

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Ann. Rev. in Control. 2008. Vol. 32. P. 229–252.
2. Isermann R. Fault Diagnosis Applications – Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-Tolerant Systems. Springer, 2011. P. 354.
3. Шестопалов М. Ю. Системы отказоустойчивого управления технологическими процессами. СПб.: Элмор, 2013. С. 308.
4. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Эволюционный синтез систем управления / ЛЭТИ. Л., 1983. С. 80.
5. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 620.
6. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др.; под ред. В. Б. Яковлева. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2009. С. 567.

Shestopalov M. Yu., Imaev D. H.
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

OPTIMAL RECONFIGURATION IN THE FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS

The problem of auto-recovery in the fault-tolerant control systems is considered. An overview of reconfiguration procedures and structure optimization methods is given.

Control system, fault, reconfiguration, fault-tolerancy

УДК 62.83.523: 681.513.6

Б. Р. Андриевский,
Институт проблем машиноведения РАН

Н. Д. Поляхов, В. В. Путов, В. Н. Шелудько
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Адаптивное управление роботизированными подвижными объектами

Излагается краткий обзор современных мировых достижений, а также разработок научно-педагогического коллектива кафедры систем автоматического управления в области методов и разработок адаптивных систем управления подвижными объектами.

Адаптивное и робастное управление, роботизированные подвижные объекты, автономное и дистанционное управление, техническое зрение, мобильные роботы, распознавание образов, объезд и столкновение с препятствием, всенаправленные колеса, безопасность посадки, измерение и корреляция коэффициента сцепления с тормозными характеристиками самолета

1. Современные методы построения и разработок адаптивных систем управления роботизированными подвижными объектами.

Общие методы адаптивного управления. Задача управления в условиях неполноты и неточности описания моделей объектов и условий их функ-

ционирования представляет собой одну из классических задач построения систем автоматического управления. Применение принципов адаптации для решения этой задачи привлекает внимание ученых и проектировщиков в течение многих десятилетий.

Широкую известность в области адаптивного управления получили результаты Б. Р. Андриевского, А. Л. Фрадкова [1], А. А. Бобцова [2], [3], Ю. А. Борцова, Н. Д. Поляхова, В. В. Путова [4], [5], С. Д. Землякова, Б. Н. Петрова, В. Ю. Рутковского [6], Ю. М. Козлова, Р. М. Юсупова [7], [8], А. А. Красовского, В. Н. Букова [9], [10], В. О. Никифорова [11], В. Н. Фомина, А. Л. Фрадкова, В. А. Якубовича [12], [13], И. Б. Фуртат, А. М. Цыкунова [14], [15], Я. З. Цыпкина [16], [17], Г. Гудвина [18], [19], П. Иоанну, П. Кокотовича [20], [21], К. Нарендры [22], [23], Р. Ортеги [3], К. Острема [24], [25], П. Паркса [26], Дж. Саридиса [27], Н. Ховакимьян [28], их коллег и учеников.

В настоящее время исследования в этой области проводятся с неослабевающей интенсивностью, их рамками охватываются новые и сложные (нелинейные, нестационарные) системы и предлагаются более совершенные алгоритмы адаптивного управления.

Адаптивное управление основано на идее модификации алгоритма управления в реальном масштабе времени в случае, когда параметры, определяющие динамику объекта, известны лишь частично или изменяются во времени. В соответствии в этой концепцией разработано большое число методов адаптивного управления [1], [2], [4], [12], [20], [21], [24], [29]. Некоторые из них основаны на оценивании параметров в целях настройки алгоритмов управления и предполагают достаточно медленные изменения этих параметров во времени, так что справедлив принцип разделения. Здесь можно особо отметить результаты для линейных систем с переменными параметрами и настраиваемым коэффициентом усиления (см. [30], [31]).

Другие стратегии используют свойство пассивности для выполнения прямой настройки коэффициента усиления регулятора через дифференциальное уравнение. Стратегия адаптивного управления, основанная на пассивности (достижении свойства пассивности и последующего его использования), была предложена в А. Л. Фрадковым в 1974 г. для линейных систем [1]–[13], [32], [33] и затем распространена на нелинейные системы [34], [35]. Поскольку такая стратегия не требует оценивания параметров, а количество настраиваемых параметров невелико даже для объектов высокого порядка, она еще иногда называется *простым адаптивным управлением* (simple adaptive control) [13], [29], [36], [37].

Методы построения и разработки адаптивных систем управления роботизированными подвижными объектами. К задачам, наиболее интенсивно стимулирующим исследования в области адаптивного управления, относится задача управления автономными робототехническими системами. Весьма активные исследования ведутся в области применения методов адаптации в системах дистанционного управления (*англ.* teleoperation) автономными подвижными робототехническими объектами. Они нашли всевозможные применения в таких областях, как космические исследования [38], [39], подводные работы [40], [41] и дистанционная хирургия [42], [43]. Дистанционному управлению посвящен ряд обзоров [44]–[48] и большое количество публикаций. Как отмечено в [48], основные проблемы, присущие таким системам, можно разбить на следующие категории: неопределенность модели оператора [44], [45]; неопределенность модели ведущей системы (внутреннее возмущение) [46], [47]; задержка в канале связи [46], [47]; неопределенность модели ведомой системы (внутреннее возмущение) [46], [47]; неопределенность модели окружающей среды [44], [45]; влияние внешних неизвестных возмущений. Указанные факторы могут существенно снизить качество работы систем дистанционного управления и даже привести к потере их устойчивости.

Вследствие сказанного одну из основных проблем для ориентированных на оператора адаптивных регуляторов представляет моделирование его поведения. Обычно динамика человека-оператора описывается пассивной системой «груз–пружина–демпфер», подверженной внешнему воздействию [45], [48]. Управление робототехническими системами при действии ограничений вызывает целый ряд сложных проблем. Точное моделирование этих процессов требует возможности решения уравнений динамики для расчета движений системы при возникновении контактов. В [49] отмечено, что рассмотрение физических ограничений, налагаемых динамическим взаимодействием, показывает, что управления положением недостаточно для дистанционного управления манипулятором, а требуется управления усилием или комбинацией положение–усилие.

Одним из распространенных методов управления для задач при ограничениях является управление импедансом (*англ.* impedance control) [49]. Поскольку манипулятор при возникновении

контакта механически соединен с объектом воздействия, он не может рассматриваться как изолированная система. В [48] представлены методы, применение которых приводят к *единому подходу* к управлению движениями при кинематических ограничениях, динамическом взаимодействии между манипулятором и окружением, достижению целевого положения и уклонения от препятствий. Предлагаемое в [49] «управление импедансом» реализуется через вычисление управляющей силы по разности желаемого и фактического положений манипулятора вместе с ее первой и второй производными.

Для построения систем дистанционного управления применяются также и классические методы построения беспилотных самонастраивающихся систем с эталонными моделями (БСНС с ЭМ), см., напр., [4]–[7], [11], [12], [20], [21]. Авторы [50] показали использование БСНС с ЭМ для исследования таких базовых задач управления силой, как непосредственное управление, общее управление импедансом и отслеживание заданной силы при импедансном управлении. Поскольку целевые значения параметров импеданса задаются оператором, используется адаптивное управление (см. также [51]), где параметр демпфирования руки оператора оценивается методом наименьших квадратов).

Адаптивные регуляторы, ориентированные на окружающую среду, повышают надежность и качество работы системы дистанционного управления с помощью оценки и включения параметров модели среды для формирования управления.

Применению скользящих режимов к задачам дистанционного управления посвящены работы [51], [52].

Методы адаптивного управления летательными аппаратами. Одной из областей исследования и применения адаптивного управления являются пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (ЛА) и (БПЛА). В процессе полета динамические характеристики ЛА изменяются в широких пределах в зависимости от высоты и скорости полета, тяги двигательной установки, механических параметров конструкции и геометрии аэродинамических поверхностей. Возможные отказы исполнительных органов или повреждения несущих поверхностей также приводят к непредвиденному изменению параметров. Выполнение маневров с большими углами атаки и управление вектором тяги двигателя, свой-

ственные многим типам современных высокоманевренных ЛА, приводят к росту нелинейных аэродинамических эффектов, влияние которых можно описать как нелинейное изменение параметров объекта управления.

Приведем сведения о последних результатах в области адаптивного управления ЛА в атмосфере. Результаты использования метрики $L1$ для синтеза систем адаптивного управления ЛА обобщены в [53]. В работе рассматриваются настройки синтезированного $L1$ -адаптивного регулятора, направленные непосредственно на достижение требуемых показателей качества при действии неопределенности и неблагоприятных условий полета. $L1$ -адаптивный регулятор в качестве дополнительного к базовому для улучшения отслеживания командного сигнала при управлении БПЛА рассмотрен в [54]. Методология $L1$ -адаптивного управления предлагается для адаптивной компенсации неизвестных параметрических неопределенностей и ошибок модели динамики.

В [55] предлагается новая концепция адаптивного управления, устойчивая по отношению к запаздыванию, на основе комбинации нескольких модификаций БСНС с ЭМ. Приведены результаты моделирования адаптивной системы управления продольным движением ЛА. Работа [56] посвящена синтезу адаптивных систем управления полетом для воздушно-реактивных сверхзвуковых самолетов при действии ограничений. Статья [57] посвящена комплексному обнаружению и идентификации отказов и отказоустойчивому управлению для класса нелинейных систем, имеющих приводы, подверженные нескольким различным типам отказов. Адаптивное управление аэрокосмическими летательными аппаратами (spaceplane) рассматривается в [58]. В [56] синтезируется адаптивная система управления полетом крылатых ракет, учитывающая неминимальнофазовость частотной характеристики. Проверка эффективности системы управления выполнена моделированием.

Адаптивное управление ЛА с идентификацией на скользящих режимах представлено в [59], где предложено использовать комбинированный адаптивный регулятор, содержащий параллельный компенсатор («шунт»), контур идентификации параметров, регулятор с переменной структурой и настраиваемую последовательную модель. Выполнение угловых разворотов ЛА одновременно с параметрической идентификацией,

которая проводится сравнением параметров движения, измеряемых при развороте, с этими же параметрами, вычисленными по аналитическим решениям дифференциальных уравнений, описывающих этот разворот, представлено в [60].

Для низколетящих ЛА, для которых точность поддержания высоты полета – критичный параметр, в [61] предлагается адаптивная комплексная система управления.

Проблема обеспечения свойств робастности системы в присутствии неучтенной (*unmodeled*) динамики рассматривается в [62] для автономных линейных стационарных (с постоянными параметрами) объектов, у которых весь вектор состояния может быть измерен. Это достигается с помощью непрерывно-липшицевого проекционного алгоритма, который позволяет использовать линейные свойства системы, когда адаптивный параметр лежит на проекции границы. Прямым следствием этого результата является робастность адаптивных систем управления к временному запаздыванию.

В [63] представлена и внедрена для малого ЛА расширенная стратегия инверсии модели для управления полетом с использованием обучения в реальном времени со скользящим режимом. Эти недорогие малые БПЛА очень восприимчивы к влиянию нелинейностей, атмосферной турбулентности, неопределенности моделей и отказов, поэтому адаптивные стратегии управления полетом обладают высоким потенциалом для улучшения степени их автоматизации.

Авторы [64] обращают внимание на то, что адаптация к изменениям окружающей среды, таким как ветер, играет очень важную роль для повышения надежности автономных беспилотных вертолетов. В [64] предлагается адаптивная система управления рысканием для автономных вертолетов. Система управления имеет иерархическую структуру, в которой используется внутренняя обратная связь по путевому углу и внешний контур обратной связи, оценивающий направление воздушной скорости с использованием угла и угловой скорости крена.

В [65] предлагается метод синтеза реконфигурируемой системы управления полетом на основе регуляторов с переменной структурой в скользящем режиме, обеспечивающих адаптацию к различным повреждениям управляющей поверхности. В [66] теоретические исследования по нелинейному адаптивному управлению полетом применены к задаче управления продольным движением сверхзвукового летательного аппарата.

Пристальное внимание в последнее время уделяется различным БПЛА вертолетного типа – вертолетам, квадрокоптерам, мультикоптерам и так далее. Авторы [67] исследуют два вида нелинейных регуляторов для управления автономными квадрокоптерами: регулятор, построенный методом линеаризации обратной связью, и адаптивный регулятор со скользящим режимом. В [68] для управления квадрокоптером используется метод бэкстеппинга («попятного обхода интегратора»), причем, в отличие от обычного подхода, бэкстеппинг используется при описании динамики в лагранжевой форме, а не в пространстве состояний. Для БПЛА вертолетного типа с вертикальным взлетом и посадкой (*vertical take-off and landing, VTOL*) в [69] предложена адаптивная система управления положением, учитывающая действие внешних возмущений.

2. Разработки кафедры систем автоматического управления в области адаптивного управления роботизированными подвижными объектами. Кафедра систем автоматического управления (САУ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» была основана как кафедра синхронно-следящих систем. В 1960 г. кафедра получила сегодняшнее название САУ. В 2008 г. коллективы кафедры САУ и кафедры «электрификации и автоматизации судов» (ЭАС) приняли решение об объединении с сохранением общего названия кафедры САУ.

Кафедру возглавляли заслуженные деятели науки и техники РСФСР Д. В. Васильев (1947–1977), Ю. А. Борцов (1977–1997) и д-р техн. наук, профессор В. В. Путов (1997–2014). В настоящее время кафедрой заведует первый проректор СПбГЭТУ д-р техн. наук, проф. В. Н. Шелудько. На кафедре сегодня работают 39 преподавателей и 14 сотрудников, из них 4 д-ра техн. наук, профессора, 10 кандидатов наук моложе 35 лет.

С основания более 30 лет кафедра работала в интересах военно-промышленного комплекса СССР (разработка систем управления военными подвижными объектами воздушного, наземного, и морского базирования). С начала 1980-х гг. и по настоящее время на кафедре успешно развиваются научно-прикладные исследования и разработки адаптивных и интеллектуальных САУ подвижными роботизированными объектами промышленного и специального назначения судовой электротехники и автоматики.

В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на кафедре САУ под руководством профессоров, д-ров техн. наук В. В. Путова, Н. Д. Поляхова, В. Н. Шелудько и доцентов, канд. техн. наук С. В. Гаврилова, И. А. Приходько, В. Е. Кузнецова, В. Б. Второва, сложилась научная группа молодых (до 35 лет) преподавателей (доценты канд. техн. наук Е. С. Филатова, А. В. Путов, В. П. Казаков, Е. В. Друян, А. Д. Стоцкая, А. В. Вейнмейстер, Д. М. Филатов), аспирантов (К. В. Игнатъев, М. М. Копычев, Т. А. Кузьмина) и студентов (Е. В. Серых, А. И. Фридрих, Г. В. Бельский), активно участвующих в научных исследованиях и в решении прикладных задач в области управления подвижными объектами, мехатроники и робототехники и опубликовавших за последние 10 лет в этой области более 300 статей, докладов, патентов и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

На кафедре создан ресурсный центр управления и автоматизации мехатронных комплексов подвижных объектов и транспортных средств и четыре учебно-научные лаборатории, оснащенные электронно-вычислительным оборудованием, контрольно-измерительными приборами и созданными на кафедре действующими физическими макетами робототехнических и электромеханических жестких и упругих объектов, маятниковых систем, наземных и воздушных подвижных объектов с автономным управлением.

Дадим краткий обзор разработок кафедры, опубликованных преимущественно за последнее десятилетие.

Адаптивные и интеллектуальные системы автоматического управления роботизированными подвижными объектами. Еще в середине 1980-х гг. на кафедре был выдвинут и развивался ([5], [70]–[72]) метод построения беспоисковых (аналитических) прямых и непрямых адаптивных систем управления с параметрической и сигнальной настройкой для нелинейных (и нестационарных) динамических объектов с функционально-параметрической неопределенностью правых частей описывающих их обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод основан на нелинейной параметризации правых частей уравнений объектов функциями, удовлетворяющими условиям мажорирования, в частности степенными функциями переменных состояния, и в некоторых публикациях именуется для краткости методом мажорирующих функций.

Указанный метод нашел применение в построении адаптивных систем управления классами многостепенных нелинейных жестких [73], [74] и многорезонансных (многомассовых) упругих механических объектов [71], [72], [75].

В [73] для правления многостепенными нелинейными взаимосвязанными механическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью предложены построенные с помощью степенных мажорирующих функций семейства локальных адаптивных регуляторов – функций только переменных состояния подвижности, и взаимосвязанных адаптивных регуляторов – функций перекрестных переменных состояния степеней подвижности, вместе образующих объединенное семейство взаимосвязанных адаптивных регуляторов. В [74] показывается работоспособность (диссипативность) построенных в [73] локальных адаптивных регуляторов со степенными мажорирующими функциями.

Многорезонансные упругие механические объекты недоступны полному измерению в силу принципиальной недоступности для измерения с помощью датчиков переменных состояния, характеризующих внутренние (виртуальные) упругие связи, учитывающие конечный спектр частот упругих колебаний, поэтому для реализации адаптивных законов алгоритмов управления по состоянию необходимо применять идентификаторы (наблюдатели) состояния [71], [72]. В [76] вопросы применимости стационарных наблюдателей в адаптивных системах управления по состоянию исследуются с позиций метода векторных функций Ляпунова.

В [77] рассматриваются вопросы построения комбинированных беспоисковых адаптивных систем, сочетающих прямое и не прямое управления с алгоритмами сигнальной и параметрической настройки. В частности, рассматривается разновидность комбинированной адаптивной системы управления многорезонансным упругим механическим объектом с неполными измерениями, полученную посредством объединения прямой адаптивной системы с параметрической настройкой и непрямой адаптивной системы с настраиваемой моделью, играющей роль адаптивного наблюдателя состояния, тогда как стационарный наблюдатель выполняет лишь вспомогательную задачу, участвуя в реализации процессов адаптации сигнально настраиваемой модели.

В работах кафедры в последние годы одновременно с аналитическими (беспоисковыми) адаптивными системами рассматриваются интеллектуальные (нейросетевые и нейронечеткие) системы адаптивного управления многостепенными нелинейными упругими механическими объектами, обучающиеся по беспоисковым адаптивным системам. Результаты этих исследований для одно- и двухрезонансных (двух- и трехмассовых) упругих объектов приведены в [78]–[80].

В [81] исследуются прямая и непрямая адаптивные системы управления с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для нелинейного асинхронного частотно-регулируемого электропривода.

В [82], [83] обсуждаются вопросы построения беспоисковых систем адаптивного управления скольжением транспортного колеса с электромеханическим двигателем с учетом упругих свойств механической трансмиссии и пневматической шины, а также сухого трения со «срывным» эффектом (эффект Штрибека) в «пятне» контакта.

В [84] представлен синтез алгоритма адаптивного управления, для построения которого использован метод функций Ляпунова. Сходимость процессов алгоритма почти мгновенная, имеет асимптотический характер и является грубой относительно неучтенных возмущений. Структурно он выглядит как закон параметрической обратной связи, однако функционально работоспособен при значительных (многократных) отклонениях параметров динамического объекта управления. Исследование моделированием режимов работы синхронного генератора (СГ) с энергосетью показывает узкую локализацию (почти совпадение) переходных процессов синхронного генератора при значительных вариациях параметрических отклонений СГ с кратностью пять и более и даже с переменной знака. В режиме возникновения бифуркации также очевидна способность ограничения размера аттрактора и даже его полного подавления. Построение и расчет этих алгоритмов достаточно прост и не нуждается в «точной» отладке.

В [85] представлены теоретическое обоснование и практические подходы в построении адаптивных электрогидравлических рулевых авиационных систем нового поколения, обеспечивающих высокие требования к динамическим характеристикам и показателям надежности в управлении современными маневренными самолетами. Разработаны практически реализуемые структуры сигнальных алгорит-

мов с эталонной моделью с переключением на настраиваемую модель, а также модально-адаптивные структуры для гашения упругих колебаний, в частности, с применением датчика перепада давления в гидродвигателе.

В [86] представлены следующие результаты по устойчивости нечетких систем: процедура исследования нечетких регуляторов, основанная на применении квадратичных неравенств и концепции универсального аппроксиматора; синтез агрегированных нечетких регуляторов, обеспечивающих расширение области грубости нечетких систем управления; синтез гибридных структур нечетких регуляторов с традиционными алгоритмами (оптимальным и робастным) для управления техническими объектами с неопределенностью, в частности, возмущенным движением синхронного генератора.

В [87]–[89] излагаются результаты построения робастных регуляторов систем возбуждения синхронного генератора, методологической основой которых является теория H_∞ -оптимизации. Метод непосредственно учитывает неопределенность управляемого объекта в синтезе регулятора. Робастный регулятор имеет структуру динамического звена с постоянными параметрами и для своей реализации требует только измеренных выходных управляемых переменных. Показана возможность использования децентрализованного подхода. Отмечается, что совместно работающие робастные регуляторы проектируются каскадно: объектом управления для синтеза последующего робастного регулятора служит замкнутая система через робастный регулятор, синтезированный на предыдущем этапе.

В [90], [91] рассматриваются методы прогнозирования энергопотребления. Исследована эффективность предсказания электропотребления основе нейронечеткого подхода с использованием вейвлет-теории. Использовано разложение по вейвлету Хаара с уровнем детализации 3. Обучение и прогнозирование осуществляется для каждого уровня детализации в отдельности. Для этого построены 4 нейронечеткие сети с различной структурой, определяемой особенностями того уровня детализации, который они призваны прогнозировать, и использующие алгоритм Такаги–Сугэно.

В [92], [93] разработана оригинальная концепция построения автономных модулей тестирования возможных разрушений сложных механических систем, в том числе и с нелинейными колебаниями,

причем с предельно широкой неопределенностью, на основе предложенного метода расчета первого показателя Ляпунова для нехаотических систем с одним состоянием равновесия. Концептуальную основу составляют интерполяционные методы анализа и обработка временных рядов для оценки первого показателя Ляпунова.

В [94]–[97] для современных маневренных самолетов разработана система управления автономным электрогидравлическим приводом с комбинированным принципом регулирования, обеспечивающая необходимые для устойчивости контура «система управления полетом – рулевой привод – самолет» частотные характеристики рулевого привода. Закон управления рулевым приводом основан на принципе построения адаптивных систем управления с сигнальной адаптацией. К отличительным особенностям предложенного закона управления можно отнести применение нелинейной эталонной модели, использование неполного вектора состояния и применение нечеткой логики при формировании сигнала управления, что позволило упростить требования к оснащению рулевого привода дополнительными датчиками и избавило от необходимости построения наблюдателей, сохранив при этом требуемые показатели качества системы управления и малую чувствительность к ограниченным параметрическим и внешним возмущениям.

В [98]–[101] рассматриваются вопросы создания и исследования систем автоматического управления положением ротора в активных магнитных подшипниках для высокоскоростных электрических машин, позволяющих осуществить бесконтактный подвес ротора электрической машины относительно статора. Разработана система управления, архитектура которой основана на децентрализованном каскадном соединении ПИ- и ПД-регуляторов, которые реализованы на базе стандартных программируемых логических контроллеров. Результаты моделирования подтверждают робастные свойства спроектированной системы автоматического управления положением ротора в электромагнитном подвесе.

В [102], в отличие от существующей практики подбора параметров сигнальной адаптации систем с эталонной моделью в процессе компьютерного моделирования, даны рекомендации по аналитическому расчету этих параметров, не связанному с необходимостью решения уравнения

Ляпунова, а основанному на особенностях динамики систем с сигнальной адаптацией в скользящем режиме. Также дано обоснование замены в алгоритме адаптации неизвестной матрицы входа объекта известной матрицей входа эталонной модели. В [103] для линейной стационарной системы с одним входом и линейной обратной связью по состоянию рассмотрена задача такого назначения полюсов, которое гарантировало бы асимптотическую устойчивость замкнутой системы с заданной степенью устойчивости при ограниченных возмущениях параметров объекта.

Разработки действующих экспериментальных образцов роботизированных подвижных объектов. В публикациях [104]–[110] описываются разработки методов, технических средств и экспериментальных образцов автономных роботизированных подвижных объектов различного назначения, выполненные на кафедре систем автоматического управления при поддержке госбюджетных и инициативных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и служащих для экспериментального исследования алгоритмов и технических средств реализации автономного управления.

1. *Промышленный робот-манипулятор MobMan.* Робот построен на базе промышленного манипулятора Nokia PUMA 560, установленном на подвижном основании, на котором также закрепляется шкаф управления с электронными компонентами. В качестве устройств движения используются в зависимости от модификации всенаправленные (omni) мотор-колеса (на рис. 1 представлен робот MobMan) и обычные мотор-колеса (на рис. 2 – робот MobMan на четырехколесной платформе с системой электродвижения).



Рис. 1



Рис. 2

Использование всенаправленных колес позволяет роботу двигаться в любых направлениях. Всенаправленные мотор-колеса с двигателями постоянного тока были спроектированы и собраны на базе имеющихся мотор-колес. В состав каждого звена манипулятора входят следующие электроприводы постоянного тока и зубчатые передачи. Серводвигатели приводов оснащены электромагнитными тормозами, которые включаются при выключении питания двигателей, обеспечивая тем самым фиксацию манипулятора в положении, предшествующем отключению питания (с целью предотвращения несчастных случаев и повреждений установки).

Проблема распознавания образов решается с использованием RGB-веб-камеры. Образ в данном случае состоит из двух разноцветных областей, причем одна лежит в пределах другой. Для ориентации в пространстве робот снабжен инфракрасной камерой глубины. Такая камера позволяет получать в реальном времени карту глубины окружающего пространства и определять расстояния до объектов. Обработка данных с камер осуществляется с использованием библиотек с открытыми исходными кодами OpenCV и OpenNI в среде QtCreator на языке C++.

Всенаправленные мотор-колеса позволяют роботу перемещаться в ограниченных пространствах, сохраняя при этом точность позиционирования рабочего органа.

2. *Автономный трехколесный робот Roborina.* Робот Roborina (рис. 3) может передвигаться автономно, используя трехмерный сканер окружающего пространства, или двигаться по заранее определенной траектории, или следовать за неко-

торым образом, или перемещаться по командам оператора с компьютера в пределах сети Wi-Fi. Робот Roborina имеет трехколесную конструкцию, содержащую два передних независимых ведущих мотор-колеса и одно заднее неуправляемое колесо, свободно закрепленное в подшипниковой опоре. Данная конструкция позволяет удобно управлять положением и скоростью передвижения робота, обеспечивая при этом его устойчивость. Для ориентации в пространстве применяется стереокамера. Она заменяет использование отдельной камеры глубины для ориентации в пространстве и RGB-камеры для распознавания образов, совмещая их функционал в одном устройстве. Для работы с исходными изображениями, полученными с двух камер, применены алгоритмы Block Matching и Semi-Global Block Matching, которые показывают удовлетворительные результаты по критериям скорости и точности вычислений. Принцип их работы основан на поиске блоков пикселей с левого изображения на эпиполярной линии правого изображения и вычисления расстояния на основе разности координат блоков на двух изображениях. Таким образом, можно создавать 3D-реконструкции окружающего пространства. При движении по незнакомой местности стереокамера помогает определять положение препятствий и расстояние до них. Проблема определения расстояния может быть решена также за счет использования ультразвуковых датчиков, расположенных по периметру корпуса робота для вычисления расстояния до препятствий, расположенных во всех направлениях. При движении к месту назначения робот в режиме реального времени изменяет свою траекторию для избежания столкновения с препятствиями, изменяя при этом свое пространственное положение и скорости ведущих колес. При появлении препятствия в зоне видимости робота

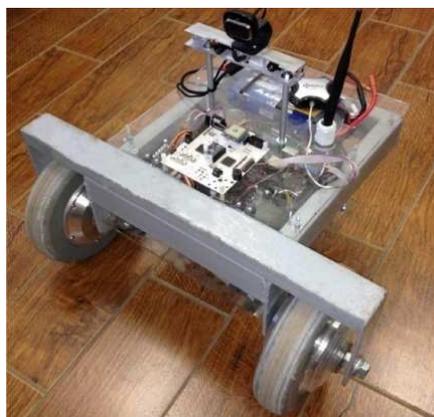


Рис. 3

система управления вырабатывает управляющее воздействие на изменение траектории движения робота, исходя из направления движения, удаленности текущего положения робота от препятствия и расстояния до места назначения. Если препятствие оказывается слишком близко, робот замедляет скорость движения и меняет пространственную ориентацию. Цель управления роботом – объезд препятствия по минимально возможному радиусу, позволяющему предотвратить столкновение, минимизируя общую протяженность траектории движения робота до места назначения.

3. *Автономный робот Hard Bot.* Робот Hard Bot (рис. 4) представляет модификацией робота Robotina. Он имеет жесткую стальную сварную конструкцию и минимум выступающих, подвижных и составляющих частей для увеличения транспортной устойчивости и снижения отказов. Благодаря своей конструкции и мощным мотор-колесам робот может переносить тяжести, а благодаря поворотной камере – распознавать образы, оставаясь при этом неподвижным, и начинать движение только после нахождения соответствующего паттерна, что позволяет минимизировать затраты энергии на движение. Для движения робот оснащается двумя мотор-колесами с двигателями постоянного тока. Радиосигнал дистанционного управления поступает на приемник, установленный в корпусе робота с пульта управления. В роботе установлены также интерактивные элементы – полоска RGB-светодиодов, кнопки, динамик и т. п. Для включения робота используется система с герконами. С целью обеспечения возможности дистанционно наблюдать за изменениями окружающего пространства для человека-оператора предусмотрена камера, закрепленная в конструкции сервомашинки. На роботе также установлена аналоговая RGB-камера в подвесе из двух сервомашинки, позволяющих управлять направлением камеры. Камеру можно поворачивать



Рис. 4

либо с пульта управления, либо с помощью акселерометра, установленного в FPV-очках, которые может использовать оператор. Робот обладает встроенным гелевым аккумулятором с разъемом для подключения зарядного устройства.

4. *Робот Banana Bot.* Миниатюрный и легкий робот Banana Bot (рис. 5) предназначен для задач слежения, фото- и видеосъемки в малых ограниченных пространствах. Для определения положения робота используется камера захвата, подключенная к стационарному микрокомпьютеру. Робот Banana Bot оснащен выполненным из оргстекла подвижным основанием и тремя omni-колесами с двигателями постоянного тока, управляемыми дистанционно по радиоканалу. Для определения положения робота используется камера захвата, подключенная к стационарному компьютеру. Также можно управлять роботом через Интернет с помощью пульта управления при использовании в системе управления роботом микрокомпьютера Banana Pi.

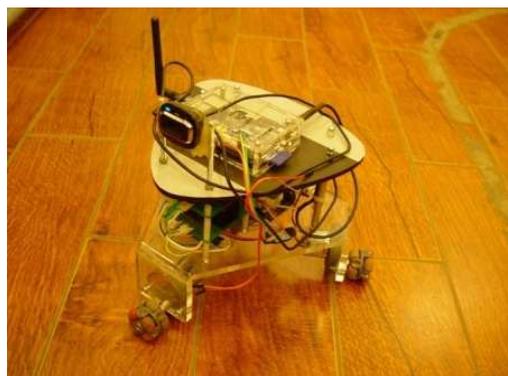


Рис. 5

Всенаправленные колеса позволяют роботу двигаться по прямой линии из одной точки плоскости в другую без необходимости в развороте. Более того, поступательное движение по прямой траектории может быть объединено с вращательным, обеспечивая перемещение робота в точку назначения под необходимым углом. Для определения положения робота используется камера захвата. Она представляет собой камеру с установленным на нее инфракрасным фильтром, которая размещается таким образом, чтобы видеть светотражающие полоски на корпусе робота и пространство вокруг него. Камера оснащается инфракрасной подсветкой. Инфракрасное излучение отражается от полосок на роботе и возвращается обратно в камеру. Благодаря наличию инфракрасного фильтра на изображении остаются видны лишь отражающие полоски на роботе, что помогает избежать дальнейшей сложной

цифровой фильтрации. Для получения и обработки изображения служит библиотека OpenCV. В результате применения морфологических преобразований и пороговой функции можно получить бинарное изображение с двумя белыми полосками на черном фоне. По площади полосок и взаимному расположению их центров можно определить координаты робота и угол его поворота. Для управления положением робота применяется микрокомпьютер, к которому подключена камера захвата и приемопередатчик радиосигналов. Программа на микрокомпьютере обрабатывает изображение с камеры захвата с целью определения положения робота, а также получает от пользователя координаты желаемого положения робота. Далее запускается подпрограмма управления роботом в реальном времени, рассчитывающая текущее положение робота, вектор движения до цели, значения скоростей колес, после чего эти значения отправляются по радиоканалу на робот.

5. *Автономный мультироторный беспилотный летательный аппарат.* Автономный беспилотный летательный аппарат (рис. 6) снабжен двумя парами двигателей (квадрокоптер), вращающимися в противоположных направлениях. Для обеспечения стабильности во время полета мультироторные БПЛА оснащаются трехосевым гироскопом, который отслеживает их положение. Акселерометр используется процессором как инструмент для выравнивания летательного аппарата по линии горизонта. Кроме того, применяются датчики GPS и барометр, которые необходимы для позиционирования и управления высотой полета квадрокоптера. Сонар может использоваться как для автоматического приземления и поддержки малой высоты полета, так и для преодоления препятствий.

Система автоматического управления полетом квадрокоптера включает набор датчиков для считывания информации об окружающем пространстве,



Рис. 6

одноплатный компьютер для обработки информации и систему передачи управляющего сигнала на роторы двигателей. Полезная нагрузка экспериментального образца достигает 3 кг и определяется суммарной мощностью двигателей; скорость полета достигает 10 м/с; максимальная высота подъема не более 1 км; время полета не более 15 мин и зависит от мощности аккумулятора и от максимальной полезной нагрузки.

Двухуровневая система управления позволяет создать быстродействующий алгоритм управления полетом. Облегченная конструкция квадрокоптера обеспечивает длительное время работы от одного аккумулятора. Алгоритм распознавания образов предусматривает итерационную обработку изображения, что уменьшает ошибку распознавания.

Для расширения возможностей обучения на кафедре САУ в 2014 г. был разработан и внедрен курс лабораторных работ с удаленным доступом, посвященных разработке систем управления многомассовыми упругими электромеханическими объектами на реальных лабораторных стендах и позволяющих студентам из других университетов ознакомиться с проектированием регуляторов для такого рода систем. Были введены в учебный процесс стенды удаленного доступа для изучения основ программирования микроконтроллеров и цифровых микроконтроллерных систем управления, создан исследовательский стенд удаленного управления группой роботов, оснащенный системой беспроводной зарядки аккумуляторов роботов.

6. *Двухмассовый упругий электромеханический стенд удаленного доступа.* Двухмассовый электромеханический объект (рис. 7) состоит из двигателя постоянного тока, соединенного с помощью пружины с алюминиевым диском с грузами, имитирующими нагрузку. В состав стенда также входят плата управления объектом, сервер удаленного доступа и камера. На данном стенде возможно осуществлять удаленные исследования адаптивных и интеллектуальных систем управления упругими колебаниями.

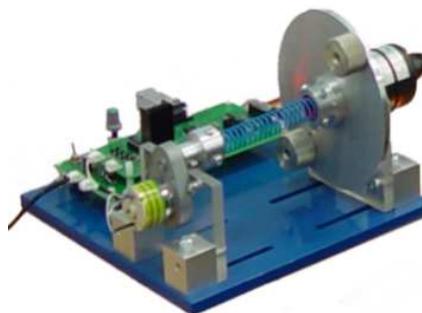


Рис. 7

7. *Микроконтроллерный стенд удаленного доступа* (рис. 8). Он основан на 8-битном микроконтроллере Atmel ATmega128A, к которому подключены различные периферийные устройства – устройства вывода информации (различные светодиодные индикаторы, ЖКИ), приводы (двигатель постоянного тока, шаговый двигатель, сервоприводы), датчики (датчик температуры, тензодатчик и ультразвуковой датчик расстояния) и т. п. Подключение к стенду осуществляется по протоколу TCP. Размер транслируемого изображения составляет 320×240 пикс.



Рис. 8

8. *Стенд удаленного управления группой роботов*. Децентрализованная система управления группой наземных роботов, передвигающихся за счет сигналов с удаленных рабочих станций и принимающих сигналы с системы управления, основанной на компьютерном зрении. Интеллектуальная нечеткая система управления обеспечивает автономное движение роботов и объезд возникающих препятствий на пути движения к цели (рис. 9).

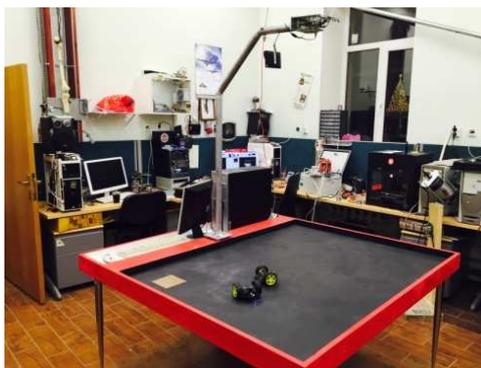


Рис. 9

Траектория движения робота может быть отслежена в реальном времени по сети Интернет. Группа роботов способна выполнять более сложные задачи, чем каждый из них в одиночку. Разрабатывается система обмена информацией между роботами и компьютерной системой управления верхнего уровня.

Стенд оснащен индуктивными зарядными станциями, обеспечивающими бесперебойную работу членов группы роботов.

9. *Автономный гибридный электроэнергетический комплекс*. Комплекс используется для отработки различных адаптивных алгоритмов распределения вырабатываемой энергии между потребителями и аккумуляторами, содержит ветрогенератор, солнечную батарею, блок аккумуляторов, нагрузку, а также вентилятор и прожектор для имитации ветра и солнца (рис. 10).

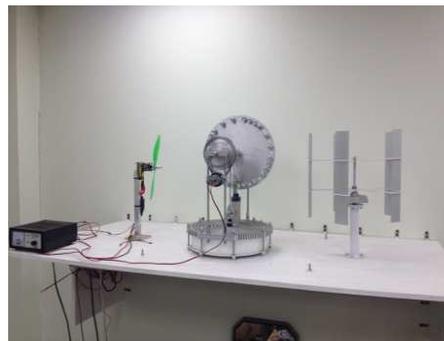


Рис. 10

В качестве источника гарантированной мощности выступает электрогенератор, обеспечивающий потребителей энергией при пиковых нагрузках. Электрическая энергия от различных источников поступает на вход системы управления, которая обеспечивает ее бесперебойное распределение. Потенциальными областями применения комплекса служат системы энергогенерации, основанные на возобновляемых источниках энергии (HRES – Hybrid Renewable Energy System), в которых традиционные источники электроэнергии объединены с возобновляемыми (солнечные панели, ветровые генераторы и др.). Такие системы могут управляться либо локально, либо удаленно (по сети GSM или с использованием web-приложений).

10. *Автоматизированный электромеханический буксируемый комплекс для измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий*. Одним из направлений исследований кафедры САУ, ведущихся под научным руководством профессора В. В. Путова, является разработка новых технологий и технических средств предпосадочного измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий в экстремальных погодных условиях, коррелирующих с реальными характеристиками торможения приземляющихся воздушных судов и опирающихся на принцип управляемого торможения измерительного колеса с

целью имитации им в процессе измерения антиблокировочных режимов торможения, близких к реальным режимам торможения колес самолета при посадке, формируемым авиационной противоюзовой автоматикой [82], [83], [111]–[114].

В настоящее время задачи создания и исследования новой технологии непрерывного измерения коэффициента сцепления взлетно-посадочных полос, обеспечивающей текущую (в реальном времени) корреляцию результатов измерения с реальными характеристиками торможения воздушных судов, и реализующего эту технологию буксируемого измерительного комплекса нового поколения, построенного на базе электромеханического имитатора измерительным колесом реальных тормозных режимов воздушных судов, решаются группой сотрудников кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» совместно с индустриальным партнером ООО «Невская инженерная компания» (СПб.). Исследования ведутся в рамках проекта «Создание и исследование новой технологии измерения коэффициента сцепления аэродромных покрытий и разработка на ее основе мобильного комплекса для прогнозирования безопасной посадки воздушного транспорта» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы».

На рис. 11 представлена концептуальная компьютерная модель создаваемого буксируемого измерительного комплекса, воспроизведенная по разработанной в проекте конструкторской документации.

Создаваемый буксируемый измерительный комплекс состоит из следующих функциональных частей (рис. 11):

- автоматически управляемое электромеханическое устройство (электромеханический имитатор) торможения измерительного колеса, выполненное на базе синхронной электрической машины с адаптивной системой управления режимами торможения;
- электрошкаф управления и автоматики, содержащий блоки силовой и управляемой электроники, бортовой микропроцессор, коммутирующую аппаратуру, GPS-приемник, радиомодем, аккумулятор и зарядное устройство;
- независимая рычажная подвеска измерительного колеса состоит из шарнирно соединенной с несущей рамой балки, с которой шарнирно скреплена балка рычажной подвески с измерительным колесом, а также содержит встроенную тензометрическую систему;
- буксируемое шасси, выполненное на базе переднего моста серийного отечественного автомобиля;
- переносной компьютерный пульт управления и индикации оператора измерительного колеса, выполненный на базе бортового панельного компьютера с цветным сенсорным экраном и оснащенный встроенным термопринтером, кнопочной клавиатурой, аккумулятором и зарядным устройством, обеспечивает все функции информационно-управляющей системы измерительного комплекса, осуществляя измерение, вычисление, документальную регистрацию и визуальную индикацию результатов измерений, а также визуаль-

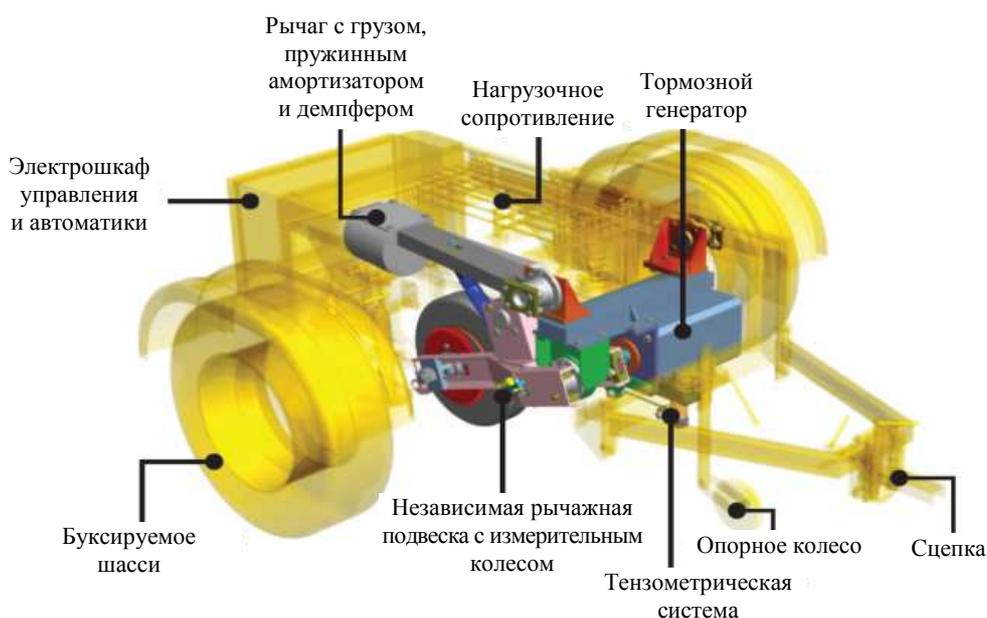


Рис. 11



Рис. 12

лизацию и индикацию электронной карты аэродрома и регистрацию на ней местоположения комплекса, передачу результатов измерения и обработанной информации с помощью GSM-модема в диспетчерскую службу аэродрома, регистрацию, архивирование и возможность воспроизведения всего объема результатов измерения коэффициента сцепления и обработанной информации, формирование и документирование экспертной информации, необходимой для принятия диспетчером аэродрома решения о безопасной посадке подлетающего воздушного судна и др.

В настоящее время завершена сборка, отладка и подготовка экспериментального образца буксируемого измерительного комплекса (рис. 12) к проведению его полунатурных и аэродромных исследовательских испытаний по оценке влияния имитации (антиблокировочных) режимов торможения измерительным колесом на точность изме-



Рис. 13

рения коэффициента сцепления на базе имеющегося в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» уникального автоматизированного электромеханического испытательного стенда с управляемым барабанным имитатором «бегущей дорожки» (рис. 13) для прокатывания по ней измерительного колеса испытуемого буксируемого измерительного комплекса.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности развития методов и разработок адаптивных систем управления подвижными объектами. Рассмотренные разработки кафедры защищены более чем пятьюдесятью патентами и Свидетельствами об официальной регистрации программ для ЭВМ и они нашли применение в области *адаптивного и интеллектуального управления роботизированными подвижными объектами различного назначения.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999.
2. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении / А. А. Бобцов, В. О. Никифоров, А. А. Пыркин, О. В. Слита, А. В. Ушаков. СПб.: РИО ИТМО, 2013.
3. A parameter estimation approach to state observation of Nonlinear systems / R. Ortega, A. Bobtsov, A. Pyrkin, A. Aronovskiy // *Systems and Control Lett.* 2015. Vol. 85. P. 84–94. URL: <https://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr/hal-01261659>.
4. Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Путов В. В. Прямые и не прямые беспоисковые адаптивные системы с мажорирующими функциями и их приложения к управлению многостепенными нелинейными упругими механическими объектами // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2007. № 10. С. 4–11.
6. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления / Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский, И. Н. Крутова, С. Д. Земляков. М.: Машиностроение, 1972.
7. Козлов Ю. М., Юсупов Р. М. Беспоисковые самонастраивающиеся системы. М.: Наука, 1969.
8. Козлов Ю. М. Адаптация и обучение в робототехнике. Научные основы робототехники. М.: Наука, 1990.
9. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. М.: Физматгиз, 1963.
10. Красовский А. А., Буков В. Н., Шендрик В. С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука, 1977.
11. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
12. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
13. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.

14. Цыкунов А. М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами. М.: Физматлит, 2009.
15. Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 109–118.
16. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах М.: Наука, 1968.
17. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем, М.: Наука, 1970.
18. Goodwin G. C., Middleton R. H. Adaptive control of continuous and discrete time systems // *Advances in Control and Dynamic Systems*; ed. by C. T. Leondes. Academic Press, 1985. Vol. XXXIV.
19. Goodwin G. C., Ramadge P., Caines P. E. Discrete time multivariable adaptive control // *IEEE Trans. Autom. Control*. 1980. Vol. AC-25, № 3. P. 449–456.
20. Ioanu P., Kokotovic P. Adaptive Systems with Reduced Models. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
21. Ioannou P., Sun J. Robust Adaptive Control. Englewood Cliffs. New York: Prentice-Hall, 1996.
22. Luders G., Narendra K. S. Stable adaptive schemes for state estimation and identification of linear systems // *IEEE Trans. AC*. 1974. Vol. AC-19, № 3. P. 841–847.
23. L1-Adaptive Control: Stability, Robustness, and Interpretations / P. A. Ioanu, A. M. Annaswamy, K. S. Narendra et al. // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 2014. Vol. 59, № 11. P. 3075–3080. URL: <https://hal-supelec.archives-ouvertes.fr/hal-01100864>.
24. Astrom K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989.
25. Kharisov E., Hovakimyan N., Astrom K. Comparison of Several Adaptive Controllers According to Their Robustness Metrics // *Proc. AIAA Guid., Nav. and Control Conf.*, Toronto, Canada, AIAA-2010-8047, 2010. URL: <http://libanswers.uah.edu/faq/100914>.
26. Parks P. C. Stability and convergence of adaptive controllers-continuous systems // *IEEE Proc. Control Theory and Appl.*, D. 1981. Vol. 128, № 5. P. 195–200.
27. Saridis G. N. Self-Organizing Control of Stochastic Systems. New York: Marcel Dekker. 1977.
28. Cao C., Hovakimyan N. Design and Analysis of a Novel L1 Adaptive Control Architecture with Guaranteed Transient Performance // *IEEE Trans. Automat. Control*. 2008. Vol. 53, № 2. P. 586–591.
29. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. Direct adaptive control algorithms. New York: Springer Verlag, 1994.
30. Leith D. J., Leithead W. E. Survey of gain-scheduling analysis and design // *Int. J. Control*. 2000. Vol. 75. P. 1001–1025.
31. Rugh W. J., Shamma J. C. Research on gain-scheduling // *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 1401–1425.
32. Фрадков А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта // *Автоматика и телемеханика*. 1974. № 12. С. 96–103.
33. Фрадков А. Л. Схема скоростного градиента и ее применения в задачах адаптивного управления // *Автоматика и телемеханика*. 1979. № 9. С. 90–101.
34. Seron M. M., Hill D. J., Fradkov A. L. Adaptive passification of nonlinear systems // *IEEE Conf. Decision Control*. Dec. 1994. P. 190–195.
35. Fradkov A. L., Miroshnik I. V., Nikiforov V. O. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
36. Barkana I. Gain Conditions and Convergence of Simple Adaptive Control // *Int. J. Adaptive Control and Sign. Proc.* 2005. Vol. 19, № 1. P. 13–40.
37. Barkana I. Simple adaptive control – a stable direct model reference adaptive control methodology – brief survey // *Int. J. Adapt. Control and Sign. Proc., Spec. iss. Simple and Robust Adaptive Control*. 2014. Vol. 28, № 7–8. P. 567–603.
38. Ground space bilateral teleoperation of ETS-VII robot arm by direct bilateral coupling under 7-s time delay condition / T. Imaida, Y. Yokokohji, M. O. T. Doi, T. Yoshikwa // *IEEE Trans. Robot. Autom.* 2004. Vol. 20, № 3. P. 499–511.
39. Jenkins L. Telerobotic work system-space robotics application // *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 1986. P. 804–806.
40. Funda J., Paul R. P. A symbolic teleoperator interface for time-delayed underwater robot manipulation // *Proc. Ocean Tech. Opportunities in Pacific for 90 s*. 1991. № 1. P. 1526–1533.
41. Yoerger D., Slotine J.-J. E. Supervisory control architecture for underwater teleoperation // *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 1987. Vol. 4. P. 2068–2073.
42. Madhani A. J., Niemeyer G., J. K. Salisbury J. The black falcon: A teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery // *Proc. IEEE /RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.* 1998. Vol. 2. P. 936–944.
43. Constrained Cartesian motion control for teleoperated surgical robots / J. Funda, R. H. Taylor, S. G. B. Eldridge, K. G. Gruben // *IEEE Trans. Robot. Autom.* 1996. Vol. 12, № 3. P. 453–465.
44. Passenberg C., Peer A., Buss M. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems // *Mechatronics. Spec. iss. on Design Control Methodologies in Telerobotics*. 2010. Vol. 20, № 7. P. 1–25.
45. Erickson D., Weber M., Sharf I. Contact stiffness and damping estimation for robotic systems // *Int. J. Robot. Res.* 2003. Vol. 22, № 1. P. 41–57.
46. Nuno E., Basanez L., Ortega R. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial // *Automatica*. 2011. Vol. 47. P. 485–495.
47. Hokayem P. F., Spong M. W. Bilateral teleoperation: An historical survey // *Automatica*. 2006. Vol. 42. P. 2035–2057.
48. Chan L., Naghdy F., Stirling D. Application of Adaptive Controllers in Teleoperation Systems: A Survey // *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* 2014. P. 337–352.
49. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation. Part I: Theory // *J. Dyn. Syst., Meas. Control*. 1985. Vol. 107. P. 1–7.
50. Singh S., Popa D. An analysis of some fundamental problems in adaptive control of force and impedance

- behavior: Theory and experiments // IEEE Trans. Robot. Automat. 1995. Vol. 11, № 6. P. 912–921.
51. Tsumugiwa T., Yokogawa R., Hara K. Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2002. P. 644–650.
52. Duchaine V., Gosselin C. M. General model of human-robot cooperation using a Novel velocity based variable impedance control // Proc. 2nd World Euro. Haptics Conf. 2007. Tsukuba, Japan, 2007. P. 446–451.
53. Flight validation of a metrics driven L1 adaptive control in the presence of general unmodeled dynamics / E. Xargay, V. Dobrokhodov, I. Kitsios et al. // IEEE Int. Conf. Control and Automation, 2009. ICCA 2009. Kathmandu, Nepal, 2009. P. 2243–2248.
54. Gao L., Wu W., Zhou S. Adaptive Flight Control Design for the Unmanned Aerial Vehicles // 2011 Int. Conf. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) Shenzhen. Guangdong, China, 2011. Vol. 1. P. 345–348.
55. High performance adaptive control in the presence of time delays / Z. Dydek, A. Annaswamy, J. Slotine, E. Lavretsky // Am. Contr. Conf. (ACC 2010). Baltimore, Maryland, USA, 2010. 30 Jun – 2 July. Baltimore, 2010. P. 880–885.
56. Integrated adaptive guidance and control of constrained nonlinear air-breathing hypersonic vehicle models / A. Serrani, A. Zinnecker, L. Fiorentini et al. // Am. Contr. Conf. (ACC '09). St. Louis, Missouri, USA, 2009. P. 3172–3177.
57. Boskovic J., Mehra R. A Decentralized Fault-Tolerant Control System for Accommodation of Failures in Higher-Order Flight Control Actuators // IEEE Trans. Contr. Syst. 2010. Vol. 18, № 5. P. 1103–1115.
58. Shimosawa T., Sagara S. Digital adaptive control of a winged rocket in wide range flight conditions // Int. Conf. Modelling, Identification and Control (ICMIC). Okayaama City, Japan, 2010. P. 197–202.
59. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Адаптивное управление летательным аппаратом с идентификацией на скользящих режимах // Управление большими системами / Институт проблем управления РАН (ИПУ РАН). М., 2009. Вып. 26. С. 113–144.
60. Синтез адаптивного управления разворотами летательного аппарата в атмосфере / В. А. Афанасьев, Г. Л. Дегтярев, А. С. Мещанов, Т. К. Сиразетдинов // Вестн. Казан. гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. 2007. № 4. С. 39–42.
61. Готцев А. В. Разработка адаптивной структуры вертикального канала системы управления НБЛА // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 6. С. 41–44.
62. Trustable autonomous systems using adaptive control / M. Matsutani, A. Annaswamy, T. Gibson, E. Lavretsky // 50th IEEE Conf. Decision and Control and Europ. Control Conf. (CDC-ECC 2011). Orlando, FL, USA, 2011. P. 6760–6764.
63. Nonlinear adaptive flight control using sliding mode online learning / T. Kruger, P. Schnetter, R. Placzek, P. Vorsmann // The 2011 Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN), Anchorage, Alaska, USA, 2011. Vol. 5. P. 2897–2904.
64. Nakanishi H., Kanata S., Sawaragi T. Environmental adaptive yaw control autonomous unmanned helicopter and bifurcation of maneuvering in turning // World Automation Congress (WAC 2010). Kobe, Japan, 2010. P. 1–6.
65. Xiao-hui Q., Hong-tao Z. The design of adaptive sliding mode control law on reconfigurable flight control system // 2011 Int. Conf. Electronics, Communications and Control (ICECC). Ningbo, China, 2011. P. 332–336.
66. Ji Y., Zong Q., Zeng F. Immersion and invariance based nonlinear adaptive control of hypersonic vehicles // 24th Chinese Control and Decision Conf. (CCDC 2012). Taiyuan, China, 2012. May. P. 2025–2030.
67. Lee D., Kim H. J., Sastry S. Feedback Linearization vs. Adaptive Sliding Mode Control for a Quadrotor Helicopter // Int. J. Control Automation and Systems. 2009. Vol. 7, № 3. P. 419–428.
68. Das A., Lewis F., Subbarao K. Backstepping Approach for Controlling a Quadrotor Using Lagrange Form Dynamics // J. Intelligent & Robotic Systems. 2009. Vol. 56, № 1–2. P. 127–151.
69. Roberts A., Tayebi A. Adaptive Position Tracking of VTOL UAVs // IEEE Transactions on Robotics. 2011. Vol. 27, № 1. P. 129–142.
70. Путов В. В. Методы построения адаптивных систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью: дис. ... д-ра техн. наук / СПбГЭТУ. СПб., 1993. 590 с.
71. Путов В. В. Развитие беспоисковых адаптивных методов и их приложения к задачам управления сложными механическими объектами // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 6. С. 31–42.
72. Путов В. В., Шелудько В. Н. Адаптивные и модальные системы управления многообъектными нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: ООО «Техномедиа»: Элмор, 2007. 244 с.
73. Путов В. В., Лебедев В. В., Путов А. В. Адаптивные системы управления многостепенными жесткими нелинейными механическими объектами, построенные по их упрощенным моделям с мажорирующими функциями // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 10. С. 49–55.
74. О работоспособности адаптивных систем управления нелинейными механическими объектами, построенными по их упрощенным моделям с мажорирующими функциями / В. В. Путов, А. В. Путов, К. В. Игнатъев, М. М. Копычев, Нгуен Тиен Тханг // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 7. С. 56–61.
75. Семейство аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления нелинейными упругими электромеханическими объектами / В. В. Путов, В. Н. Шелудько, В. В. Лебедев, Ч. А. Зунг, В. Н. Казаков, А. В. Путов, Е. В. Друян // Мехатроника, автоматизация и управление. 2007. № 10. С. 16–25.
76. On the Efficiency of Adaptive Control Systems of nonlinear Control Object with the Uncertainties and Incomplete Measuring / V. Putov, A. Putov, K. Ignatiev, A Stotckaia, E. Druian // Proc. of the 2015 IEEE North

West Rus. Section Yong Res. in El. and Electron. Engin. Conf. (2015 ElConRusNW). St. Petersburg. Febr. 2–4, 2015. St. Petersburg, 2015. P. 244–248.

77. Путов В. В., Шелудько В. Н. Новый подход в построении беспойсковых адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами с неопределенным описанием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. № 4. С. 37–50.

78. Путов В. В., Шелудько В. Н. Системы управления многостепенными механическими объектами с упругими деформациями: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 167 с.

79. Neural network control system for two-mass elastic electromechanical system / V. V. Putov, A. V. Putov, K. V. Ignatiev, M. M. Kopichev // Proc. of the XVIII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements SCM`2015, St. Petersburg, May 19–21, 2015. St. Petersburg, 2015. P. 141–143.

80. Аналитический и интеллектуальный подходы в построении адаптивных систем управления и нелинейными электромеханическими объектами с упругими деформациями / В. В. Путов, В. Н. Шелудько, А. В. Путов, К. В. Игнатъев, М. М. Копычев, Н. А. Русяев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 43–52.

81. Сравнительное исследование прямой и не прямой адаптивных систем управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами / Н. К. Чьен, В. В. Путов, В. Н. Шелудько, С. Г. Герман-Галкин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 5. С. 82–87.

82. Путов В. В., Путов А. В., Андриевский Б. Р. Управление торможением транспортных колес с электромеханическими двигателями // Мехатроника, автоматизация и управление. 2014. № 3. С. 33–42.

83. Adaptive Control System of Transport Wheels Electromechanical Braking / V. Putov, V. Sheludko, A. Putov, A. Stotckaia // Intern. Rev. of Automatic Control (IREACO). 2014. Vol. 7, № 5. P. 492–499.

84. Поляхов Н. Д., Ха Ань Туан. Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма адаптации // Электричество. 2014. Вып. 12. С. 47–52.

85. Электروهидравлические рулевые приводы с адаптивным управлением маневренных самолетов / С. В. Константинов, В. Е. Кузнецов, Н. Д. Поляхов и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 513 с.

86. Интеллектуальное управление в технических системах / Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, А. А. Карачев, А. В. Вейнмейстер, А. В. Беспалов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 10. С. 11–15.

87. Робастные регуляторы систем возбуждения мощных синхронных генераторов / Ю. А. Борцов, А. А. Бурмистров, А. Г. Логинов, Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, В. А. Хлямов // Электричество. 2003. № 7. С. 29–36.

88. Gamma of H_∞ -based robust excitation controllers for synchronous generators / A. Burmistrov, N. Polyakhov, A. Loginov, V. Khlyamkov // 15-th Intern. conf. on electrical machines. Aug. 25–28, 2002: Proc. Brugge, Belgium, 2002. P. 291.

89. Robust controller for excitation systems of synchronous generators / Y. Bortsov, N. Polyakhov, A. Loginov, A. Burmistrov // ICEM 2000, 28–30, Aug. 2000, Helsinki University of Technology Espoo Finland. Helsinki, 2000. P. 1056–1060.

90. Forecasting of a temporary row on the basis of the caterpillar method – SSA / N. Polyakhov, I. Prikhodko, E. Vorobjova, A. Minor // Proc. Intern. conf. on soft computing and measurements (SCM-2015), St. Petersburg, 19–21 May, 2015. St. Petersburg, 2015.

91. Predicting power consumption / Yu. A. Bortsov, N. D. Polyakhov, I. A. Prikhodko, E. S. Anushina // Russian Electrical Engineering. 2006. Vol. 77, № 8. P. 25–29.

92. Polyakhov N., Bespalov V. Determination of the Largest Lyapunov Exponents based on Time Series // World Appl. Sci. J. 2013. № 26 (2). P. 157–164.

93. Polyakhov N., Bespalov V. Second Largest Lyapunov Exponent based on Time Series // Papers of the 5th Intern. Scientific Conf. «European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches»: October 28–29, 2013, Stuttgart, Germany. Stuttgart, 2013. P. 55–57.

94. Minav T. A., Filatov D. M. Self-tuning-parameter fuzzy PID speed control in an electro-hydraulic forklift // Intern. Rev. of Electr. Engin. (I. R. E. E.). 2012. Vol. 4, № 1. P. 9–15.

95. Филатов Д. М., Кузнецов В. Е., Кузнецов А. В. Демпфирование упругих колебаний рулевого привода средствами модально-адаптивного управления // Полет. 2012. № 2. С. 51–54.

96. Филатов Д. М., Кузнецов В. Е., Поляхов Н. Д. Исследование и улучшение динамических характеристик электрогидростатических рулевых систем с помощью адаптивных регуляторов с эталонной моделью // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 5. С. 74–81.

97. Адаптивно-нечеткие регуляторы систем управления техническими объектами / Д. М. Филатов, А. В. Вейнмейстер, Н. Д. Поляхов и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 4. С. 59–66.

98. Поляхов Н. Д., Стоцкая А. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Науч. приборостроение. 2012. № 4. С. 5–18.

99. Polyahov N. D., Stotckaia A. D. Development and Investigation of Radial Active Magnetic Bearing's Mathematical Model // Intern. Rev. of Electr. Engin. (I. R. E. E.). 2014. Vol. 9, № 3. P. 519–526.

100. Polyahov N. D., Stotckaia A. D. Study of dynamics of a Rotating rotor in active magnetic bearings // Russian Electrical Engineering. 2012. Vol. 83, № 8. P. 457–461.

101. Polyahov N. D., Stotckaia A. D. Investigation of the magnetically suspended rotor stabilization problem // World Appl. Scien. J. 2013. № 25 (3). С. 469–480.

102. Второв В. Б., Калмыков А. Н. Некоторые вопросы расчета и практической реализации систем с сигнальной адаптацией // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2003. Вып. 1. С. 37–42.

103. Второв В. Б., Сяо Ченлинь. О задаче робастного назначения полюсов динамической системы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2004. Вып. 1. С. 29–36.
104. Control system for a computer vision equipped robot / M. M. Kopichev, V. V. Putov, A. V. Putov, K. V. Ignatiev // Proc. of the XVIII Intern. conf. on soft computing and measurements SCM`2015, Saint Petersburg, May 19–21, 2015. SPb., 2015. P. 93–95.
105. Autonomous Three-Wheeled Robot with Computer Vision System / V. Putov, A. Putov, K. Ignatiev, E. Belgradskaya, M. Kopichev // Proc. of the 2015 IEEE North West Rus. Section Yong Res. in El. and Electron. Engin. Conf. (2015 ElConRusNW). February 2–4, 2015. P. 240–244.
106. Система управления роботами на подвижном основании / М. М. Копычев, В. В. Путов, А. В. Путов, К. В. Игнатиев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 55–61.
107. Mobile manipulation platform control / V. Putov, A. Putov, K. Ignatiev, M. Kopichev, J. Asiedu-Baah // Intern. Rev. of Automatic Control (IREACO). 2014. Vol. 7, № 4. P. 412–419.
108. Putov A., Ignatiev K., Kopichev M. Autonomous Control and Stabilization System for Unmanned Aerial Vehicles // 2nd RED-UAS 2013 IFAC Workshop on Res., Education and Development of Unmanned Aerial Systems, Nov. 20–22, 2013, Compiègne, France (Scopus). Compiègne. 2013. P. 152–155.
109. Мобильная электромеханическая установка нового поколения для оперативного контроля аэродомных покрытий / В. В. Путов, В. Е. Хильченко, А. В. Путов, В. Н. Шелудько // Мехатроника, автоматизация и управление. 2007. № 10. С. 25–30.
110. A mathematical model of an electromechanical test rig with a drum imitator of motion for the electro-mechanical drivers of wheel transport / V. V. Putov, V. N. Sheludko, E. V. Druian, A. V. Putov, V. V. Lebedev // Proc. of the IEEE Russia North West Section. 2012. Vol. 3. P. 31–34.
111. Опыт и перспективы создания инновационной комплексной разработки в области обеспечения безопасности посадки воздушного и движения наземного транспорта / В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Т. Л. Русяева, В. В. Лебедев, Я. Н. Сколяров // Изв. междунар. акад. наук высш. шк. 2012. Вып. 2 (60). С. 122–130.
112. On correlation between the airport runway friction coefficient measurement results and the real-life aircraft take-off and landing braking characteristics / V. V. Putov, A. V. Putov, V. N. Sheludko, V. P. Kazakov, A. D. Stockaia, M. M. Kopichev, K. V. Ignatiev // Proc. of the XVIII Intern. conf. on soft comp. and measurements SCM 2015. Saint Petersburg, 2015. P. 119–121.
113. On Improving the Efficiency of Methods and Technical Solutions of Prelanding Air Field Coatings Frictional Properties Control / V. Putov, A. Putov, V. Kazakov, T. Rusyaeva, M. Kopichev // Proc. of the 2015 IEEE North West Rus. Section Yong Res. in El. and Electronic Eng. Conf. (2015 ElConRusNW). Saint Petersburg, 2015. P. 235–240.
114. Elevator Car Resilient Oscillations Suppression Control System / N. Zaskalnyuk, V. Putov, K. Ignatiev, T. Rusyaeva, M. Kopichev // Proc. of the 2015 IEEE North West Rus. Section Yong Res. in El. and Electronic Eng. Conf. (2015 ElConRusNW). Saint Petersburg, 2015. P. 283–289.

B. R. Andrievsky,
Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS

N. D. Polyahkov, V. V. Putov, V. N. Sheludko
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MOVING OBJECTS

Presents an overview of the achievements of the modern world, as well as the development of scientific and pedagogical staff of the department of automatic control systems in the field of methods and development of adaptive control systems of mobile objects.

Adaptive and robust control, robotic moving objects, independent and remote control, machine vision, mobile robotics, pattern recognition, and a detour crash, omni wheels, landing safety, measurement and correlation coefficient of adhesion with the braking performance of the aircraft