руководителя и не менее трёх молодых учёных и (или) специалистов (до 35 лет), работающих по единой научной тематике в соответствии с приоритетными направлениями фундаментальных исследований Института и РАН. С 2007 г. в ИПУ введена система грантов для поддержки МНШ, конкурс на соискание объявляется ежегодно, грант выделяется на один или два года. Решение о продлении или выделении гранта принимается по результатам ежегодных отчётов МНШ на Учёном совете Института. На заседании Учёного совета выступают и научные руководители, и сами «школьники». Заседания совета завершаются процедурой закрытого экспертного голосования, результатом которого становятся усреднённые балльные оценки каждой из МНШ. Программа молодёжных школ является важным элементом финансовой поддержки молодёжи.

Сегодня в Институте действует 22 молодёжные научные школы, возглавляемые Е.В. Каршаковым (д.т.н., в.н.с. лаб. № 1), А.Ю. Кустовым (к.ф.-м.н., с.н.с. лаб. № 1), А.В. Балабановым (д.т.н., в.н.с. лаб. № 2), В.В. Лычагиным (д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. № 6), А.Г. Кушнером (д.ф.-м.н., зав. лаб. № 6), М.В. Хлебниковым (д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. № 7), О.П. Кузнецовым (д.т.н., г.н.с. лаб. № 11), В.А. Уткиным (д.т.н., г.н.с. лаб. № 16), М.П. Фархадовым (д.т.н., г.н.с. лаб. № 17), И.В. Черновым (к.т.н., с.н.с. лаб. № 20), С.А. Красновой (д.т.н., г.н.с. лаб. № 37), А.А. Галяевым (чл.-корр. РАН, д.т.н., г.н.с. лаб. № 38), Ф.Ф. Пащенко (д.т.н., г.н.с. лаб. № 40), Н.Н. Бахтадзе (д.т.н., г.н.с. лаб. № 41), А.В. Арутюновым (д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. № 45), В.Г. Лебедевым (д.т.н., г.н.с. лаб. № 46), А.Г. Чхартишвили (д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. № 57), А.А. Лазаревым (д.ф.-м.н., г.н.с. лаб. № 68), В.М. Вишневским (д.т.н., г.н.с. лаб. № 69), А.В. Макаренко (к.т.н., с.н.с. лаб. № 70), Р.В. Мещеряковым (д.т.н., г.н.с. лаб. № 80), С.Н. Черкасовым (д.м.н., г.н.с. лаб. № 81) В состав этих школ входят более 150 ярких молодых учёных и специалистов.

8.6.5. Научно-образовательные центры

Актуальной формой интеграции образования и науки являются научно-образовательные центры (НОЦ) проблем управления, которые созданы на базе вузов для объединения усилий и ресурсов Института и вузов.

За период с 2005 г. Институтом совместно с ведущими вузами созданы и на сегодняшний день успешно функционируют научно-образовательные центры:

1. Арзамасский центр теории и систем управления (на базе АПИ), руководитель – д.ф.-м.н. П.В. Пакшин.
2. Волгоградский центр проблем управления (на базе ВолГУ), руководитель – д.ф.-м.н. А.А. Воронин.
3. Воронежский центр проблем управления (на базе ВГАСУ), руководитель – д.ф.-м.н. П.А. Головинский.
4. Казанский центр проблем управления (на базе КНИТУ-КАИ), руководитель – д.т.н. Р.Т. Сиразетдинов.
5. Курский центр проблем управления (на базе ЮЗГУ), руководитель – д.т.н. С.Г. Емельянов.
6. Липецкий центр проблем управления (на базе ЛГТУ), руководитель – д.т.н. А.К. Погодаев.
7. Магнитогорский центр проблем управления (на базе МаГТУ), руководитель – д.т.н. И.Ю. Мезин.
8. Пермский центр проблем управления (на базе ПГТУ), руководитель – д.т.н. В.Ю. Столбов.
9. Самарский центр проблем управления (на базе СГАУ), руководитель – д.т.н. М.И. Гераськин.
10. Старооскольский центр проблем управления (на базе СТИ), руководитель – к.т.н. Д.А. Полещенко.

11. Тамбовский центр проблем управления (на базе ТГТУ), руководитель – д.т.н. Ю.Ю. Громов.
12. Уфимский центр проблем управления (на базе УГАТУ), руководитель – д.т.н. Б.Г. Ильясов.
13. Южно-Уральский центр проблем управления (на базе ЮУрГУ), руководитель – д.т.н. О.В. Логиновский.

8.6.6. Центр молодёжного инновационного творчества

По сравнению с советским периодом в современном российском обществе, к сожалению, не так уж много детей, мечтающих стать учёными. Для привлечения и приобщения молодёжи к науке нужна маркетинговая стратегия, основой которой является системная работа по популяризации научных знаний и исследовательской деятельности. При этом в целевую аудиторию нужно включать не только студентов, но, прежде всего, школьников, и даже дошкольников.

Исследовательская деятельность интересна не только сама по себе. Профессии учёного, преподавателя высшей школы в большинстве стран мира являются весьма уважаемыми, несмотря на немного меньший доход по сравнению с отраслевыми специалистами сравнимого уровня квалификации. В России последние годы уровень привлекательности академической карьеры растет.

Центры молодёжного инновационного творчества (ЦМИТы) задумывались как места, где школьники (и не только) приобщаются к современным технологиям, пробуют создавать новое и получают импульс для дальнейшего творчества. Здесь ребенок свои самые смелые задумки может обсудить с опытными наставниками и под их руководством довести свою идею до готового прототипа изделия. Но чтобы это работало, ЦМИТ должен быть определённым образом оснащён. Во-первых, необходима элементная база. Чаще всего используются робототехнические наборы *Arduino*, включающие в себя датчики, электромоторы, микроконтроллеры со встроенными алгоритмами стабилизации, машинного зрения и др. Во-вторых, ЦМИТ должен предоставлять средства быстрого прототипирования – например, 3D-принтеры. В-третьих, с детьми должны работать опытные преподаватели, которые последовательно проведут ребёнка сквозь все этапы от идеи до прототипа, помогут разобраться с компонентами и запрограммировать нетривиальный алгоритм.

Центр молодёжного инновационного творчества ИПУ РАН открыл свои двери 1 сентября 2018 г. Главной задачей центра является выявление школьников, склонных к исследовательской деятельности, и пробуждение у них интереса к науке управления.

За прошедшие годы Институту удалось выстроить систему профессиональной ориентации, охватывающую школьников старшего и среднего звеньев (в отдельных случаях - даже младших), и органично интегрированную в ранее существовавшие в Институте программы поддержки молодых учёных. В целом через активности ЦМИТа за это время прошли несколько тысяч школьников. В результате уже летом

2021 г. появились первые выпускники, которые при поступлении в профильные вузы заключили с Институтом договор о целевом обучении.



Изюминкой ЦМИТ ИПУ РАН являются уникальные интерактивные мастер-классы, демонстрирующие детям, приходящим на регулярно проводимые профориентационные мероприятия «Киберсреда», как решаются задачи управления в различных технических и социально-экономических системах. За последние пять лет свои мастер-классы провели более двадцати молодых учёных. Об истории Института школьникам рассказывают его известные сотрудники – Ф.Т. Алескеров, М.Х. Дорри, А.П. Кирпичников, А.С. Мандель и др. – и молодёжь с интересом слушает о непростом пути становления Института и всей российской науки управления.

Под эгидой Института ЦМИТ проводит научно-практические конференции, хакатоны, соревнования по робототехнике. С 2018 г. ИПУ РАН ежегодно является одной из площадок Всероссийского фестиваля науки NAUKA 0+.

Среди конкретных мероприятий, организованных ЦМИТом за время своего существования, самым массовым стал заключительный этап научно-практической конференции «Наука для жизни» по направлению «Многообразие науки», проведенный Институтом в 2021 г. В конференции приняли участие более 2000 школьников Москвы. Победители и призеры конференции получили ценные призы и дополнительные баллы при поступлении в столичные вузы.

В 2022–23 учебном году ЦМИТ совместно с Советом молодых учёных и специалистов ИПУ РАН провел серию научно-популярных занятий, посвященных синтезу науки и искусства (направление *Art-Science*). Представление различных аспектов науки через призму искусства позволяет участникам взглянуть на мир науки с неожиданной и новой для себя стороны. Самым ярким мероприятием цикла стал мастер-класс «День киматики», который провел м.н.с. А. В. Голев. В рамках мастер-класса участники, управляя параметрами звукового генератора, создавали визуальные образы с помощью сыпучих материалов на пластинах и различных жидкостей в кюветах (фигуры Хладни), а также при помощи одной или нескольких лазерных установок (фигуры Лиссажу).



Совместно с Центром

искусственного интеллекта и робототехники регулярно проводятся занятия по спортивной робототехнике для школьников и студентов средне-специальных учебных заведений. В 2022–23 учебном году серия занятий завершилась региональным отборочным этапом чемпионата *RoboCup Junior* в следующих категориях: футбол роботов, соревнование роботов-спасателей, футбол человекоподобных роботов. В рамках серии организаторы часто экспериментируют с форматами проведения мероприятий. Например, в 2023 г. предзащита проектов участников проводилась в формате «*pecha kucha*» (рассказать 20 слайдов за 400 секунд).

Отдельным и очень важным направлением деятельности ЦМИТ ИПУ РАН является научно-методическое сопровождение проектно-исследовательской деятельности старшеклассников. Институт тесно сотрудничает с лучшими школами Москвы и Московской области, помогая ребятам получать нетривиальные результаты в области построения управляемых агробиоценозов, создания программ виртуальной и дополненной реальности, конструирования специализированных робототехнических систем и даже бизнес-планирования. Будущее этого направления связывается с программами предпрофессионального образования города Москвы, в которых участвует Институт – «Академический (научно-технологический) класс в Московской школе», «Инженерный класс в Московской школе», «Предпринимательский класс в Московской школе».

8.7. Прикладные работы

Ниже перечисляются упорядоченные по разделам приложений современные прикладные разработки Института. Более подробную информацию об этих разработках можно найти на сайте Института *https://www.ipu.ru/*, а также в буклете «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук: прикладные разработки». - М.: ИПУ РАН, 2024.

1. Управление подвижными объектами

1.1. Информационная поддержка экипажа воздушного судна на взлётно-посадочных режимах.

1.2. Управление траекторией и скоростью самолета с учётом постоянных и динамических ограничений.

1.3. Бортовые терминальные системы управления внутрибаковыми процессами.

1.4. Перспективные системы управления классом многорежимных, многоцелевых морских подвижных объектов.

1.5. Специализированный исследовательский стенд для разработки алгоритмов управления подводной лодкой.

1.6. Специализированный исследовательский стенд для моделирования движения судов.

1.7. Стенд для исследования блоков управления модульными многомоторными электрическими платформами.

1.8. Технологии интеллектуальной автоматизации управления функционированием беспилотных авиатранспортных систем.

1.9. Специализированный комплекс для контроля и управления параметрами рабочих процессов при проведении испытаний жидкостных ракетных двигателей космических аппаратов.

1.10. Система мониторинга состояния объектов, систем и комплексов корабля.

2. Управление в промышленности и энергетике

2.1. Самонастраивающийся ПИД-регулятор на основе частотного адаптивного управления.

2.2. Установки для быстрого производства сложных прототипов деталей методом послойного отвердевания полимеров.

2.3. Управление разработкой трудноизвлекаемых запасов нефти и газа.

2.4. Оценка надёжности, готовности и ремонтопригодности технологических комплексов добычи, подготовки и транспортировки природного газа.

2.5. Программное обеспечение проектного анализа контролепригодности функциональных систем самолётов.

2.6. Система управления плазмой в токамаках.

2.7. Неразрушающий контроль механизмов, агрегатов и машин.

2.8. Интеграционная платформа для АСУ ТП – система-оператор

2.9. Автоматизированная система моделирования и оптимизации химико-технологических процессов.

2.10. Управление в металлургической промышленности.

2.11. Киберфизические системы в рыбных хозяйствах.

3. Технические средства управления

3.1. Струйная техника.

3.2. Системы автоматизированного дозирования жидкостей «САД-1м».

3.3. Резервные системы управления неэлектрической природы.

3.4. Анизотропные тонкоплёночные магниторезистивные преобразователи магнитного поля и тока.

3.5. Привязная высотная беспилотная телекоммуникационная платформа длительного функционирования.

3.6. Автоматизированная система управления безопасностью на автодорогах с использованием RFID-технологиий и широкополосных беспроводных сетей.

3.7. Интерфейсы человеко-машинных систем.

3.8. Полётный контроллер для БПЛА мультироторного типа на российском микроконтроллере.

3.9. Перспективный отечественный комплект микроблочной аппаратуры для АСУ подводных аппаратов.

3.10. Многофунциональный необитаемый подводный аппарат НПА «Водяной-1».

4. Управление в организационно-технических системах

4.1. Оценка качества условий проживания в регионе и удовлетворённости населения деятельностью администрации.

4.2. Индексы центральности и их использование.

4.3. Модели прогнозирования торнадо.

4.4. Информационная поддержка принятия решений по управлению жизнеобеспечением города.

4.5. Комплекс механизмов отраслевого управления, включая управление проектами и программами.

4.6. Система анализа онлайновых социальных сетей.

4.7. Комплекс моделей управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры.

4.8. Новые методы моделирования, прогноза и оценивания динамических случайных сетей.

5. Системы безопасности

5.1. Программно-аналитический комплекс сценарного моделирования «Полюс».

5.2. Программно-аналитический комплекс *omole*: сервис и открытый портал для моделирования безопасности сложных систем.

5.3. Подсистема защиты от несанкционированного доступа системы верхнеблочного уровня АЭС.

5.4. Аналитический инструмент расчёта рисков от кибератак – КАЛЬКИБЕР.

5.5. Прототип системы оценки защищённости объекта с облачной инфраструктурой.

5.6. Прототип системы прогнозирования безопасности информационных инфраструктур с учётом влияния объектов друг на друга.

5.7. Система объявления в международный розыск физических лиц по линии Интерпола.

5.8. Средство переноса данных между сетями «Интерлинк».

5.9. Информационная система проверки трансграничного пассажиропотока.

5.10. Оценка уязвимости сетевых инженерных инфраструктур.

6. Геоинформационные системы и навигация

6.1. Магнитоградиентная измерительная система.

6.2. Алгоритмы электромагнитной системы относительного позиционирования.

6.3. Алгоритмы инверсии геофизических данных.

6.4. Программное обеспечение ГИС «*Suek*3d».

6.5. Цифровая фотограмметрическая станция «Талка».

6.6. Геоинформационная система ГИС «Нева».

6.7. Мультисредный планировщик заданий для групп роботов различного назначения.

6.8. Виртуальный полигон испытаний систем полётов в режиме подавления ГНСС.

6.9. Виртуальное поле боя группы БПЛА-истребителей и реализация группы тактических манёвров «4 против 40».

6.10. Кибертренинговая площадка для операторов БПЛА.

6.11. Виртуальная площадка для обучения операторов агродронов.

6.12. Киберсимулятор обучения пилотов полётам в смешанном режиме.

7. Цифровые платформы

7.1. Социальные системы помощи людям со слуховой патологией.

7.2. Системное программное обеспечение LICS (*Linux of Institute of control sciences*).

7.3. Информационно-аналитический центр интегрированной системы производственного экологического мониторинга потенциально-опасных технологических объектов.

7.4. Информационная технология создания компьютерных тренажёрных комплексов для подготовки операторов, управляющих потенциально-опасными технологическими объектами.

7.5. Программнный комплекс «РДС» для разработки исследовательских стендов систем автоматического управления.

7.6. Информационная технология календарного планирования и составления расписаний.

7.7. Сверхвысокоскоростные беспроводные самоорганизующиеся гибридные *mesh*-сети миллиметрового и оптического диапазонов волн.

7.8. Оптоволоконная система охраны магистральных трубопроводов.

7.9. Система контроля наличия и правильности ношения средств индивидуальной защиты персоналом.

7.10. Система интеллектуальной видеоаналитики, решающей задачи точного свиноводства на этапе откорма.

7.11. Система интеллектуальной видеоаналитики, решающей задачи автоматического обнаружения падежа кур несушек в условиях промышленного птичника.

7.12. Система интеллектуальной видеоаналитики, решающей задачи автоматической классификации степени спелости плодов томатов.

7.13. Система интеллектуальной видеоаналитики, решающей задачи автоматической сегментации листьев томатов и определения прироста биомассы.

Кроме того, в Институте имеются шесть Центров компетенций:

- Центр управления безопасностью сложных систем,
- Центр интеллектуальных робототехнических систем,
- Центр интеллектуальной цифровой электроэнергетики,
- Центр интеллектуального цифрового сельского хозяйства,
- Центр технологий искусственного интеллекта,
- Центр новых информационных технологий, –

в которых осуществляется координация разнообразных прикладных исследований и разработок.

Наши заказчики последних лет:

- Администрация Президента
- Совет безопасности
- Государственная Дума
- Министерства обороны
- Министерство внутренних дел
- Федеральная служба безопасности
- Федеральная служба охраны
- Федеральная служба по техническому и экспортному контролю
- Министерство промышленности и торговли
- Министерство здравоохранения
- Министерство по чрезвычайным ситуациям
- Министерство науки и высшего образования
- Правительство Москвы
- Правительство Московской области
- Администрация Воронежской области
- Администрация Краснодарского края
- Администрация Республики Крым
- Администрация Смоленской области
- Администрация Хабаровского края
- Администрация Ханты-Мансийского автономного округа
- ОАО «Научно-исследовательский электромеханический институт»
- АО «ВНИИ по эксплуатации атомных электростанций»
- ФГУП «ГосНИИАС»
- АО «РКЦ «Прогресс»
- ЗАО «Атомстройэкспорт»
- ОАО «РЖД»
- Госкорпорация «Роскосмос»
- Госкорпорация «Росатом»
- Госкорпорация «Ростех»
- ПАО «Россети»
- ПАО «Газпром»
- Центральный банк
- Внешторгбанк
- ФГУП «НИИ Квант»
- ПАО «РКК Энергия»
- ПАО «Корпорация Иркут»
- ПАО «Ижсталь»
- ПАО «ВымпелКом»
- АО «Морские неакустические системы и комплексы»
- АО «Атомтехэкспорт»
- ФГБУ «НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»
- ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»
- ООО «Московский завод «Физприбор»
- Сколковский институт науки и технологий
- ФГУП ФНПЦ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»
- ФГУП «ЦНИИмаш»
- ФГУП ЦАГИ
- ЦКБ МТ «Рубин»
- ОАО «Атомэнергопроект»
- АО ВПК «НПО машиностроения»
- ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и другие

9. Вместо послесловия

Завершая эту книгу, хочется рассказать о том, чем помимо науки гордятся все, кому выпало счастье работать в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. О здании нашего Института, об истории его появления, о людях, которые добивались достойного размещения для творцов науки об управления, напомнив заодно о тех строениях, в которых Институт жил прежде.

Публикуемый ниже материал принадлежит перу журналистки и искусствоведа Натальи Алексеевны Алексеевой, фотографии заимствованы в архиве Института.

9.1. ИПУ РАН: от начала до наших дней

Комплекс зданий Института был спроектирован в 60-е годы в ГИПРОНИИ – Государственном институте по проектированию научно-исследовательских институтов, лабораторий и научных центров АН СССР и академий наук союзных республик. Этот институт занимался проектированием большинства научных комплексов Москвы.



Панорама нынешнего здания Института



Здание Института на Каланчёвке

В 50-е годы у Института, который тогда назывался Институт автоматики и телемеханики (ИАТ), было три здания: головное на Каланчёвской улице, а также на улице Часовая на Соколе и на Ленинградском проспекте. Между зданиями по расписанию ходил автобус для сотрудников. В эти годы институт участвовал в серьезных общесоюзных работах, и тогда же возглавлявшему его академику Трапезни-

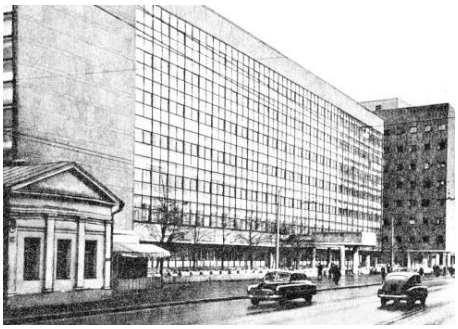
кову удалось добиться постановления ЦК и Совета министров о строительстве нового здания. Из нескольких предложенных площадок для строительства было выбрано место на юго-западе, на первый взгляд не престижное и неудобное. Москва тогда заканчивалась у станции метро Калужская, которая была конечной, и за улицей Обручева уже не было ни одного городского дома, дальше шли поля,



Панорама стройки здания на Калужской

перелески, поселки. Даже когда здание было сдано строителями, вокруг не было ни дорог, ни благоустройства, так что многие сотрудники брали с собой на работу резиновые сапоги, чтобы дойти к институту от метро (посмотрите нижнюю фотографию на стр. 19 этой книги). Но решение оказалось дальновидным, поскольку сегодня юго-запад Москвы и, в частности, Профсоюзная улица представляет собой сосредоточение различных научных учреждений и является одним из самых развитых районов Москвы. Для реализации постановления было выделено финансирование, заведомо недостаточное для проекта, но благодаря организаторским способностям и влиянию Вадима Александровича Трапезникова и его заместителя Михаила Лазаревича Линского проект был реализован.

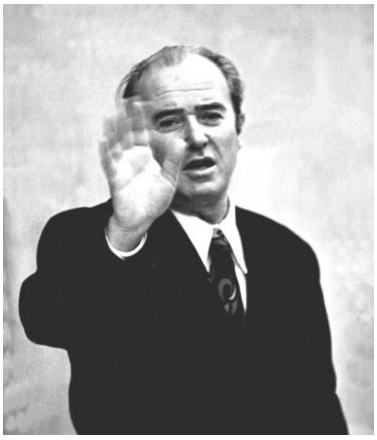
К началу 60-х годов уже определились основные приемы проектирования крупных общественных зданий. Отличительной чертой новых сооружений становится органичная связь общего архитектурного замысла с градостроительной ситуацией, функциональным назначением и конструктивной системой. Это, как правило, асимметричная композиция, подчинённая только конкретным нуждам здания и особенностям участка. Новые институты с градостроительной точки зрения характеризуются большим масштабом, обширными территориями, лаконичными объёмами зданий и обилием элементов монументального искусства, которые призваны дополнить строгость архитектуры. То, что сегодня получило общее название «советский модернизм», имеет узнаваемые черты и признаки, которые были определены еще в первой половине XX века французским архитектором Ле Корбюзье, а также принципами российских архитекторов-конструктивистов. Дополнительный толчок воплощению этих принципов дало развитие строительной отрасли, активное применение железобетонных конструкций и стекла, применение типового блочного домостроения.





Эти здания построены Ле Корбюзье в Москве (заметим, в близкой окрестности от здания Института на Каланчёвской улице). Слева – здание ЦСУ, справа – здание Министерства сельского хозяйства.

Все основные архитектурные приемы, определённые Ле Корбюзье в своих теоретических работах и постройках, прослеживаются и в нынешнем комплексе зданий ИПУ РАН: подпорные колонны, плоская кровля, ленточное остекление, бетон как основной материал, который подвергается последующему декорированию. Фасады лабораторного корпуса украшены панелями, выложенными мелким камнем-галькой, а корпус общего назначения (КОН) отделан темно-синим стемалитом – одним из самых популярных фасадных материалов советской модернистской архитектуры.



Михаил Лазаревич Линский в действии

В 1967 году здание на Калужской было передано Институту. Частично внутренняя отделка была реализована уже силами самого Института, и примерно через полгода многие лаборатории переехали в новое здание, а на территории отделали бассейн. Всеми работами по окончательной отделке корпусов и благоустройству территории руководил заместитель директора по хозяйственной части Михаил Лазаревич Линский. Он руководил не только хозяйственными вопросами, но и внимательно относился к эстетической стороне дела. Именно он поставил перед техническими и конструкторскими службами Института задачу, чтобы интерьеры КОНа поражали любого входящего в новое здание. Он хорошо понимал, как влияет искусство и архитектура не только на сотрудников, но и на партнеров и коллег, повышая статус Института в их глазах. Для работы над интерьерами была назначена рабочая группа, которая занималась дообработкой деталей, начиная от эскизов и заканчивая макетированием и реализацией в материале. Старую мебель из других корпусов не перевозили, закупали и устанавливали всё самое новое, в полном соответствии с образом нового здания.

Сам Линский переехал в новое здание одним из первых и лично курировал все вопросы, касающиеся работы над зданием и территорией. Его кабинет располагался сначала в 6-ти этажном Лабораторно-производственном корпусе (сегодня, его, для

краткости, именуют просто лабораторным) и был заселён первым. На 4-м этаже в дополнение к лабораториям разместились директор Института и его заместители, а управленческие службы (финансисты, плановики, отдел кадров и т.п.) нашли себе место на других этажах. Весь первый этаж занимало экспериментальное производство, левое крыло второго этажа – конструкторский и технологический отделы. В правом крыле первого и второго этажей через какое-то время установили полученную из Великобритании компьютерную систему ICL 4-70. Со временем на 3-м, 4-м и части 5-го этажей правого крыла, тоже появились компьютеры, но уже отечестве-



Вот она, тогдашняя «волшебница», ICL 4-70.
Получена благодаря участию Института во Всесоюзном проекте АСУ «Металл»

нного производства, а вся административная структура переехала в корпус общего назначения. В Корпусе общего назначения располагались также библиотека, два зала для конференций, столовая. А ещё на втором этаже КОНа была организована выставка с разработками Института, которую посещали многие руководители советского времени (сегодня выставка переехала на 1-й этаж, в фойе Института).



Корпус общего назначения был построен одновременно с Лабораторным, но отделан позже. Но даже тогда, когда «украшения» КОНа были выполнены только «вчерне», он производил на сотрудников очень сильное впечатление. Мрамор, огромные окна, высокие потолки и дневной свет, струящийся с 3-го этажа через прозрачные стеклянные полусферы, создавали невероятное ощущение.

60-е годы были временем большого внимания к учёным, к космической, атомной, оборонной отраслям. Никогда больше в XX веке (да и, наверное, сейчас) профессия учёного не была в таком почёте и фокусе внимания. Это видно по активному проектированию и строительству НИИ, по книгам и фильмам. То был период романтизации труда учёных, когда стремились создавать совершенно новые, комфортные условия для сотрудников, больше напоминавшие не рабочее место, а дом или санаторий. Отсюда огромные рекреации, непременные зимние сады и фонтаны, мрамор и паркет. Проектировщики стремились повысить эффективность научной работы, а для этого старались сделать интерьер производственных помещений с одной стороны уютным, а с другой – впечатляющим, даже роскошным.



Сразу после сдачи холл КОНа был пустым, отделанным мрамором пространством с колоннами. Но барельеф В.И. Ленина у бассейна и цветной витраж (см. стр. 143 настоящей книги) на первом этаже у центрального лифта уже были готовы. Витраж специально для здания Института был выполнен в 1967–1968 гг. художником-монументалистом Леонидом Полищуком в соавторстве со Светланой Щербининой. Полищук – один из самых известных художников-монументалистов своего времени, автор витражей и мозаик научных институтов и общественных зданий. Практически для всех общественных зданий 60-70-х годов от НИИ до театров и санаториев характерно активное использование монументальных панно, а также активное проникновение элементов живой природы в интерьеры. Были популярны открытые мелкие бассейны и фонтаны, обилие зелени.





Чтобы усилить связь интерьера с природой первый этаж полностью остеклен. Согласно принципам модернизма, здание КОНа оторвано от земли и поставлено на опорные колонны. Традиционное строительство предполагало устройство высокого фундамента, который отрывает здание от земли и выделяет его в окружающей среде. Корпус общего назначения построен вровень с землёй, здесь был реализован полностью стеклянный фасад «без фундамента». Этот прием был призван объединить внутреннее пространство с газоном и озеленением снаружи. Сегодня мало кого можно удивить огромными стеклянными витражами, но тогда это была совсем новая технология. Два стекла устанавливаются в металлический профиль и закрепляются резиновыми прокладками, а потом между стеклами откачивается воздух, что даёт отличную теплоизоляцию. Это хорошее решение для теплого климата, но в российских условиях резина прокладок быстро приходит в негодность, и теплоизоляционные свойства пакета снижаются (увы, это горькая правда, познанная в зимнюю стужу, многими сотрудниками Института). Ещё одна передовая технологическая идея, которая была очень популярна в 60-е годы и которую хотели реализовать в здании ИПУ, – кондиционирование. Смонтировали систему и даже планировали сделать глухие окна, чтобы проветривание осуществлялось только через кондиционер. В последний момент настояли на открывающихся окнах, что оказалось верным решением, поскольку система кондиционирования в полной мере так и не заработала.

Доработка интерьеров шла силами конструкторского отдела и коллектива главного инженера. Институт многое мог спроектировать и изготовить самостоятельно. Во вспомогательных корпусах на заднем дворе располагалось оборудование для тепло-, водо- и электроснабжения Института, а также мастерские, где изготавливалась, например, оконная и дверная арматура. В них же был создан неплохо оборудованный столярный цех. Все лабораторные стеллажи, которые ещё эксплуатируются в части лабораторий, подоконники и входные двери изготовлены в этом цехе. Еще пару строений возвёл несколько позже на территории Института знаменитый ЦАГИ. Они предназначались для проведения совместных работ в области испытания прочностных и аэродинамических характеристик крыльев самолётов. Те совместные работы не сложились, а строения остались и активно используются институтскими службами.

Сразу, как только был выбран участок, появилась идея научно-исследовательского института как отдельно стоящего комплекса, помещённого в парковую зону, благо обширный участок, выделенный под строительство, позволял реализовать это в полной мере. Подобные идеи также были частью планов по созданию для сотрудников благоприятной рабочей атмосферы, где хотелось бы находиться. Это также стало важной частью работы Михаила Лазаревича Линского над комплексом зданий Института, так как он считал важным даже то, какое впечатление зелёная и благоустроенная территория производит на тех, кто приезжает в ИПУ по делам впервые. Сразу, от проходной, любой гость ощущал размах и современность нового здания. Примерно в это же время возникла тема водоёма-пруда. Тогда

в Институте стояла мощная вычислительная полупроводниковая техника, которая сильно грелась. Машины требовали охлаждения, что и подсказало идею построить систему водяного охлаждения с внешним резервуаром. Благодаря этому удалось создать свой водоём, для которого были спроектированы и очистные сооружения. Но в реальности этот «пруд» никогда для охлаждения не использовался, зато стал украшением парковой зоны, особенно после того, как к нему был добавлен фонтан, на тот момент единственный во всем районе*. Конструкцию фонтана разработали в конструкторском отделе института. А для вычислительных машин были построены мощные кондиционеры.



Любимый дуб В.А. Трапезникова

Изначально на территории почти не было деревьев и кустарников, но по предложению Линского территория была озеленена и благоустроена в начале 70-х. В питомнике подмосковного города Пушкино был найден саженец канадского дуба, который сейчас украшает вход на территорию Института. Основную территорию от резервной отделили густо засаженной лесополосой (сейчас эта территория уже не принадлежит Институту). Позже слева вдоль пруда были высажены пихты, а серебристые ели, которые растут между 6-этажным корпусом и козырьком над центральным входом, родом из Приэльбрусья, где в советские времена находился «кремлёвский» дендрарий.



Сегодня комплекс зданий ИПУ РАН – один из самых гармонично сложившихся научных комплексов Москвы. Он по-прежнему вызывает интерес своими архитектурными решениями на фоне всплеска внимания к модернистской архитектуре, несмотря на трудности с обслуживанием новаторских идей 60-х, не всегда приспособленных к реальной офисной жизни. А романтическая идея сделать рабочее место комфортным и домашним и вовсе переживает второе рождение, но уже на новом технологическом уровне в современных офисах крупных технологических компаний, где нормой стали не только паркетные полы, огромные окна или озеленение, но и множество других архитектурных и дизайнерских приемов, которые способствуют тому, чтобы сотрудники проводили на рабочем месте как можно больше времени. На этом фоне сохранение и развитие инфраструктуры и эстетики зданий ИПУ РАН выглядит естественным продолжение и развитием большой истории Института в духе актуальных тенденций сегодняшнего дня.

* Этот водоём уже давно стал полигоном для испытания разрабатываемых в Институте беспилотных надводных и подводных аппаратов.

Информационное издание

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук: научные напрвления

Под редакцией академика РАН Д.А. Новикова

Подписано в печать 01.04.2024
Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 29,0
Тираж 300 экз. Заказ 57

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
117997, Россия, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65
www.ipu.ru

