

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ, ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ ПОКОЛЕНИЙ (общероссийский семинар)

22 марта 2012 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) состоялся традиционный ежегодный Общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления движением». Семинар проводился в ИПУ РАН уже в седьмой раз, его организаторы: Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Российский национальный комитет по автоматическому управлению; Академия навигации и управления движением (АНУД); Объединенный научный совет РАН по комплексной проблеме «Процессы управления и автоматизация»; Научный совет РАН по теории управляемых процессов и автоматизации; ИПУ РАН; ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и ФГУП «ЦНИИ автоматизации и гидравлики». Информацию по истории и тематике этих семинаров можно найти в сообщениях [1–3].

В 2012 г. Семинар имел тематический подзаголовок «Состояние и перспективы, преемственность поколений». Обычно на Семинаре выступали известные ученые страны, руководители крупных научных и производственных объединений, научных направлений, представлявшие крупные теоретические и практические разработки в области навигации и управления движением. В этом году организаторы Семинара пригласили для участия в нем молодых ученых Москвы и Санкт-Петербурга. И очень интересным оказался опыт приглашения в качестве докладчиков молодых ученых, доклады которых были отобраны по результатам проведения XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», ежегодно проводимой ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Напомним, что формат Семинара — однодневный (все доклады заслушиваются в один день), все доклады — приглашенные. Поэтому и в этом году Семинар традиционно состоял из двух заседаний — утреннего и вечернего, на которых заслушаны двенадцать докладов, присутствовали более 150 человек.

Открыл Семинар директор ИПУ РАН академик *С.Н. Васильев*. В своем выступлении он отметил важность выбранной тематики семинара и предоставления трибуны для выступлений молодым ученым, которые в основном являются кандидатами наук и у многих готовы докторские диссертации.

На утреннем заседании председательствовал президент АНУД, генеральный директор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» академик *В.Г. Пешехонов*.

Первым был доклад *Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевского* и *С.А. Решмина* (ИПМех РАН) «Методы управления нелинейными механическими системами», с которыми

выступил *С.А. Решмин*. Доклад посвящен проблеме построения эффективного управления в лагранжевых системах. Для систем со многими степенями свободы представлены методы, основанные на декомпозиции нелинейных управляемых систем, и кусочно-линейные алгоритмы управления по обратной связи. Для нелинейной системы с одной степенью свободы, обобщающей нелинейный маятник, рассмотрена задача быстродействия. Система описывает динамику инерционного объекта под действием ограниченной по модулю управляющей силы, которая входит линейно, и известной возмущающей силы, периодической по координате. Терминальное множество представляет собой точки на оси абсцисс фазовой плоскости, причем расстояние между двумя соседними точками равно периоду возмущающей силы по координате. Найдены условия, при которых оптимальное по быстродействию управление имеет не более одного переключения при любых начальных условиях. Исследованы свойства кривой разделения на фазовом цилиндре в случае, когда модуль управляющей силы достаточно велик.

Далее был заслушан доклад *А.Е. Полякова* (ИПУ РАН) «О некоторых алгоритмах равномерной финитной стабилизации», в котором рассмотрена новая задача управления, состоящая в синтезе обратной связи, обеспечивающей равномерную глобальную финитную стабилизацию объекта управления за заданное (фиксированное) время при любых начальных состояниях системы. Данное свойство замкнутой системы получило название сверхфинитной устойчивости. Предложено развитие метода негладких функций Ляпунова для анализа сверхфинитной устойчивости положения равновесия системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для линейных объектов управления рассмотрены задачи синтеза регуляторов, которые гарантируют сверхфинитную стабилизацию замкнутой системы в заданной в точке или в заданной зоне за заданное время. Указанные задачи решены в классе нелинейных кусочно-непрерывных и полиномиальных обратных связей соответственно. Закон управления найден путем приведения исходной системы к блочной форме управляемости и применения нелинейных процедур каскадного синтеза. Доказательство сверхфинитных свойств замкнутой системы проведено с помощью метода функций Ляпунова. Качество полученных управлений продемонстрировано на тестовых примерах.

Следующим на утреннем заседании Семинара был доклад *И.Б. Фуртата, А.Л. Фрадкова* (ИПМаш РАН) и *А.М. Цыкунова* (Астраханский ГТУ) «Некоторые вопросы построения адаптивных и робастных систем с запаздыванием» (докладчик *И.Б. Фуртат*). Рассмотрены задачи адаптивного управления по выходу объектами, динамические процессы в которых описываются линейными



уравнениями с запаздыванием по управлению и состоянию, а также структурно неопределенными уравнениями с липшицевой нелинейностью на базе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка. Предложен синтез робастных систем управления по выходу с компенсацией возмущений для объектов, модели которых описываются дифференциальными уравнениями с липшицевой нелинейностью, запаздыванием и динамический порядок которых может изменяться в процессе функционирования. Рассмотрено применение систем робастного управления для регулирования сетью электрических генераторов в условиях нормальной работы и аварийных ситуациях, связанных с изменением реактивного сопротивления линии связи. Полученный алгоритм управления компенсирует неопределенность параметров генераторов и связей между ними с некоторой точностью при измерении только относительной угловой скорости роторов. Приведены результаты численного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенных алгоритмов.

Далее был заслушан доклад *М.М. Чайковского, А.П. Курдюкова* (ИПУ РАН) и *В.М. Никифорова* (ФГУП «НПЦ АП им. акад. Н.А. Пилюгина») «Синтез анизотропийных субоптимальных регуляторов для управления движущимися объектами и навигационными системами». Докладчик (*М.М. Чайковский*) обратил внимание на то, что задачи подавления внешних возмущений являются очень важными задачами теории управления, неизбежно возникающими при синтезе современных систем управления движущимися объектами. Стохастическая неопределенность случайных возмущений, рассматриваемая как различие между неточно известным распределением реального шума измерений и распределением его номинальной модели, может значительно ухудшить качество работы системы управления, если применяемая процедура синтеза регулятора основана на определенном законе распределения возмущения и предположении, что этот закон известен точно. В рассматриваемых задачах подавления случайных возмущений с неточно известными вероятностными распределениями статистическая неопределенность измеряется в терминах средней анизотропии возмущения; возможности системы по подавлению внешних возмущений количественно характеризуются анизотропией нормы. Анизотропийный субоптимальный регулятор в общем случае представляет собой динамический компенсатор заданного порядка по измеряемому выходу, стабилизирующий замкнутую систему и обеспечивающий подавление внешних возмущений с качеством не хуже заданного. Численное решение задачи синтеза анизотропийного субоптимального регулятора сводится к решению задачи выпуклой оптимизации или задачи поиска взаимнообратных матриц, удовлетворяющих выпуклым ограничениям. В условиях статистической неопределенности коррелированных внешних возмущений анизотропийные регуляторы характеризуются рядом преимуществ по сравнению с традиционными линейно-квадратичными гауссовскими и H_∞ -регуляторами. Для иллюстрации разработанных методов синтеза регуляторов рассмотрены примеры решения задач анизотропийного управления для моделей различных систем (самолеты, ракеты «воздух — воздух»). Разработанные методы синтеза многокритериальных анизотропийных регуляторов также продемонстрированы на примере решения задачи управления угловым положением гиросtabilизированной платформы в условиях внешних возмущений и шумов измерений. Рассмотрен пример решения задачи робастного анизотропийного управления угловым положением мехатронного стенда «Верто-

лет с тремя степенями свободы» компании «Quanser» в условиях коррелированных шумов измерений.

Следующим был сделан доклад *А.П. Крищенко и А.Е. Голубева* (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Управление движением: методы, результаты, проблемы» (докладчик *А.Е. Голубев*). Рассмотрена задача терминального управления аффинными динамическими системами. Решения терминальной задачи ищется согласно концепции обратных задач динамики и дифференциально-геометрического подхода. Предложен метод высокоточного планирования траектории движения летательного аппарата с помощью шестимерной модели. В качестве управлений рассматриваются перегрузки, действующие на летательный аппарат. Предложены алгоритм выбора траектории движения, а также алгоритм расчета управлений, стабилизирующих движение летательного аппарата на выбранной траектории. Доклад вызвал много вопросов и споров о применении предложенного метода к реальным задачам управления летательным аппаратом.

Завершал утреннее заседание доклад *А.А. Голована* (МГУ) и *Е.В. Каршакова* (ИПУ РАН) «Навигационные применения бортовых измерений физических полей», сделанный *Е.В. Каршаковым*. Доклад посвящен вопросам применения для решения задачи определения угловых и пространственных координат подвижного объекта измерений физических полей на борту атмосферного летательного аппарата. Рассмотрены те виды полей, параметры которых традиционно измеряются при дистанционных геофизических исследованиях — магнитометрии, гравиметрии, электромагнитных измерений. Приведены примеры, иллюстрирующие взаимосвязь задач навигации и геофизики. Обсуждались особенности структуры бортовой системы измерения физических полей. Выделены три основных блока: измерение физической величины, компенсация поля носителя и влияния параметров его движения, решение навигационной задачи. Описаны основные составляющие модели измерений. Приведены результаты компенсации поля носителя и влияния параметров его движения для гравиметрии, магнитометрии, электромагнитных измерений. В заключение приведен набор задач, связанных с бортовыми измерениями физических полей и их навигационными применениями: корреляционно-экстремальная навигация по параметрам поля, корреляционно-экстремальная навигация по параметрам среды, навигация и наведение вблизи источника поля. Притом что рассматриваются различные системы, структура решаемых проблем в целом одинакова. Иногда это позволяет применять схемы и подходы, наработанные для одного типа систем, на системы другого типа. Показаны отдельные результаты, которые успешно применяются в современных аэрогеофизических системах.

Завершая утреннее заседание, академик *В.Г. Пешехонов* отметил большой интерес к семинару среди молодежи (в зале, вмещающем 150 чел., практически не было свободных мест и среди слушателей не менее половины были молодыми людьми) и важность проведения такого рода семинаров в дальнейшем.

На вечернем заседании председательствовал академик *С.Н. Васильев*.

Заседание открылось докладом, отобранным по результатам проведения XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» в г. Санкт-Петербурге, *В.О. Рыбинского* и *Е.Н. Розенвассера* (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет) «Стабилизированность импульсных систем с обобщенными цифро-аналоговыми преобразователями высших порядков», который сделал *В.О. Рыбинский*. Рассмотрены замкнутые системы цифрового управле-

ния непрерывным объектом, в которых вместо традиционно применяемого цифроаналогового преобразователя (ЦАП) — фиксатора нулевого порядка, применяются экстраполяторы высших порядков, учитывающие при преобразовании не только текущее, но и предыдущие значения цифрового сигнала, что может приводить к улучшению точности функционирования всей системы в целом. Исследована стабилизируемость и стабилизация указанных систем. В качестве аппарата исследования принята концепция параметрической передаточной функции. Исследованы замкнутые одноконтурные системы, и задача решается в частотной области. Для расматриваемых систем с учетом концепции параметрической передаточной функции строятся характеристические уравнения и исследуются их свойства. По результатам исследования строятся множества стабилизирующих регуляторов, показывается, что при некоторых значениях периода квантования, называемых патологическими, дискретная модель системы может оказаться неуправляемой и/или ненаблюдаемой, а сама система содержит неуправляемые полюса, что приводит к сложностям при проектировании. Приведены расчетные формулы, позволяющие в явном виде определить множество патологических периодов для исследуемых систем. Рассмотрена задача стабилизации для одноконтурных систем, в которых в качестве ЦАП используются экстраполятор и так называемый интерполятор первого порядка. Для систем с данными ЦАП строятся характеристические уравнения, множества стабилизирующих регуляторов и выводятся условия непатологичности периода в явном виде, аналогично тому, как в традиционной литературе эти условия приводятся для систем с фиксатором нулевого порядка. Последнее обстоятельство делает результаты доклада актуальными для инженерных приложений.

Далее был заслушан доклад, также отобранный по результатам проведения XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» в г. Санкт-Петербурге, *А.М. Боронахина, Р.В. Шальмова и Ю.В. Филатова* (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ») «Методы и средства диагностики рельсового пути на основе инерциальных и геоинформационных технологий» (докладчик *А.М. Боронахин*). В докладе проведен анализ соответствия возрастающей с каждым годом интенсивности грузоперевозок и применяемых методов и средств диагностики. Помимо ручных инструментов, обладающих низкой производительностью, существуют различные вагоны-лаборатории: путеизмерительные вагоны (по контролю геометрических параметров рельсового пути); вагоны испытаний контактной сети; вагоны дефектоскопы. Они обладают достаточно высокими точностными характеристиками, однако их количество, в силу существенной стоимости, ограничено, а для организации измерений требуется выделение окон в расписании движения. Применение инерциальных навигационных систем позволяет приводить все измерения к географической системе координат. В первую очередь это касается таких параметров, как возвышение одной рельсовой нити относительно другой (уровень), продольный уклон и положение пути в плане (кривизна). Значительная часть параметров анализируется как отклонение относительно некоторого среднего уровня, поэтому становится принципиально невозможно диагностирование импульсных неровностей (дефектов поверхности катания колеса). Применение оптических систем в большинстве случаев, учитывая условия эксплуатации (снег, трава и др.), неэффективно. В целях устранения этих недостатков разработана и внедрена малогабаритная инерциальная система диа-

гностики, в состав которой входят микромеханические акселерометры, установленные на крышки подшипников, т. е. в непосредственной близости к точке контакта «колесо — рельс». Такой подход позволяет учитывать динамические деформации пути под нагрузкой и обеспечивает высокую степень достоверности. Отметим, что результаты измерений фиксируются как функции пройденной дистанции, а основным измерителем для решения задачи навигации на рельсовом пути, принимая постоянство его пространственного положения, становится датчик пути (одометр). Для оценки составляющей систематической погрешности, зависимостей от скорости и ускорения движения, а также положения пути в плане и направления движения предложен алгоритм построения интегрированной системы навигации на рельсовом пути. Такой подход, благодаря многократности измерений, позволяет реализовать геоинформационную базу пути, которая обеспечит не только прогноз развития дефектов пути, но и повысит устойчивость существующих интегрированных систем ориентации и ориентации к поступлению недостоверных данных от приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы. Доклад был встречен с большим интересом.

Следующим было выступление *А.В. Проскурникова* (ИПМаш РАН) «Синхронизация в сетевых и многоагентных системах с переменной топологией». В докладе приведены эффективно проверяемые частотные условия достижения синхронизации (консенсуса) в сетевых системах с линейными агентами произвольного порядка и переменной топологией, которая предполагается сохраняющей связность и в остальном произвольна. Функции связи между агентами нелинейны, нестационарны и могут быть неизвестными. Предполагается лишь, что они удовлетворяют условию симметрии и квадратичным ограничениям, в скалярном случае сводящимися к простым секторным условиям. Показано, что установленные условия сходимости алгоритмов синхронизации представляют собой прямое обобщение классического кругового критерия устойчивости систем в форме Лурье. Для доказательства используется квадратичный критерий абсолютной устойчивости В.А. Якубовича, основанный на лемме Якубовича — Калмана — Попова («частотной теореме»). Сделаны утверждения о робастности исследуемых алгоритмов синхронизации по отношению к малым запаздываниям. Обсуждены вопросы применимости полученных результатов к различным задачам управления и анализа сетевых и многоагентных систем, возникающих в физике, биологии и технике. Рассмотрены, в частности, модель биологических формаций К. Рейнольдса, модель Т. Висека самоорганизации в потоках движущихся частиц и модель связанных сетей осцилляторов Й. Курамото.

Далее был заслушан доклад *О.Н. Артемовой* (ФГУП «ЦНИИАГ») «Особенности синтеза алгоритмов управления высокоскоростного беспилотного летательного аппарата при отделении от тела соизмеримой массы». Доклад посвящен разработке метода синтеза алгоритмов управления высокоскоростного беспилотного летательного аппарата (ЛА) на участке траектории непосредственно после отделения от тела соизмеримой массы и действия на них широкого спектра возмущающих факторов. При решении данной задачи необходимо учитывать дополнительные возмущающие факторы, такие как аэродинамическая интерференция между частями разделяющейся конструкции, которые соизмеримы по массе и, как следствие, оказывают сильное взаимное влияние. Учет действия сил и моментов интерференции вносит существенную нелинейность и нестационарность в сис-



тему управления, а интенсивность и ограниченность по времени их действия ведут к необходимости формирования отдельного кратковременного участка траектории с жестким выполнением граничных условий. Рассматриваемую динамическую систему можно описать векторным дифференциальным уравнением с известными векторами начальных и конечных условий. Необходимо определить такое управляющее воздействие, определенное на заданном отрезке времени, которое минимизирует заданное значение функционала состояния. Такая постановка задачи соответствует задаче синтеза так называемого финитного управления, а для решения поставленной задачи построения управления применяют робастные системы. Анализ неуправляемого движения рассматриваемого высокоскоростного беспилотного ЛА показал, что для параметров движения ЛА на рассматриваемом участке траектории характерны практически линейное изменение функции угла наклона вектора скорости к плоскости местного горизонта и сильно колебательный переходный процесс изменения угла тангажа. Поэтому целесообразно применять для минимизации угла атаки линейное программное управление по углу тангажа, а из-за скоротечности рассматриваемого процесса — жесткую программу управления по тангажу. Для определения параметров алгоритмов управления, обеспечивающих требуемое качество управления, которое можно оценить по характеристикам переходного процесса быстроменяющихся функций, разработан численный метод. Для обработки результатов численного моделирования предложен метод фрактальных матриц. Многомерная фрактальная матрица формируется из полученного массива данных. После обработки фрактальной матрицы определяется необходимый набор параметров алгоритмов управления.

Затем вниманию участников был представлен доклад *И.М. Финаева* и *Г.Г. Себрякова* (ФГУП «ГосНИИАС») «Идентификация нелинейных динамических систем на основе аппроксимации ортогональными функциональными преобразованиями», который сделал *И.М. Финаев*. В докладе представлен метод аппроксимации нелинейных динамических систем на основе приближения рядом из ортогональных функционалов и предложен способ идентификации данной аппроксимирующей модели. Аппроксимирующая модель задается на семействе реализаций стационарного гауссовского случайного процесса с заданными параметрами распределения. Свойство ортогональности функционалов, составляющих модель, позволяет увеличивать ее точность добавлением дополнительных членов ряда, при этом необходимо идентифицировать только добавленную часть. Данный метод отличается от аппроксимации нелинейных динамических систем ортогональным рядом Винера видом функциональных преобразований и относительной простотой их численного моделирования. В докладе представлены результаты идентификации аппроксимирующей модели. В качестве приближаемой модели были использованы: явно заданная стационарная нелинейная динамическая система, человеко-машинная система в задаче слежения человеком оператором за целью на экране, включающая в себя человека-оператора, индикацию, органы управления и линейную модель объекта управления. Экспериментально показана высокая степень соответствия идентифицируемой модели объекту, при этом близость реакции модели и системы оценивались в среднеквадратическом смысле на наборе реализаций, отличных от используемых при идентификации.

Последним был заслушан доклад *П.А. Точилина* (МГУ) «О синтезе управлений при интервальной неоп-

ределенности по финитным данным». Рассмотрены задачи управления линейной системой обыкновенных дифференциальных уравнений с линейным наблюдаемым выходом. Система содержит неопределенности (помехи), относительно которых известны лишь поточечные ограничения. Помехи могут быть случайными, но могут и не обладать каким-либо статистическим описанием. Для такой системы решается задача синтеза управлений, переводящего траектории в заданное целевое множество или малую его окрестность в пределах заданного интервала времени. Управление также удерживает траектории в заданной окрестности целевого множества в течение определенного времени. Рассмотрены варианты с неподвижным и перемещающимся целевым множеством. Управление может использовать лишь неполную и неточную (зашумленную) информацию о состоянии системы, поступающую в режиме реального времени от наблюдателей. Для решения задачи предложен подход, сводящийся к построению информационных и слабо инвариантных множеств, а также последующему «прицеливанию» первым множеством на второе. Для построения указанных множеств, а также для синтеза управлений разработаны эффективные алгоритмы приближенного решения, основанные на применении аппарата эллипсоидального исчисления. Полученные методы позволяют решать задачи синтеза управлений в условиях реально доступной информации для систем с большой размерностью фазового пространства. В качестве иллюстрации рассмотрены примеры решения задачи синтеза управлений для различных типов помех, а также разных структур наблюдателей.

В конце семинара академик *С.Н. Васильев* предложил выступить участникам семинара. Особенно интересным было выступление одного из старейших членов АНУД *Ю.А. Лукомского*, который отметил высокий уровень докладов молодых ученых, однако обратил внимание на то, что такой формат проведения Семинара (заслушать 12 научных докладов в один день) требует достаточно напряженной работы. Выступающий предложил организаторам Семинара, который, по его словам, надо провести в следующем году, подумать об изменении его формата.

В заключительном слове академик *С.Н. Васильев* поблагодарил докладчиков и слушателей Семинара и пожелал организаторам не снижать его высокий уровень в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов Б.В., Курдюков А.П., Гольдин Д.А. Общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления движением: информационно-управляющие системы автономных движущихся объектов» // Проблемы управления. — 2009. — № 4. — С. 80–82.
2. Павлов Б.В., Гольдин Д.А. Современные методы навигации и управления движением: модели и методы обработки информации в задачах управления движением // Там же. — 2010. — № 3. — С. 79–82.
3. Павлов Б.В., Гольдин Д.А. Современные методы навигации и управления движением: состояние и перспективы (общероссийский семинар) // Там же. — 2011. — № 4. — С. 74–78.

Б.В. Павлов, Д.А. Гольдин

Павлов Борис Викторович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-93-51, ✉ pavlov@ipu.ru,

Гольдин Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-89-51, ✉ goldind@ipu.ru, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.