

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных технологий, механики и
оптики"

На правах рукописи



Томашевич Станислав Игоревич

**Адаптивное децентрализованное управление группой подвижных
агентов через цифровой канал связи**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в
технических системах)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Андриевский Борис Ростиславич

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	4
1 Обзор и анализ задач сетевого управления и известных результатов	10
1.1 Задачи сетевого управления	12
1.2 Адаптивное управление в многоагентных системах	21
1.3 Обобщенная постановка задачи	22
1.4 Выводы по разделу 1	24
2 Адаптивные алгоритмы управления агентами в группе	25
2.1 Адаптивное управление группой на основе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка	25
2.1.1 Формирование многоагентной сети с эталонными моделями для каждого агента	25
2.1.2 Синтез системы управления	26
2.1.3 Числовой пример	33
2.2 Адаптивное управление группой на основе метода пассивации	37
2.2.1 Задача слежения в многоагентной системе	37
2.2.2 Многоагентная система с неявными эталонными моделями для агентов	38
2.2.3 Числовой пример	41
2.3 Выводы по разделу 2	47
3 Адаптивное кодирование данных через каналы связи с ограниченной пропускной способностью	49
3.1 Алгоритм адаптивного кодирования	49
3.2 Использование алгоритма кодирования в группе квадрокоптеров	52
3.3 Выводы по разделу 3	66
4 Децентрализованное управление группой квадрокоптеров через сеть связи	73
4.1 Применение алгоритмов в группе квадрокоптеров	73
4.1.1 Адаптивное управление положением группы квадрокоптеров в пространстве	73

4.2 Компьютерное моделирование движения формации квадрокоптеров с реальным каналом связи	81
4.3 Квадрокоптерный стенд КОМЕКС-1	82
4.3.1 Описание стенда	82
4.3.2 Идентификация параметров углового движения	86
4.3.3 Идентификация параметров движения центра масс	91
4.3.4 Модификация для автопилота	93
4.3.5 Результаты эксперимента	97
4.4 Аппаратно-программная реализация алгоритма кодирования	100
4.4.1 Аппаратная реализация	100
4.4.2 Программная реализация	101
4.4.3 Результаты эксперимента	102
4.5 Взаимодействие нескольких стендов для экспериментов с многоагентными системами	103
4.6 Выводы по разделу 4	106
Заключение	107
Слова благодарности	109
Список литературы	110

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Многоагентные системы (в зарубежной литературе – multi-agent systems), состоящие из взаимодействующих между собой подсистем («агентов»), в настоящее время находят все более широкое применение в различных областях. Эти системы позволяют эффективно решать задачи, которые не в состоянии выполнить отдельные подсистемы. Использование децентрализованного управления в многоагентных системах позволяет сделать систему автономной, сигналы управления в которой вырабатываются не общим управляющим центром, а локальными регуляторами на основе взаимного межагентного обмена информацией. Учитывая расширение областей применения миниатюрных автономных мобильных роботов, таких как легкие беспилотные летательные аппараты (БПЛА), автономные подводные аппараты, шагающие роботы, становится более доступной и результативной идея объединения их в группы по цели выполняемых ими задач. Подход и основные положения, используемые в этой бурно развивающейся за последнее время сфере, позволяют получать системы, функционирующие автономно с учетом как внешних, так и внутренних факторов.

Важным свойством многоагентной системы является способ организации взаимодействия между агентами. Выбор структуры сети, через которую агенты обмениваются информацией, во многом определяет характеристики системы в целом. Сложность в проектировании многоагентных систем связана с большим количеством агентов и появлением новых свойств системы вследствие межагентного взаимодействия. Одной из характерных задач, которые ставятся при управлении многоагентными системами, является обеспечение **консенсуса** – сходимости состояния либо выходов агентов к общему значению (например, к среднему начальных состояний) либо общей заданной траектории.

Разработка и внедрение в практическое использование многоагентных систем вызывает необходимость в решении как новых теоретических задач, связанных, прежде всего, с обеспечением требуемого качества работы системы в целом, так и прикладных вопросов, таких как организация надежного обмена информацией между агентами. В этой области имеется большое количество задач, которые еще не были решены или решены лишь частично. Настоящая работа направлена на развитие теоретических методов и прикладных аспектов создания многоагентных систем управления подвижными объектами в условиях параметрической неопределенности и ограниченности пропускной способности каналов связи между ними.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на большое количество ра-

бот по многоагентным системам, основное внимание в них уделяется системам, состоящим из агентов с известными и одинаковыми динамическими свойствами. Кроме того, одним из основных предположений является знание графа связей, описывающего структуру сети, или хотя бы минимального собственного числа соответствующей матрицы связей. В публикациях по применению методов адаптивного управления для таких систем требуется, как правило, использование наименьшего собственного числа лапласиана. В содержательном смысле это означает, что должна быть известна информационная структура сети, поскольку расчет собственных чисел выполняется по матрице Лапласа, составленной на основе графа связей, описывающего ее топологию. Тем самым, при разработке алгоритмов управления многоагентной системой должна быть известна структура сети, что затруднено для систем с большим количеством агентов и, например, для систем с переключающимися связями. Недостаточно внимания в литературе уделено также разработке алгоритмов передачи данных по каналам связи между агентами при ограниченности информационных потоков, возникающей, например, из соображений экономии энергии, физических ограничений или требований скрытности. Рассмотренные в некоторых публикациях адаптивные алгоритмы кодирования недостаточно быстро настраиваются на изменение характера передаваемого сигнала.

В настоящей диссертации развиваются методы адаптивного управления многоагентными децентрализованными системами, обеспечивающие у них консенсусное поведение или выполнение слежения в условиях параметрической неопределенности параметров агентов, структуры сети и информационных ограничений в каналах связи между агентами. Подобный подход позволяет охватить специфику многоагентных систем, связанную с обеспечением требуемых динамических свойств системы в целом настройкой локальных регуляторов отдельных агентов, а также осуществление взаимодействия между ними через информационные сети.

Научной базой диссертации являются труды Р.П. Агаева, О.Н. Граничина, А.С. Матвеева, В.О. Никифорова, Б.Т. Поляка, Н.Д. Поляхова, В.В. Путова, А.В. Проскурникова, А.Л. Фрадкова, И.Б. Фуртата, А.М. Цыкунова, Я.З. Цыпкина, П.Ю. Чеботарева, Р.В. Беарда (R. W. Beard), Р. Мюррея (R. Murray), Р. Олфати-Сабера (R. Olfati-Saber), Р. Ортеги (R. Ortega), В. Рена (W. Ren), А. Факса (A. Fax), С. Хары (S. Hara) и их коллег.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов адаптивного управления подвижными агентами в условиях неизвестной структуры сети и параметрической неопределенности моделей динамики агентов.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи:

1. Разработка алгоритма управления, обеспечивающего консенсус в многоагентной системе с нециклическим графом связей неизвестной структуры.
2. Разработка метода адаптивного управления многоагентными системами, позволяющего применить для группы параметрически неопределенных агентов критерии устойчивости многоагентной системы, образованной однородными агентами с заданной динамикой.
3. Разработка алгоритма адаптивного бинарного кодирования информации при обмене данными через цифровой канал связи, позволяющего минимизировать объем передаваемой по каналу информации.
4. Анализ качества работы предложенных алгоритмов и условий их работоспособности на основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на стенде.
5. Разработка рекомендаций по практическому применению предложенных алгоритмов.

Научная новизна.

1. На основе метода синтеза алгоритмов адаптации высокого порядка разработан новый алгоритм управления подвижными агентами в многоагентных системах для условий неопределенности параметров агентов и структуры сети, обеспечивающий консенсусное поведение агентов при неизвестной структуре нециклической сети.
2. Разработан новый метод адаптивного управления многоагентными системами, позволяющий применить для группы параметрически неопределенных агентов критерии устойчивости многоагентной системы, образованной однородными агентами с заданной динамикой. В частности, при использовании неявной эталонной модели первого порядка оказывается возможным обеспечить консенсус в многоагентной системе при любой топологии сети.
3. Разработан новый алгоритм адаптивного кодирования информации для передачи данных по каналу связи между агентами, позволяющий использовать в сети каналы передачи данных с малой пропускной способностью.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретические результаты работы являются значимым вкладом в теорию и методы построения децентрализованных многоагентных систем, функционирующих в условиях параметрической неопределенности агентов и структуры сети с обменом информацией между агентами через цифровые каналы связи. Практические результаты работы состоят в разработке рекомендаций по применению предло-

женных алгоритмов и методик синтеза для децентрализованного управления группой малых БПЛА (квадрокоптеров), разработке аппаратно-программного обеспечения для тестирования алгоритмов управления угловым движением квадрокоптеров и обмена информацией между ними по цифровому каналу связи в лабораторных условиях (стенд КОМЕКС-1).

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались такие методы современной теории автоматического управления, как метод функций Ляпунова, метод пассивации, общая теория систем и методы цифровой обработки информации. Для описания динамики агентов использовались методы пространства состояний, преобразования Лапласа, для описания структуры сети использовались методы теории графов. Для апробации алгоритмов управления использовался программный пакет Simulink, входящий в состав среды MATLAB, а также языки программирования C++ и Python вместе с фреймворком Qt5.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм адаптивного управления агентами в сети на основе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка.
2. Метод адаптивного управления многоагентными децентрализованными системами на основе метода пассивации.
3. Алгоритм адаптивного кодирования информации, передаваемой между агентами в сети.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается

- строгостью доказательств теорем и утверждений, корректным использованием математического аппарата;
- представленными в диссертационной работе результатами компьютерного моделирования;
- представленными в диссертационной работе результатами экспериментальных исследований на основе предложенного в диссертации испытательного стенда;
- печатными работами, а также статьями в сборниках трудов конференций.

По теме диссертации опубликовано **19** научных работ, из которых **5** опубликованы в журналах из перечня ВАК [1–5], **14** – в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и

Web of Science [6–19].

Результаты научных исследований по теме диссертации были доложены и получили положительную оценку на **11** международных конференциях:

- 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Шестой международный конгресс по современным телекоммуникациям и системам управления, 6–8 октября 2014 г., Санкт-Петербург, Россия [6]

- 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON), Первая конференция по вопросам моделирования, идентификации и управления нелинейными системами, 24–26 июня 2015 г., Санкт-Петербург, Россия [7, 8]

- 2015 IFAC Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles (ACNAAV), 10–12 июня 2015 г., Севилья, Испания [9]

- 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 30 мая – 1 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Россия [10]

- 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP), 29 июня – 1 июля 2016 г., Эйндховен, Нидерланды [11, 12]

- 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA), 4–8 июля 2016 г., Ля Рошель, Франция [13]

- 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 3–6 июля 2017 г., Валетта, Мальта [14–16]

- 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 29–31 мая 2017 г., Санкт-Петербург, Россия [17]

- 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), Первая международная конференция по промышленным кибер-физическим системам, 15–18 мая 2018 г., Санкт-Петербург, Россия [18]

- 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control (PID), 9–11 мая 2018 г., Гент, Бельгия [19]

- 13th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA), 3–6 июля, 2018 г., Ереван, Армения,

а также на научных семинарах лаборатории УСС ИПМаш РАН и кафедр УСС, СУиИ Университета ИТМО.

Результаты диссертационного исследования были использованы в следующих НИР: №716969, «Управление многоагентными, распределенными и сетевыми системами» (Университет ИТМО), РНФ №14-29-00142, «Управление сложными физико-техническими системами и сетями» (ИПМаш РАН), РФФИ №14-08-01015, «Адаптивное управление в стохастических сетях с запаздыванием и потерей данных» (ИПМаш РАН), РФФИ №17-08-01728, «Методы управления колебаниями в распределенных и негладких системах и сетях» (ИПМаш РАН).

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в рамках государственной финансовой поддержки ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (программа 14.Z50.31.0031), РФФИ (гранты №14-08-01015 и №17-08-01728) и РНФ (грант 14-29-00142), что подтверждено актом об использовании результатов диссертационной работы Томашевича Станислава Игоревича в разработках НОЦ-ММПУ ИПМаш РАН.

Личный вклад. Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы [1–19]. Соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах диссертационного исследования, включая разработку адаптивных алгоритмов управления агентами в сети, алгоритма адаптивного кодирования, проведение компьютерного моделирования, а также разработку, реализацию испытательного стенда и проведение экспериментов на нем.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в **19** научных публикациях, **5** из которых опубликованы в российских журналах, входящих в перечень ВАК [1–5], **14** – в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science [6–19].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Полный объем диссертации составляет **128** страниц с **55** рисунками и одной таблицей. Список литературы содержит **211** наименований.

1 Обзор и анализ задач сетевого управления и известных результатов

Обзор результатов, связанных с многоагентными системами, явно показывает актуальность данной тематики. По сетевому управлению пишутся монографии и книги [20–22], количество научных работ, в которых затрагиваются вопросы многоагентных систем, настолько велико, что охватить все практически невозможно. На момент написания по запросу «Multi-agent» в заголовках статей с 2012 года Академия Google выдает 9590 результатов. Количество работ свидетельствует об актуальности исследований в этой области. Также стоит отметить цитируемость работ с основными результатами: статья [23] имеет более 3000 цитирований, статья [24] цитируется почти 5000 раз, а статья [25] – свыше 6000 раз.

Несмотря на такой активный рост количества публикаций и развитие темы многоагентных систем в последнее время, схожие по подходам статьи появлялись гораздо раньше. В некоторых случаях они не имели прямого отношения к системам управления, а также к технике вообще. Наглядным примером являются работы 90-х годов физиков Л. Пекоры и Т. Кэрролла [26,27] об управлении синхронизацией хаотических систем, которые близки к тому, что позже сформирует каркас многоагентных систем. Важно отметить целый ряд интересных работ, посвященных переложению многоагентных систем на социальные группы, биологические и животные ареалы. Многоагентные системы похожи на группу организмов, которые учитывают друг друга (мнения или информация в случае социальных групп). Примерами таких систем в животном и социальном мире могут быть муравейник, пчелиный рой, косяки рыб, социальные сети и множество других. Такие исследования приведены в [28–33].

Задолго до появления сферы многоагентных систем в настоящем понимании, начинают появляться работы, посвященные взаимодействию между собой нескольких однотипных объектов на основе определенного взаимодействия. Примером таких работ могут служить статьи [34–36] о совместном движении автомобилей с поддержанием постоянной скорости во избежание столкновений. Поэтому важно помнить, что несмотря на достаточно свежую область исследований, само направление начинает зарождаться еще с 1950-х годов.

В последнее время разработка регуляторов для агентов в сети, взаимодействующих автономно с окружением и с другими агентами для выполнения целей, которые не могут быть выполнены каждым агентом в отдельности, привлекает пристальное внимание. Исследования в этой области активно продолжаются в связи с наличием огромного потенциала для практических приложений, таких как управление группами спутников [37–39], беспилотных лета-

тельных аппаратов (БПЛА), мобильных роботов, автономных подводных судов, автоматизированных дорожных систем и многих других. В частности, существенное внимание обращено на разработку консенсусных протоколов для управления группами роботов [40–42]. Важным основным отличием многоагентных систем является принцип децентрализованного управления, который для различных групп агентов рассматривается, например, в [43, 44]. Исследования в области управления группами летательных аппаратов обычно вдохновлены результатами, полученными для совместного движения группы автономных мобильных роботов [23, 45] и согласования движения [24]. Важно отметить, что многие из алгоритмов, применяемых в многоагентных системах являются модификациями уже известных алгоритмов, разработанных для одиночных систем. Так, вопросам адаптивного управления без учета возможного совместного поведения объектов посвящены многочисленные работы, см. напр. [46–76].

В настоящее время разработка сложных промышленных, транспортных, энергетических и агрокультурных систем становится важнейшей задачей. Результаты интенсивных исследований, посвященных разработке многоагентных систем с децентрализованным управлением через сети связей широко представлены в современной научно-технической литературе, см. напр. [3, 20, 24, 77–91]. Под сетевыми системами подразумеваются системы реального времени, в которых измеренная информация с датчиков и сигналы управления могут передаваться через общую сеть связи, некоторую общую среду обмена информацией. Разработка такого вида систем требует одновременного рассмотрения вопросов управления, вычислений и обработки информации, так как сетевое управление включает в себя совместное управление группой движущихся агентов, таких как транспортные роботы, самолеты, водные транспортные средства, в которых множество информации подлежит измерению, а также имеют ограничения, заключающиеся не только в каналах связи с ограниченной пропускной способностью, но вычислительного характера. В большинстве современных систем из-за цифрового характера канала связи каждый сигнал, передаваемый по цифровой сети, представлен символом конечного набора [77]. Таким образом, особенности такого хранения и передачи информации должны быть явно учтены при разработке сетевых систем управления движением групп агентов. В последние годы особенности оценивания параметров объектов, обусловленные ограниченностью пропускной способности канала связи, широко изучались в научной литературе, см. [92–97]. Однако на текущий момент не существует полноценного исследования влияния всех ограничений, связанных с каналами связи, на поведение агентов в многоагентных системах. Эта особенность становится действительно важной, если обратить внимание на возможную запутанность ком-

муникационных каналов между агентами, из-за которой, например, даже небольшие задержки при передаче данных могут привести к неправильному функционированию всей системы, и даже потери устойчивости. В частности, для линейных систем показано, что их стабилизация при использовании каналов связи с ограниченной пропускной способностью может быть обеспечена только если скорость передачи данных по каналу связи (в битах в секунду) скорости роста энтропии в окрестности состояния равновесия, о чем говорит так называемая «теорема о скорости передачи данных» [92, 98].

В некоторых системах (например, в распределенных сетях датчиков или удаленных мониторинговых системах) отсутствует возможность передачи большого количества сигналов по каналу связи, и только скалярный сигнал может быть передан. Для нелинейных систем, такая задача рассматривается в [99], где получены результаты по синхронизации на основе наблюдателя. В [100–102] показана схема минимизации загрузки канала посредством кодирования и передачи только «сигнала обновления», который генерируется наблюдателем на стороне передатчика с использованием адаптивной процедуры настройки. В [103] рассматривается применение процедуры адаптивного кодирования в задаче слежения за движением БПЛА, численно найдена зависимость точности слежения от скорости передачи данных в канале связи.

Вопросам, связанным с каналами данных с ограниченной пропускной способностью, посвящены работы [92, 98–100, 103]. Пропадание информационных пакетов, характерное для реальных систем, изучается в теории информации, компьютерных науках и в литературе, посвященной теории управления [95, 104–111]. Несмотря на множество исследований в области передачи информации, каналы связи являются важной составляющей многоагентных сетей, имеют связанные с этим характерные особенности и поэтому требуют пристального изучения.

1.1 Задачи сетевого управления

Перед многоагентными системами могут быть поставлены разнообразные задачи в таких областях, как организация совместного движения формаций интеллектуальных роботов, групп БПЛА, разработка систем доставки и распределения заказов, управление производственными и энергетическими сетями [112]. В частности, перед ними возникают задачи управления группами [37–39, 113] (движение в пространстве с целью формирования заданных геометрических форм), достижение агентами одного и того же состояния [114] (задача о рандеву), управление загруженностью агентов в информационных сетях [115] или организация групп в стаи [116].

Классифицируя многоагентные системы, можно выделить системы с лидерами (реальными или виртуальными). Пример многоагентной системы с виртуальным лидером рассматривается в [117]. В случае многоагентной системы с лидером, существует лидер, который влияет на всех остальных агентов в системе. Его движение, в свою очередь может быть задано извне или через внешние воздействия. Таким образом, движение лидера может являться задающим воздействием для всей системы. Также стоит отметить, что выделяется группа полностью неавтономных систем, имеющих общее планирование движения. Такие многоагентные системы управляются внешней задающей системой, которая имеет данные о состоянии всех или большинства агентов. Таким образом система имеет полный контроль над агентами, распределяя управление на основе всей имеющейся информации. Подобный подход можно найти, например, в работе [118]. Наиболее распространен подход, в котором предполагается, что в системах нет ни одного управляющего центра, а все влияние на работу сети формируется исходя из состояния каждого из агентов и его положения в структуре сети. В некоторых случаях децентрализованное управление представляет собой функционирование системы при наличии лидера. В этом случае лидер управляет всей системой опосредованно через сеть, не передавая команды непосредственно каждому агенту. Также рассматриваются системы, в которых есть несколько влияющих на сеть лидеров, каждый из которых расположен особым образом в структуре сети [119]. Наличие или отсутствие лидера кардинально не меняет работу сети. Многоагентным системам с лидером в частности посвящены работы [116, 120, 121].

Обращаясь к практическим задачам, отметим, что наиболее часто встречающейся в примерах задач для многоагентной системы является совместное исследование воздушного и водного пространства. Такое исследование подразумевает наиболее оптимальное распределение в пространстве. Оптимальность будет определяться в условиях конкретно каждой задачи в зависимости от целей и множества факторов. Примеры таких систем приведены в [122, 123]. Схожей трактовкой обладает совместное групповое движение с учетом внутренних ресурсов (таких, как, например, количество топлива в летательном аппарате, предельной скорости и прочее). Такие задачи рассматриваются в [124, 125]. На этих примерах можно видеть очевидные плюсы многоагентных систем: их децентрализованность и гибкость. В зависимости от возникшей ситуации, поведение системы будет корректироваться естественным образом. Если какой-либо из агентов сталкивается с препятствием, то информация об этом препятствии, об изменении курса и о многом другом начинает передаваться от него постепенно по сети. Если сеть формируется, например, по физической удаленности агентов, то чем дальше по структуре

сети располагается агент, тем позже и слабее на него будет влиять командное воздействие.

Перечень всевозможных задач весьма обширен в связи с тем, что мультиагентные системы могут применяться для любых подсистем, рассматриваемых в качестве агентов, например, для электрических генераторов [126, 127]. Таким образом, можно сделать вывод, что перед классом мультиагентных систем можно открывать все новые цели и задачи в тех областях, где нужна совместная работа нескольких систем.

Для многоагентных систем часто используется понятие консенсуса [20, 24, 25, 128, 129], который является частным случаем синхронизации [130]. В [20] описаны другие виды синхронизации: частотная (гюйгенсова), экстремальная [131, 132], фазовая [133–135]. Остановившись на консенсусе (координатной синхронизации, в том числе и обобщенной [26, 136, 137]), отметим, что этот вид синхронизации является наиболее часто упоминаемым в работах по многоагентным системам. Одной из ранних задач, рассматриваемых в контексте синхронизации, была задача по управлению транспортными средствами с сохранением одинаковой скорости при совместном движении [34–36].

Цель координатной синхронизации для линейных агентов может быть записана как

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (1.1)$$

где x_i – вектор состояния i -го агента, а N – количество всех агентов. Очевидным образом задается цель обобщенной координатной синхронизации:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_i(t) - y_j(t)| = 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (1.2)$$

где $y_i(t) = Cx_i(t)$, а C – матрица выхода.

В физическом понимании координатная синхронизация наиболее четко видна на примере пространственного движения агентов. Этими агентами могут быть мобильные роботы, БПЛА, роботы-манипуляторы и множество других взаимодействующих устройств, целью которых является совместное движение. Для случая БПЛА координатная синхронизация может осуществляться для поддержания постоянной высоты, если аппараты, например, переносят какой-то груз. Также синхронизация может осуществляться по таким компонентам вектора состояния, как положение, скорость и ускорение. При задании соответствующей цели синхронизации агенты будут поддерживать одинаковые положения в пространстве, скорости и ускорения.

В связи с тем, что агенты должны взаимодействовать друг с другом, между ними должна быть налажена связь. Эта связь представляет собой канал, через который передается информация, например, о текущих компонентах вектора состояния агента. Также должна быть задана структура сети, описывающая, как конкретный агент взаимодействует со всеми остальными. Общепринятым способом описания этого взаимодействия является применение теории графов, позволяющей перейти к строгому и наглядному описанию взаимодействия между агентами.

На рисунке 1.1 показан пример графа сети для многоагентной системы, в которую входят 25 агентов. Агенты в графах обозначаются вершинами, а взаимодействие между ними – ребрами. Если взаимодействие не симметрично (один из агентов влияет на другого, но не наоборот), то граф становится ориентированным (так называемый *орграф*). Свойства графов важны при исследовании многоагентных сетей, так как структура и вид графа связей напрямую влияют на то, как информация распространяется в многоагентной системе.

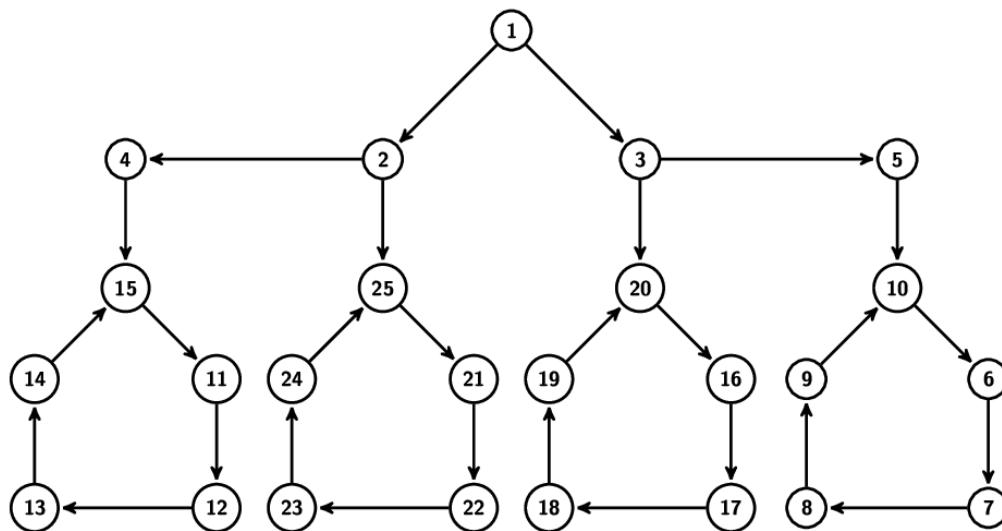


Рисунок 1.1 — Пример графа сети для многоагентной системы состоящей из 25 агентов.

Наиболее часто в литературе встречается использование *лапласиана* (матрицы Лапласа), которая позволяет перейти от визуального описания – в виде графа – к формульному описанию взаимодействия. В общем случае эту матрицу называют *матрицей связей*. Необходимо отметить основные известные свойства лапласиана [138] и графов [139, 140], которые будут использоваться в дальнейшем. Пусть рассматривается орграф без петель, в этом случае все дуги имеют направление. Число дуг, которые являются входящими в вершину α , обозначается как $d_i(\alpha)$, а число дуг, которые исходят из этой вершины – $d_o(\alpha)$. Тогда согласно [141] нормированная матрица Лапласа будет формироваться на основе матрицы смежности в виде:

$L = I - G$, где I – единичная матрица, а G – матрица смежности, формируемая по правилу

$$\begin{cases} G_{ij} = \frac{1}{d_o(\alpha_i)}, & \text{если } d_o(\alpha_i) \neq 0, \\ G_{ij} = 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1.3)$$

Другой вариант получения лапласиана подразумевает вычисление по формуле: $L = D^{-1}(D - A)$, где A – матрица смежности, а D – матрица степеней вершин. Стрелки на ребрах (α, β) показывают, что выходы агента β соединены со входами агента α . Также используется матрица Кирхгофа, которая формируется аналогично, но с учетом входящих в вершину дуг. Выражение (1.3) вычисляется с заменой $d_o(\alpha)$ на $d_i(\alpha)$. Нетрудно убедиться, что лапласиан графа равен матрице Кирхгофа того же графа, но с инвертированными дугами. Здесь стоит отметить, что в теорию многоагентных систем понятие лапласиана вошло несколько неточно. Под матрицей Лапласа в теории графов подразумевается на самом деле матрица Кирхгофа, то есть матрица смежности считается по входящим дугам. В связи с тем, что эти понятия связаны как было указано выше, в дальнейшем будем использовать понятие лапласиана, понимая, что имеется в виду матрица Кирхгофа. Использование лапласиана также удобно из-за того, что все его собственные числа лежат в диске Перрона – круге единичного радиуса на комплексной плоскости с центром в точке $(1, 0j)$. Вопросу влияния лапласиана и определению собственных чисел посвящены работы [129, 142, 143].

Полученная таким образом матрица Лапласа характеризует не только направления и порядок взаимодействия, но и степень влияния агентов друг на друга. Перейдем к изложению основных результатов, которые составляют основу теории многоагентных систем. Рассмотрим многоагентную систему, состоящую из N агентов, описываемых линейными уравнениями состояния:

$$\dot{x}_i(t) = A_a x_i(t) + B_a u_i(t), \quad y_i(t) = C_a x_i(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.4)$$

где $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$, $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$, $y_i(t) \in \mathbb{R}^l$ – векторы состояния, входа и выхода i -го агента соответственно, а A_a, B_a, C_a – матрицы соответствующих размеров. В силу взаимодействия агентов, формируется сигнал синхронизации, который задается следующим образом:

$$z_i(t) = -\left(y_i(t) - \frac{1}{|J_i|} \sum_{j \in J_i} y_j(t)\right), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.5)$$

где $|J_i|$ – мощность множества J_i – множества входящих дуг. Под мощностью множества понимается число всех агентов, влияющих на i -го агента. Выражением (1.5) задается консенсусный протокол, который в совокупности с графом связей дает соответствующий лапласиан.

В дальнейшем будет показано, как выбор другого консенсусного протокола влияет на формирование матрицы связей. Линейные динамические регуляторы для каждого агента могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}\dot{v}_i(t) &= K_A v_i(t) + K_{B_1} y_i(t) + K_{B_2} z_i(t) \\ u_i(t) &= K_C v_i(t) + K_{D_1} y_i(t) + K_{D_2} z_i(t), \quad i = 1, \dots, N,\end{aligned}\tag{1.6}$$

где $v_i(t) \in \mathbb{R}^k$. Для сформированной системы известна следующая теорема о достижимости консенсуса.

Теорема 1 (Факс-Мюррей [23]) . *Многоагентная система, состоящая из N агентов вида (1.4), регуляторов (1.6) и консенсусного протокола (1.5) асимптотически достигает консенсуса тогда и только тогда, когда одновременно асимптотически устойчивы системы*

$$\dot{x}_i(t) = A_a x_i(t) + B_a u_i(t), \quad y_i(t) = C_a x_i(t), \quad z_i(t) = \lambda_i y_i(t), \quad i = 1, \dots, N \tag{1.7}$$

с регулятором (1.6), где λ_i , $i = 1, 2, \dots, N$ – собственные значения лапласиана L , соответствующему графу связей.

Аналогичный результат был ранее получен в [144], где рассматривались однотипные системы. Если упростить задачу и в регуляторе (1.6) оставить только управление по рассогласованию между агентами (1.5), то в терминах устойчивости по Найквисту теорема 1 может быть переформулирована [1], а именно: если агент (1.4) асимптотически устойчив, то необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ его передаточной функции не охватывала точки $-\lambda_i^{-1}$. В противном случае необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ охватывала точки $-\lambda_i^{-1}$ и при увеличении частоты от 0 до ∞ совершала оборот на угол $\varphi = n\frac{\pi}{2}$ вокруг всех точек $-\lambda_i^{-1}$, где n – степень характеристического полинома, соответствующего динамике агента.

Теорема 1 позволяет провести декомпозицию задачи исследования устойчивости многоагентной системы, рассматривая набор N систем n -го порядка вместо системы порядка $N \times n$. Более того, с учетом трактовки устойчивости в форме критерия Найквиста, появляется возможность строить регуляторы с учетом совместного расположения годографа агента и чисел $-\lambda_i^{-1}$ [1, 6].

Вопросам консенсуса посвящено большое количество работ как у нас в стране, так и за рубежом. Важное значение в этой области имеют работы Агаева и Чеботарева [129, 145, 146], в которых сформулирована следующая теорема:

Теорема 2 (Агаев–Чеботарев [145]) Ранг матрицы Лапласа L , характеризующей граф Γ , равен $N - v$, где v – лесная размерность графа по входящим деревьям. Это означает, что матрица L имеет собственное число равно нулю единичной кратности тогда и только тогда, когда $\text{rank } L = N - 1$, то есть граф Γ имеет входящее остовное дерево.

Фраза «орграф Γ имеет ориентированное остовное дерево» означает, что в системе нет разбиения агентов на кластеры. Информация в этом случае может одинаково поступить в любую вершину, нет обособленных агентов. В самом простом случае, когда динамика агента (1.4) может быть описана интегратором

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad y_i(t) = x_i(t), \quad i = 1, \dots, N \quad (1.8)$$

и задан простой консенсусный протокол (1.5) с регулятором $u_i(t) = z_i(t)$, можно сформировать систему вида

$$\dot{X}(t) = -LX(t), \quad (1.9)$$

где $X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_N(t)]^T$. Так как собственные числа L лежат в диске Перрона, система (1.9) будет устойчива, если нулевой корень имеет кратность не выше первой. Это возможно по теореме 2 при наличии ориентированного остовного дерева. Таким образом, необходимо рассматривать многоагентные системы, которые не могут быть разбиты на кластеры: даже если консенсусные цели (1.1) или (1.2) будут выполнены, например, в нуле, то это достигается только за счет динамики агентов, но не из-за их взаимодействия. В этом случае теряется сама идея консенсуса, поэтому в дальнейшем полагаем, что во всех рассматриваемых графах есть ориентированное остовное дерево.

Близкая теорема приведена в [24], а в [147] сформирована следующая теорема о консенсусе в системах с переключающейся топологией сети.

Теорема 3 (Рен–Берд [147]) Пусть t_1, t_2, \dots – бесконечная последовательность моментов времени, в которые происходит переключения графа, и $\tau_i = t_{i+1} - t_i$ – ограничено снизу, где $i = 0, 1, \dots$. Консенсус достигается с использованием протокола (1.5) и регулятора $u_j(t) = z_j(t)$ если существует бесконечная последовательность непересекающихся равномерно ограниченных интервалов $[t_{i_j}, t_{i_j+l_j}]$, $j = 1, 2, \dots$, начиная с момента времени $t_{i_1} = t_0$ на которых объединение ориентированных графов имеет ориентированное остовное дерево.

Как видно из теоремы 3, требуется ориентированное остовное дерево. Это подтверждает, что система не должна распадаться на кластеры. Стоит отметить, что и эта теорема является расширением теоремы Агаева–Чеботарева [145], появившейся на несколько лет раньше работ [128, 147]. В реальных системах и условиях со временем может происходить нарушение обмена информацией между агентами. Например, при сильном удалении друг от друга (таком, что средства связи не позволяет передавать информацию, налагается ограничение по расстоянию) или при выбывании из строя меняется граф связей, описывающий структуру сети. Вопросу непостоянства формации уделяется внимание в [148–153]. Также необходимо учитывать возможные задержки в работе агентов, вызванные конструктивными или программными особенностями. Временные задержки изменяют динамику агента (в контур разомкнутой системы вносится элемент задержки), что в ряде случаев также может сильно повлиять на поведение всей формации. В работах [154–157] подробнее рассмотрены такие системы и предложены методы работы с ними.

Приведенные результаты расширены на случаи, когда динамика агентов описывается двойным интегратором:

$$\dot{x}_i(t) = v_i(t), \quad \dot{v}_i(t) = u_i(t), \quad y_i(t) = x_i(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.10)$$

а управление с консенсусным протоколом задается как

$$u_i = -\alpha \sum_{j \in J_i} (x_i - x_j) - \beta \sum_{j \in J_i} (v_i - v_j). \quad (1.11)$$

Например, в работе [158] приведена следующая теорема:

Теорема 4 (Ю-Чен-Чао [158]) *Консенсус в сети линейных агентов (1.10) с управлением (1.11) достигается тогда и только тогда, когда граф связей имеет ориентированное остовное дерево и коэффициенты α и β удовлетворяют неравенству*

$$\frac{\beta^2}{\alpha} > \max_{2 \leq i \leq N} \frac{\text{Im}(\lambda_i)^2}{\text{Re}(\lambda_i)[\text{Re}(\lambda_i)^2 + \text{Im}(\lambda_i)^2]}. \quad (1.12)$$

Таким образом, к настоящему времени сформирована основная база результатов, посвященных многоагентным системам, которая включила в себя основные принципы и подходы к работе с сетевыми системами. На основе разработанной теории многоагентных систем начали появляться работы, которые вводят ставшие классическими для теории управления разделы.

Например, появляются публикации по адаптивному и робастному управлению сетями, используются различные подходы для синтеза регуляторов, расширяются консенсусные протоколы. Дальнейшее развитие опирается на основные и расширенные частотные критерии консенсуса. Некоторые из них представлены в работах [23, 144, 155, 159–161].

Одно из интересных свойств многоагентной системы показано в работе [162]. Исходя из основных теорем следует, что многоагентную систему можно разделить на набор обособленных агентов с коэффициентом обратной связи, который может быть и комплексным. Авторы [162] предлагают воспользоваться обратным: для случая, когда систему необходимо стабилизировать статической обратной связью, предлагается воспользоваться второй системой, которая обеспечит нужный коэффициент обратной связи, что аналогично введению комплексного коэффициента усиления. В качестве примера приводится тележка с перевернутым маятником. Динамика такой системы от входа $x(t)$ – линейного положения тележки к выходу $\theta(t)$ – углу наклона маятника описывается передаточной функцией

$$W(s) = \frac{(Ts + 1)(\frac{19}{10}s^2 - \frac{1}{500}s + \frac{21}{10})}{s(s - 2)(s + 1)(s + 5)}, \quad (1.13)$$

где T – параметр регулятора. Такая система может быть стабилизирована только с использованием комплексного коэффициента усиления в обратной связи. Это может быть показано с использованием D-разбиения: области расположения подходящих значений коэффициента обратной связи лежат только в комплексных плоскостях, не пересекая вещественную ось. Но такая система может быть стабилизирована с использованием второй такой же системы, которая будет связана с первой особым образом. Связь входов и выходов этих систем описывается выражением

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

где a, b – коэффициенты, которые обеспечивают расположение точек $a \pm bj$ (здесь $j^2 = -1$) в требуемых областях устойчивости. Заметим, что такой случай также рассматривался в [163], где рассмотрен пример двумерной системы с антисимметричными связями. Структурная схема этой системы приведена на рисунке 1.2. Предложенный в работе [162] подход также подразумевает получение системы с антисимметричными связями. Нетрудно показать, что ее устойчивость может быть исследована и рассмотрена в свете многоагентных систем. Таким образом, вопросы, связанные с многоагентными системами, такие как консенсус, синхронизация, задача рандеву и прочие, достаточно хорошо изучены в случае, когда динамика агентов простая,

структура сети известна, а каналы связи – идеальные.

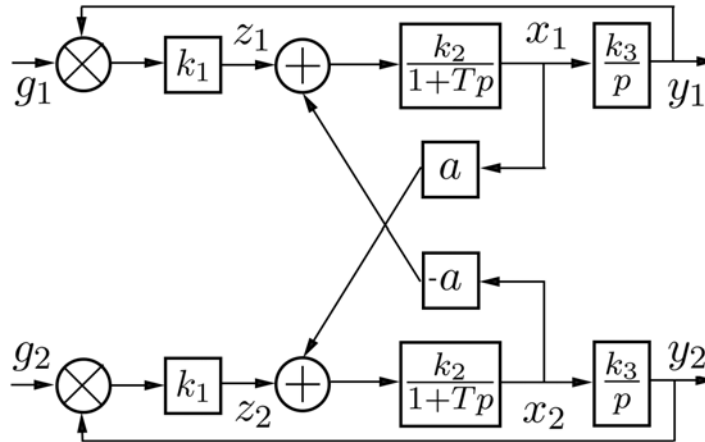


Рисунок 1.2 — Пример системы с антисимметричными связями

1.2 Адаптивное управление в многоагентных системах

Внедрение адаптивного управления в многоагентные системы произошло в связи с появлением требования обеспечить работоспособность и требуемое качество их поведения в условиях неопределенности. Несмотря на разнообразие работ, в большинстве из них требуется использование наименьшего собственного числа лапласиана. С содержательной точки зрения это означает, что известна структура сети, так как собственные числа могут быть посчитаны для известной матрицы Лапласа. Как было указано выше, лапласиан составляется на основе графа связей, описывающем взаимодействие в сети. Таким образом, проектировщику необходимо знать структуру сети. Подобный подход используется в большинстве работ, см., например, [81, 164–169]. Во многих реальных системах со множеством агентов и связей между ними это требование практически невозможно выполнить. Более того, связи могут появляться и пропадать, поэтому после каждого переключения графа связей меняется структура сети и, как следствие, ее свойства.

С ростом вычислительных мощностей существенно упростилось решение линейных матричных неравенств (ЛМН). Это объясняет возросший интерес к возможности вычисления коэффициентов регулятора для классических систем с помощью решения (ЛМН) [170, 171]. После формирования теории многоагентных систем как отдельной области, стали появляться работы, которые переносят методы расчета регулятора из классических систем на сети. В них используются решения ЛМН для расчета регуляторов при сетевом управлении, с учетом специфики сетей. Так, в [172] предлагается полудецентрализованный регулятор для много-

агентных систем с двунаправленным взаимодействием агентов. В [159] предложена методика синтеза локального регулятора по состоянию для систем такого вида.

Одним из примеров является алгоритм, предложенный в [117], который основан на модифицированном алгоритме адаптации высокого порядка, впервые описанным в [55]. Впоследствии был предложен ряд модификаций этого алгоритма для обособленных систем. Наиболее близкими к алгоритму [117] являются алгоритмы работ [56–58, 60]. На этом примере можно видеть не только общую тенденцию расширения адаптивных алгоритмов на многоагентные системы, но и вышеуказанный недостаток множества алгоритмов: для их функционирования предполагается, что граф связи известен. Как отмечено выше, этот недостаток обычно проявляется для реальных систем. Структура системы может меняться между запусками, например, если один из агентов вышел из строя и не может участвовать в следующем запуске, многоагентная система по своей природе должна функционировать уже для новой структуры сети. Иначе необходимо перестраивать алгоритмы для каждого из агентов и запускать обновленную систему. В этом случае теряется основная идея многоагентных систем, которая подразумевает полную автономность каждого агента и способность работать в любой конфигурации сети.

Из всего вышесказанного видно, что сфера мультиагентных систем действительно широка: их использование требует видоизменения устоявшихся правил и методов работы для многих случаев. Для случаев, когда информация о структуре сети отсутствует, применение адаптивного управления агентами в сети является особенно актуальным.

1.3 Обобщенная постановка задачи

Рассматривается многоагентная система M , состоящая из N агентов M_i , и орграф $\Gamma = (V, E)$, ассоциированный с многоагентной системой M , где каждый агент M_i ассоциируется с соответствующей вершиной графа Γ при $i \in \overline{1, N}$, $V = v_1, \dots, v_N$ – множество всех вершин графа, $E \subseteq V \times V$ – множество всех возможных ребер. Важное предположение в постановке задачи заключается в отсутствии петель в графе, то есть отсутствуют ребра, входящие и выходящие из одной и той же вершины. Обозначим: $J_i \subset [1, N] \setminus \{i\}$ – множество смежных вершин для узла v_i , для которых v_i – конечная вершина, а $d_o(v_i)$ – число дуг, которые выходят из вершины v_i . Также предполагается, что орграф Γ , как этого требует теорема 2, имеет единичную лесную размерность графа по входящим деревьям, из чего следует, что множество исходящих дуг для каждой вершины ненулевое. Структура сети, описанная графом Γ , предполагается неизвестной.

Динамика каждого из агентов имеет вид (1.4), предполагается неизвестной и может быть разной для каждого агента. Между взаимодействующими агентами налажены каналы связи с ограниченной пропускной способностью, через которые передается информация о выходе $y_i(t)$ каждого агента. Также вводится консенсусный протокол (1.5) по выходу.

В диссертационной работе ставится задача синтеза законов управления $u_i(t)$, которые обеспечивают выполнение целевого условия консенсуса по выходу (1.2).

Задача 1. Разработать локальный закон управления агентами, обеспечивающий выполнение цели (1.2). Рассмотреть частный вид объектов управления (1.4), у которых числитель передаточной функции

$$W_i(s) = C_i^T (sI - A_i)^{-1} B_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (1.15)$$

– гурвицев многочлен, а относительный порядок передаточной функции не меньше единицы. Также предполагается, что орграф Γ не содержит циклов, а канал связи между агентами – идеальный. Решение задачи 1 представлено в разделе 2 и проиллюстрировано результатами моделирования.

Задача 2. Разработать локальный закон управления агентами, обеспечивающий выполнение цели (1.2). Рассмотреть строго G -пассифицируемые объекты управления (1.4), то есть такие, для которых существует G_i , что передаточная функция $G_i C_i (sI - A_i)^{-1} B_i$ – гиперминимально-фазовая. Канал связи между агентами подразумевается идеальным. Также должна быть рассмотрена задача отслеживания формацией агентов задающего воздействия. Решение задачи 2 представлено в разделе 2 и проиллюстрировано результатами компьютерного моделирования.

Задача 3. Разработать алгоритм кодирования-декодирования информации, обеспечивающий сохранение консенсуса в системе при связи между агентами через каналы с ограниченной пропускной способностью. Рассмотреть многоагентную систему, в которой канал связи между агентами имеет ограниченную пропускную способность и с некоторой вероятностью возможно стирание информационных пакетов. Решение задачи 3 представлено в разделе 3 и проиллюстрировано результатами моделирования.

Задача 4. Использовать полученные теоретические результаты для решения прикладных задач децентрализованного управления группой квадрокоптеров. Разработать аппаратное и программное обеспечение для проведения лабораторных экспериментов по управлению группой квадрокоптеров. Реализовать предложенные алгоритмы адаптивного управления на основе

метода пассивации и адаптивного кодирования информации в бортовом компьютере квадрокоптера. Провести и проанализировать результаты экспериментов с предложенными алгоритмами на лабораторном стенде.

1.4 Выводы по разделу 1

В данном разделе выполнен обзор текущего состояния методов управления многоагентными системами. Выделены достоинства и недостатки основных методов и подходов управления агентами для задач достижения консенсуса и слежения. На основе обзора сделан вывод, что задача управления агентами с разной динамикой в условиях неизвестной структуры сети является важнейшей задачей в области сетевых систем. Наиболее подходящим подходом для решения этой задачи является применение методов адаптивного управления при синтезе локальных регуляторов агентов. Особый интерес представляют задачи синтеза алгоритмов управления, учитывающих связи между агентами. Эти связи в реальных системах неидеальные. Поэтому многоагентная система должна быть спроектирована таким образом, чтобы физическая ограниченность полосы пропускания в каналах связи не нарушала работу сети. В результате обзора имеющихся методов и алгоритмов кодирования, отмечена эффективность адаптивного кодирования для передачи данных в каналах управления динамических систем. В связи с расширяющимся использованием БПЛА показана актуальность применения методов многоагентных систем при управлении группой квадрокоптеров.

На основе проведенного анализа в данном разделе сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

2 Адаптивные алгоритмы управления агентами в группе

Ниже, в подразделах 2.1 и 2.2 представлено решение задач 1 и 2 в соответственно.

2.1 Адаптивное управление группой на основе модифицированного алгоритма адаптации высокого порядка

В настоящем подразделе представлено решение задачи 1. Разработан алгоритм адаптивного управления, обеспечивающий состояние консенсуса в многоагентной системе, структура сети которой неизвестна, но не содержит циклов. Считается, что передаточные функции, описывающие динамику агентов имеют гурвицев числитель и относительную степень не меньшую единицы.

2.1.1 Формирование многоагентной сети с эталонными моделями для каждого агента

Рассмотрим многоагентную систему M с ассоциированным орграфом Γ . В каждый момент времени t значение $y_i(t)$ определяет измеряемое состояние агента $i \in \{1, \dots, N\}$. Для каждого агента динамика изменения его состояний может быть описана в виде

$$Q_i(p)y_i(t) = k_i R_i(p)u_i(t), \quad i \in \overline{1, N}, \quad (2.1)$$

где $y_i(t)$, $u_i(t)$ – скалярные сигналы, соответствующие выходу и входу i -го агента соответственно, $p = d/dt$ – оператор дифференцирования, $R_i(p)$ и $Q_i(p)$ – линейные дифференциальные операторы с неизвестными коэффициентами, которые принадлежат известному ограниченному множеству Ξ , $\deg R_i(p) = m$ и $\deg Q_i(p) = n$, $R_i(\cdot)$ – гурвицевы многочлены, $n - m \geq 1$, $k_i > 0$ – неизвестные коэффициенты, также принадлежащие множеству Ξ .

Для каждого агента можно задать эталонную модель, которая определяет эталонное движение для соответствующего ей агента. Все локальные ведущие подсистемы для каждого агента могут быть заданы в виде

$$Q_m(p)y_{mi}(t) = k_m R_m(p)z_i(t), \quad i \in \overline{1, N}, \quad (2.2)$$

где $y_{mi}(t)$ – выход эталонной модели, $z_i(t)$ – эталонное задающее воздействие, формируемое для каждого агента и зависящее от состояния других агентов. Использование подобного подхода позволяет назначить каждому агенту одинаковую эталонную модель.

Задание консенсусного протокола (1.5) для формирования входа $z_i(t)$ эталонной модели (2.2) позволяет получить замкнутую многоагентную систему.

Сформированную систему можно описать следующим образом: рассматривается много-агентная система M , агентами которой являются объекты с динамикой вида (2.1), каждому агенту соответствует ведущая подсистема (2.2), которая формирует эталонные движения для соответствующего агента исходя из состояний других агентов. Взаимодействие между агентами определено с использованием консенсусного протокола (1.5). Стоит отметить, что в рассматриваемых первоначально многоагентных системах отсутствовали эталонные модели, то есть консенсусный протокол задавался сразу для агента, то есть $u_i(t) = z_i(t)$.

Цель управления состоит в ограниченности всех сигналов в замкнутой системе, а также в выполнении условия консенсуса по выходу

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y_i(t) - y_j(t)| < 2\delta, \quad i, j \in \overline{1, N} \quad (2.3)$$

и целевого условия

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |y_i(t) - y_{mi}(t)| < \delta, \quad i \in \overline{1, N}, \quad (2.4)$$

где $\delta > 0$ – точность управления. Здесь упрощенно считается, что канал связи, по которому передается информация, является идеальным. Это означает, что не учитываются особенности реальных каналов связи, а именно: квантование по времени, ограничение по скорости, а также вероятность потери пакетов данных. При синтезе закона управления не должно использоваться ни одно из собственных чисел лапласиана.

Остановимся на последнем условии. Неизвестные собственные числа лапласиана означают, что структура многоагентной сети неизвестна. Граф Γ , описывающий взаимодействия между агентами, неизвестен, то есть ни агенты, ни проектировщик системы не знает в точности, как устроена система. Такое условие соответствует реальным ситуациям, в которых структура сети формируется не статически при запуске многоагентной системы, а определяется исходя из множества факторов. Например, наиболее значимыми являются физическая удаленность агентов друг от друга и качество связи между ними. По условию задачи, в данном подразделе рассматривается неизвестный граф Γ , в котором отсутствуют циклы.

2.1.2 Синтез системы управления

В связи с предположением о входящем остовном дереве по теореме 2 это означает, что нуль имеет единичную кратность и выполняется $0 = \lambda_1 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$ для неориентированного графа Γ . Консенсус в такой системе будет достигаться в том случае, когда модель динамики агента (2.1) соответствует интегрирующему звену [129, 145, 146]. Если динамика агента опи-

сывается более сложной функцией, необходимо воспользоваться теоремой 1, которая может быть переписана в альтернативной частотной формулировке.

В теореме 1 нет формулировки в терминах консенсуса, а говорится о стабилизации видоизмененной системы. Теорему можно трактовать следующим образом: если устойчивы все i агентов, охваченных обратными связями с коэффициентами λ_i , где λ_i – ненулевые собственные числа лапласиана L , а $i \in \overline{1, N-1}$, то в исходной системе M агенты будут приходить к консенсусу. Это позволяет судить о выполнении цели (2.4) по модифицированной системе \overline{M} . Таким образом, для исследования на предмет консенсуса в многоагентной системе M рассматривается ее агрегированная модель \overline{M} , представленная уравнением

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_{N-1}(t) \end{bmatrix} = -W_a(s) \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_{N-1}(t) \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Выбор указанного критерия консенсуса обусловлен удобством представления многоагентной системы в целом виде обособленных подсистем. Очевидным преимуществом такого подхода является возможность решать задачу синтеза регулятора только для одного агента, а не рассматривать многосвязную систему большой размерности с большим количеством связей регуляторов.

В настоящем разделе рассматривается граф, ассоциированный с многоагентной системой M , чей лапласиан имеет нулевое собственное число единичной кратности: $\lambda_1 = 0$, то есть граф Γ не может быть разбит на кластеры. Поэтому выражение (2.5) может быть заменено на аналогичное, имеющее размерность меньшую на единицу. Теорема 1 может трактоваться следующим образом: устойчивость системы \overline{M} (2.5) влечет за собой сходимость исходной многоагентной системы M к консенсусу.

Пусть годограф передаточной функции, описывающий динамику каждого из агентов, при вращении может огибать хотя бы одну из точек $-\frac{1}{\lambda_i}$, $i \in \overline{1, N-1}$. Для того, чтобы обеспечить цель управления (2.4) при условии, если параметры каждого агента неизвестны, модифицируем алгоритм, описанный в [62]. Выбор данного адаптивного алгоритма обусловлен тем, что необходима адаптация в системе у которой параметры агентов и структура сети неизвестны.

Собственные числа лапласиана, исходя из его свойств, могут быть как вещественными,

так и мнимыми. В настоящем подразделе рассматривается случай неориентированного графа. Для древовидной структуры это граф без циклов, что и указано при постановке задачи. В этом случае собственные числа лапласиана могут быть только вещественными, что возможно, когда лапласиан симметричен и является положительно полуопределенным.

Замечание 1 Ограничение в виде требования отсутствия циклов в структуре сети является достаточно жестким. Следует отметить, что комплексные собственные числа не влияют на справедливость доказательства утверждения 1, однако коэффициенты усиления не могут быть представлены комплексными числами. Здесь также важно упомянуть, что постановка задачи допускает достаточно широкий выбор возможной динамики агентов, однако допустимая структура сети без циклов является достаточно редкой во всем многообразии возможных структур.

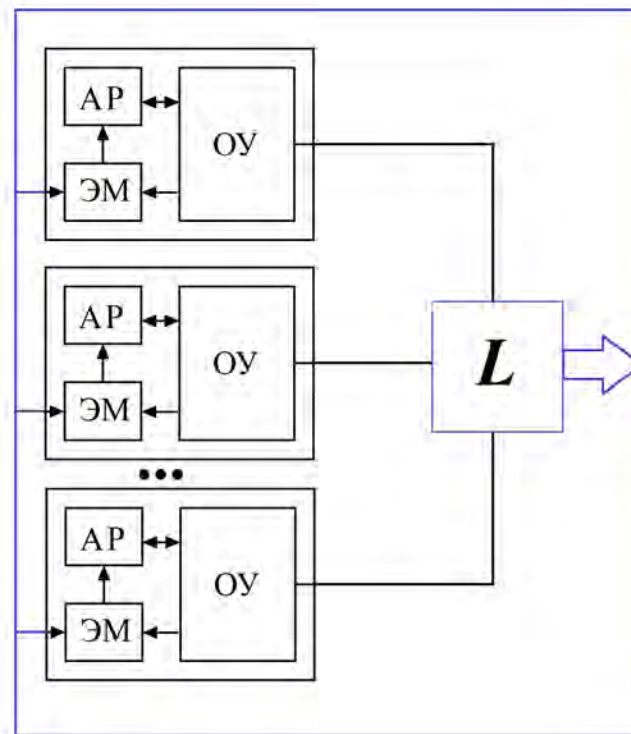


Рисунок 2.1 — Структурная схема замкнутой многоагентной системы

На рисунке 2.1 представлена структурная схема многоагентной системы с предлагаемой системой управления для каждого агента, для описания элементов используются обозначения: ОУ – объект управления, ЭМ – эталонная модель, АР – адаптивный регулятор. Как видно, совокупность ОУ, ЭМ и АР, в свою очередь, является целиковым агентом, динамика

которого нелинейна. При такой структуре агента вход ведущей подсистемы $z_i(t)$ становится общим входом всего агента и определяется с помощью консенсусного протокола (1.5), а непосредственно вход агента $u_i(t)$ будет сформирован в дальнейшем с учетом алгоритма адаптации. Делается предположение о том, что динамика агента описывается уравнениями ЭМ по окончании времени адаптации. Данное предположение позволяет использовать теорему 1, что допускает исследование консенсуса в сети по системе аналогичной (2.5). В этом случае динамика каждого агента заменяется совокупностью ОУ, ЭМ, АР и имеет динамику ЭМ. Поэтому, основываясь на доказательстве теоремы 1, можно считать, что такая система аналогична системе с управлением $z_i(t) = \lambda_i y_i(t)$, где λ_i – неизвестный коэффициент усиления. Для исходной многоагентной системы M выполняется цель (2.3), когда устойчивы все $N - 1$ систем, сформированных вышеуказанным способом.

Числитель и знаменатель динамики агента $Q_i(p)$ и $R_i(p)$ могут быть переписаны в виде следующих сумм:

$$\begin{cases} Q_i(p) = Q_m(p) + \Delta Q_i(p), \\ R_i(p) = R_m(p) + \Delta R_i(p), \end{cases} \quad (2.6)$$

где $\deg \Delta Q_i(p) \leq n - 1$, $\deg \Delta R_i(p) \leq m - 1$. После подстановки (2.6) в (2.1), может быть получена модель следующего вида

$$Q_m(p)y_i(t) = k_i R_m(p)u_i(t) + k_i \Delta R_i(p)u_i(t) - \Delta Q_i(p)y_i(t).$$

Закон управления для каждого из агентов задается, согласно [62], в виде

$$u_i(t) = T(p)\hat{v}_i(t), \quad (2.7)$$

где $T(p)$ должен быть выбран исходя из требования строго положительно вещественности к функции $\frac{R_m(s)T(s)}{Q_m(s)}$, а $\hat{v}_i(t)$ – оценка вспомогательного сигнала $v_i(t)$, способ формирования которой приведен ниже. Использование оценки вспомогательного сигнала необходимо из-за того, что $T(p)$ может быть первого порядка и выше. Тогда в (2.7) необходимо получение производных от $v_i(t)$.

Изменение ошибки слежения $e_i(t) = y_i(t) - y_{mi}(t)$ с учетом (2.2), (2.6) и (2.7) принимает вид

$$e_i(t) = \frac{k_i R_m(p)T(p)}{Q_m(p)} \left(\hat{v}_i(t) + \frac{\Delta R_i(p)}{R_m(p)} \hat{v}_i(t) - \frac{\Delta Q_i(p)}{k_i R_m(p)T(p)} y_i(t) - \frac{k_m \lambda}{k_i T(p)} y_i(t) \right). \quad (2.8)$$

Выделяя целую часть из третьего слагаемого в скобках в (2.8), получим:

$$\frac{\Delta Q_i(p)}{k_i R_m(p)T(p)} = K_{yi} + \frac{\Delta \bar{Q}_i(p)}{k_i R_m(p)T(p)}, \quad (2.9)$$

где $\deg \Delta \bar{Q}_i(p) \leq n - 2$. Уравнение (2.8) может быть преобразовано в виде:

$$e_i(t) = \frac{k_i R_m(p) T(p)}{Q_m(p)} \left(\hat{v}_i(t) + \frac{\Delta R_i(p)}{R_m(p)} \hat{v}_i(t) - K_{y_i} y_i(t) - \frac{\Delta \bar{Q}_i(p)}{k_i R_m(p) T(p)} y_i(t) - \frac{k_m \lambda}{k_i T(p)} y_i(t) \right). \quad (2.10)$$

Из (2.10) видно, что сигналы $\hat{v}_i(t), y_i(t)$ проходят через звенья с передаточными функциями, в которых не все параметры известны. Сформируем фильтры состояния из известных частей:

$$\begin{cases} \dot{V}_{1i}(t) = F_1 V_{1i}(t) + b \hat{v}_i(t), \\ \dot{V}_{2i}(t) = F_2 V_{2i}(t) + b y_i(t), \end{cases} \quad (2.11)$$

где F_1, F_2 – сопровождающие матрицы к характеристическим полиномам $R_m(p)$ и $R_m(p)T(p)$ соответственно, $b = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$.

С учетом (2.11) уравнение (2.8) может быть свернуто с использованием вектора регрессии:

$$e_i(t) = \frac{k_i R_m(p) T(p)}{Q_m(p)} \left(\hat{v}_i(t) - c_{0i}^T \omega_i(t) \right), \quad (2.12)$$

где c_{0i} – вектор, включающий неизвестные параметры i -го агента, и формируемый с учетом коэффициента K_{y_i} , коэффициентов операторов $\Delta R_i(p)$ и $\Delta \bar{Q}_i(p)$, а также включающий в себя собственные числа матрицы связей λ . Вектор регрессии имеет следующий вид:

$$\omega_i(t) = \begin{bmatrix} V_{1i}^T(t) & y_i(t) & V_{2i}^T(t) & \frac{k_m}{T(p)} y_i(t) \end{bmatrix}^T. \quad (2.13)$$

Вспомогательное управляющее воздействие $v_i(t)$ задается в виде

$$v_i(t) = c_i^T \omega_i(t), \quad (2.14)$$

где $c_i(t)$ – вектор настраиваемых параметров.

Как указано выше, необходимо получение производных от вспомогательного управляющего воздействия $v_i(t)$, поэтому для закона управления (2.7) требуется использовать наблюдатель, например, из [173], который задается в форме

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_i(t) = G_0 \zeta_i(t) + B(\hat{v}_i(t) - v_i(t)), \\ \hat{v}_i(t) = \mathcal{L} \zeta_i(t), \end{cases} \quad (2.15)$$

где $\zeta_i(t) \in \mathbb{R}^\gamma$, $G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} -\frac{d_1}{\mu} & \dots & -\frac{d_\gamma}{\mu^\gamma} \end{bmatrix}^T$, $\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$, d_1, \dots, d_γ выбираются с учетом требования гурвицевости к матрице $G = G_0 + \begin{bmatrix} d_1 & \dots & d_\gamma \end{bmatrix}^T \mathcal{L}$, $\mu > 0$ – достаточно малое число.

Утверждение 1 Существует число $\mu_0 > 0$ такое, что при $\mu < \mu_0$ система управления, включающая в себя (2.7), (2.11), (2.14), (2.15) вместе с алгоритмом адаптации

$$\dot{c}_i(t) = -\alpha e_i(t)\omega_i(t), \quad (2.16)$$

где $\alpha > 0$, обеспечивает выполнение целевого условия (2.4).

Рассматривается вектор $\bar{\eta}_i(t) = \bar{D}^{-1}\delta_i(t)$, где $\bar{D} = \text{diag}\{\mu^{\gamma-1}, \mu^{\gamma-2}, \dots, \mu, 1\}$. Полная производная по времени от $\bar{\eta}_i(t)$ с учетом (2.15):

$$\dot{\bar{\eta}}_i(t) = \mu^{-1}G\bar{\eta}_i(t) + \bar{b}\zeta_i^{(\gamma)}(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1}\mathcal{L}\bar{\eta}_i(t). \quad (2.17)$$

Относительно выхода $\bar{\Delta}_i(t)$ предпоследнее уравнение может быть переписано в виде:

$$\dot{\eta}_i(t) = \mu^{-1}G\eta_i(t) + b\dot{v}_i(t), \quad \bar{\Delta}_i(t) = \mu^{\gamma-1}\mathcal{L}\eta_i(t), \quad (2.18)$$

где $\eta_i(t) \in \mathbb{R}^\gamma$, $\eta_i^1(t) = \bar{\eta}_i^1(t)$ – первые элементы векторов $\eta_i(t)$ и $\bar{\eta}_i(t)$, $b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T$.

Пусть $\frac{R_m(s)T(s)}{Q_m(s)} = \frac{1}{s+a}$, где $a > 0$. Выражение (2.12) с учетом (2.18) преобразуется следующим образом:

$$\dot{e}_i(t) = -ae_i(t) + k_i(c_i(t) - c_{0i})^T \omega_i(t) + \mu^{\gamma-1}\mathcal{L}\eta_i(t). \quad (2.19)$$

Перепишем уравнения (2.18) и (2.19) в виде

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = -ae_i(t) + k_i(c_i(t) - c_{0i})^T \omega_i(t) + \mu_2^{\gamma-1}\mathcal{L}\eta_i(t), \\ \mu_1\dot{\eta}_i(t) = G\eta_i(t) + \mu_2\bar{b}\dot{v}_i(t), \end{cases} \quad (2.20)$$

где $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$, и воспользуемся леммой [174].

Лемма 1 Рассмотрим динамическую систему

$$\dot{x} = f(x, \mu_1, \mu_2, t), \quad (2.21)$$

где $x \in R^{s_1}$, $\mu = \text{col}(\mu_1, \mu_2) \in R^{s_2}$, $f(x, \mu_1, \mu_2, t)$ – липшицева функция по x . Предположим, что (2.21) имеет замкнутое ограниченное множество притяжения $\Omega = \{x \mid P(x) \leq C\}$, когда $\mu_2 = 0$, где $P(x)$ – кусочно-гладкая положительно-определенная функция в R^{s_1} . Тогда можно выбрать такие $\exists C_1 > 0$ и $\exists \bar{\mu}_1$ при которых выполнено условие:

$$\sup_{|\mu_1| \leq \bar{\mu}_1} \left[\left[\frac{\partial P(x)}{\partial x} \right]^T f(x, \mu_1, 0, t) \Big|_{P(x)=C} \right] \leq -C_1. \quad (2.22)$$

Тогда может быть найдено такое $\mu_0 > 0$, при котором система (2.21) будет иметь множество притяжения Ω при выполнении $\mu_2 \leq \mu_0$.

Приведенная лемма является модификацией в [лемма 1] [175], которая служит для исследования системы неавтономных дифференциальных уравнений.

Для верификации леммы выберем в (2.20) $\mu_2 = 0$ и функцию Ляпунова, составленную для (2.20), в виде

$$V = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} e_i^2(t) + \eta_i^T(t) P \eta_i(t) + \frac{1}{2} (c_i(t) - c_{0i})^T (c_i(t) - c_{0i}) \right), \quad (2.23)$$

где $P = P^T > 0$ – решение уравнения $G^T P + P G = -Q$, $Q = Q^T > 0$. Для этого необходимо взять полную производную от функции V вдоль всех траекторий (2.20):

$$\dot{V} = - \sum_{i=1}^k \left[a e_i^2(t) + \frac{1}{\mu_1} \eta_i^T(t) Q \eta_i(t) \right]. \quad (2.24)$$

Ограниченность сигналов $e_i(t)$ и $\eta_i(t)$ следует из выполнения (2.24), для доказательства ограниченности других переменных при $\mu_2 = 0$ необходимо воспользоваться доказательством, аналогичным [68]. Следовательно, выбирая число $\mu_2 = 0$, можно показать, что система уравнений (2.20) становится асимптотически устойчивой. Условия леммы выполнены только для системы (2.20), но не для исходного уравнения.

Выбирая в (2.20) равные значения $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ и вычисляя функцию Ляпунова (2.23), можно получить полную производную по времени от (2.23) вдоль всех траекторий (2.16) и (2.20). Производная по времени примет вид, учитывая полученное ранее выражение (2.24):

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^k \left[-a e_i^2(t) + \mu_0^{\gamma-1} e_i(t) \mathcal{L} \eta_i - \frac{1}{\mu_0} \eta_i^T(t) Q \eta_i(t) + 2 \eta_i^T(t) P \bar{b} \dot{v}_i(t) \right]. \quad (2.25)$$

Рассмотрим оценки

$$\begin{cases} \mu_0^{\gamma-1} e_i(t) \mathcal{L} \eta_i(t) \leq \frac{1}{2} \mu_0^{\gamma-1} e_i^2(t) + \frac{1}{2} \mu_0^{\gamma-1} \eta_i^T(t) \mathcal{L} \eta_i(t), \\ 2 \eta_i^T(t) P \bar{b} \dot{v}_i(t) \leq \eta_i^T(t) P \bar{b} \bar{b}^T P \eta_i(t) + \dot{v}_i^2(t). \end{cases} \quad (2.26)$$

Тогда с учетом оценок перепишем (2.25) в виде

$$\dot{V} = - \sum_{i=1}^N \left[\tilde{a} e_i^2(t) + \frac{1}{\mu_0} \eta_i^T(t) \tilde{Q} \eta_i(t) \right] + N \psi, \quad (2.27)$$

где $\psi = \sup\{\dot{v}_i^2(t)\}$, $\tilde{a} = a - \frac{1}{2} \mu_0^{\gamma-1}$, $\tilde{Q} = Q - \mu_0 P \bar{b} \bar{b}^T P - \frac{1}{2} \mu_0^{\gamma-1} \mathcal{L}^T \mathcal{L}$. Таким образом показывается, что может быть найдено такое число μ_0 , которое обеспечит выполнение условий $\tilde{a} > 0$ и $\tilde{Q} >$

0, что, в свою очередь, влечет за собой выполнение целевого условия (2.4). Утверждение доказано.

Основное отличие предложенного алгоритма от рассматриваемых в [60, 62] заключается в использовании коэффициентов усиления λ_i в качестве элементов вектора настраиваемых параметров. Такой подход позволяет агентам в системе не только иметь динамику эталонной модели, но и адаптироваться к различной структуре. Таким образом покрываются все возможные графы связей и соответствующие им неизвестные собственные числа λ_i . По предположению необходимо, чтобы был известен их возможный диапазон. В общем случае для нормированного лапласиана, рассматриваемого в настоящей диссертации, такой областью является круг с центром в точке $(1, 0j)$ на комплексной плоскости, имеющий единичный радиус. С учетом жесткого ограничения на вид графа без циклов допустимой областью является отрезок $[0, 2]$. Подробности о свойствах лапласиана и его собственных числах рассмотрены в [138].

2.1.3 Числовой пример

Рассмотрим многоагентную систему, состоящую из агентов, динамика каждого из которых описывается одной из следующих передаточных функций:

$$\begin{aligned} W_1(s) &= \frac{5s^2 + s + 20}{s^3 + 2s + 2}, & W_2(s) &= \frac{6s^2 + s + 10}{s^3 + 8s + 9}, \\ W_3(s) &= \frac{s^2 + 2s + 3}{s^3 + 2s + 1}, & W_4(s) &= \frac{6s^2 + 2s + 4}{s^3 + 10s + 16}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Примером агента, динамику которого описывают функции (2.28), может быть разомкнутый контур управления квадрокоптерами [6] или электрическими машинами [126, 176].

В качестве примера графа без циклов рассмотрим неориентированный граф, в котором все вершины взаимодействуют со всем. Граф связей, характеризующий подобную структуру рассматриваемой многоагентной сети, представлен на рисунке 2.2.

Исходя из рисунка 2.2, может быть сформирован лапласиан

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Первые $N - 1$ собственных чисел лапласиана, который соответствует графу, изображенному на рисунке 2.2, равны $1 + \frac{1}{N - 1}$, а последнее – нуль единичной кратности [23]. Для

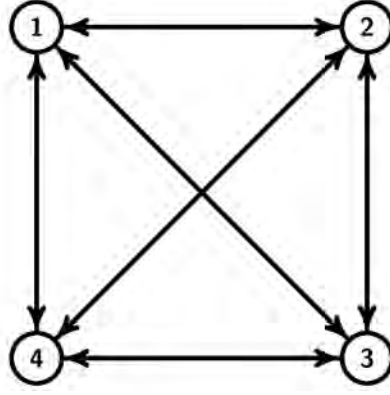


Рисунок 2.2 — Граф рассматриваемой структуры системы многоагентной системы M .

рассматриваемого случая $N = 4$ и $\lambda_{2,3,4} = \frac{4}{3}$.

Пусть динамика агентов, входящих в многоагентную систему, описывается каждой из передаточных функций (2.28) соответственно. Анализ такой многоагентной системы показал бы, что она неустойчива. Покажем это на примере функции $W_1(s)$: годограф передаточной функции $W_1(s)$, изображенный на рисунке 2.3 (где V и U обозначают комплексную и вещественную оси соответственно), охватывает точку $\sigma_{2,3,4} = -\lambda_{2,3,4}^{-1}$, т.е. $(-\frac{3}{4}, 0)$. По теореме 1 это означает, что система не придет к консенсусу.

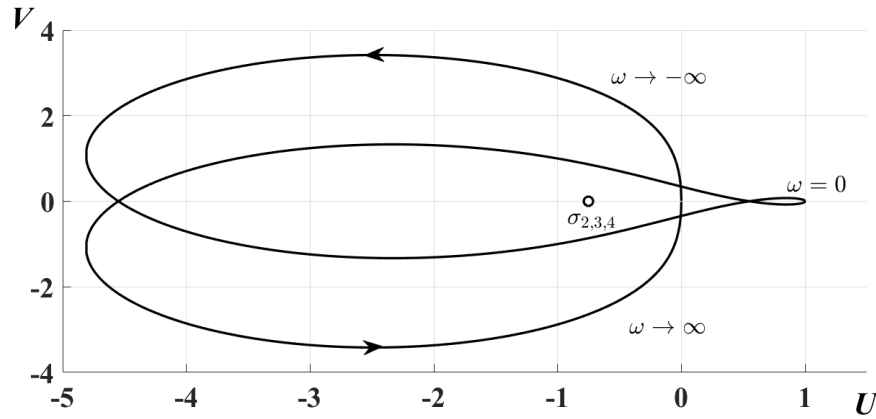


Рисунок 2.3 — Годограф передаточной функции агента W_1 и значения $\sigma_{2,3,4}$.

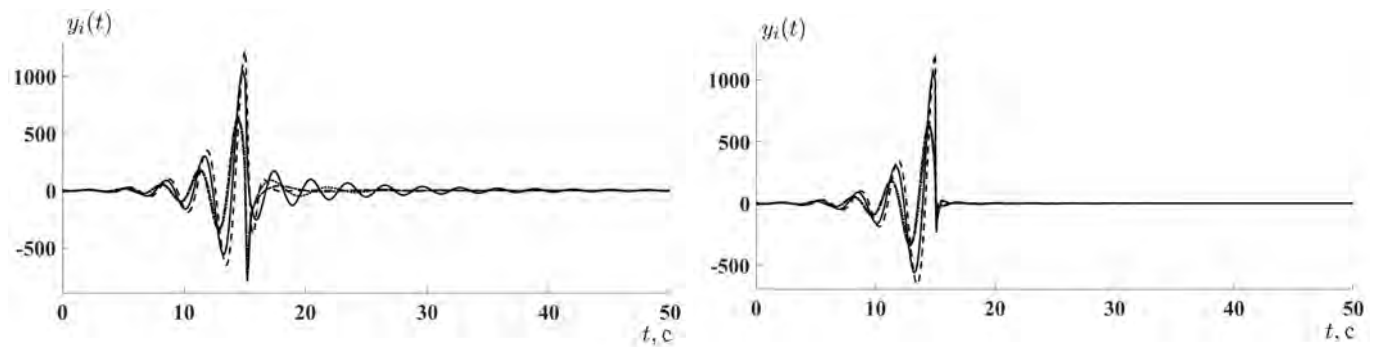
Определим эталонные модели в следующем виде для каждого агента в системе:

$$W_e(s) = \frac{s^2 + 2s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}. \quad (2.30)$$

Исходя из свойств эталонной модели (2.30), $T(p)$ в (2.7) может быть выбран в виде $T(p) = 1$. Для исследования качества предложенного алгоритма рассматриваются пара разных

значений коэффициента управления α . Для иллюстрации взаимодействия приводятся результаты моделирования для каждого из коэффициентов на двух графиках: изменение сигналов выхода всех агентов и ошибка слежения за сигналом выхода одного из них.

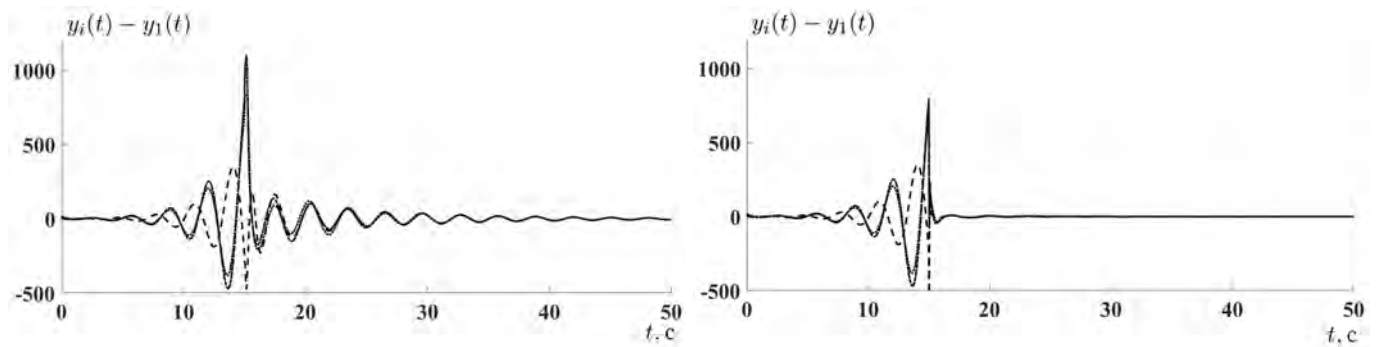
Для того, чтобы наглядно видеть процесс работы алгоритма, используем различные начальные условия для положения и скорости каждого агента, а также продемонстрируем различия в характере движения агентов. Для этого на момент начала моделирования алгоритм выключен, спустя $t = 15$ секунд после начала моделирования агенты будут иметь различные значения положения и скорости. Включение алгоритма адаптации в этот момент позволит наблюдать сходимость системы к консенсусу с алгоритмом адаптации, в то время, как без использования алгоритма система является неустойчивой. Также для определенности предположим, что агентами (2.28) осуществляется движение в пространстве, к примеру, в вертикальной плоскости.



$$\alpha = 10^{-5}$$

$$\alpha = 10^{-3}$$

Рисунок 2.4 — Изменение положения в пространстве каждого агента при совместном движении.



$$\alpha = 10^{-5}$$

$$\alpha = 10^{-3}$$

Рисунок 2.5 — Рассогласования трех агентов по отношению к первому при совместном движении.

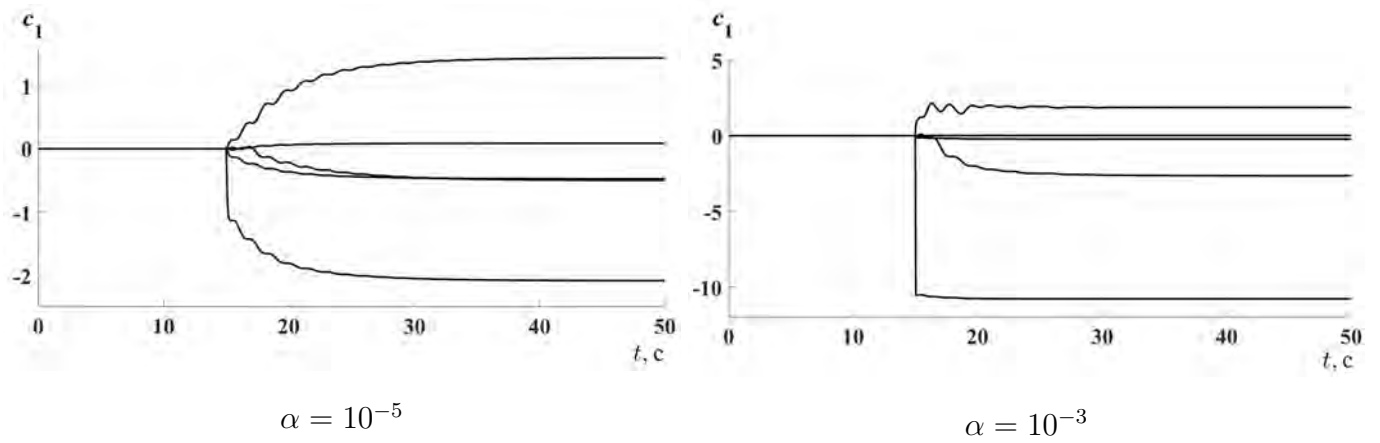


Рисунок 2.6 — Настройка коэффициентов регулятора первого агента.

На рисунках 2.4–2.6 показаны графики где y – выходной переменной, c_1 – вектор настраиваемых параметров для первого агента. Как видно из рисунков, выбор коэффициента алгоритма α влияет на скорость управления. При увеличении этого коэффициента сходимость к консенсусу происходит быстрее в связи с увеличением скорости последовательного выполнения целей (2.4) и (2.3) для каждого из агентов.

Замечание 2 Заметим, что система с использованием предложенного алгоритма сходится к консенсусу в случае, когда многоагентная система, состоящая только из эталонных моделей неустойчива. Это возможно с помощью внесения коэффициентов усиления λ_i в вектор неизвестных параметров. Без этого использование предложенного алгоритма управления позволяет агенту (2.1) всего лишь иметь динамику эталонной модели (2.2). Как было указано выше, по теореме 1 такая многоагентная система не может прийти к консенсусу.

2.2 Адаптивное управление группой на основе метода пассивации

В настоящем разделе представлено решение задачи 2. Разработан алгоритм адаптивного управления, обеспечивающий консенсус в многоагентной системе, структура сети которой неизвестна. Передаточные функции, описывающие динамику агентов, считаются строго G -пассивируемыми.

2.2.1 Задача слежения в многоагентной системе

Рассмотрим многоагентную систему M , состоящую из N агентов, динамика которых описывается следующим образом:

$$A_i(p)y_i(t) = B_i(p)u_i(t), \quad (2.1)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, $i \in \overline{1, N}$, $A_i(p), B_i(p)$ – полиномы, соответствующие i -му агенту.

Введем для слежения управление вида

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^N g_{i,j}y_j(t) + d_i r(t), \quad (2.2)$$

где $g_{i,j}$ – коэффициент, описывающий влияние j -го агента на i -го, d_i – коэффициент по задающему воздействию, $r(t)$ – задающее воздействие. Для того, чтобы получить консенсусную задачу, необходимо, чтобы коэффициенты $g_{i,j}$ формировали лапласиан, который соответствует консенсусному протоколу (1.5) и $d_i = 0$.

Подставим (2.2) в (2.1) и рассмотрим систему в статическом режиме при $p \rightarrow 0$:

$$A_i(0)y_i(t) = B_i(0) \left(\sum_{j=1}^N g_{i,j}y_j(t) + d_i r(t) \right) \quad (2.3)$$

Учитывая, что при слежении цель задается в виде $y_i(t) = r(t), i \in \overline{1, N}$, получим:

$$a_{i,n}y_i(t) = b_{i,m} \left(y_i(t) \sum_{j=1}^N g_{i,j} + d_i y_i(t) \right), \quad (2.4)$$

где $a_{i,n}$ и $b_{i,m}$ – коэффициенты полиномов $A_i(p), B_i(p)$ при p^0 .

Из (2.4) легко получить условие выполнения задачи слежения в статическом режиме (при естественном предположении что $b_{i,m} \neq 0$):

$$\frac{a_{i,n}}{b_{i,m}} = \sum_{j=1}^N g_{i,j} + d_i. \quad (2.5)$$

2.2.2 Многоагентная система с неявными эталонными моделями для агентов

Рассмотрим многоагентную систему M с ассоциированным оргграфом Γ . В каждый момент времени t состояние i -го агента ($i = 1, \dots, N$) характеризуется значением вектора $x_i(t)$, а его динамика представляется в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t), \end{cases} \quad (2.6)$$

где $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$, $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$, $y_i(t) \in \mathbb{R}^l$ – векторы состояния, входа и выхода соответственно, а A_i , B_i , C_i – матрицы соответствующих размеров.

По указанному при постановке задачи предположению передаточная функция $G_i C_i (sI - A_i)^{-1} B_i$ – гиперминимально-фазовая, где G_i – матрицы размеров $m \times l$.

Воспользуемся теоремой о пассивации (см. [46, 177]). Гиперминимально-фазовость соответствует случаю, когда передаточная функция $G_i C_i (sI - A_i)^{-1} B_i$ – минимально-фазовая и $G_i C_i B_i > 0$. В этом случае для достижения стабилизации системы или для слежения за задающим сигналом может быть использован ряд сигнально-параметрических регуляторов [52, 178, 179].

Зададим ошибку адаптации как

$$\sigma(t) = G_i y_i(t) - p_i r_i(t), \quad (2.7)$$

где r_i – задающее воздействие для i -го агента, а p_i – коэффициент усиления при нем.

В дальнейшем рассматривается случай SIMO агентов, так как в качестве цели управления помимо консенсуса по выходу (1.2) необходимо обеспечить слежение за сигналом $r(t)$. Также введем вспомогательную цель управления, а именно – требование скользящего режима вдоль поверхностей $\sigma_i = 0$:

$$\sigma_i \rightarrow 0. \quad (2.8)$$

Требование скользящего режима вдоль поверхностей $\sigma_i = 0$ с учетом (2.7) означает скольжение вдоль поверхности

$$p_i r_i(t) = G_i y_i(t), \quad (2.9)$$

что в скалярном случае при $y_i(t) \in \mathbb{R}^2$ и $G_i = \begin{bmatrix} 1 & \tau \end{bmatrix}$ соответствует динамике апериодического звена:

$$\tau \dot{y}_i(t) + y_i(t) = p_i r_i(t). \quad (2.10)$$

Очевидно, что при выполнении (2.8), будет стремиться к выполнению (2.10). Это означает, что динамика агента будет стремиться к динамике апериодического звена.

Сформируем задающее воздействие для каждого агента с учетом протокола (2.2) в виде

$$r_i(t) = \sum_{j=1}^N q_{i,j} y_j(t) + d_i r(t), \quad (2.11)$$

Объединение выражений (2.11) в векторном виде, аналогично (2.5) будет описывать многоагентную систему в виде

$$R(t) = QY(t) + Dr(t), \quad (2.12)$$

где $R(t) = \text{col}(r_1(t), \dots, r_N(t)) \in \mathbb{R}^N$ – вектор задающих воздействий, состоящий из результирующих воздействий для каждого агента, $Q = ||q_{i,j}|| \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $Y(t) = \text{col}(y_1(t), \dots, y_N(t)) \in \mathbb{R}^N$ – вектор выходных сигналов, компоненты которого – выходы каждого из агентов, а $D(t) = \text{col}(d_1(t), \dots, d_N(t)) \in \mathbb{R}^N$ – вектор коэффициентов отработки задающего воздействия.

Матрица Q здесь выступает в роли матрицы связей, описывающей взаимодействие между агентами. С использованием консенсусного протокола (1.5), в которой не входит задающее воздействие, матрица Q сводится к лапласиану, а $D(t) = \text{col}(0, \dots, 0)$. Таким образом, рассматривается случай более общий, чем классические постановки задачи, используемые в многоагентных системах. Как было указано в подразделе 2.2.1 для слежения многоагентной системы за задающим сигналом $r(t)$ налагаются условия на компоненты матрицы Q и вектора D в зависимости от динамики агента. Таким образом, если динамика каждого агента будет сведена к динамике апериодического звена (2.10), то будет необходимо выполнение следующих условий:

$$p_i = \sum_{j=1}^N g_{i,j} + d_i. \quad (2.13)$$

Консусный протокол (1.5) для слежения может быть модифицирован в виде

$$r_i(t) = -\left(y_i(t) - \frac{1}{|J_i|} \sum_{j \in J_i} y_j(t)\right) + r(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.14)$$

тогда общее описание многоагентной системы (2.12) будет сведено к аналогичному описанию при $p_i = d_i = 1$:

$$R(t) = -LY(t) + \text{col}(1, \dots, 1)r(t), \quad (2.15)$$

то есть задающее воздействие должно быть подано на всех агентов.

Следует также отдельно остановиться на вопросе, почему в системе при выполнении цели (2.8) будет осуществляться консенсус по выходу (1.2). Как было указано выше, при выполнении (2.8) динамика агента будет практически совпадать с динамикой аperiodического звена (2.10). Известно, что годограф частотной передаточной функции аperiodического звена лежит в правой комплексной полуплоскости, поэтому по теореме 1, консенсус наверняка будет достигаться, если все собственные числа матрицы связей Q лежат в левой комплексной полуплоскости. Очевидно, что для лапласиана это условие выполняется всегда, а для произвольной же матрицы связей Q необходимо искать ее собственные числа. Важно также указать, что это условие достаточное, но не необходимое. Таким образом, выполнение цели (2.8) влечет за собой выполнение цели (1.2) и, как следствие, решение поставленной задачи.

Для выполнения цели (2.8) воспользуемся сигнально-параметрическим регулятором следующего вида:

$$\begin{cases} u_i(t) = -k_i(t)\sigma_i(t) - \gamma_\sigma \operatorname{sign} \sigma_i \sqrt{|\sigma_i|}, \\ \dot{k}_i(t) = \gamma\sigma_i^2(t) - \alpha(k_i(t) - k_{i0}), \\ k_{i0} = k_i(0). \end{cases} \quad (2.16)$$

где коэффициент $\alpha \geq 0$ – управляющий параметр, регулирующий обратную связь в законе адаптации. Через него в алгоритм адаптации вводится параметрическая обратная связь, препятствующая неограниченному росту коэффициентов регулятора при действии возмущений и шумов измерения, см. [47, 49, 51–54, 58, 71, 91, 178–181]. Сигнальное слагаемое в законе управления (2.16) инспирировано алгоритмом супер-твистинга [182–184]. Доказательство попадания процесса на поверхность скольжения за конечное время может быть проведено с использованием функции Ляпунова вида $V(x) = |\sigma|$, см., напр. [47, 54, 58, 61, 178].

В результате образуется многоагентная система, в которой каждый из агентов включает в себя неявную эталонную модель (2.9) и сигнально-параметрический регулятор (2.16). На рисунке 2.1 показана структурная схема сформированной многоагентной системы.

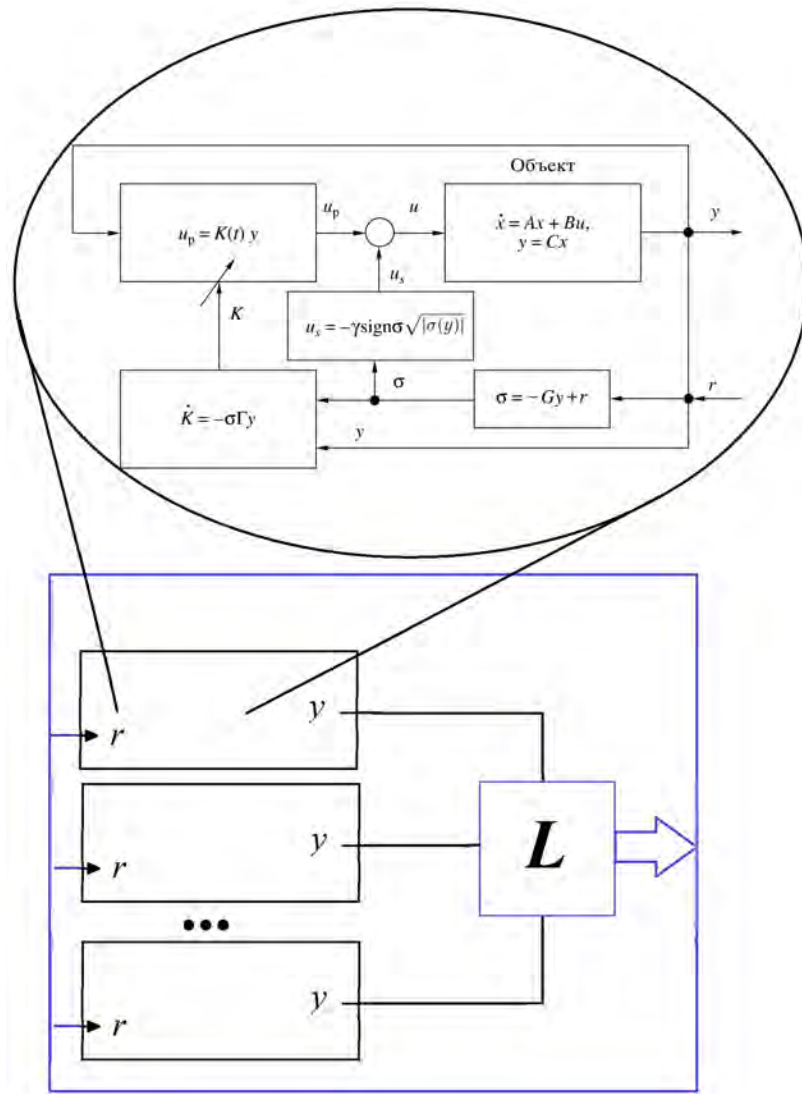


Рисунок 2.1 — Структурная схема многоагентной системы

2.2.3 Числовой пример

На основе модели из работы [6] для численного моделирования рассмотрим процесс изменения высоты квадрокоптера, который описывается с помощью следующей передаточной функции

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (2.17)$$

где $A(s) = s^3(0.1s + 1)$, $B(s) = 0.025(53s^2 + 21s + 1)$, которые рассматриваются как некоторые номинальные полиномы передаточных функций агентов, а вся функция (2.17) в дальнейшем считается номинальной.

Выходом агента, за которым осуществляется слежение в группе является высота полета

$h(t)$, то есть в (2.1) принимается $y_i(t) = h_i(t)$ для всех $i \in \{1, \dots, N\}$. Пусть вектор выхода агента $x_i(t)$ имеет вид $x_i(t) = \begin{bmatrix} y^j(t) & \dot{y}^j(t) \end{bmatrix}^T$. Таким образом предполагается, что в квадрокоптере подлежит измерению высота (например, с помощью барометра, лидара или GPS) и вертикальная скорость (которая также может быть получена из GPS или после корректной обработки и интегрировании данных с акселерометра).

Учитывая метод применения неявной эталонной модели, ошибка адаптации $\sigma_i(t)$ для каждого агента задается в виде

$$\begin{aligned} e_i^h(t) &= h^*(t) - h_i(t), \\ \sigma_i(t) &= e_i^h(t) - \tau \dot{h}_i(t), \end{aligned} \quad (2.18)$$

где $h^*(t)$ – задающий сигнал по высоте, $\tau > 0$ – параметр управления.

Очевидно, что такое определение ошибки адаптации $e_i^h(t)$ означает, что динамика неявных эталонных моделей будет описывается, как указано в (2.9) следующим дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\tau \dot{h}_i(t) + h_i(t) = h^*(t), \quad (2.19)$$

где τ определяет время переходного процесса замкнутой системы (2.19).

В качестве примера рассмотрим информационный граф связей, изображенный на рисунке 2.2.

Задающий сигнал подается на агента-лидера, в рассматриваемом примере им является агент под номером 1 на рисунке 2.2. Моделирование проводится для оценки характеристик адаптивной системы одного квадрокоптера и для всей формации. Рассмотрим одиночный квадрокоптер и адаптивное управление для случаев как номинальных и различных наборов параметров. Для моделирования параметры регуляторов выбраны следующим образом: $\tau = 0.25$ с, $\gamma_\sigma = 10^2$, $\alpha = 0.2$. В качестве задающего сигнала $h^*(t)$ выбран сигнал в форме «прямоугольной волны» с амплитудой 1 метр и периодом 10 секунд.

На рисунках 2.3, 2.4 изображены результаты моделирования для одиночного квадрокоптера и номинальных параметров. Как видно из графиков, ошибка адаптации $\sigma(t)$ быстро сходится к нулю и динамика всей системы становится близкой к динамике, описываемой уравнениями эталонной модели (2.19).

Последующее моделирование выполнено для случая, когда параметры агентов различны. Для этого коэффициенты знаменателя $A(s)$ в 2.17 были случайным образом отклонены от но-

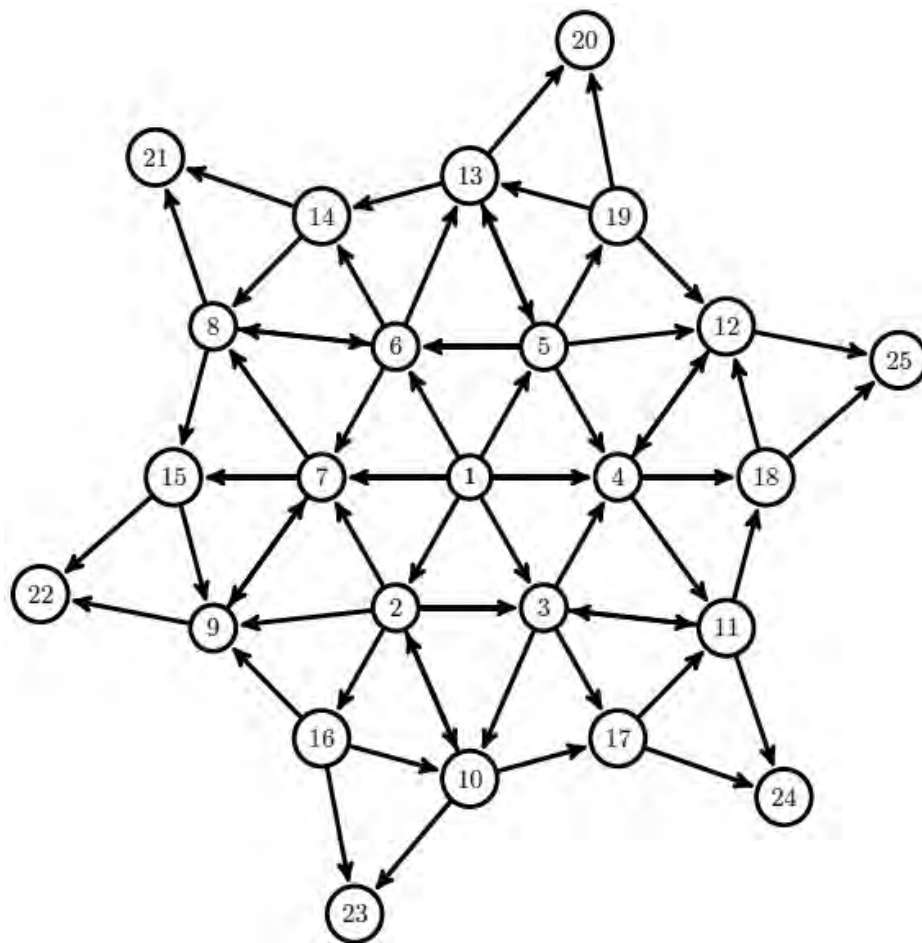
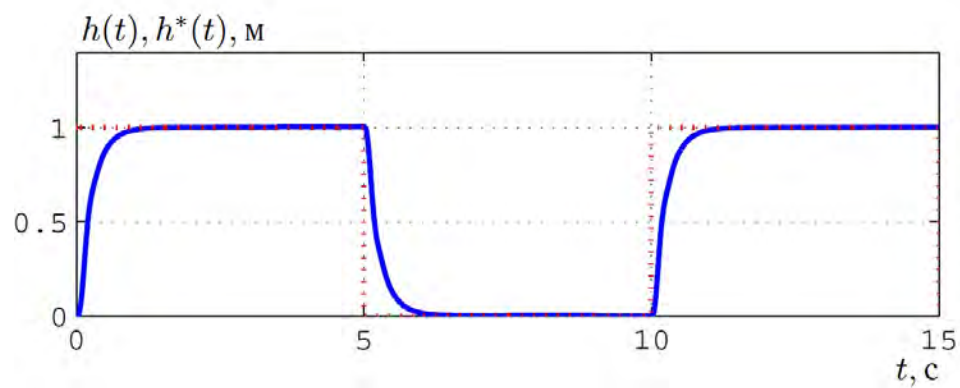
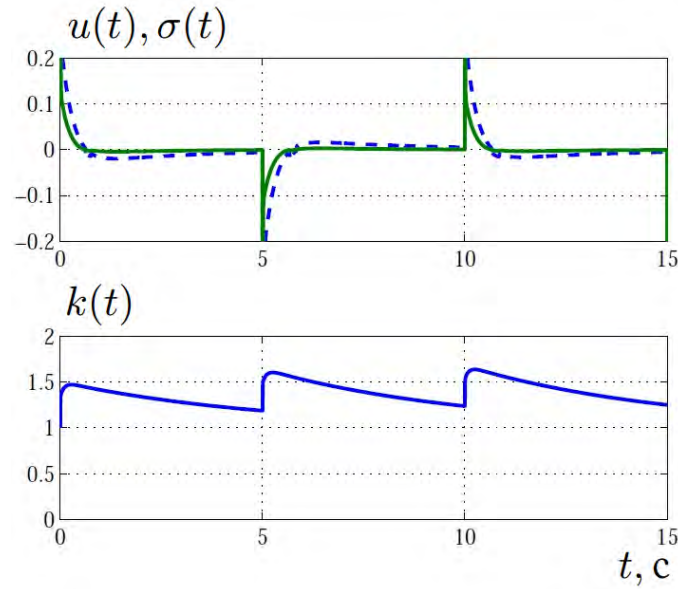


Рисунок 2.2 — Граф информационных связей формации из 25 квадрокоптеров.



Траектории $h(t)$ (сплошная линия) и $h^*(t)$ (пунктирная линия).

Рисунок 2.3 — Траектории для случая агента с номинальными параметрами.



Управляющий сигнал $u(t)$ (пунктирная линия), ошибка адаптации $\sigma(t)$ (сплошная линия), коэффициент регулятора $k(t)$

Рисунок 2.4 — Сигналы регулятора для случая агента с номинальными параметрами.

минальных для каждого из 25-ти агентов так, чтобы не нарушалось условие гиперминимально-фазовости, налагаемое на передаточные функции агентов. Свойства и разброс характеристик полученных разомкнутых систем для разных $A(s)$ показаны с помощью ЛАФЧХ на рисунке 2.5. Черной сплошной линией на графиках соответствует ЛАФЧХ номинальной системы (2.19).

Результаты моделирования для случая агентов с различной динамикой показаны на рисунке 2.6, где $h_i(t)$ — траектория одного из агентов для $i \in \{2, \dots, 25\}$. Также показана ошибка между выходом номинальной модели модели $h_{\text{ном}}$ и выходом $h_i(t)$ рассматриваемого агента. Этот результат показывает, что адаптивное управление имеет высокую робастность по отношению к параметрической неопределенности.

После анализа работы предложенного адаптивного алгоритма для стабилизации систем с разной динамикой, необходимо рассмотреть, как ведут себя агенты с разной динамикой (которая для каждого из агентов была получена выше путем отклонения от номинальной модели) в сети с этим алгоритмом. Результаты моделирования приведены на рисунках 2.7, 2.8. Траектория изменения высоты $h_1(t)$ лидера (имеющего номер 1), и агентов под номерами 5, 17, 25 в сети показаны на рисунке. 2.7. На рисунке 2.8 показано рассогласование движения между агентами под номерами 5, 17, 25 в сети и агентами под номерами 5, 17, 25 в аналогичной

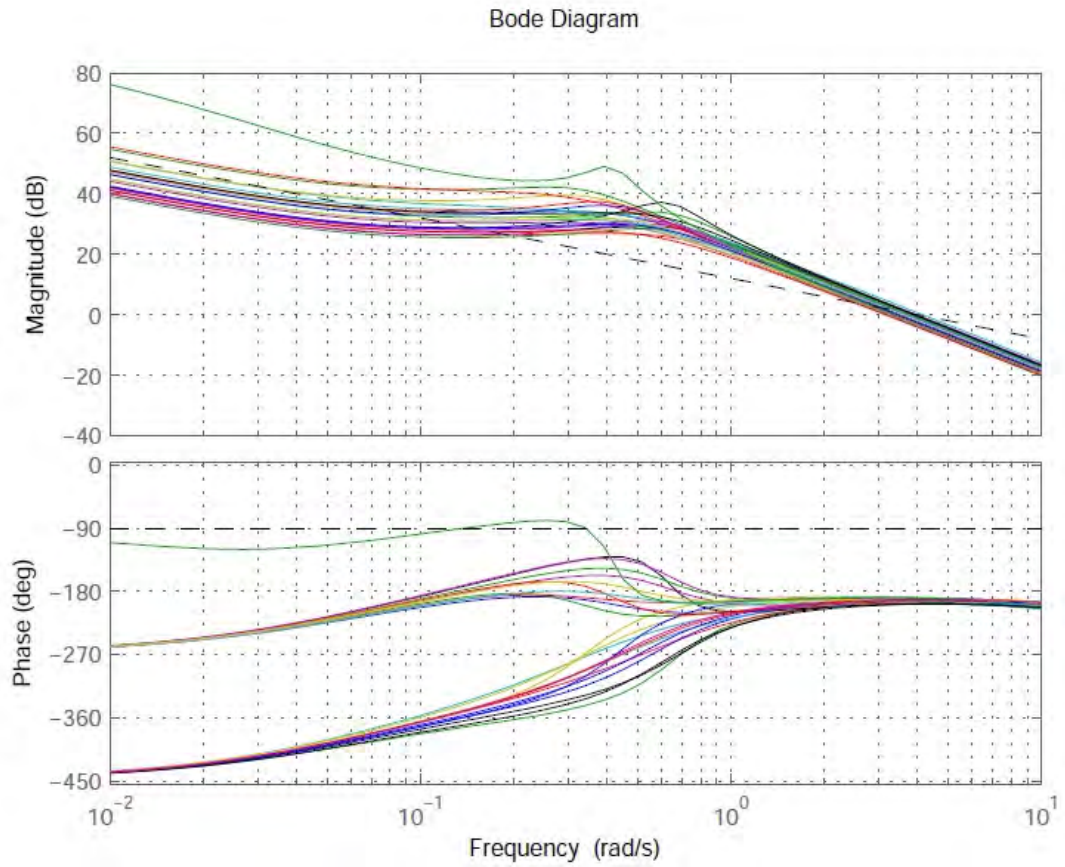


Рисунок 2.5 — ЛАФЧХ агентов для случая, когда их параметры различны

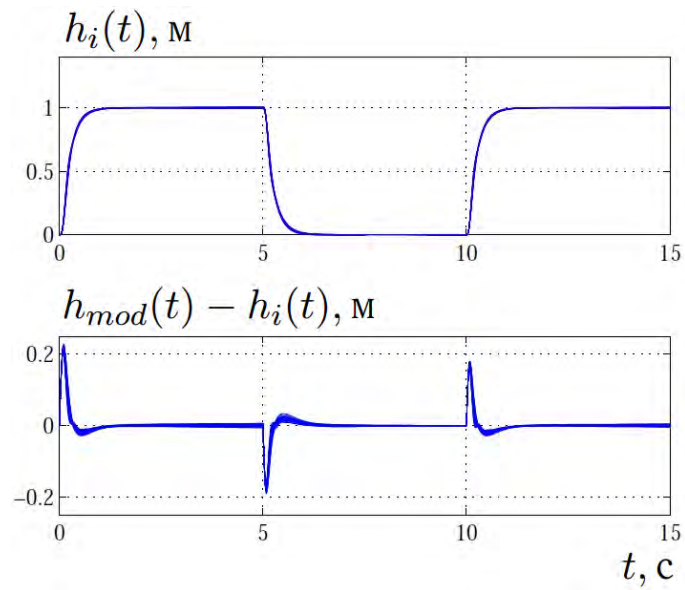


Рисунок 2.6 — Кривые $h^i(t)$ и $h_{mod}(t) - h_i(t)$ для случая агентов с различной динамикой.

системе, состоящей из агентов, динамика которых описывается эталонной моделью (2.19).

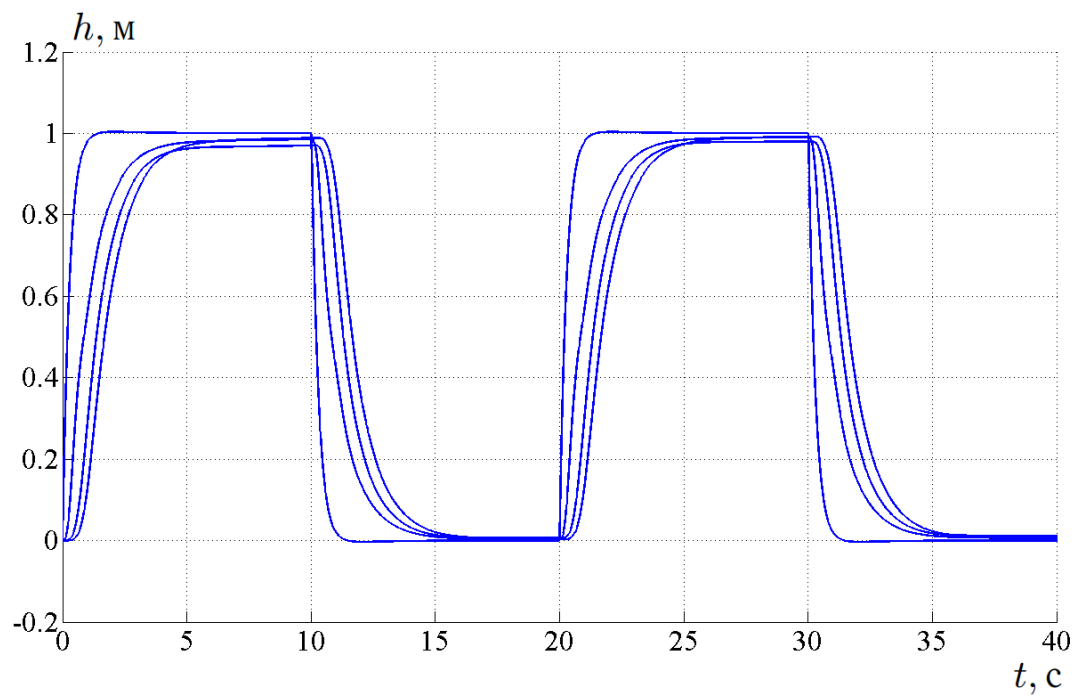


Рисунок 2.7 — Изменение высоты $h(t)$ лидера (номер 1) и агентов (номера 5, 17, 25) в группе.

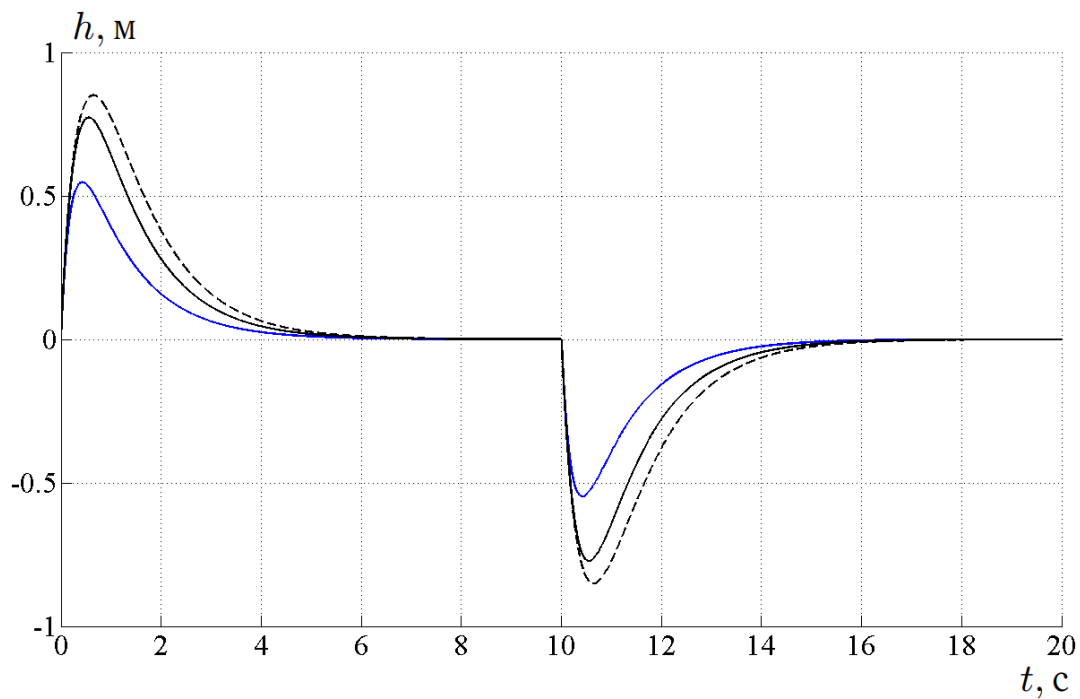


Рисунок 2.8 — Разница высот агентов под номерами 5, 17, 25 в группе и соответствующих агентов в аналогичной системе, состоящей из эталонных моделей.

2.3 Выводы по разделу 2

В данном разделе рассмотрен предложенный адаптивный алгоритм управления агентами, динамика которых описывается линейными уравнениями в случае, когда граф, описывающий структуру сети, не имеет циклов. Структура сети может быть неизвестна, более того, при смене структуры сети между запусками многоагентной системы в работу нет необходимости перестраивать регуляторы каждого агента. Такой подход имеет преимущество перед другими алгоритмами, которые в процессе работы используют значение минимального собственного числа лапласиана. С помощью числового моделирования показано, что предложенный алгоритм применим к системам, в которых консенсус не достигается из-за совокупности вида графа сети и динамики агентов. Другим преимуществом предложенного алгоритма является простота настройки регуляторов, которая заключается в вариации всего одного параметра. Изменение этого параметра позволяет влиять на качественные характеристики переходных процессов сходимости агентов, например, время переходного процесса. Также приведена модифицированная структура многоагентной системы, в которой с учетом ввода эталонной модели и адаптивного регулятора, синтезировано адаптивное управление, обеспечивающее требуемое условие консенсуса в сети. Рассмотрен иллюстративный пример, для которого приведены результаты компьютерного моделирования.

Также в данном разделе для многоагентных систем предложен метод использования адаптивного управления, опирающийся на метод пассивации и алгоритмы адаптации с неявной эталонной моделью для случая сети неизвестной и произвольной структуры. На иллюстративном примере численно показано, что алгоритм, полученный на основе этого подхода приводит к указанной цели для многоагентной системы сложной структуры и достаточно высоким порядком модели динамики агентов. Преимуществом предложенного подхода является также простота настройки регуляторов.

В подразделе 2.2 также приводится модифицированная структура многоагентной системы с учетом ввода эталонной модели и адаптивного регулятора, синтезируется адаптивное управление, обеспечивающее требуемое условие консенсуса и слежения в сети. Также приводится численное моделирование на примере многоагентной системы, состоящей из беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптер.

В разделе были предложены и рассмотрены два адаптивных алгоритма управления агентами в многоагентных системах с неизвестной структурой сети. Каждый из алгоритмов может

быть применим при определенном сочетании динамики агентов и структуры сети. Параметры в каждом случае могут быть различны для всех агентов в сети, но должны быть выполнены общие условия. Таким образом, в зависимости от агентов, входящих в многоагентную систему, и структуры сети может быть применен один из предложенных алгоритмов. Основные результаты раздела опубликованы в [1, 5–7].

3 Адаптивное кодирование данных через каналы связи с ограниченной пропускной способностью

В настоящей разделе предложено решение задачи 3. Разработан алгоритм адаптивного кодирования, позволяющий кодировать информацию, передаваемую между агентами в сети через каналы связи с ограниченной пропускной способностью. Также предполагается, что передаваемая информация может быть потеряна.

3.1 Алгоритм адаптивного кодирования

Рассматривается дискретный процесс, описываемый следующей линейной моделью:

$$x[k+1] = Ax[k] + E\varphi[k], \quad y[k] = Cx[k], \quad (3.1)$$

где $x[k] \in R^n$ – вектор состояния процесса, $y[k] \in R$ – измеряемый скалярный сигнал, $k = 0, 1, \dots$ – номер такта. Этот сигнал необходимо передать через канал связи с ограниченной пропускной способностью. Матрицы A, C, E считаются известными как на стороне кодера, так и декодера. Пара матриц (A, C) предполагается наблюдаемой. Внешнее воздействие $\varphi[k] \in R$ не может быть измерено.

Подобное представление модели процесса позволяет трактовать процедуру кодирования как оценку траектории движения динамической системы, описываемой моделью (3.1). В многоагентных системах под этой информацией понимается значения сигналов выходов агентов $y_i[k]$ или компоненты вектора состояния $x_i[k]$ (в зависимости от используемого протокола), которые агент передает тем, агентам, с которыми он связывается структурно. Так, наглядным примером является передача навигационной информации между беспилотными летательными аппаратами при осуществлении совместного полета, рассматриваемого в разделе 2.2. В этом случае информация, которую требуется передавать, может представлять собой данные о пространственном (координаты x, y, z) и угловом положении (курсовой угол ψ) летательного аппарата. Изменение этих величин может быть описано моделью (3.1) второго порядка для каждого из передаваемых сигналов при предположении, что их динамика имеет постоянную скорость.

Для кодирования и декодирования информации предложим следующий алгоритм адаптивного кодирования. Пусть $y[k]$ – скалярный сигнал, который требуется передавать в дискретные моменты времени $t_k = kT$ по цифровому каналу связи, T – интервал дискретности.

При двоичном кодировании выполняется соотношение $R = T^{-1}$, где R – скорость передачи данных, выраженная в битах в секунду. Воспользуемся бинарным статическим квантователем

$$q[k] = M[k]\sigma[k], \quad (3.2)$$

где $M[k]$ – уровень квантования, а $\sigma[k] = \text{sign}(y[k] - \hat{y}[k])$, где $\hat{y}[k]$ – оценка сигнала $y[k]$, получение которой описано ниже. Значение $\sigma[k]$ может быть описано однобитовым символом выходного алфавита. После выполнения всех необходимых вычислений это значение передается по каналу связи. Существенным является предположение, что кодер и декодер работают синхронно, а также, что передача данных в канале связей осуществляется без потерь. Случай потерь пакетов более подробно описан в [106, 111, 185–187] и подразумевает, что факт потери пакета известен как на стороне кодера, так и декодера. Подобное предложение достаточно жесткое и требует дополнительного исследования при проектировании реальной системы. Одним из решений может быть нумерация передаваемых пакетов или реализация обратной связи между передатчиком и приемником.

В [91, 96, 100, 101, 103, 188–192] описан алгоритм настройки диапазона квантования $M[k]$ с использованием подхода адаптивного зуминга на основе вычисления скользящего среднего.

Предложим иной алгоритм настройки уровня квантования в алгоритме адаптивного кодирования следующего вида:

$$\begin{aligned} \lambda[k] &= (\bar{\sigma}[k] + \bar{\sigma}[k-1] + \bar{\sigma}[k-3])/3, \\ M[k+1] &= m_c + (|\lambda[k]| + 0.5)M[k], \\ \lambda[0] &= 0, \quad M[0] = M_0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Предложенный алгоритм настройки уровня квантования обладает более высокой скоростью настройки при изменении характера передаваемого сигнала. В процедуре кодирования-декодирования полного порядка используется встроенный наблюдатель. Пусть динамика кодируемого процесса имеет вид

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\varphi(y), \quad y(t) = Cx(t), \quad x(0) = x_0 \quad (3.4)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния кодируемого процесса, $y(t)$ – скалярный измеряемый сигнал $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – вещественные матрицы; $\varphi(y)$ – липшицева непрерывная функция вдоль всей траектории системы 3.4.

Для оценивания кодируемого процесса используется наблюдатель

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B\varphi(\hat{y}(t)) + L\bar{\sigma}(t), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad (3.5)$$

где $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния наблюдателя, $\hat{y}(t)$ оценка кодируемого сигнала процесса, L – матрица размера $(n \times 1)$ параметров наблюдателя, непрерывная ошибка наблюдения $\bar{\sigma}(t)$ находится как расширение $\bar{\sigma}[k]$ на интервал сэмплирования. В случае экстраполяции нулевого порядка значение $\bar{\sigma}(t)$ находится как $\bar{\sigma}(t) = \bar{\sigma}[k]$ при $t_k \leq t < t_{k+1}$.

При передаче навигационной информации о положении движущихся агентов часто считается, что движение агента происходит с постоянной скоростью по каждой из координат. В этом случае модель процесса (3.1) может быть представлена в форме

$$z[k+1] = Az[k], \quad x[k] = Cz[k], \quad k = 0, 1, \dots, \quad (3.6)$$

где $z[k] \in \mathbb{R}^2$ – вектор состояния, $A = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $C = [1, 0]$.

Для оценивания изменения кодируемого сигнала введем в кодер и декодер наблюдатель вида

$$\begin{cases} \hat{y}[k+1] = \hat{y}[k] + T\hat{V}[k] + l_1\sigma[k], \\ \hat{V}[k+1] = \hat{V}[k] + l_2\sigma[k], \end{cases} \quad (3.7)$$

где $\hat{V}[k]$ – оценка скорости сигнала $y[k]$ и l_1, l_2 – параметры наблюдателя.

Параметр $\lambda[k]$ характеризует разброс изменений кодируемого сигнала, что дает возможность определить требуемое направление изменения параметра $M[k]$. Диапазон квантования увеличивается, если кодируемый сигнал изменяется быстро и в одном направлении, и, наоборот, уменьшается, если наблюдается колебательно поведение сигнала относительно его оценки. Такое поведение позволяет с одной стороны «догнать» новое кодируемое значение при его существенном изменении, а с другой стороны – оценивать его все более точно, когда кодируемый сигнал меняется медленно. Направление изменения получается через канал связи приемником и обрабатывается декодером. Параметр m_c определяет минимальный уровень квантования. Кодер и декодер, получая значение $\sigma[k]$, настраивают уровень квантования по алгоритму (3.3). Вычислив текущее значение (3.2), которое кодер считает как $q[k] = y[k] - \hat{y}[k]$, декодер использует восстановленное значение $y[k]$ для оценивания наблюдателем (3.7).

По аналогии с [111], предполагается, что измерения выходов агентов, закодированные кодером и переданные на декодер, могут быть потеряны с вероятностью p . Модель этого процесса может быть представлена с помощью модели канала связи со стираниями. Также предполагается, что существует обратная связь от декодера к кодеру, позволяющая последнему

иметь информацию о том, дошел информационный пакет или нет. Таким образом, кодер знает, какая информация была доставлена на декодер (так называемое условие эквивапамти выполнено [193]). Пусть сигнал, передаваемый по обратной связи в ответ на пакет с кодера на декодер в момент времени k может быть представлен в виде $\sigma[k] \in \{0, 1\}$:

$$\sigma[k] = \begin{cases} 0, & \text{нет стирания в момент } k, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3.8)$$

Случайная величина $\sigma[k]$, $k = 0, 1, \dots$ предполагается независимой и равномерно распределенной: $P_r(\sigma[k] = 0) = 1 - p$ и $P_r(\sigma[k] = 1) = p$.

Пример. Для определенности рассмотрим процесс передачи информации с одного квадрокоптера на другой. Передача информации между квадрокоптерами в группе с другим алгоритмом кодирования была рассмотрена в [9, 11, 17]. Пусть рассматривается движение летательного аппарата только в вертикальной плоскости вдоль оси OY . Модель вертикального движения квадрокоптера может быть получена из модели (4.1). В качестве кодируемой информации можно воспользоваться экспериментальными данными о высоте полета из [8]. Также пусть в рассматриваемой системе имеется канал передачи данных между квадрокоптерами с пропускной способностью $R = 10$ бит/с. Приведем результаты моделирования с рассмотренным выше алгоритмом адаптивного кодирования для небольшого отрезка времени.

На рисунках 3.1-3.2 показаны результаты численного моделирования.

На рисунке 3.1 изображены процессы изменения, соответствующие кодируемому сигналу и оценкам, полученным на декодере. рисунок 3.2 показывает процесс изменения уровня кодирования $M[kT]$ во время работы алгоритма. Результат моделирования подтверждает применимость предложенного алгоритма к кодированию динамических сигналов.

3.2 Использование алгоритма кодирования в группе квадрокоптеров

В связи с тем, что многоагентная система подразумевает совокупность динамики агентов и связей между ними, на каждый из этих аспектов может влиять наличие кодирования в каналах связи. Для начала рассмотрим упрощенную систему, где динамика линейна и одинакова для всех агентов, но граф связей, описывающий взаимодействие между квадрокоптеров достаточно большой и имеет сложную структуру. Для этого рассмотрим динамику вертикального движения, которая может быть получена экспериментально и описывается передаточной функцией (4.42). В качестве примера рассматривается сложный граф информационных свя-

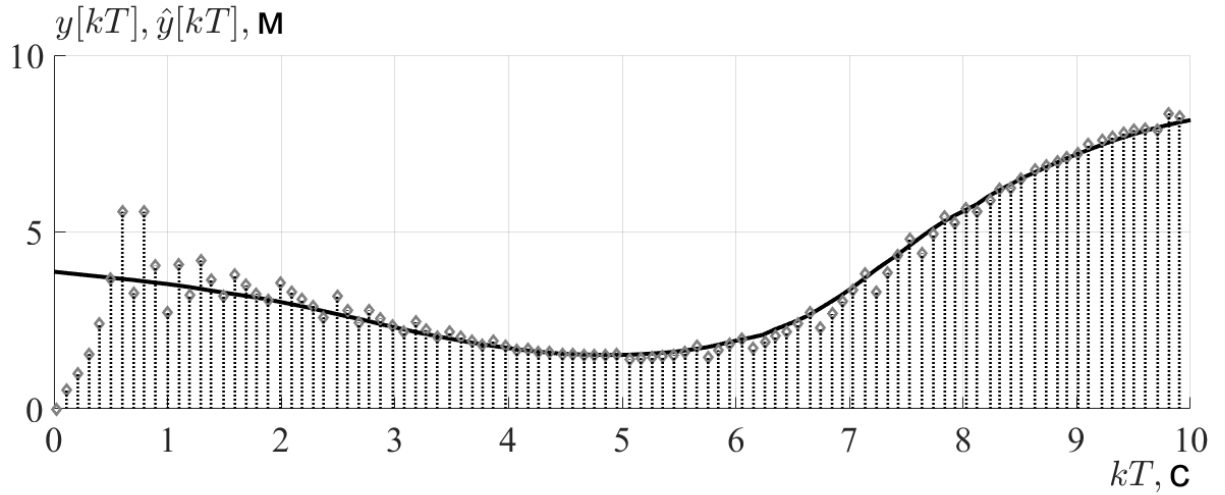


Рисунок 3.1 — Кодированный сигнал $y[kT]$ и его дискретные оценки $\hat{y}[kT]$, полученные на декодере при моделировании.

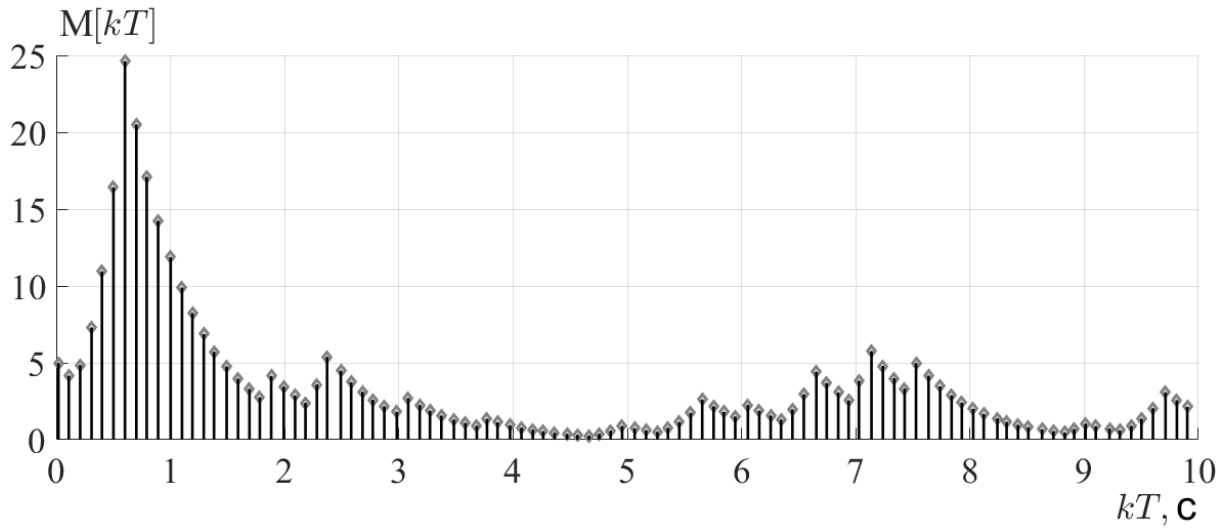


Рисунок 3.2 — Процесс изменения уровня квантования $M[kT]$.

зей, представленный на рисунке 2.2. Для проверки условия сходимости системы к консенсусу, рассмотрим на комплексной плоскости совокупность кривой Найквиста и собственных чисел лапласиана, характеризующего граф связей, изображенный на рисунке 2.2. Построим годограф передаточной функции (4.42) и отметим на нем все числа $-\lambda_i^{-1}, i \in \overline{1, N}$. Исходя из рисунка 3.3, кривая Найквиста не охватывает ни одно из отмеченных собственных чисел при увеличении частоты ω от 0 до ∞ . По теореме 1 можно сделать вывод, что формация придет к консенсусу при использовании идеального канала связей между агентами.

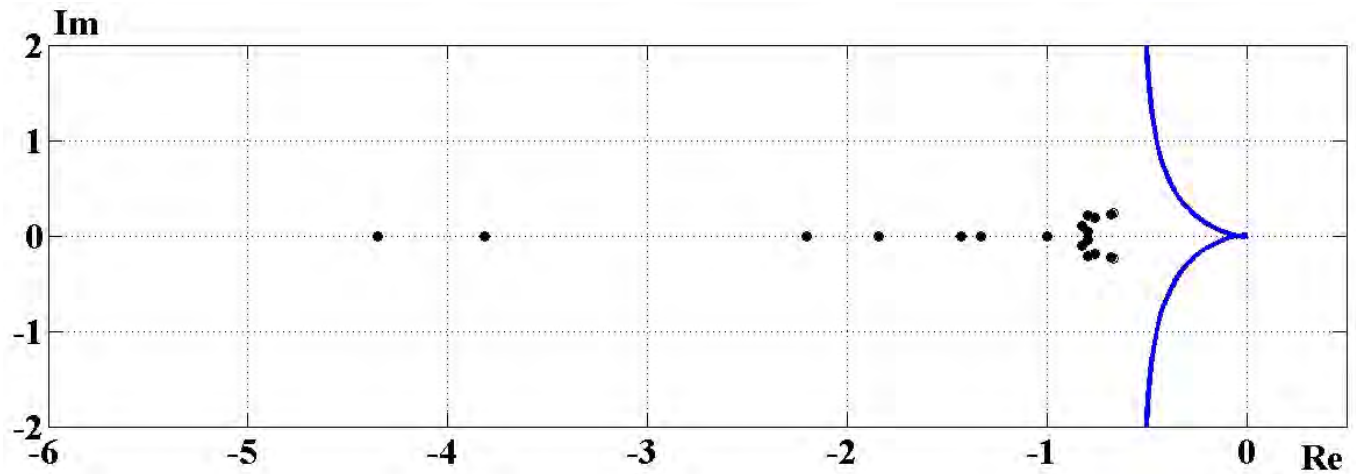
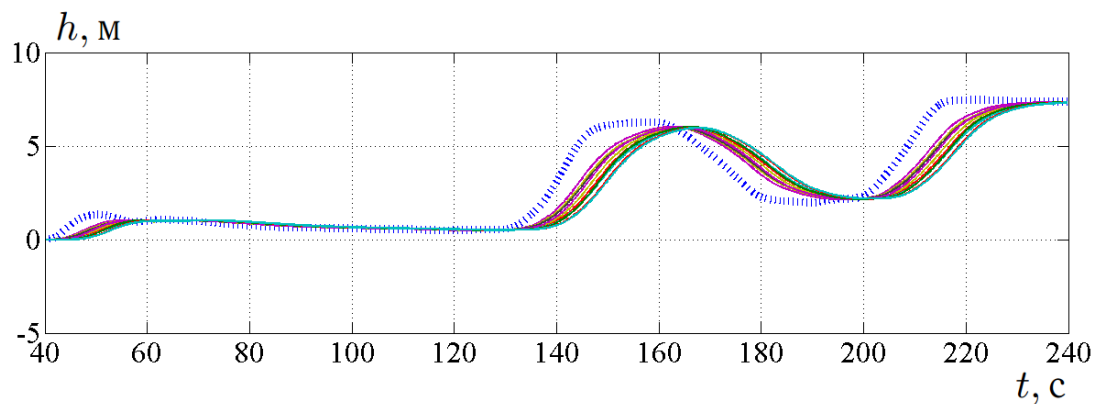


Рисунок 3.3 — Кривая Найквиста передаточной функции (4.42) и собственные числа лапласиана графа информационных связей.

Для исследования влияния процедуры кодирования-декодирования на поведение формации воспользуемся задающим сигналом $r(t)$, полученным при изменении высоты реального квадрокоптера при идентификации его параметров, описанной в подразделе 4.3.3. Для простоты считаем, что этот сигнал генерируется лидером (квадрокоптером «1»), кодируется и передается по цифровому каналу связи ведомым квадрокоптерам. На рисунках 3.4–3.2 показаны результаты численного моделирования для случая, когда скорость передачи данных по каждому каналу ограничена значением $R = 20$ бит/с.



Пунктирная линия – $h_1(t)$.

Рисунок 3.4 — Процесс слежения формацией квадрокоптеров за изменением высоты лидера.

Рисунки 3.6, 3.7 демонстрируют влияние скорости передачи данных по каналу на то, как точно приемник с использованием декодера восстанавливает закодированное значение.

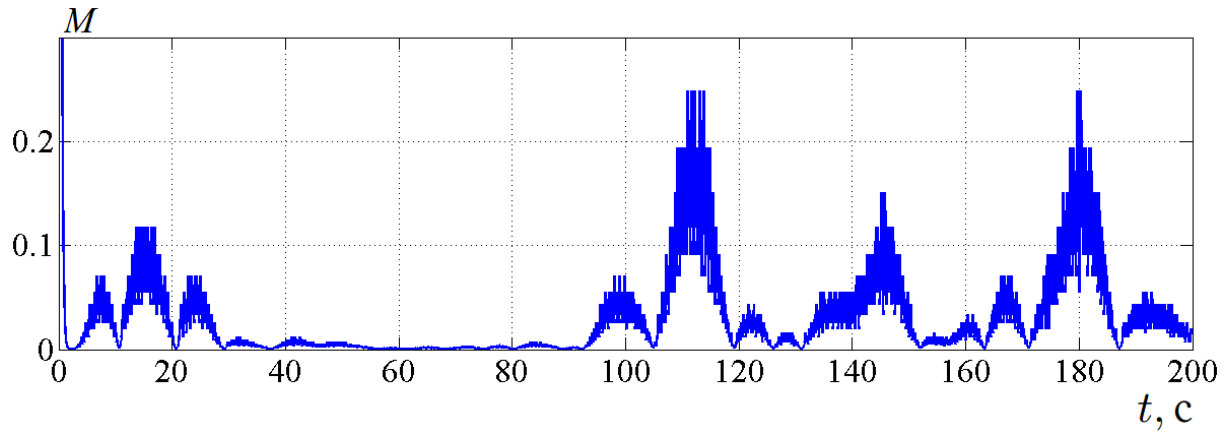


Рисунок 3.5 — Изменение уровня $M[k]$ при передаче данных между лидером и ведомым.

Для демонстрации может быть выбран один из каналов данных, например, связь от агента «12» к агенту «25». Из рисунка 3.6 можно видеть, что при скорости передачи данных $R = 20$ бит/с ошибка данных мала и составляет доли метра при $R = 10$ бит/с (рисунок 3.7). Поскольку радиомодули *XBee*, используемые для построения реальной системы, описанной в разделе 4, имеют рабочий диапазон скорости передачи данных вплоть до $R_{XB} = 250$ бит/с, то можно сказать, что в физической системе, представляющей группу квадрокоптеров, выбор радиомодемов с указанной скоростью соответствует допустимым значениям.

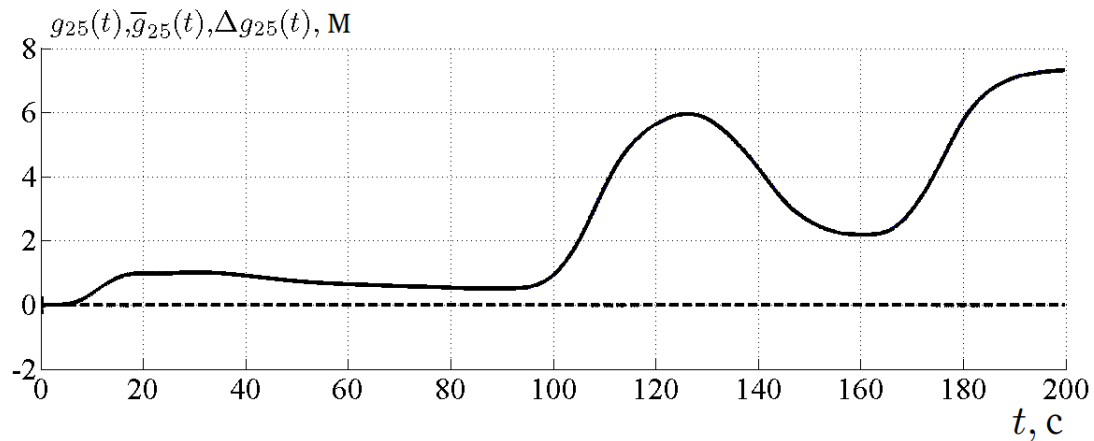


Рисунок 3.6 — Кодированный и декодированный сигнал, ошибка кодирования при $R = 20$ бит/с.

Исходя из результатов работ [101, 190, 191], скорость передачи данных R , выраженная в битах в секунду, может быть уменьшена до определенного «порогового» значения при сохранении обратно пропорциональной зависимости ошибки кодирования данных от R . После достижения порогового значения ошибка кодирования стремится к бесконечности, исходя из

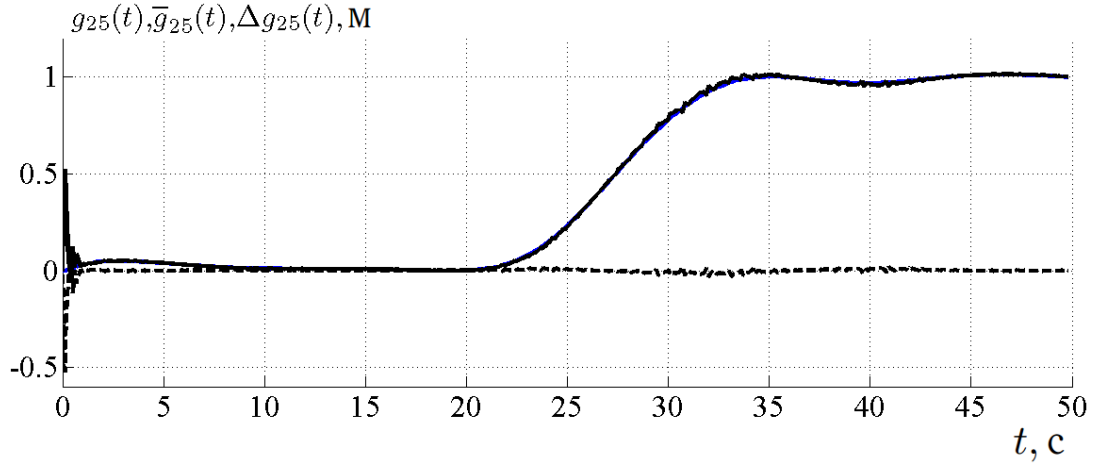


Рисунок 3.7 — Кодированный и декодированный сигнал, ошибка кодирования при $R = 10$ бит/с. чего процесс передачи данных не может считаться корректным. Это можно наблюдать на рисунке 3.2, где в результате численного моделирования получена и показана зависимость среднеквадратической ошибки кодирования данных при передаче их от агента «12» к агенту «25» от скорости передачи R :

$$A_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k_f} (g_{25}(iT) - \hat{g}_{25}(iT))^2}{k_f}}, \quad (3.9)$$

где k_f — номер последнего шага численного моделирования, а T — шаг дискретизации.

На рисунке 3.2 показана зависимость составляющей ошибки процесса слежения от скорости передачи данных R . Эта составляющая зависит от ошибки кодирования данных, а результат получен после сравнения результатов моделирования движения ведомого квадрокоптера с использованием идеального канала передачи данных и результатов моделирования для случая канала данных с ограниченной пропускной способностью. Идеальный канал данных может быть охарактеризован «бесконечной полосой пропускания».

$$E_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k_f} (y_{25}(iT) - y_{25}(R, iT))^2}{k_f}}, \quad (3.10)$$

где $y_{25}(R, iT)$ — траектория движения квадрокоптера «25» при численном моделировании со скоростью R , а $y_{25}(iT)$ — аналогичная траектория для идеального канала связи.

Полученной ошибкой можно пренебречь на рассматриваемом диапазоне скоростей передачи данных R . Об этом легко сделать вывод исходя из результатов, показанных на рисун-

ке 3.2, поэтому для моделируемых систем выбор скорости передачи данных из этого диапазона не является определяющим.

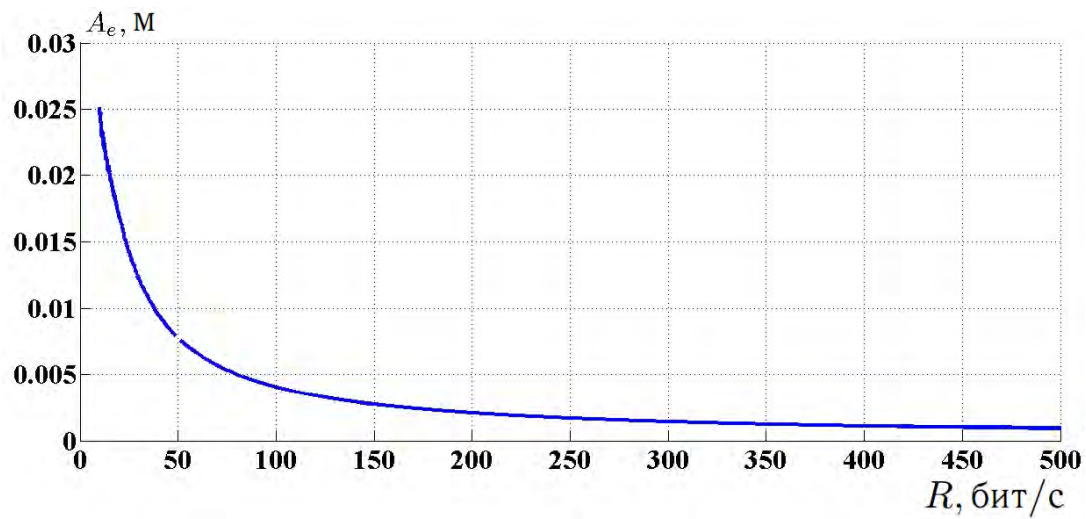


Рисунок 3.8 — Зависимость среднеквадратической ошибки $\sigma_{\Delta h, tr}$ от R при кодировании данных для их передачи от агента «12» к агенту «25».

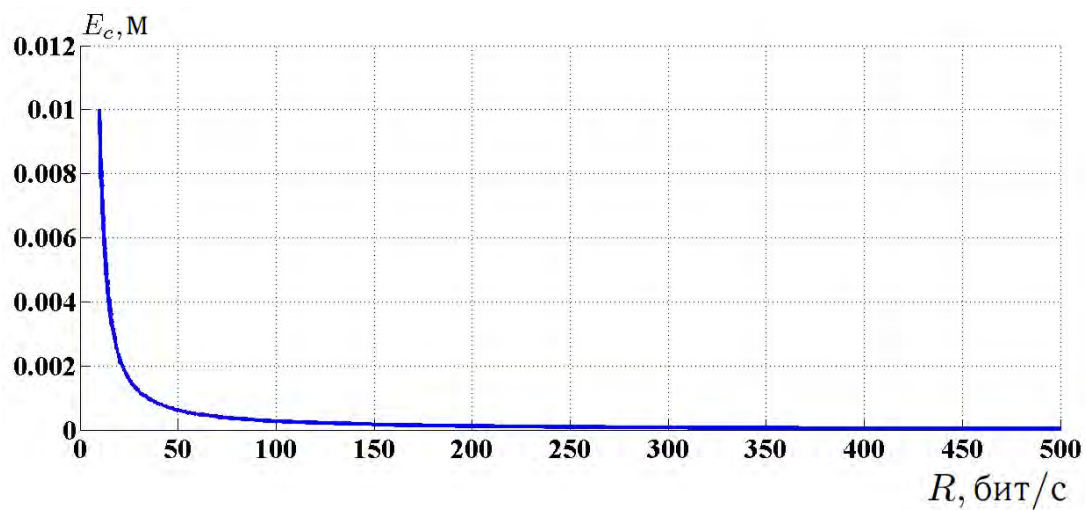


Рисунок 3.9 — Зависимость среднеквадратической ошибки $\sigma_{\Delta h}$ от R при кодировании данных во время отслеживания задающей высоты полета h для агента под номером «25».

Таким образом, предложенный алгоритм кодирования информации не существенно влияет на работу всей многоагентной системы в целом даже на небольших скоростях передачи данных. Теперь необходимо рассмотреть противоположный случай, когда динамика агентов достаточно сложная и нелинейная, а структура сети простая. Такой подход позволит изучить,

влиять ли особенности предложенного метода кодирования на системы, состоящие из систем, которые не могут легко считаться движущимися с постоянной скоростью. В этой части рассматривается многоагентная система, аналогичная рассматриваемой подробно в дальнейшем в подразделе 4.1.1. Основным отличием является то, что для минимизации узлов, из-за которых может возрасти ошибка оценивания и кодирования, не используется предложенный алгоритм адаптации на основе метода пассивации, а параметры модели специально выбраны так, чтобы выполнялось слежение в условиях выбранного графа связей. Таким образом, при выборе алгоритма задающих углов (4.11), динамика движения в горизонтальной плоскости описывается системой уравнений (4.12). Очевидно, что в статическом режиме при $p \rightarrow 0$ будет выполняться

$$\begin{cases} k_{\gamma^*} z^* = k_{\vartheta^*} z, \\ k_{\vartheta^*} x^* = k_{\vartheta^*} x, \end{cases} \quad (3.11)$$

то есть система квадрокоптера будет стабилизироваться в точке $(x^*; z^*)$.

Таким образом, рассматриваемую структуру можно описать следующим образом. Рассматривается группа из шести квадрокоптеров, которые должны следовать друг за другом, сохраняя между собой заранее заданное расстояние d_x между соседними летательными аппаратами вдоль оси OX и поддерживать такую же координату при движении вдоль оси OZ . Такое построение формации также может быть использован для выполнения задачи мониторинга поверхности земли. Пусть агент под номером 1 будет считаться лидером. Его высота описывается через функцию $z_1(t)$, координаты широты и долготы описаны функциями $x_1(t)$ и $y_1(t)$ соответственно. Координаты $x_1(t)$, $y_1(t)$ должны быть переданы ведомому агенту, то есть летательному аппарату под номером 2. Координаты второго летательного аппарата $x_2(t)$, $y_2(t)$ должны быть переданы квадрокоптеру под номером 3 и т.д. Координаты $x_i(t)$ должны быть переданы с заданным постоянным сдвигом во избежание столкновений между квадрокоптерами. Вообще говоря, граф связей, описывающий структуру сети может быть любым, например, в котором учитывается динамика всех агентов. В настоящем подразделе граф в виде цепочки взят в качестве примера для упрощения демонстрации. Для лидера задается специальный маршрут следования, которого он должен придерживаться для того, чтобы остальные летательные аппараты смогли повторить его траекторию с учетом вышеуказанного сдвига по одной из координат. Синхронизация по высоте не рассматривается в связи с тем, что совместное движение в

координатах широты и долготы сложнее и представляет больший интерес для анализа. Также допустим, что квадрокоптеры в начальный момент времени уже расположены в пространстве в том порядке, в котором информация будет передоваться от лидера к концу цепочки летательных аппаратов. Так как рассматривается только движение в горизонтальной плоскости, то для каждого квадрокоптера необходима реализация двух кодеров и декодеров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_x[k] = (\bar{\sigma}_x[k] + \bar{\sigma}_x[k-1] + \bar{\sigma}_x[k-3])/3, \\ M_x[k+1] = m_x^0 + (|\lambda_x[k]| + 0.5)M_x[k], \\ \lambda_x[0] = 0, \quad M_x[0] = M_0, \\ \hat{x}[k+1] = \hat{x}[k] + T\hat{V}_x[k] + l_1\sigma_x[k], \\ \hat{V}_x[k+1] = \hat{V}_x[k] + l_2\sigma_x[k], \\ \lambda_z[k] = (\bar{\sigma}_z[k] + \bar{\sigma}_z[k-1] + \bar{\sigma}_z[k-3])/3, \\ M_z[k+1] = m_z^0 + (|\lambda_z[k]| + 0.5)M_z[k], \\ \lambda_z[0] = 0, \quad M_z[0] = M_0, \\ \hat{z}[k+1] = \hat{z}[k] + T\hat{V}_z[k] + l_1\sigma_z[k], \\ \hat{V}_z[k+1] = \hat{V}_z[k] + l_2\sigma_z[k], \end{array} \right. \quad (3.12)$$

где $\hat{x}[k], \hat{z}[k]$ – оценки сигналов $x[k]$ и $z[k]$ соответственно, $\hat{V}_x[k], \hat{V}_z[k]$ – оценки скоростей сигналов $x[k]$ и $z[k]$ соответственно, $\bar{\sigma}_x[k] = \text{sign}(x[k] - \hat{x}[k])$, $\bar{\sigma}_z[k] = \text{sign}(z[k] - \hat{z}[k])$, параметры наблюдателя l_1, l_2 выбраны одинаковыми для кодирования сигнала по каждой из координат, однако в общем случае они могут различаться.

Предположим, что на лидера подается сигнал, задающий продольное движение $x_1^*(t)$, генерируемый импульсной функцией с амплитудой $A_z = 100$ метров, периодом $T_z = 60$ секунд и шириной импульса $W_z = 30$ секунду. Задающий сигнал показан на рис. 3.10.

Численно исследуем точность слежения ведомых агентов за лидером с учетом квантования данных. Точность оценки показана на рисунках 3.11, 3.12.

На рисунках 3.11, 3.12 показана зависимость максимальной ошибки слежения в зависимости от скорости передачи R в канале связи для координаты широты x и долготы z для второго и шестого агентов в цепочке. $e_{x,i} = \max |x[k] - \hat{x}[k]|$ и $e_{z,i} = \max |z[k] - \hat{z}[k]|$, где $k \in \overline{1, k_f}$ и k_f – номер последнего шага моделирования. Важно отметить, что максимальная ошибка для координаты широты x у второго квадрокоптера на высоких скоростях составля-

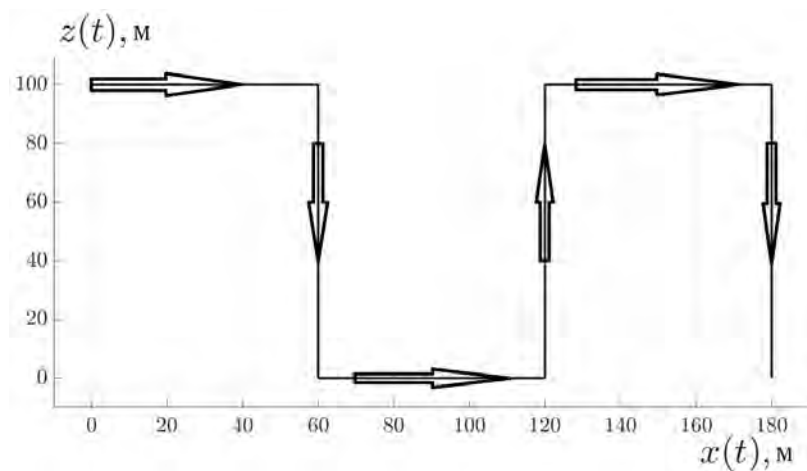


Рисунок 3.10 — Задающий сигнал для траектории движения лидера.

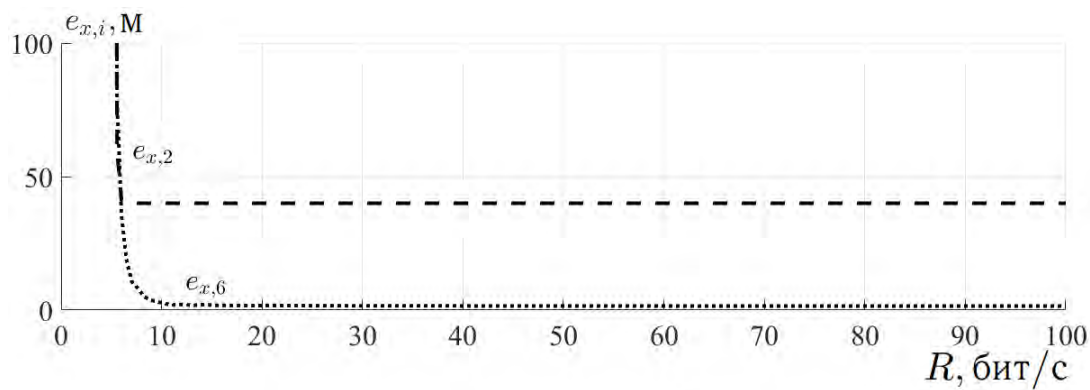


Рисунок 3.11 — Зависимость максимальной ошибки слежения за передаваемой координатой широты x от скорости передачи данных R .

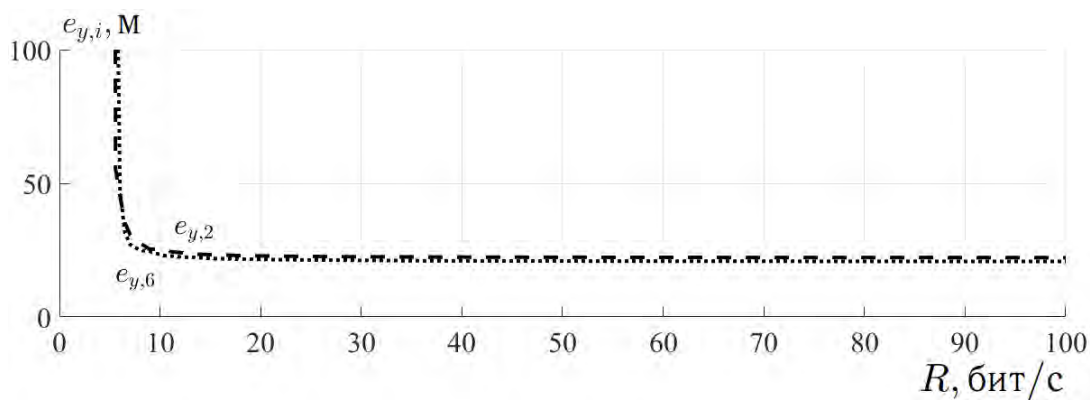


Рисунок 3.12 — Зависимость максимальной ошибки слежения за передаваемой координатой долготы z от скорости передачи данных R .

ет 40 метров. Это связано с тем, что в начальный момент времени оценка $\hat{x}[0] = 0$, в то время, когда его координата $x[0] = 40$. Исходя из того, что максимальная ошибка за все вре-

моделирования не превышает значения начальной координаты, можно сделать вывод, что при достаточно больших скоростях, наибольшая ошибка будет наблюдаться только в момент первоначальной «подстройки» алгоритма кодирования до текущего значения, в то время как последующее функционирование осуществляет лишь обновление с небольшой подстройкой оценки значения кодируемого сигнала.

Как видно из рисунков 3.11-3.12, при выборе достаточно высокой скорости передачи (свыше 20 бит/с), регуляторы летательных аппаратов вносят составляющую часть ошибки слежения, в отличие от квантования по уровню. Основываясь на вышеизложенных результатах, скорость передачи данных $R^* = 15$ бит/с для каждого из каналов данных может считаться подходящей для рассматриваемого примера. Стоит отметить, что в случае, когда R меньше некоторого порогового значения (5 бит/с в рассматриваемом примере), тогда ошибка оценивания и, как следствие, ошибка слежения существенно возрастает, что соответствует полученным ранее теоретическим утверждениям [194–200].

Пусть будет выбрана скорость передачи данных $R = 20$ бит/с ($T = 0.05$ с). Рассмотрим ситуацию, когда данные при передаче могут быть утеряны, обратимся к каналу связи со стираниями (3.8).

На рисунке 3.13 показано пропадание сигнала при передаче через канал связи со стиранием. Ниже приводятся графики переданного сигнала $s_t[k \cdot T]$, полученного сигнала $s_r[k \cdot T]$ и ошибка оценки $e_{z,1}(t)$ для квадрокоптера под номером 2 для моделирования ситуации с вероятностью потерь $p = 0.25$.

Оценки скорости третьего квадрокоптера и его реальная скорости для $p \in \{0, 0.4, 0.5\}$ приведены на рис. 3.14–3.16. Выбор других коэффициентов в регуляторах и увеличение скорости квадрокоптеров может улучшить качество слежения.

Последний случай ($p = 0.5$) может считаться уже критическим для рассматриваемой скорости $R = 20$ бит/с: процесс оценивания перестает сходиться при $p = 0.6$.

Процесс настройки уровня квантования $M[k]$ для случая идеального канала и канала со стираниями показан на рисунке. 3.17. Из графиков видно, что уровень квантования увеличивается при большой вероятности потери данных (в этом моделировании рассматривается движение вдоль оси координат широты для третьего квадрокоптера). Если кодируемый процесс меняется медленно, значение $M[k]$ уменьшается почти до минимального уровня, заданного параметром m_c , и увеличивается при больших скоростях кодируемого сигнала.

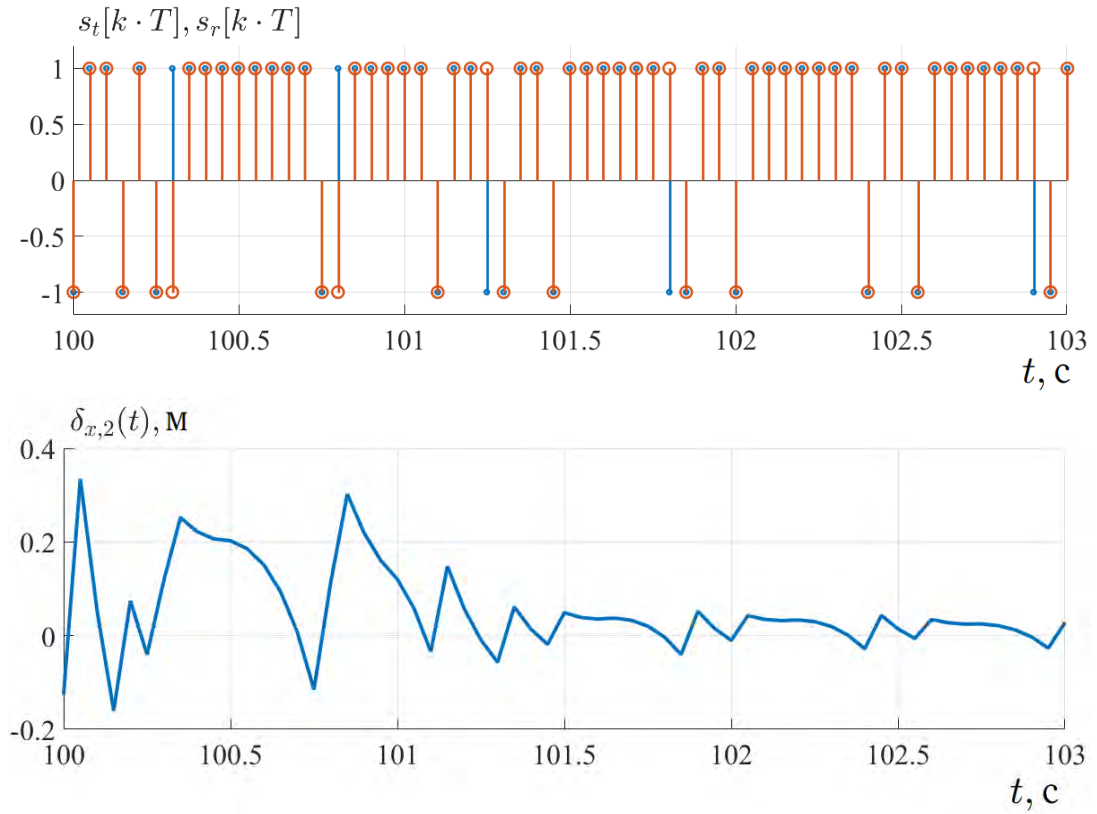


Рисунок 3.13 — Переданный сигнал $s_t(k \cdot T)$, полученный сигнал $s_r(k \cdot T)$ и ошибка оценивания $e_{x,2}(t)$ для случая $R = 20$ bit/s, $p = 0.25$.

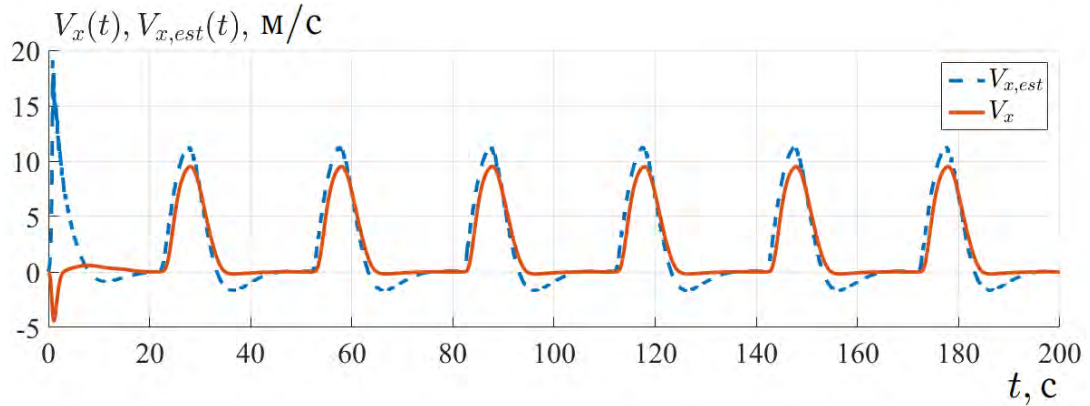


Рисунок 3.14 — Скорость третьего квадрокоптера и ее оценка для случая идеального канала, $p = 0$.

Результат влияния обоих факторов (скорости передачи данных и вероятности их пропажи) на максимальную ошибку позиционирования последнего агента в цепочке показан на рисунке 3.18. Исследуется зависимость уровня ошибки слежения для второго агента при изменении скорости R и следующих вероятностей потери: $p \in \{0, 0.25, 0.5\}$. На рисунке 3.19

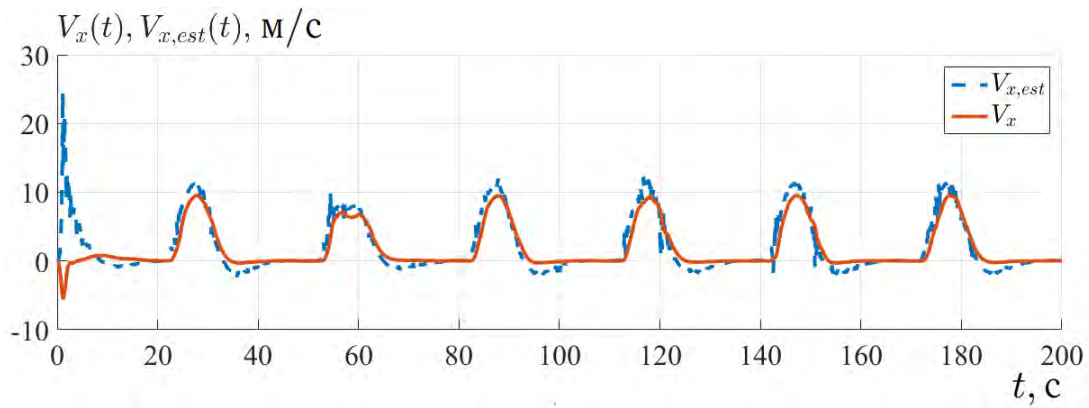


Рисунок 3.15 — Скорость третьего квадрокоптера и ее оценка для случая канала данных со стиранием, $p = 0.4$.

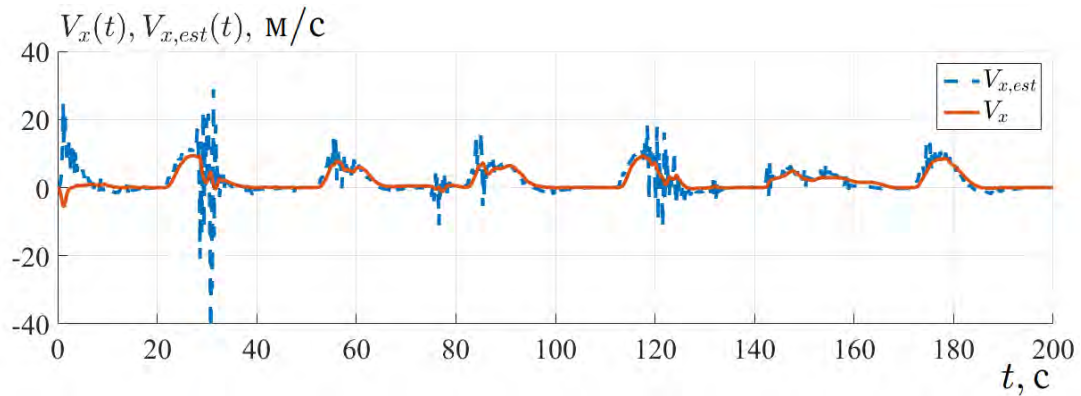


Рисунок 3.16 — Скорость третьего квадрокоптера и ее оценка для случая канала данных со стиранием, $p = 0.5$.

показана зависимость ошибки слежения в установившемся режиме для третьего агента при разных значениях скорости R и ряда вероятностей потерь.

В связи с тем, что рассмотренный случай хоть и является действительно актуальной реальной задачей для многоагентных систем, но наглядно не демонстрирует их особенность: отсутствует сложная структура, и проблема неправильного оценивания сигнала при его кодировании распространяется в одну сторону по цепочке, внося все больше и больше ошибку в последующее кодирование. Для более наглядного анализа необходимо рассматривать систему, в которой присутствуют циклы. В этом случае ошибка оценивания может начать циркулировать по кругу и накапливаться.

Рассмотрим многоагентную систему, состоящую из шести квадрокоптеров связанных в цепочку вида «ведущий–ведомый», динамика которых описывается системой (4.1). В рассматриваемой системе для наглядности отсутствует смещение, обеспечивающее разнесение квад-

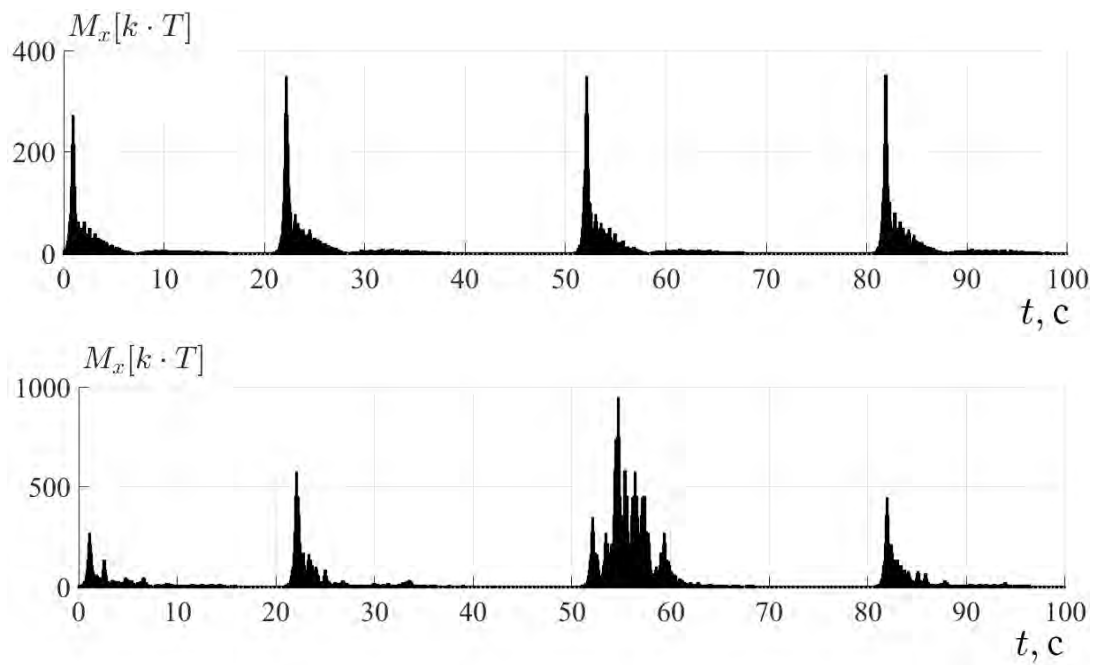


Рисунок 3.17 — Процесс настройки уровня квантования $M[k]$ для идеального канала ($p = 0$) и канала данных со стиранием ($p = 0.4$).

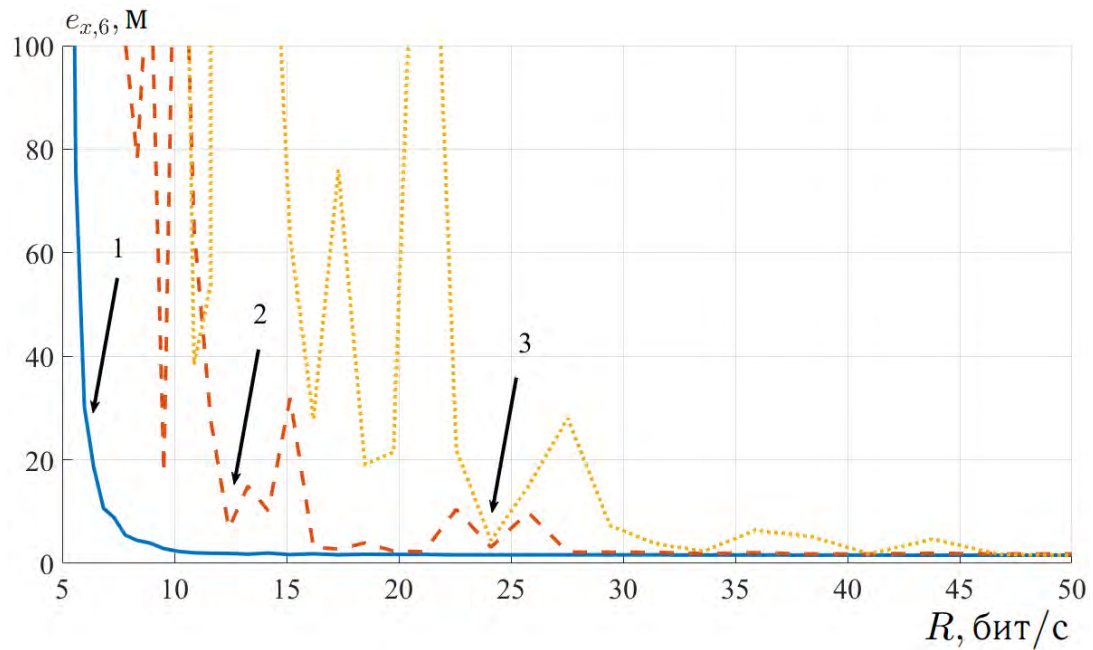


Рисунок 3.18 — Зависимость уровня ошибки слежения при движении шестого агента вдоль оси OX от скорости R . 1) $p = 0$; 2) $p = 0.25$; 3) $p = 0.5$.

рокоптеров в пространстве друг относительно друга, а задающее воздействие имеет вид:

$$\begin{cases} r_x(t) = 8 \sin 0.1t, \\ r_y(t) = 0.5t, \\ r_z(t) = 8 \sin 0.1t + \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3.13)$$

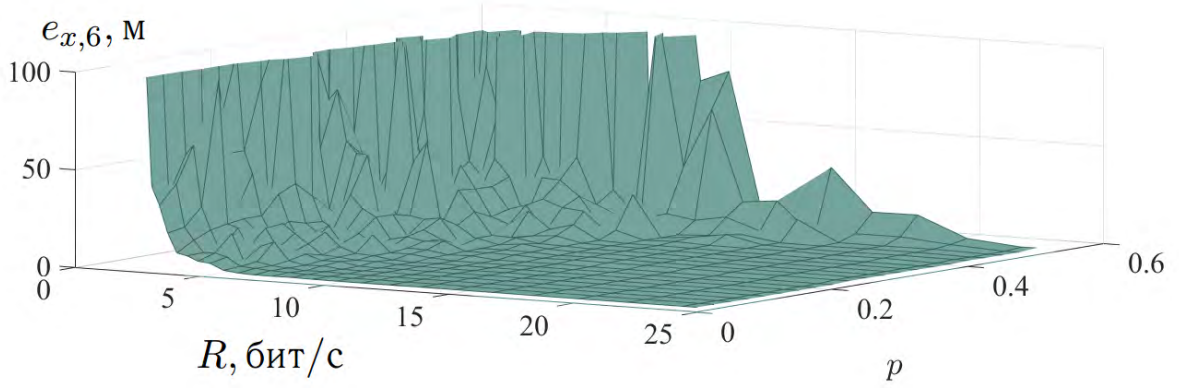


Рисунок 3.19 — Зависимость установившейся ошибки слежения при движении третьего агента вдоль оси OX от скорости R .

Для удобства обозначения задающее воздействие будет указываться в виде вектора $r(t) = [r_x(t) \ r_y(t) \ r_z(t)]^T$, а сигнал следования для каждого из квадрокоптеров в виде $\hat{g}_i(kT) = [\hat{x}_i(kT) \ \hat{y}_i(kT) \ \hat{z}_i(kT)]^T$.

В связи с тем, что теперь рассматривается движение по всем трем пространственным координатам, необходимо использовать в каждом квадрокоптере по три связки кодер-декодер. Таким образом, к уже введенным двум парам кодер-декодер для широты и долготы (3.12) добавится третья пара для кодирования сигнала высоты

$$\begin{cases} \lambda_y[k] = (\bar{\sigma}_y[k] + \bar{\sigma}_y[k-1] + \bar{\sigma}_y[k-3])/3, \\ M_y[k+1] = m_y^0 + (|\lambda_y[k]| + 0.5)M_y[k], \\ \lambda_y[0] = 0, \quad M_y[0] = M_0, \\ \hat{y}[k+1] = \hat{y}[k] + T\hat{V}_y[k] + l_1\sigma_y[k], \\ \hat{V}_y[k+1] = \hat{V}_y[k] + l_2\sigma_y[k], \end{cases} \quad (3.14)$$

где $\hat{y}[k]$ – оценка сигнала $y[k]$, $\hat{V}_y[k]$ – оценка скорости сигнала $y[k]$, $\bar{\sigma}_y[k] = \text{sign}(y[k] - \hat{y}[k])$, параметры наблюдателя l_1, l_2 выбраны такими же, как и для кодирования координат горизонтальной плоскости (3.12), однако в общем случае они также могут различаться.

Пусть скорости передачи данных по каждому из каналов соответствуют $R = 100$ бит/с, различные начальные условия для координат $x_i[k], z_i[k]$. Результаты приведены на рисунках 3.20-3.22.

Из рисунков 3.20–3.22 видно, что использование предложенного алгоритма управления в многоагентной системе для кодирования передаваемой информации на достаточно большой

скорости передачи данных между агентами не вносит существенного ухудшения в поведении всей системы. Особенности процесса кодирования переносятся на процесс движения системы в целом: уменьшение как ошибки кодирования, так и слежения происходит после первоначальной настройки всех кодеров для каждого из каналов. Стоит отметить, что процесс скольжения кодера вдоль кодируемой траектории в реальных системах сглаживается собственной динамикой агента. Степень сглаживания зависит от инерционности агента и может быть наглядно рассмотрена на примере результатов моделирования на рисунке 3.22. Для того, чтобы показать влияние уменьшения скорости передачи данных на результат функционирования системы, необходимо рассмотреть аналоги рисунков 3.20-3.22 для существенно меньшей скорости, в частности, для рассматриваемой системы скорость $R = 5$ бит/с близка к критической. Проведем численное моделирование системы с указанной скоростью передачи данных в канале связей и представим результаты на рисунках 3.23-3.25

3.3 Выводы по разделу 3

В данном разделе предложен алгоритм адаптивного кодирования информации, передаваемой между агентами. Данный алгоритм может быть использован для случая, когда пропускная способность рассматриваемого канала связи ограничена сверху. Проведено компьютерное моделирование, показывающее эффективность предложенного метода и наличие минимально возможной скорости передачи данных, при которой может быть обеспечено желаемое поведение многоагентной системы. Приведены результаты моделирования, описывающего функционирование с предложенным алгоритмом многоагентной системы. Основные результаты раздела опубликованы в [3, 9, 11, 17, 18].

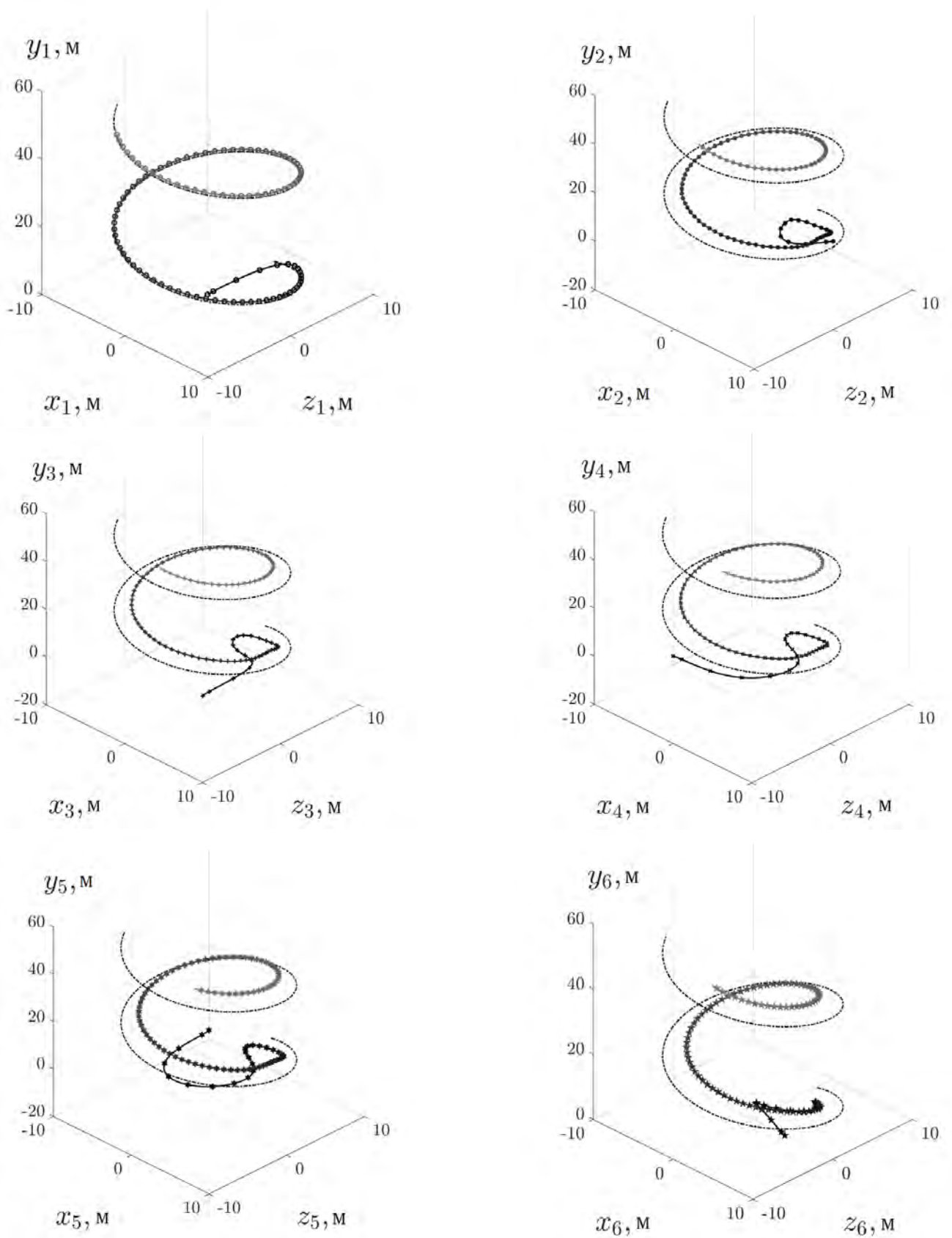


Рисунок 3.20 — Движение каждого квадрокоптера при $R = 100$ бит/с в пространстве и сигнал $r(t)$, обозначенный штрих-пунктирной линией.

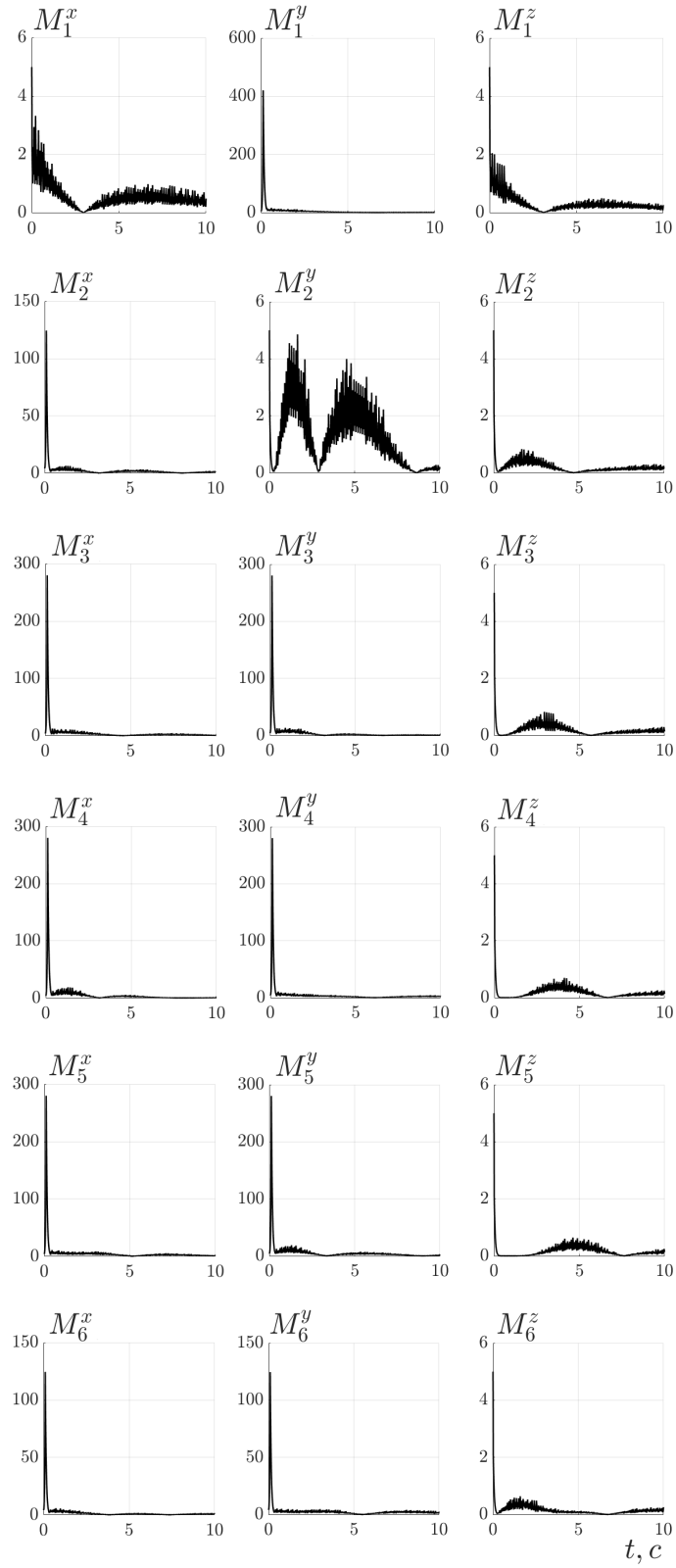


Рисунок 3.21 — Процесс настройки коэффициентов кодеров каждого квадрокоптера для каждого из каналов при $R = 100$ бит/с.

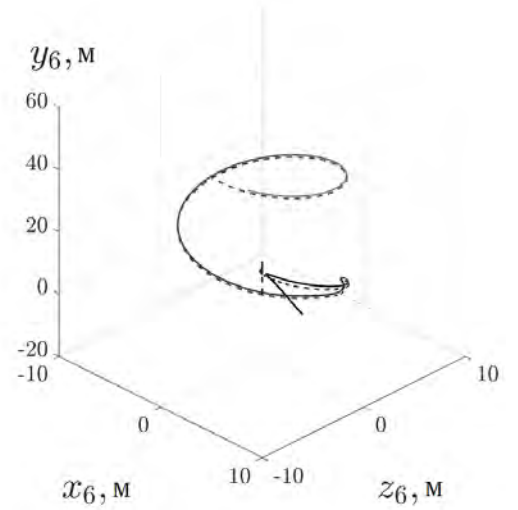
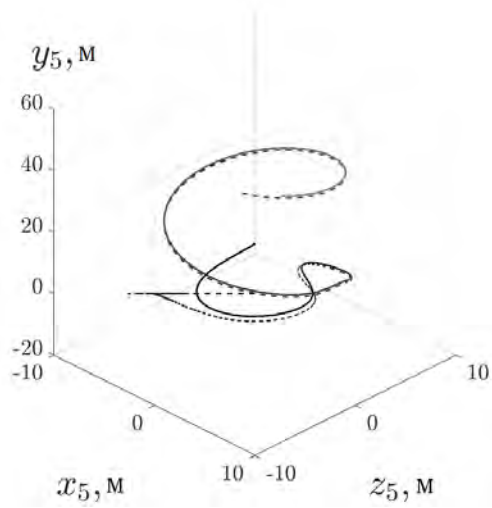
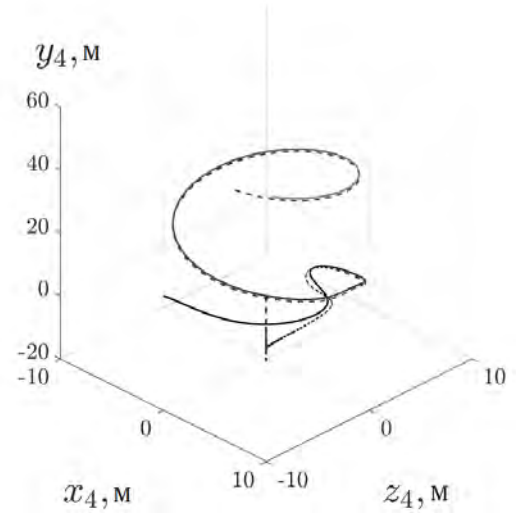
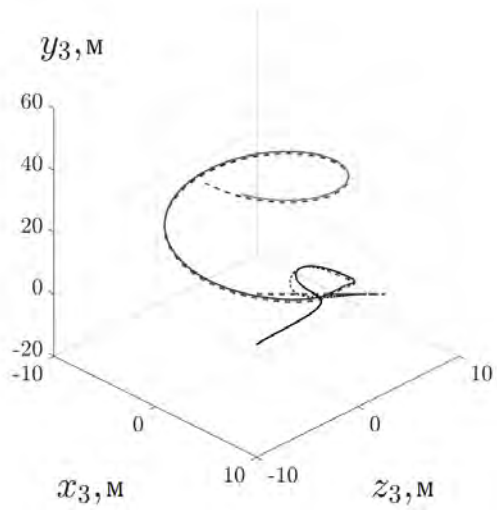
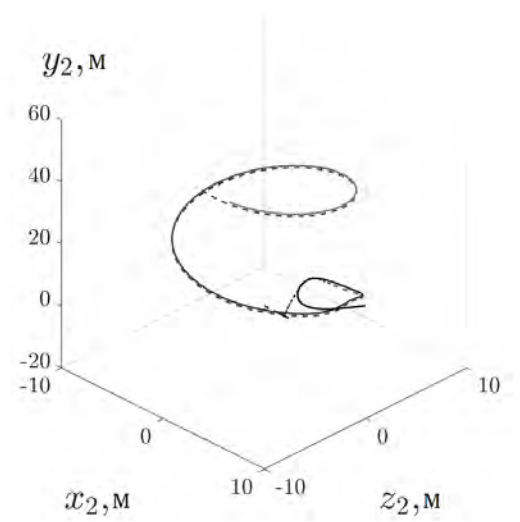
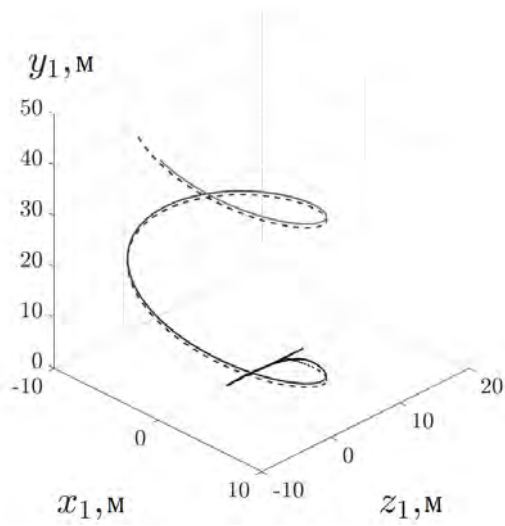


Рисунок 3.22 — Оценка сигнала $\hat{g}(kT)$, обозначенной пунктирной линией и траектория движения квадрокоптеров, обозначенная сплошной, при $R = 100$ бит/с.

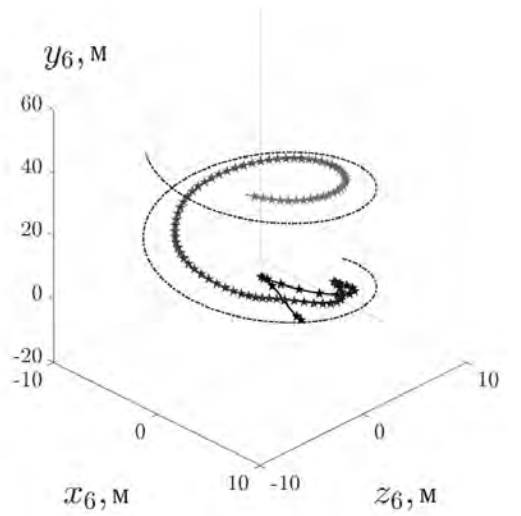
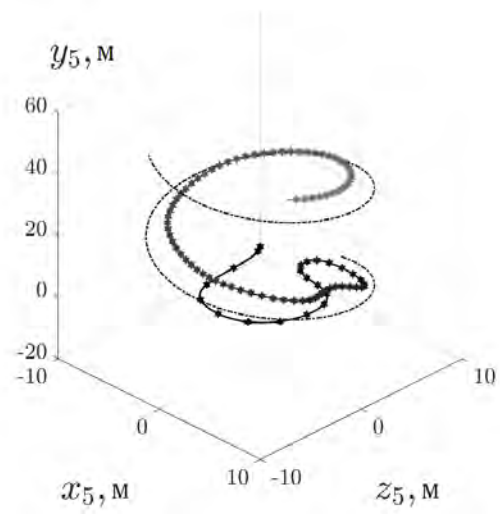
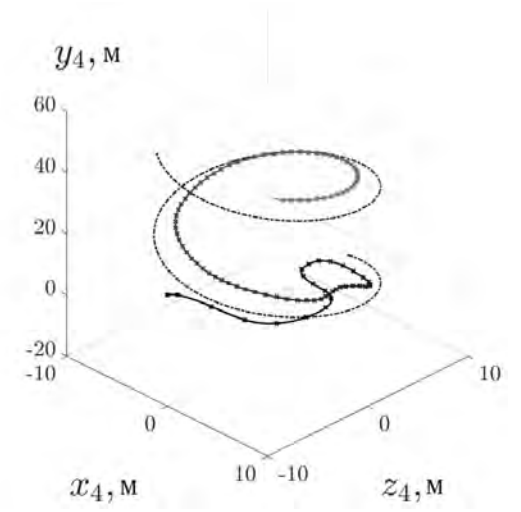
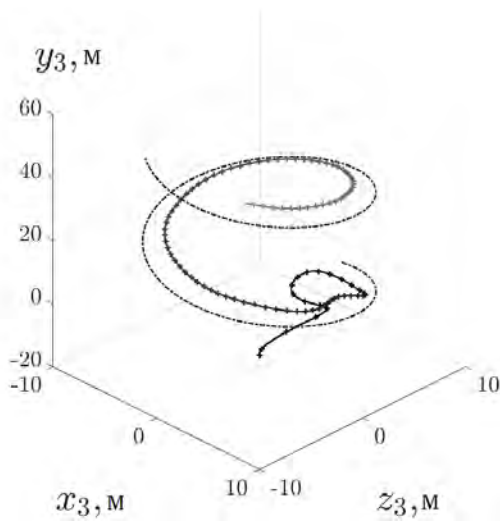
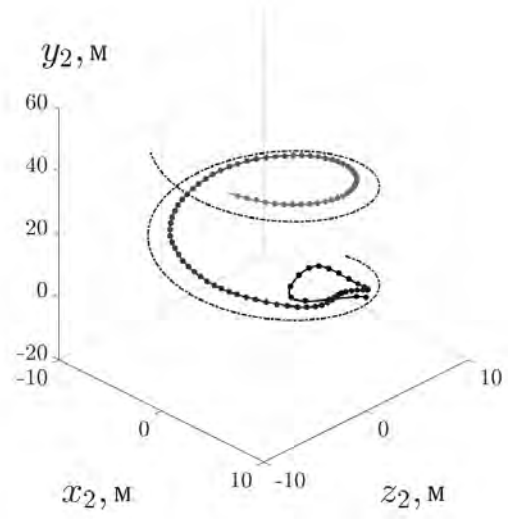
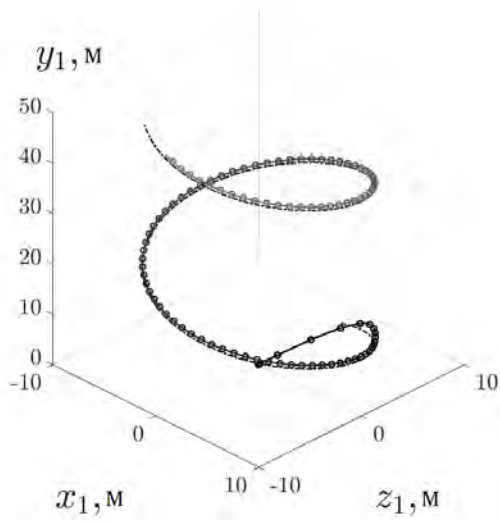


Рисунок 3.23 — Движение каждого квадрокоптера при $R = 5$ бит/с в пространстве и сигнал $r(t)$, обозначенный штрих-пунктирной линией.

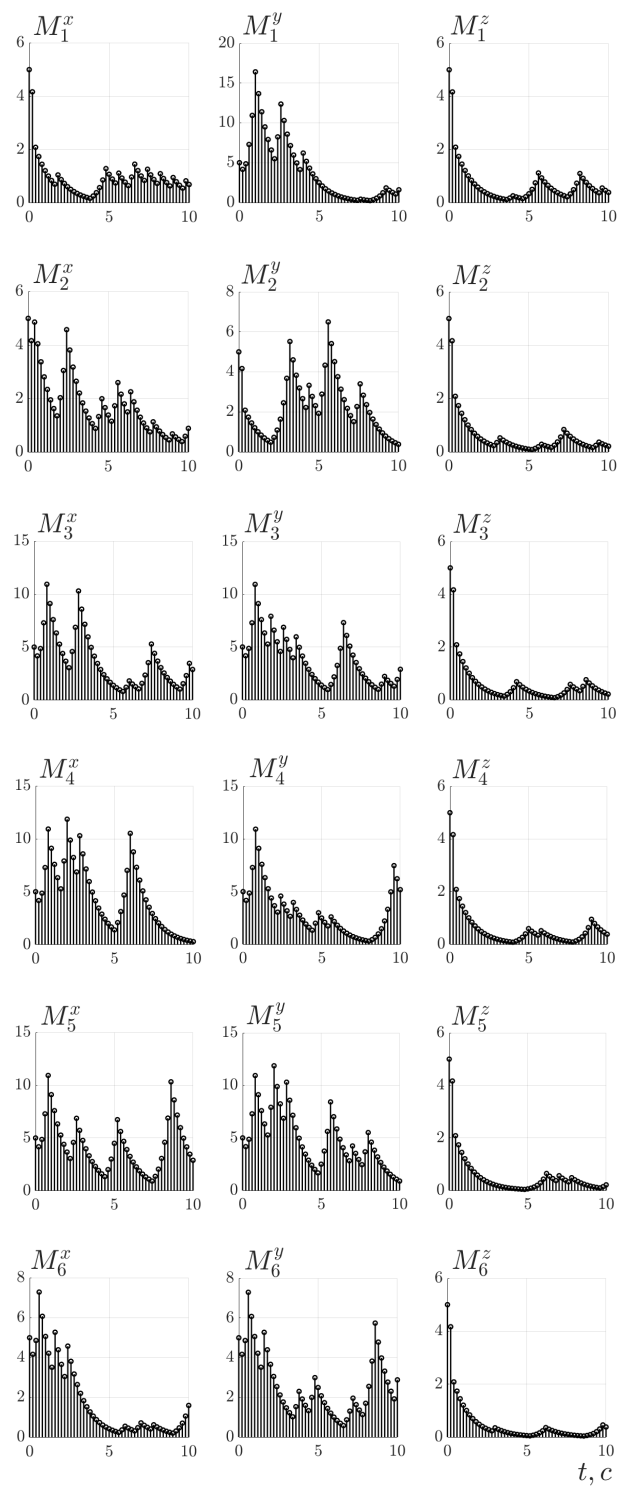


Рисунок 3.24 — Процесс настройки коэффициентов кодеров каждого квадрокоптера для каждого из каналов при $R = 5$ бит/с.

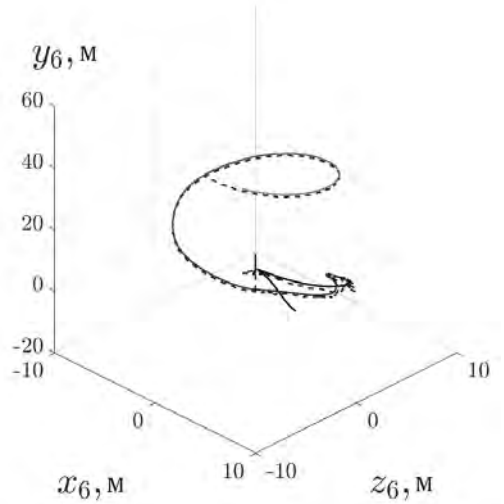
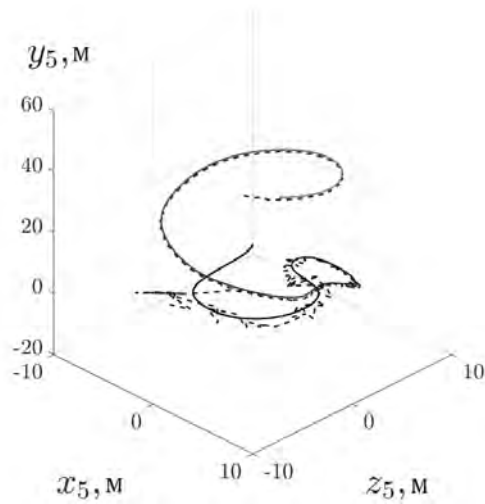
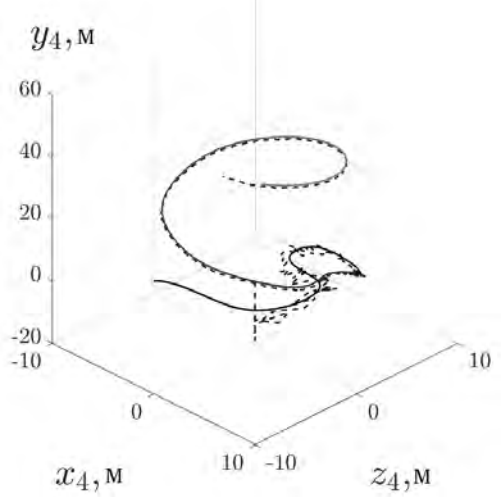
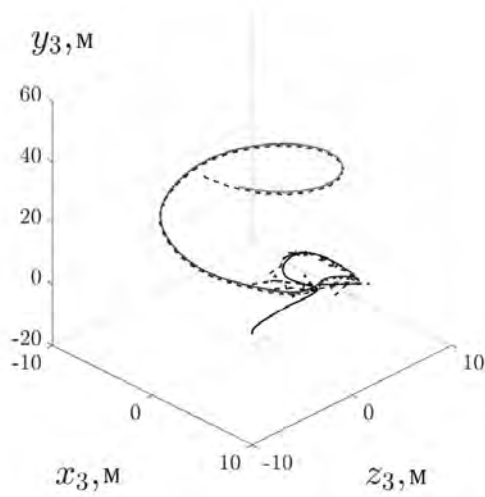
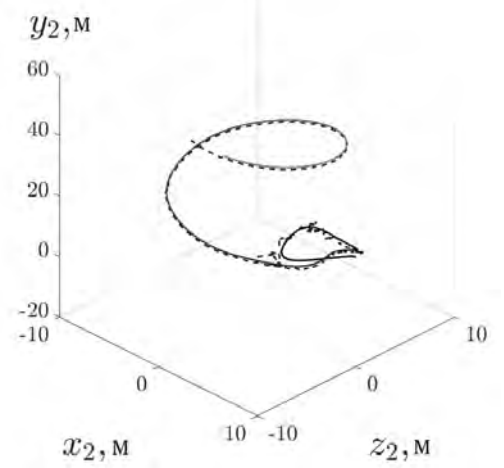
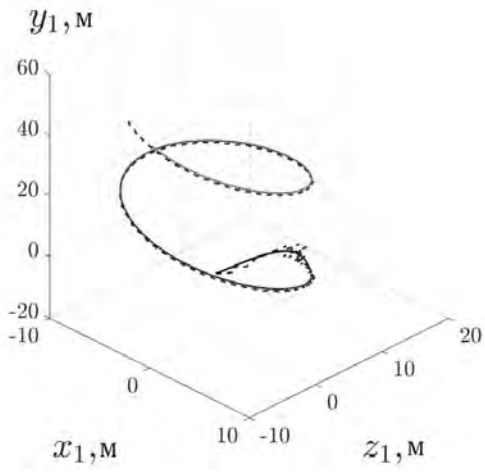


Рисунок 3.25 — Оценка сигнала $\hat{g}(kT)$, обозначенного пунктирной линией и траектория движения квадрокоптеров, обозначенная сплошной, при $R = 5$ бит/с.

4 Децентрализованное управление группой квадрокоптеров через сеть связи

В настоящем разделе представлено решение задачи 4. Результаты, полученные в предыдущих разделах диссертации применены для синтеза системы децентрализованного адаптивного управления группой квадрокоптеров. Разработан и реализован лабораторный стенд для тестирования алгоритмов управления квадрокоптерами и реализации процедур обмена данными между агентами. Стенд использован в диссертации для экспериментальной проверки предложенных алгоритмов адаптивного управления и кодирования.

Аппаратно и физически реализованы алгоритм адаптивного управления на основе метода пассивации и алгоритм адаптивного кодирования информации.

4.1 Применение алгоритмов в группе квадрокоптеров

4.1.1 Адаптивное управление положением группы квадрокоптеров в пространстве

Рассмотрим формацию, в качестве агентов которой выступают квадрокоптеры. Для описания динамики квадрокоптера используем модель [2, 201–206]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\dot{V}_x = \tau_y(C_\psi S_\vartheta C_\gamma + S_\psi S_\gamma) - V_x A_x, \\ m\dot{V}_y = -mg + \tau_y(C_\vartheta C_\gamma) - V_y A_y, \\ m\dot{V}_z = \tau_y(S_\psi S_\vartheta C_\gamma - C_\psi S_\gamma) - V_z A_z, \\ \dot{\gamma} = \omega_x + S_\gamma T_\vartheta \omega_z + C_\gamma T_\vartheta \omega_y, \\ \dot{\vartheta} = C_\gamma \omega_z - S_\gamma \omega_y, \\ \dot{\psi} = \frac{S_\gamma}{C_\vartheta} \omega_z + \frac{C_\gamma}{C_\vartheta} \omega_y, \\ I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma, \\ I_y \dot{\omega}_y = (I_z - I_x) \omega_x \omega_z + \tau_\psi, \\ I_z \dot{\omega}_z = (I_x - I_y) \omega_x \omega_y + I_r \omega_x \omega_r + \tau_\vartheta, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

где V_x, V_y, V_z – линейные скорости вдоль осей OX, OY и OZ , $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости вращения квадрокоптера на оси связанной системы координат, A_x, A_y, A_z – аэродинамические коэффициенты вдоль соответствующих осей, $S_\alpha = \sin(\alpha), C_\alpha = \cos(\alpha), T_\alpha = \tan(\alpha)$, g – ускорение свободного падения, m – масса квадрокоптера.

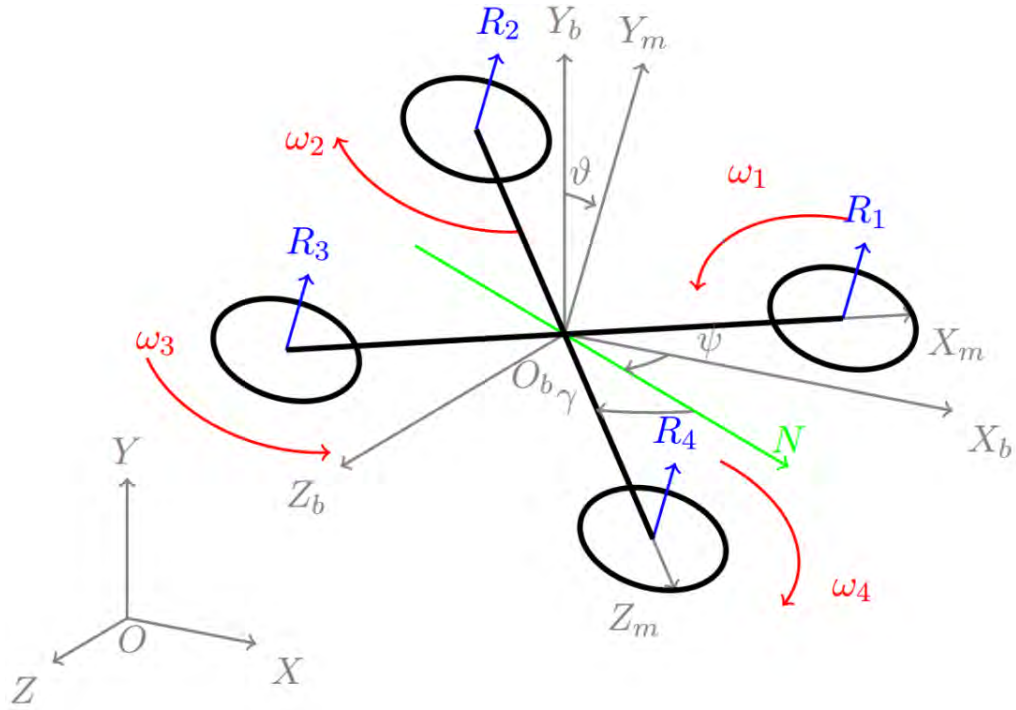


Рисунок 4.1 — Схематическое изображение квадрокоптера.

Для численного моделирования в дальнейшем используются параметры из работ [2, 9], приведенные в таблице 4.1.

Квадрокоптер имеет симметричную структуру рамы и четыре двигателя. Каждый двигатель располагается на лучах, которые направлены вдоль осей O_bX_b и O_bZ_b . Двигатели находятся на расстоянии l от центра масс, а регуляторы оборотов располагаются вдоль лучей квадрокоптера. Исходя из построенной модели, матрица инерции выглядит следующим образом:

$$I_A = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_z & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

где I_x , I_y , I_z — моменты инерции квадрокоптера при его вращении вдоль соответствующих осей в связанной с ним системе координат, $I_x = I_z$.

В качестве упрощенной модели квадрокоптера может быть выбрана сфера, окружающая его центр. К сфере прикреплены лучи, на концах которых имеются четыре шара, которые характеризуют двигатели. Также в модели учитывается инерционность пропеллеров, которые могут быть представлены в виде стержней, закрепленных на оси пропеллеров перпендикулярно им. На рисунке 4.2 представлено соответствующее схематическое изображение квадрокоптера.

Таблица 4.1 — Параметры математической модели.

Параметры	Величина	Размерность
m_c	1	кг
m_e	0.1	кг
m_p	0.01	кг
m	1.44	кг
I_x	0.0151	кг·м ²
I_y	0.0253	кг·м ²
I_z	0.0151	кг·м ²
I_r	$5.38 \cdot 10^{-5}$	кг·м ²
g	9.81	м/с ²
k_l	$3 \cdot 10^{-6}$	кг · м
a_r	0.033	кг · м
A_x	0.25	кг/с
A_y	0.25	кг/с
A_z	0.25	кг/с
l	0.225	м
l_c	0.1	м
R	0.127	м

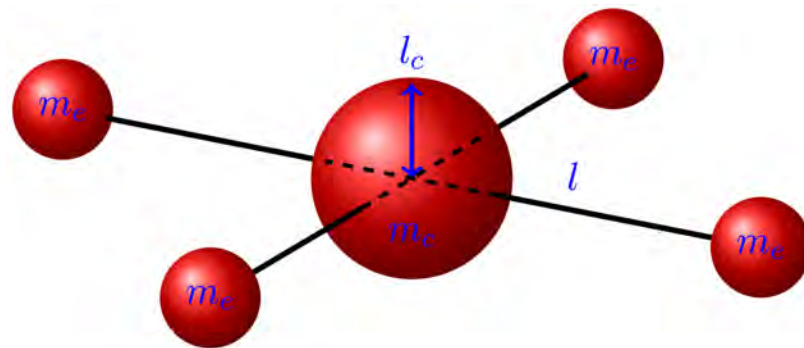


Рисунок 4.2 — Схематичное изображение квадрокоптера.

Момент инерции каждого из элементов рассчитываются следующим образом:

$$I_x = I_z = \frac{1}{2}m_c l_c^2 + 2m_e l^2, \quad I_y = \frac{1}{2}m_c l_c^2 + 4m_e l^2, \quad (4.3)$$

где m_c – масса центра квадрокоптера, l_c – радиус центральной сферы, который характеризует основную часть массы квадрокоптера, m_e – масса двигателя. В рассматриваемой модели учитывается момент инерции ротора двигателя I_r :

$$I_r = \frac{1}{3}m_p R^2, \quad (4.4)$$

где R – радиус несущего винта, а m_p – его масса. Для всего квадрокоптера масса может быть рассчитана как сумма всех элементов:

$$m = m_c + 4m_e + 4m_p. \quad (4.5)$$

Скорость вращения ротора каждого двигателя приближенно описывается дифференциальным уравнением $\dot{\omega}_i = I_r(\tilde{\omega}_i - \omega_i)$, где $\tilde{\omega}_i$ – желаемая скорость, которая задается ШИМ-регуляторами, связанными с бортовым компьютером квадрокоптера [207]. Винты в квадрокоптере попарно вращаются в разные стороны, что обеспечивается выбором соответствующих регуляторов оборотов или подключением пары из них инверсно. Благодаря этому два винта, расположенных по диагонали, вращаются по часовой стрелке, два – против. Рассматриваемая модель подразумевает, что скорости вращения физически ограничиваются сверху и снизу: $0 < \omega_{min} \leq \omega_i \leq \omega_{max}$. Винты могут вращаться только в стороны, заранее определенные их формой и способом подключения регулятора оборотов. Так как момент инерции ротора двигателя I_r пренебрежимо мал, его можно не учитывать, как и постоянную времени цепи якоря. В связи с этим инерционность двигателя в рассматриваемой модели никак не учитывается.

Совокупная тяга τ_y , направленная вдоль оси $O_b Y_b$, создается посредством совместной работы четырех роторов. Вектор вращающего момента τ включает в себя вращающие моменты τ_γ , τ_ϑ и τ_ψ , направленные перпендикулярно осям, вдоль которых осуществляется вращение квадрокоптера.

В модели квадрокоптера учитывается суммарная скорость $\omega_R = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$. Силы, создаваемые работой четырех двигателей, имеют вид:

$$\tau_y = k_l(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4), \quad (4.6)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_\gamma \\ \tau_\vartheta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(\omega_2 - \omega_4) \\ l(\omega_1 - \omega_3) \\ a_r(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

где a_r – постоянная вращательного движения.

Пересчет задающих воздействий в скорости вращения роторов происходит по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & 0 & -\frac{1}{2l} & -\frac{1}{4a_r} \\ \frac{1}{4} & -\frac{1}{2l} & 0 & \frac{1}{4a_r} \\ \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{4a_r} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2l} & 0 & \frac{1}{4a_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_y \\ \tau_\gamma \\ \tau_\vartheta \\ \tau_\psi \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Рассмотрим многоагентную систему, состоящую из шести квадрокоптеров, осуществляющих совместный полет в плоскости, параллельной Земле. На рис. 4.1 схематично изображен квадрокоптер и его положения в нормальной Земной системе координат. Пусть управление угловым положением осуществляется с помощью следующих ПД-регуляторов [2]:

$$\begin{cases} \tau_\gamma = k_\gamma(\gamma^* - \gamma) + k_{\dot{\gamma}}(\dot{\gamma}^* - \dot{\gamma}), \\ \tau_\vartheta = k_\vartheta(\vartheta^* - \vartheta) + k_{\dot{\vartheta}}(\dot{\vartheta}^* - \dot{\vartheta}), \\ \tau_\psi = k_\psi(\psi^* - \psi) + k_{\dot{\psi}}(\dot{\psi}^* - \dot{\psi}), \end{cases} \quad (4.9)$$

где $\gamma^*, \vartheta^*, \psi^*$ – задающие значения углов поворота, $\dot{\gamma}^*, \dot{\vartheta}^*, \dot{\psi}^*$ – задающие значения скорости углов.

Также для поддержания заданной высоты используется регулятор

$$\tau_y = \frac{m}{\cos \gamma \cos \vartheta} (k_y(y^* - y) + k_{\dot{y}}(\dot{y}^* - \dot{y}) + g), \quad (4.10)$$

где y^* – задающее значение высоты, \dot{y}^* – скорость его изменения.

Для управления пространственным положением используются следующие алгоритмы:

$$\begin{cases} \gamma^* = -\arcsin \frac{k_{\gamma^*}}{\tau_y} (\cos \psi^* (x - x^*) + \sin \psi^* (z - z^*)), \\ \vartheta^* = \arcsin \frac{k_{\vartheta^*}}{\tau_y \cos \gamma} (\cos \psi^* (z - z^*) - \sin \psi^* (x - x^*)), \end{cases} \quad (4.11)$$

где x^*, z^* – задающие значения положения квадрокоптера в пространстве, а $k_{\gamma^*}, k_{\vartheta^*}$ – положительные коэффициенты.

При использовании алгоритмов управления (4.11) с учетом линеаризации модели (4.1) в нулевой точке и поворота квадрокоптера на заданный угол рыскания ψ^* , дифференциальные уравнения, описывающую динамику движения в горизонтальной плоскости, примут вид

$$\begin{cases} k_{\gamma^*} z^*(t) = (mp^2 + A_z p + k_{\gamma^*}) z(t), \\ k_{\vartheta^*} x^*(t) = (mp^2 + A_x p + k_{\vartheta^*}) z(t). \end{cases} \quad (4.12)$$

Нетрудно убедиться, что передаточные функции, полученные из уравнений (4.12), являются строго G -пассифицируемыми при $G = \begin{bmatrix} 1 & \tau_G \end{bmatrix}$, $\tau_G > 0$.

Пусть рассматриваемая многоагентная система M имеет последовательную структуру.

Между агентами введем протокол обмена информацией, заданный с помощью уравнения (2.11), ошибка адаптации $\sigma(t)$ задается уравнением (2.7) с $p_i = 1$. В каждом квадрокоптере для движения вдоль осей OX и OZ , динамика которого описывается уравнениями 4.12, используем сигнально-параметрический регулятор (2.16). Это обеспечит выполнение цели $\sigma \rightarrow 0$ и, как следствие, слежение за сигналом $r(t)$ и консенсус по выходу.

Таким образом, задающие воздействия для движения вдоль каждой из пространственных координат имеет вид

$$\begin{bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ r_3(t) \\ r_4(t) \\ r_5(t) \\ r_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \\ c_3(t) \\ c_4(t) \\ c_5(t) \\ c_6(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r(t), \quad (4.13)$$

где $r_i(t)$ – задающая координата для i -го квадрокоптера ($x^*(t)$ или $z^*(t)$), а $c_i(t)$ – значение i -го квадрокоптера (соответственно $x(t)$ или $z(t)$); $r(t)$ – сигнал, задающий желаемую траекторию движения группы. Стоит отметить, что матрица связей в (4.13) выглядит таким образом из-за протокола (2.11) и накладываемых на него условий для обеспечения слежения (2.5). Здесь учитывается, что динамика квадрокоптера при движении вдоль каждой из координат сводится к динамике (2.10), в которой высокочастотный коэффициент равен единице. В качестве решаемой задачи перед группой квадрокоптеров со структурой, описываемой системой (4.13), может быть поставлена задача мониторинга земной поверхности. Для этого на лидера подается задающее воздействие в виде прямоугольной волны («меандра») на плоскости XOZ , а

остальные квадрокоптеры смещаются на некоторое расстояние друг от друга. Очевидно, что в связи с цепочечной структурой сети, нет необходимости исследовать систему на наличие консенсуса, так как в этом случае весь критерий редуцируется до условия устойчивости каждого из агентов. В общем случае проводить такое исследование необходимо.

Воспользуемся сигнально-параметрическим регулятором (2.16) для осуществления слежения за сигналом вдоль осей OX, OZ , динамика этого движения описывается системой (4.12). Для этого сделаем замену следующего вида:

$$z^*(t) = u_z^{aux}(t), \quad x^*(t) = u_x^{aux}(t), \quad (4.14)$$

где u_z^{aux}, u_x^{aux} – вспомогательные управления, которые формируются с помощью двух регуляторов вида (4.12). В связи с выбором матрицы $G = \begin{bmatrix} 1 & \tau_G \end{bmatrix}, \tau_G > 0$, необходимо, чтобы была возможность измерения сигналов $\dot{z}(t), \dot{x}(t)$, то есть линейных скоростей квадрокоптера. В реальных квадрокоптерах получение линейных скоростей возможно либо с помощью интегрирования показаний акселерометра, встроенного в инерциальную систему, либо с использованием GPS модулей, предоставляющих измерение линейной скорости непосредственно. Ошибка адаптации (2.7) примет вид

$$\begin{cases} \sigma_{z_i}(t) = z_i + \tau \dot{z}_i(t) - z_i^*(t), \\ \sigma_{x_i}(t) = x_i + \tau \dot{x}_i(t) - x_i^*(t), \quad i \in \overline{1, N}. \end{cases} \quad (4.15)$$

На рисунках 4.3-4.5 представлены результаты моделирования движения многоагентной системы.

На рисунке 4.3 разными типами линий показаны траектории движения шести квадрокоптеров группы, интенсивность цвета линии означает момент удаления от начала движения по времени: чем линия менее интенсивная, тем больше времени прошло. Штрих-пунктирной линией обозначается траектория задающего меандра, подаваемая на квадрокоптер в виде двух сигналов вдоль каждой из осей $r_z(t), r_x(t)$.

На рисунке 4.4 показан процесс настройки коэффициентов сигнально-параметрических регуляторов лидера $k_1^z(t), k_1^x(t)$. Видно, что алгоритм интенсивно изменяет коэффициенты после каждого изменения направления движения. На рисунке 4.5 показана аналогичная настройка коэффициентов, но для последнего квадрокоптера в цепочке. Из рисунка видно, что процесс настройки происходит практически на всем протяжении полета, в отличие от быстрых переходных процессов в настройке коэффициентов лидера. Здесь можно наблюдать явление цепочечной

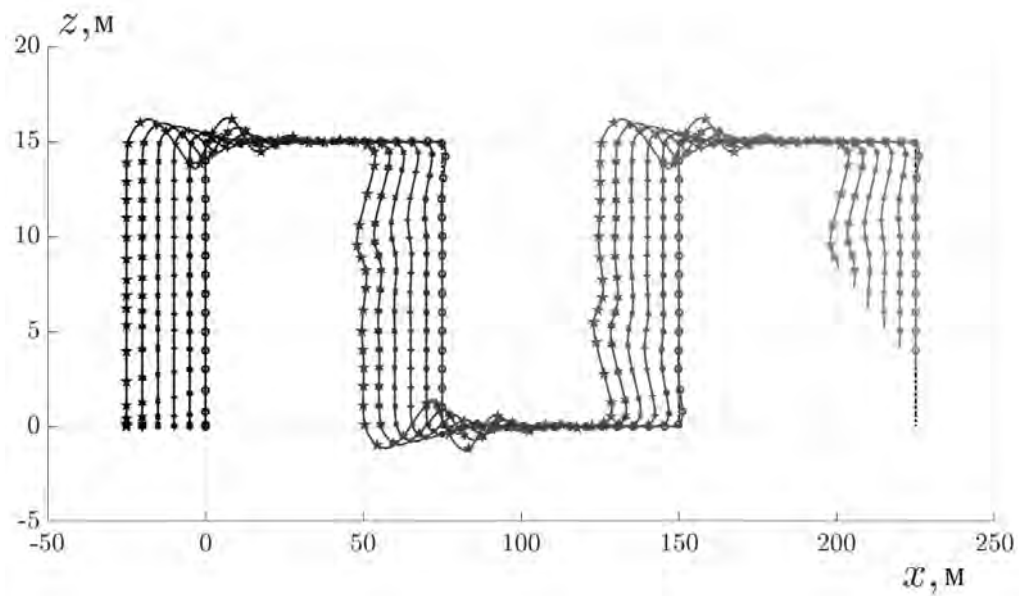


Рисунок 4.3 — Траектории движения квадрокоптеров.

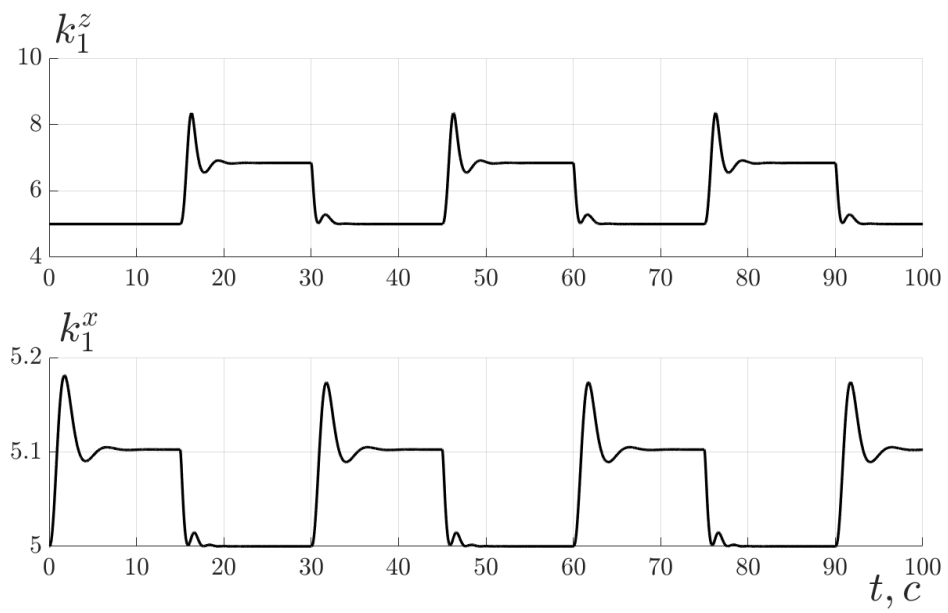


Рисунок 4.4 — Процесс изменения коэффициентов сигнально-параметрических регуляторов лидера.

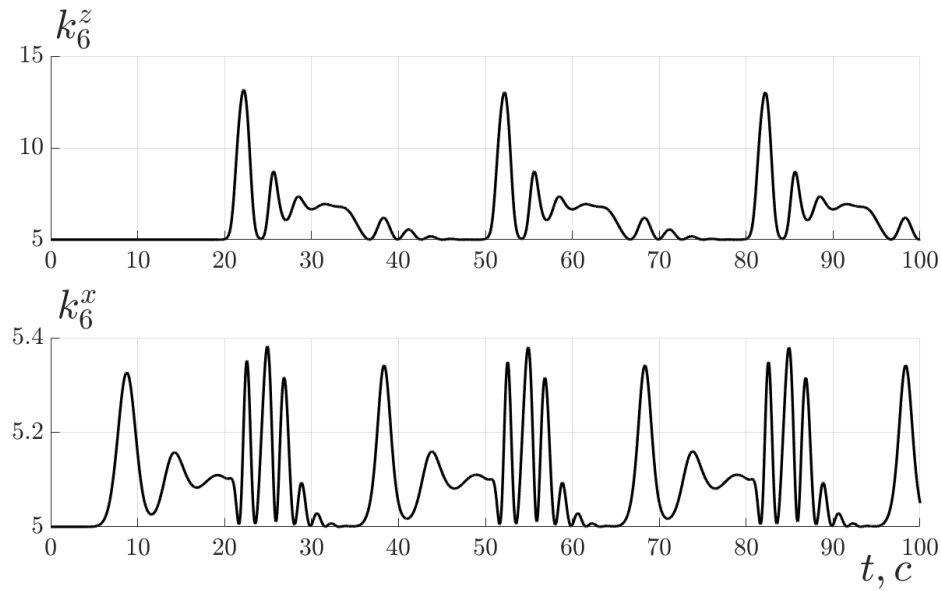


Рисунок 4.5 — Процесс изменения коэффициентов сигнально-параметрических регуляторов последнего квадрокоптера в цепочке.

неустойчивости: так как лидер отрабатывает слежение за задающим сигналом с какой-то ошибкой, следующий за ним — с ошибкой по отношению к лидеру и т.д. Таким образом, движение последнего в цепочке является наиболее колебательным, так как ошибка накапливается по цепочке. Предложенный алгоритм может быть использован в формации квадрокоптеров, так как использованная модель наиболее полно описывает динамику реального квадрокоптера.

4.2 Компьютерное моделирование движения формации квадрокоптеров с реальным каналом связи

Для дальнейшего необходимо рассмотреть полноценную систему, которая включает в себя полную модель квадрокоптера и реальный канал связи. Параметры каждого агента отклонены от номинальной модели аналогичным способом, как это было сделано в подразделе 2.2. В качестве графа связей рассматривается более сложный граф, изображенный на рисунке 4.6, параметры которого удовлетворяют условиям, показанным в подразделе 2.2.

Канал между агентами считается неидеальным и имеет ограничение пропускной способности в виде 30 бит/с. Таким образом, при передачи всех трех пространственных координат, для передачи каждой из них требуется использовать не более 10 бит/с. Для этого воспользуемся алгоритмом, представленным в разделе 3. Для управления угловым положением используются ПД-регуляторы (4.9), а для управления пространственным положением используются

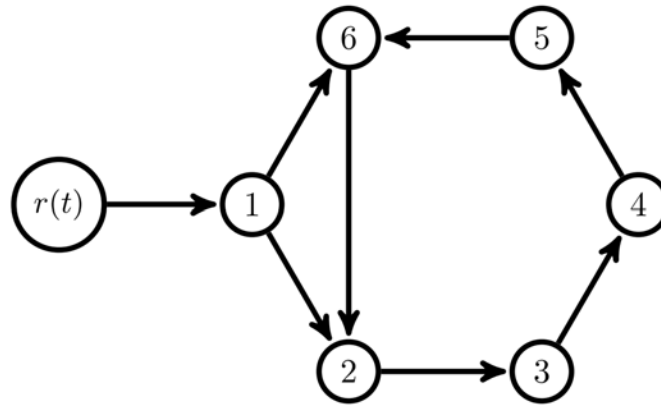


Рисунок 4.6 — Граф связей рассматриваемой формации.

регуляторы (4.11), (4.46). Результаты моделирования представлены на рисунках 4.7, 4.8 и 3.25.

По результатам численного моделирования можно видеть, что даже при малых скоростях передачи данных, предложенный метод использования адаптивного управления на основе пассивации позволяет добиться требуемого поведения агентов в сети.

4.3 Квадрокоптерный стенд КОМЕКС-1

4.3.1 Описание стенда

В связи с тем, что задачи, рассматриваемые в области многоагентных систем, являются расширением задачи управления одним объектом на задачу управления множеством связанных объектов, все разработанные алгоритмы управления должны быть выполнены и протестированы на одном объекте. Для этого был спроектирован лабораторный тестовый стенд.

Механическая часть стенда представляет собой двухступенной подвес с возможностью закрепления на нем квадрокоптера. Квадратная рамка установлена на двух вертикальных опорах и свободно вращается вокруг горизонтальной оси. Опоры жестко зафиксированы на квадратной основе, устанавливающейся на полу. Квадрокоптер закрепляется на планке внутри подвижной рамы и может свободно вращаться на углы тангажа и крена. В качестве основы квадрокоптера выбрана база *DJI 450* и автопилот *ArduPilot Mega 2.6* со встроенной инерциальной системой (включающей гироскоп, акселерометр и барометр) и модулем GPS. Приводы состоят из бесколлекторных двигателей с внешним ротором *DJI 2213* и контроллеров скорости *DJI 30A Opto*. Все данные с систем квадрокоптера могут в режиме реального времени быть переданы на компьютер управляющего оператора с помощью радиомодемов *XBee*.

До недавнего времени разработанный испытательный стенд использовался только для

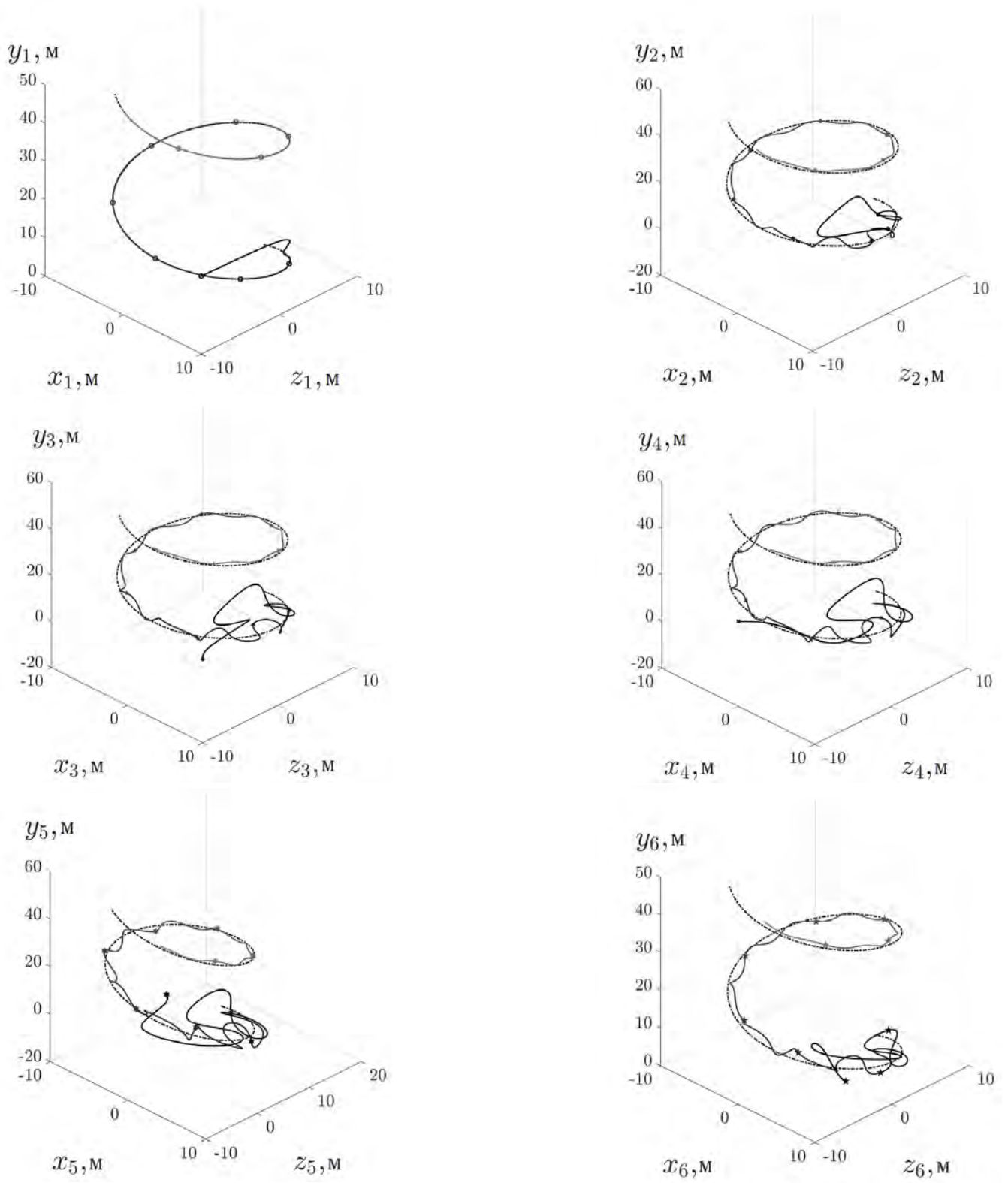


Рисунок 4.7 — Траектории движения каждого квадрокоптера при $R = 10$ бит/с в пространстве и сигнал $r(t)$, обозначенный штрих-пунктирной линией.

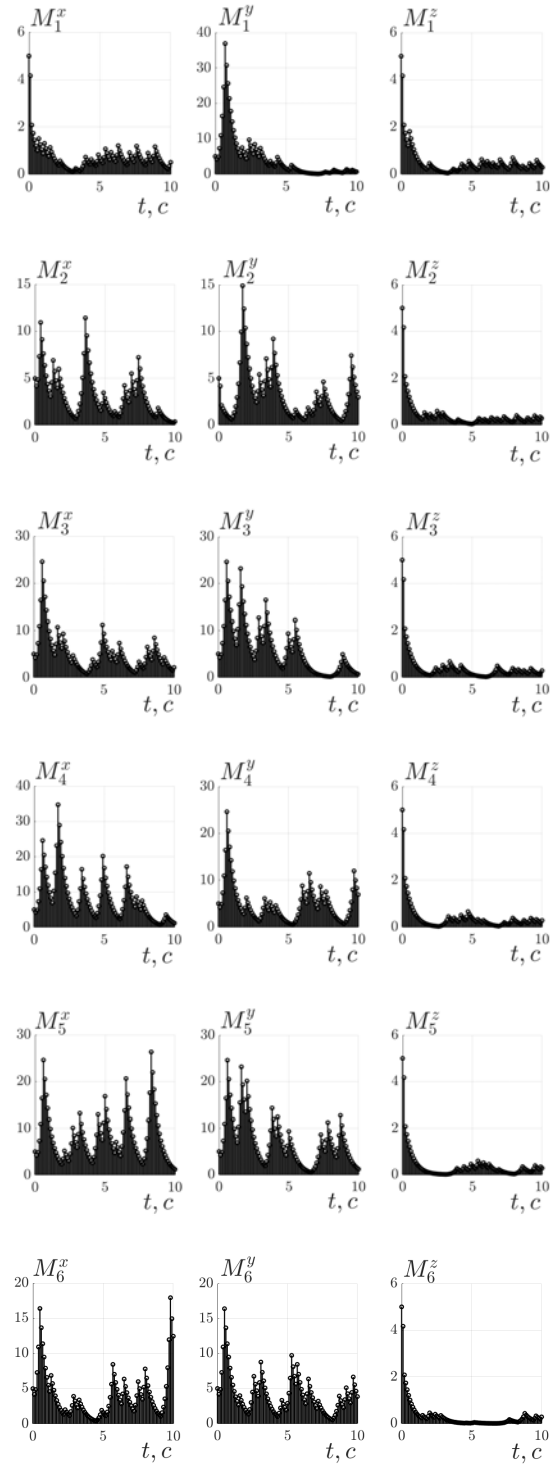


Рисунок 4.8 — Процесс настройки коэффициентов кодеров каждого квадрокоптера для каждого из каналов при $R = 10$ бит/с.

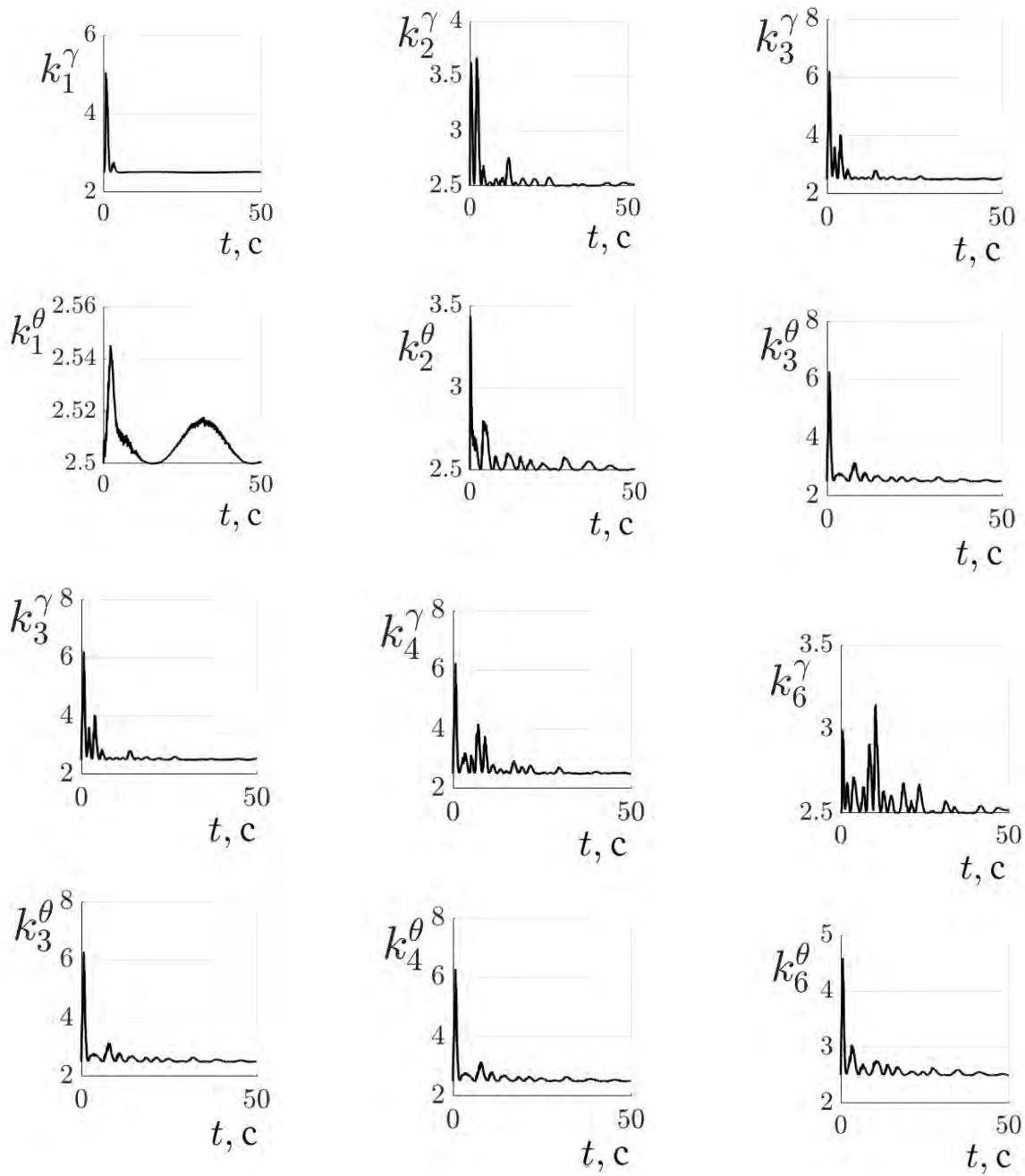


Рисунок 4.9 — Изменение коэффициентов адаптивных регуляторов (4.49) при $R = 10$ бит/с.

научных исследований в области проектирования адаптивных систем управления в качестве экспериментальной базы [7, 10, 13, 16]. В настоящее время его применение распространяется в образовательных целях в различных работах бакалавриата, а также используется в магистерской учебной программе «Мехатроника и робототехника», которая на момент написания диссертации преподается в Университете ИТМО. Большинство из них включают лабораторные работы с программным обеспечением MATLAB.

С помощью стенда студенты изучают, как сформулировать цели научных исследований, методы и способы решения поставленных задач. Они также учатся решать проблемы при моделировании объектов управления, описании возмущений и законов управления, изучают методы проектирования различных типов контроллеров в соответствии с желаемыми характеристиками производительности системы. Студенты понимают основные проблемы в своей предметной области, выбор методов и средств их решений, сами выбирают методы и разрабатывают алгоритмы решения задач управления в области мехатроники и робототехники. Изучив этот предмет, учащиеся должны иметь возможность синтезировать контроллеры для реальных физических растений. Это позволяет анализировать и сопоставлять результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также научиться подготавливать научные рукописи.

Так как динамика квадрокоптера (4.1) достаточно сложная и нелинейная, закрепление квадрокоптера на стенде позволяет рассматривать только два угла: тангаж и крен, чья динамика описывается набором уравнений

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma, \\ \dot{\gamma} = \omega_x + S_\gamma T_\vartheta \omega_z + C_\gamma T_\vartheta \omega_y, \\ I_z \dot{\omega}_z = (I_x - I_y) \omega_x \omega_y + I_r \omega_x \omega_r + \tau_\vartheta, \\ \dot{\vartheta} = \omega_x + S_\gamma T_\vartheta \omega_z + C_\gamma T_\vartheta \omega_y. \end{cases} \quad (4.16)$$

На рисунке 4.10 показано изображение закрепленного на стенде квадрокоптера, динамика движения которого описывается системой (4.16).

4.3.2 Идентификация параметров углового движения

Прежде чем работать с системой, выполняется идентификация ее параметров. В качестве примера продемонстрируем процесс идентификации для одного из углов, например, крена:

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma, \\ \dot{\gamma} = \omega_x + S_\gamma T_\vartheta \omega_z + C_\gamma T_\vartheta \omega_y. \end{cases} \quad (4.17)$$

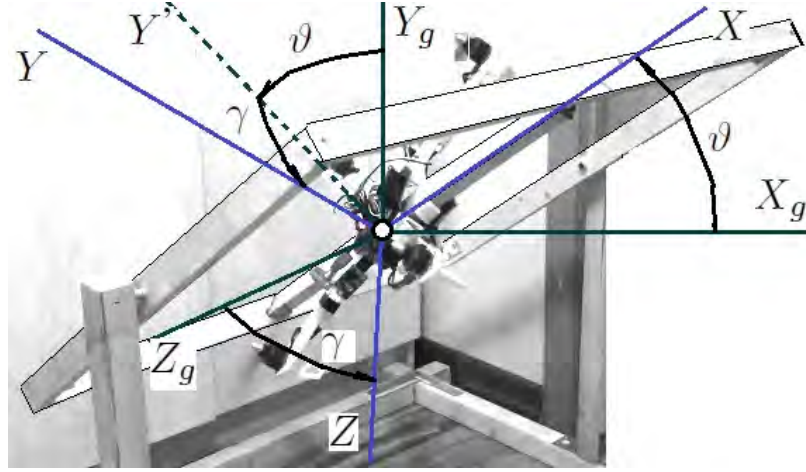


Рисунок 4.10 — Фотография стенда с нанесенными координатными осями и углами поворота.

Очевидно, что $\dot{\gamma} = \omega_x$ в связи с тем, что рассматриваются повороты только на один из углов, нет взаимного влияния всех углов друг на друга. Учитывая это, уравнение динамики, описывающей поворот на угол крена γ , имеет вид

$$I_x \ddot{\gamma} = \tau_\gamma + \beta \dot{\gamma}, \quad (4.18)$$

где β – коэффициент вязкого трения вращающейся рамки о внешний каркас тестового стенда.

Для того, чтобы была возможность проведения идентификации по методу наименьших квадратов [208], необходимо воспользоваться обратной связью с подходящим коэффициентом, например, $\tau_1 = \alpha(f_1(t) - 25\gamma_1)$, где α – коэффициент управления. Окончательно динамика замкнутой системы принимает вид

$$\ddot{\gamma}_1 = \alpha_N(f_1(t) - 25\gamma_1) + \beta_N \dot{\gamma}_1, \quad (4.19)$$

где $\alpha_N = \frac{\alpha}{I_x}$, $\beta_N = \frac{\beta}{I_x}$ – нормализованные коэффициенты.

В результате тестового полета получаются дискретизированные массивы измеренных значений $f_1(t)$, γ_1 , $\dot{\gamma}_1$, $\ddot{\gamma}_1$ из системы записи данных в квадрокоптере. Для идентификации с помощью метода наименьших квадратов, необходимо (4.19) представить в матричной форме:

$$\Gamma_1 = \chi_1 \Xi_1, \quad (4.20)$$

где $\Gamma_1 = [\ddot{\gamma}_1(1) \quad \ddot{\gamma}_1(2) \quad \dots \quad \ddot{\gamma}_1(N)]^T$,

$$\chi_1 = \begin{bmatrix} f_1(1) - 25\gamma_1(1) & \dot{\gamma}_1(1) \\ f_1(2) - 25\gamma_1(2) & \dot{\gamma}_1(2) \\ \vdots & \vdots \\ f_1(N) - 25\gamma_1(N) & \dot{\gamma}_1(N) \end{bmatrix}, \quad \Xi_1 = \begin{bmatrix} \alpha_N \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Находя Ξ_1 с помощью псевдообратной матрицы $\Xi_1 = \chi_1^\dagger \Gamma_1$, где \dagger – операция псевдообращения, могут быть найдены коэффициенты α_N, β_N с помощью минимизации квадрата ошибки.

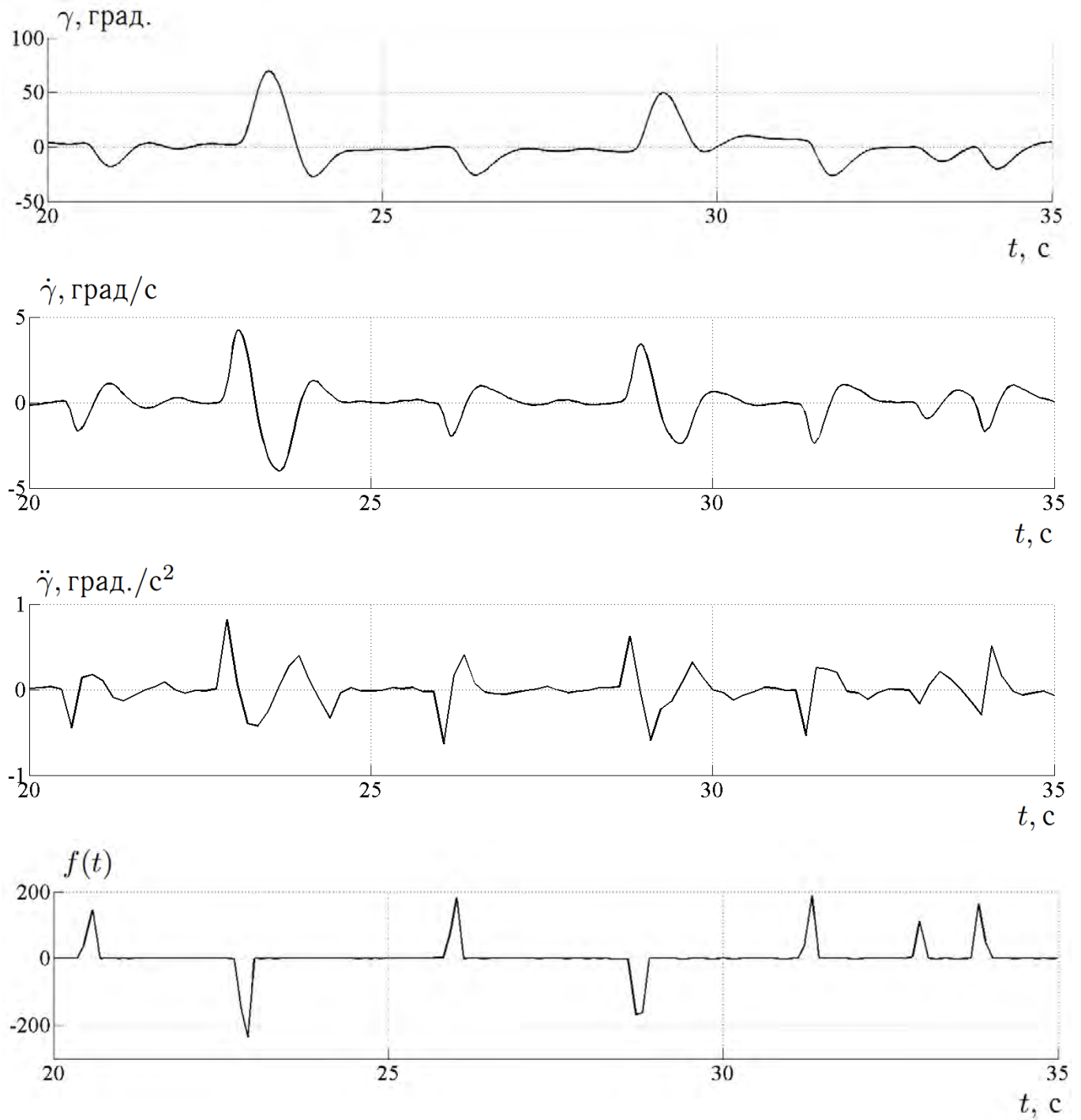


Рисунок 4.11 — Пример данных, полученных при идентификации с обратной связью сигналов

γ_1 .

Используя алгоритм, описанный выше, для массива данных, показанных на рисунке 4.11,

могут быть полученные значения нормализованных коэффициентов:

$$\alpha_N = 0.22, \quad \beta_N = -2.48, \quad (4.22)$$

тогда (4.19) принимает вид

$$\ddot{\gamma}_1 + 2.48\dot{\gamma}_1 + 5.5\gamma_1 = 0.22f(t), \quad (4.23)$$

а сама модель описывается уравнением

$$\ddot{\gamma}_1 + 2.48\dot{\gamma}_1 = 0.22f_1(t). \quad (4.24)$$

Идентификация может быть произведена и без использования обратной связи, только при стабилизации квадрокоптера в ручном режиме оператором. В этом случае динамика описывается уравнением

$$\ddot{\gamma}_2 = \alpha_N f_2(t) + \beta_N \dot{\gamma}_2. \quad (4.25)$$

В результате эксперимента получается аналогичный набор массивов данных сигналов $f_2(t), \gamma_2, \dot{\gamma}_2, \ddot{\gamma}_2$. Для идентификации с помощью метода наименьших квадратов, необходимо представим (4.25) в матричном виде:

$$\Gamma_2 = \chi_2 \Xi_2, \quad (4.26)$$

где $\Gamma_2 = [\ddot{\gamma}_2(1) \quad \ddot{\gamma}_2(2) \quad \dots \quad \ddot{\gamma}_2(N)]^T$,

$$\chi_2 = \begin{bmatrix} f_2(1) & \dot{\gamma}_2(1) \\ f_2(2) & \dot{\gamma}_2(2) \\ \vdots & \vdots \\ f_2(N) & \dot{\gamma}_2(N) \end{bmatrix}, \quad \Xi_2 = \begin{bmatrix} \alpha_N \\ \beta_N \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Вектор коэффициентов Ξ_2 получается аналогично способу для Ξ_1 .

Используя приведенный выше алгоритм к данным, приведенным на рисунке 4.12, найдем нормализованные значения

$$\alpha_N = 0.16, \quad \beta_N = -2.58, \quad (4.28)$$

при которых (4.25) принимает вид

$$\ddot{\gamma}_2 + 2.58\dot{\gamma}_2 = 0.16f_2(t). \quad (4.29)$$

Для получения более точной модели можно воспользоваться средними значениями, полученным с помощью обоих методов: $\alpha_N = 0.19$ и $\beta_N = -2.53$, с учетом которых (4.25) принимает

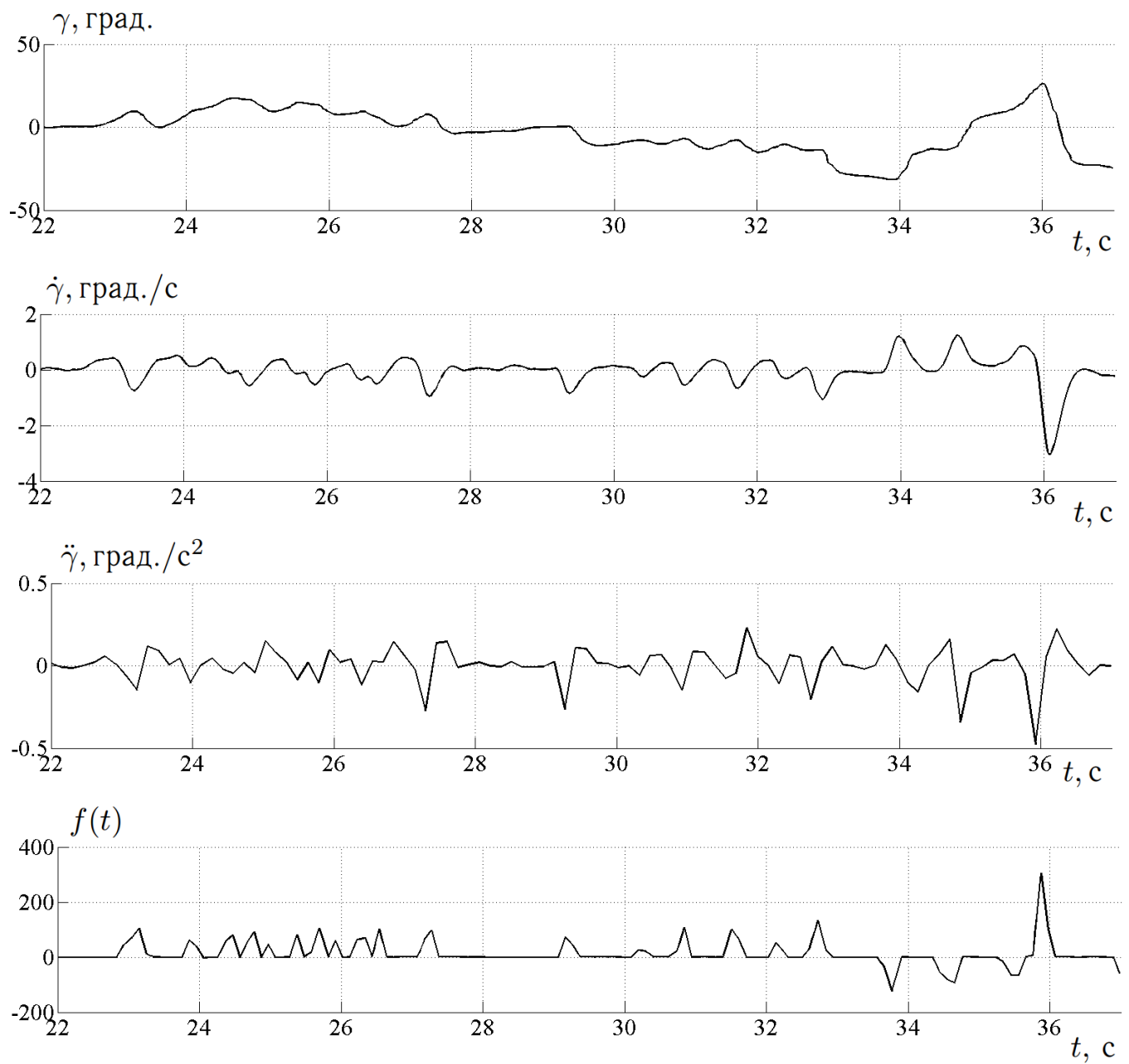


Рисунок 4.12 — Пример данных, полученных при идентификации без обратной связи сигналов γ_1 .

окончательный вид

$$\ddot{\gamma} + 2.53\dot{\gamma} = 0.19f(t), \quad (4.30)$$

что может быть переписано в виде передаточной функции от входа силы τ_γ к выходу угла крена γ

$$W(p) = \frac{0.19}{s(s + 2.53)}, \quad (4.31)$$

где s – оператор преобразования Лапласа.

Аналогичным образом может быть получена модель динамики вращения квадрокоптера на стенде для угла тангажа. В дальнейшем эта модель используется при сравнении качества функционирования предложенного алгоритма адаптивного управления и стандартного ПД-регулятора.

4.3.3 Идентификация параметров движения центра масс

Так как квадрокоптер имеет встроенную инерциальную систему, дальномер (сонар, радар или лидар), GPS, то с помощью всех датчиков могут быть получены сигналы управления $U_z(t_k)$, текущей высоты $y(t_k)$, вертикальной скорости $\dot{y}(t_k)$ и вертикального ускорения $\ddot{y}(t_k)$. Для идентификации все значения были получены экспериментально в тестовом полете в условиях отсутствия регуляторов управления высотой квадрокоптера в дискретные моменты времени t_k , $t_k = kT_0$, $k = 0, 1, \dots, N$, где N – число измерений, а $T_0 = 0,01$ с – интервал квантования. Все полученные данные сохраняются во внутреннюю память автопилота и могут быть считаны наземной станцией или бортовым компьютером в виде упорядоченных массивов данных. К этим данным применяется аналогичная процедура идентификации той, что была использована для идентификации параметров углового движения. Для этого модель динамики

$$\ddot{y}(t) + K\dot{y}(t) = K_u U_y(t) - g, \quad (4.32)$$

полученная из (4.1) с помощью линеаризации в нулевой точки, может быть записана в виде уравнения регрессии

$$\Phi\Theta = Y, \quad (4.33)$$

где $Y = [\ddot{y}(1), \ddot{y}(2), \dots, \ddot{y}(N)]$, а Φ формируется с помощью данных, полученных с датчиков квадрокоптера:

$$\Phi = \begin{bmatrix} U_y(1) & 1 & \dot{y}(1) \\ U_y(2) & 1 & \dot{y}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ U_y(k) & 1 & \dot{y}(N) \end{bmatrix}, \quad (4.34)$$

где $k = 0, 1, \dots, N$. Из уравнения (4.33) находится вектор неизвестных параметров модели вертикального движения квадрокоптера Θ . Для этого необходимо применить операцию псевдообращения в (4.33): вектор Θ вычисляется как $\Theta = \Phi^\dagger Y$, где Φ^\dagger – матрица, псевдообратная к Φ .

Используя процедуры нахождения вектора неизвестных параметров к полученным с интервалом $T_0 = 0,01$ данным по результатам $N = 600$ измерений, могут быть вычислены оценки параметров модели (4.32): $\hat{K}_u = 0.021$ [м/(с²В)], $\hat{g} = 9.6$ [м/с²], $\hat{K} = 0.293$ [м/с]. После подстановки найденных значений параметров в (4.32) динамика вертикального движения принимает вид

$$\ddot{y} + 0.293\dot{y} = 0.021U_y - 9.6. \quad (4.35)$$

В полученной модели движения (4.35) оценка постоянной ускорения свободного падения $\hat{g} = 9.6$ м/с² оказалась близкой к реальному значению. Подобная оценка может косвенно свидетельствовать о корректности процесса идентификации, а также о допустимой точности вычисленных параметров модели.

Для построения регулятора предполагается, что динамика двигателя может быть описана с помощью модели апериодического звена первого порядка:

$$W_s(s) = \frac{1}{\tau s + 1}, \quad (4.36)$$

где постоянная времени τ предполагается достаточно малой: $\tau = 0.05$ секунд.

К модели (4.36) может быть построен пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор скорости изменения высоты:

$$W_{PI}(s) = \frac{K_I}{s} + K_P = \frac{K_I(T_1 s + 1)}{s}, \quad (4.37)$$

где K_I , K_P – коэффициенты регулятора сигнала ошибки соответственно, а постоянная времени T_1 находится в виде соотношения $T_1 = K_P/K_I$.

С помощью метода эталонных полиномов в качестве примера выбирается $T_1 = K^{-1} = 3.41$ секунд. В этом случае передаточная функция результирующей разомкнутой системы выглядит следующим образом:

$$W(s) = \frac{K_I K_0}{s(0.05s + 1)}, \quad (4.38)$$

где $K_0 = 0.071$. Коэффициент K_I выбирается таким образом так, чтобы условие

$$K_I K_0 \tau \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2} \quad (4.39)$$

было верно, где M – характеризует колебательность (H_∞ -индекс). Для выбора M рекомендуется диапазон значений $M = 1.1$ – 1.4 , из которого может быть выбрано значение $M = 1.2$ в качестве примера. Учитывая выбранный показатель колебательности, найдем допустимые значения коэффициента K_I

$$K_I \leq 315. \quad (4.40)$$

Положим $K_I = 16$ с, откуда следует $K_P = K_I T_1 = 54.6$ и окончательно ПИ-регулятор (4.37) может быть записан в виде

$$W_{PI}(s) = 54.58 + \frac{16}{s}. \quad (4.41)$$

В связи с тем, что инерционное звено (4.36) входит в синтезируемый контур управления, динамика разомкнутой системы описывается передаточной функцией

$$W_a(s) = \frac{13.6s + 4}{s(s^3 + 20.3s^2 + 28.6s + 6.7)}. \quad (4.42)$$

Полученная модель может быть использована как упрощенная модель динамики квадрокоптера, что позволяет легко строить модели для анализа устойчивости в многоагентных системах.

4.3.4 Модификация для автопилота

Для использования адаптивного управления на основе метода пассивации для квадрокоптеров в группе, применим технику неявной эталонной модели к угловой динамике лета-

тельного аппарата. Модель динамики углового движения квадрокоптера имеет вид [13]:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \omega_x + S_\gamma T_\vartheta \omega_z + C_\gamma T_\vartheta \omega_y, \\ \dot{\vartheta} = C_\gamma \omega_z - S_\gamma \omega_y, \\ \dot{\psi} = \frac{S_\gamma}{C_\vartheta} \omega_z + \frac{C_\gamma}{C_\vartheta} \omega_y, \\ I_x \dot{\omega}_x = (I_y - I_z) \omega_y \omega_z - I_r \omega_z \omega_r + \tau_\gamma, \\ I_y \dot{\omega}_y = (I_z - I_x) \omega_x \omega_z + \tau_\psi, \\ I_z \dot{\omega}_z = (I_x - I_y) \omega_x \omega_y + I_r \omega_x \omega_r + \tau_\vartheta, \end{cases} \quad (4.43)$$

где γ , ϑ , ψ – углы Эйлера (крен, тангаж и рыскание соответственно); ω_x , ω_y , ω_z – угловые скорости в системе, связанной с квадрокоптером, $S_\xi = \sin(\xi)$, $C_\xi = \cos(\xi)$, $T_\xi = \tan(\xi)$; g – ускорение свободного падения, I_x , I_y , I_z – вращательные моменты инерции. Вращающие силы относительно центра масс представляют собой вектор $\tau = [\tau_\gamma, \tau_\vartheta, \tau_\psi]^T$, где компоненты равны $\tau_\gamma = l(\omega_2 - \omega_4)$, $\tau_\vartheta = l(\omega_1 - \omega_3)$, $\tau_\psi = a_r \omega_R$, где $\omega_R = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$. Скорость вращения двигателей находится как $\dot{\omega}_i = k_l(\tilde{\omega}_i - \omega_i)$, где k_l – параметр, характеризующий свойства двигателя, $\tilde{\omega}_i$ – целевое значение скорости вращения. Сама скорость вращения ограничена неравенством $0 < \omega_{\min} \leq \omega_i \leq \omega_{\max}$. Так как k_l достаточно большое, инерционностью двигателей можно пренебречь.

Допустим, что угловые скорости ω_x , ω_y , ω_z закрепленного на стенде квадрокоптра малы, тогда модель (4.43) может быть линеаризована относительно нулевой точки вблизи положения равновесия. В полученной линеаризованной модели угловое движение относительно угла рыскания не зависит от углов крена и тангажа и описывается уравнением

$$\ddot{\psi} = I_y^{-1} \tau_\psi, \quad (4.44)$$

или в векторном виде с вектором состояния $\tilde{x}_\psi = [\psi, \dot{\psi}]^T$ принимает вид

$$\dot{\tilde{x}}_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x}_\psi + \begin{bmatrix} 0 \\ I_y^{-1} \end{bmatrix} \tau_\psi, \quad \tilde{y}_\psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{x}_\psi. \quad (4.45)$$

Учитывая технику неявной эталонной модели, введем вектор G_ψ в виде $G_\psi = [1, \alpha_\psi]$, где $\alpha_\psi > 0$ – параметр регулятора. Тогда алгоритм управления углом рыскания квадрокоптера имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \psi(t) - \psi^*(t) + \alpha_\psi \dot{\psi}(t), \\ u_\psi(t) &= -k_\psi(t) \sigma(t) - \gamma_\sigma \text{sign}(\sigma(t)) \sqrt{|\sigma(t)|}, \\ \dot{k}_\psi(t) &= \gamma_k \sigma(t)^2 - \alpha_k (k_\psi(t) - k_\psi^0), \quad k_\psi(0) = k_\psi^0 \end{aligned} \quad (4.46)$$

где $\psi^*(t)$ – целевое значение угла рыскания.

Для того, чтобы справиться с неучтенной динамикой двигателей, в закон управления добавим шунт (параллельный компенсатор) (4.46) [59,209]. Закон управления углом рыскания тогда принимает вид

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \psi(t) - \psi^*(t) + \alpha_\psi \dot{\psi}(t) - v(t), \\ u_\psi(t) &= -k_\psi(t)\sigma(t) - \gamma_\sigma \text{sign}(\sigma(t))\sqrt{|\sigma(t)|}, \\ \dot{k}_\psi(t) &= \gamma_k \sigma(t)^2 - \alpha_k (k_\psi(t) - k_\psi^0), \quad k_\psi(0) = k_\psi^0 \\ \dot{v}(t) &= (\kappa u(t) - v(t))\tau^{-1},\end{aligned}\tag{4.47}$$

где κ и τ – вспомогательные коэффициенты усиления обратной связи и κ может быть взято достаточно малым [59].

Линеаризованная модель динамики движения по углам тангажа (ϑ) и крена (γ) может быть переписана в следующем виде

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{y}}_{\gamma\vartheta} &= \begin{bmatrix} 0 & -I_r I_x^{-1} \omega_R & 0 & 0 \\ I_r I_x^{-1} \omega_R & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{y}_{\gamma\vartheta} + \begin{bmatrix} I_x^{-1} & 0 \\ 0 & I_x^{-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_\gamma \\ \tau_\vartheta \end{bmatrix}, \\ \tilde{y}_{\gamma\vartheta} &= [\omega_x, \omega_z, \gamma, \vartheta]^T.\end{aligned}$$

Модель (4.48) представляет собой многосвязную систему четвертого порядка с двумя управляющими входами и двумя выходами. Взаимное влияние углов тангажа и крена обусловлено наличием скорости вращения ω_R и может значительно меняться во время полета.

Применение описанного выше подхода к многосвязным системам рассматривается в [177]. Согласно этому подходу алгоритм управления принимает вид [13]:

$$\begin{aligned}\sigma(\tilde{y}) &= G_{\gamma\vartheta} \tilde{y}, \\ \tilde{u}(t) &= \xi^T(t) \tilde{y}(t) - \gamma_M \text{sign}(\sigma(\tilde{y}))\sqrt{|\sigma(\tilde{y})|}, \\ \dot{\xi}_j &= -(G_j \tilde{y}) \Gamma \tilde{y} - \alpha_M (\xi_j - \xi_j^0), \quad \xi_j^0 = \xi_j(0),\end{aligned}\tag{4.48}$$

где $G_{\gamma\vartheta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_\vartheta \end{bmatrix}$ и j – номер соответствующих строки или столбца матриц. При-

нимая во внимание вид $G_{\gamma\vartheta}$, регулятор (4.48) может быть расписан покомпонентно:

$$\begin{aligned}
\sigma_\gamma(\tilde{y}) &= \omega_x + \alpha_\gamma \gamma, \\
\sigma_\vartheta(\tilde{y}) &= \omega_z + \alpha_\vartheta \vartheta, \\
\tilde{u}_\gamma(t) &= k_\gamma^\top(t) \tilde{y}(t) - \gamma_M \text{sign}(\sigma_\gamma(\tilde{y})) \sqrt{|\sigma_\gamma(\tilde{y})|}, \\
\tilde{u}_\vartheta(t) &= k_\vartheta^\top(t) \tilde{y}(t) - \gamma_M \text{sign}(\sigma_\vartheta(\tilde{y})) \sqrt{|\sigma_\vartheta(\tilde{y})|}, \\
\dot{\xi}_\gamma &= -\sigma_\gamma(\tilde{y}) \Gamma_\gamma \tilde{y} - \alpha_M (k_\gamma - k_\gamma^0), \quad k_\gamma = \xi_\gamma(0), \\
\dot{k}_\vartheta &= -\sigma_\vartheta(\tilde{y}) \Gamma_\vartheta \tilde{y} - \alpha_M (k_\vartheta - k_\vartheta^0), \quad k_\vartheta = k_\vartheta(0).
\end{aligned} \tag{4.49}$$

Передаточная матрица имеет вид

$$\begin{aligned}
P_{\gamma\vartheta}(s) &= G_{\gamma\vartheta} C_{\gamma\vartheta} (sI_4 - A_{\gamma\vartheta})^{-1} B_{\gamma\vartheta} \\
&= \frac{1}{s(I_x^2 s^2 + I_r^2 \omega_R^2)} \begin{bmatrix} I_x s^2 + I_x \alpha_\gamma s & -I_r \omega_R (s + \alpha_\gamma) \\ I_r \omega_R (s + \alpha_\vartheta) & I_x s^2 + I_x \alpha_\vartheta s \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{4.50}$$

Полином $\delta(s)$ рассчитывается как $\delta(s) = \det(sI_4 - A_{\gamma\vartheta}) = I_x^{-2}(I_x^2 s^3 + I_r^2 \omega_R^2 s)$, откуда полином $\delta(s) \det P_{\gamma\vartheta} = I_x^{-2}(s^2 + (\alpha_\gamma + \alpha_\vartheta)s + \alpha_\vartheta \alpha_\gamma)$ является гурвицевым.

Для проверки применимости метода пассивации необходимо вычислить

$$\Gamma_P = \lim_{|s| \rightarrow \infty} s P_{\gamma\vartheta} = GCB = \begin{bmatrix} I_x^{-1} & 0 \\ 0 & I_y^{-1} \end{bmatrix}, \tag{4.51}$$

что удовлетворяет требованиям $\Gamma = \Gamma^\top > 0$, откуда делается вывод, что $GW(s)$ является гипер-минимальнофазовой и удовлетворяет условию теореме о пассивации для сигнально-параметрического адаптивного регулятора.

В связи с дискретностью работы автопилота квадрокоптера, необходимо использовать дискретный вариант алгоритмов (4.47) и (4.49). Дискретизованные алгоритмы имеют вид

$$\begin{aligned}
\sigma_\gamma[n] &= \gamma^*[n] - \gamma[n] - \alpha_\gamma \omega_x[n] - v[n], \\
k_\gamma[n+1] &= (\gamma_k \sigma_\gamma^2[n] - \alpha_k (k_\gamma[n] - k_\gamma^0)) T_0 + k_\gamma[n], \\
u_\gamma[n] &= k_\gamma[n] \sigma_\gamma[n] - \gamma_{\sigma_\gamma} \text{sign}(\sigma_\gamma[n]) \sqrt{|\sigma_\gamma[n]|}, \\
v_\gamma[n+1] &= (\kappa u_\gamma[n] - v_\gamma[n]) T_0 \tau^{-1} + v_\gamma[n],
\end{aligned} \tag{4.52}$$

где $n = 0, 1, \dots$ – номер шага вычислений, T_0 – интервал дискретизации, γ^* – задающее значение угла крена, измеряемые значения переменных $\gamma(t)$, $\omega_x(t)$ сэмпированы по времени в моменты nT_0 : $\gamma[n] = \gamma(nT_0)$, $\omega_x[n] = \omega_x(nT_0)$, экстраполяция нулевого порядка используется для расщрения сигнала управления для формирования управляющих сигналов для двигателей квадрокоптера: $u_\gamma(t) = u_\gamma(nT_0)$ при $nT_0 \leq t < (n+1)T_0$.

Аналогично, цифровое управление используется для управления углом тангажа:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\vartheta}[n] &= \vartheta^*[n] - \vartheta[n] - \alpha_{\vartheta}\omega_z[n] - v[n], \\
 k_{\vartheta}[n+1] &= (\vartheta_k\sigma_{\vartheta}^2[n] - \alpha_k(k_{\vartheta}[n] - k_{\vartheta}^0))T_0 + k_{\vartheta}[n], \\
 u_{\vartheta}[n] &= k_{\vartheta}[n]\sigma_{\vartheta}[n] - \gamma_{\sigma_{\vartheta}}\text{sign}(\sigma_{\vartheta}[n])\sqrt{|\sigma_{\vartheta}[n]|}, \\
 v_{\vartheta}[n+1] &= (\kappa u_{\vartheta}[n] - v_{\vartheta}[n])T_0\tau^{-1} + v_{\vartheta}[n],
 \end{aligned} \tag{4.53}$$

где ϑ^* – задающее значение угла тангажа, $\vartheta[n] = \vartheta(nT_0)$, $\omega_z[n] = \omega_z(nT_0)$, $u_{\vartheta}(t) = u_{\vartheta}(nT_0)$ при $nT_0 \leq t < (n+1)T_0$. Обоснованность дискретных модификаций адаптивного управления с параметрической обратной связью вытекает из метода непрерывных моделей, согласно которому из экспоненциальной устойчивости непрерывной системы («непрерывная модель») при достаточно малом интервале квантования T_0 следует устойчивость дискретизованной системы [48, 210]. В свою очередь, экспоненциальная устойчивость непрерывных адаптивных систем с неявной эталонной моделью обеспечивается параметрической обратной связью в алгоритме адаптации.

4.3.5 Результаты эксперимента

Ряд экспериментов был выполнен для изучения качества функционирования спроектированной замкнутой системы с сигнально-параметрическими регуляторами. В качестве параметров адаптивного регулятора (4.52) были выбраны следующие: $a_{\phi} = 0.3$, $\gamma_{\sigma} = 20$, $\gamma_k = 0.5$, $k_{\psi}^0 = k_{\gamma}^0 = 30$, $k_u = 0.05$, $\alpha_u = 10$, $\kappa = 0.05$, $\tau = 10$. Эксперименты проводились на разработанном двухступенном квадрокоптерном лабораторном стенде, описанном в подразделе 4.3, см. также [13, 14].

Проведено сравнение работы предложенного адаптивного регулятора управления с работой типового ПД-регулятора, используемого в большинстве автопилотов. ПД-закон управления для рассматриваемой системы имеет вид $u_i(t) = k_p(y_i^*(t) - y_i(t)) - k_d\dot{y}_i(t)$, где y_i^* , y_i – заданное значение углового положения ($i \in \{\vartheta, \gamma\}$). Коэффициенты управления были выбраны для номинального режима равными $k_p = 40$, $k_d = 10$. Результат слежения за кусочно-непрерывными задающими сигналами для управляемых углов, ошибки слежения и процессы изменения коэффициентов управления показаны на рисунке 4.13 (общий случай) и рисунке 4.14 (параметрически возмущенный режим). Во втором случае к одному из лучей квадрокоптера крепится груз, после чего в процессе функционирования системы происходит мгновенное отсоединение груза.

Летные испытания вне тестового стенда производились на том же квадрокоптере, который был использован в экспериментах на стенде. Также параметры адаптивного регулятора

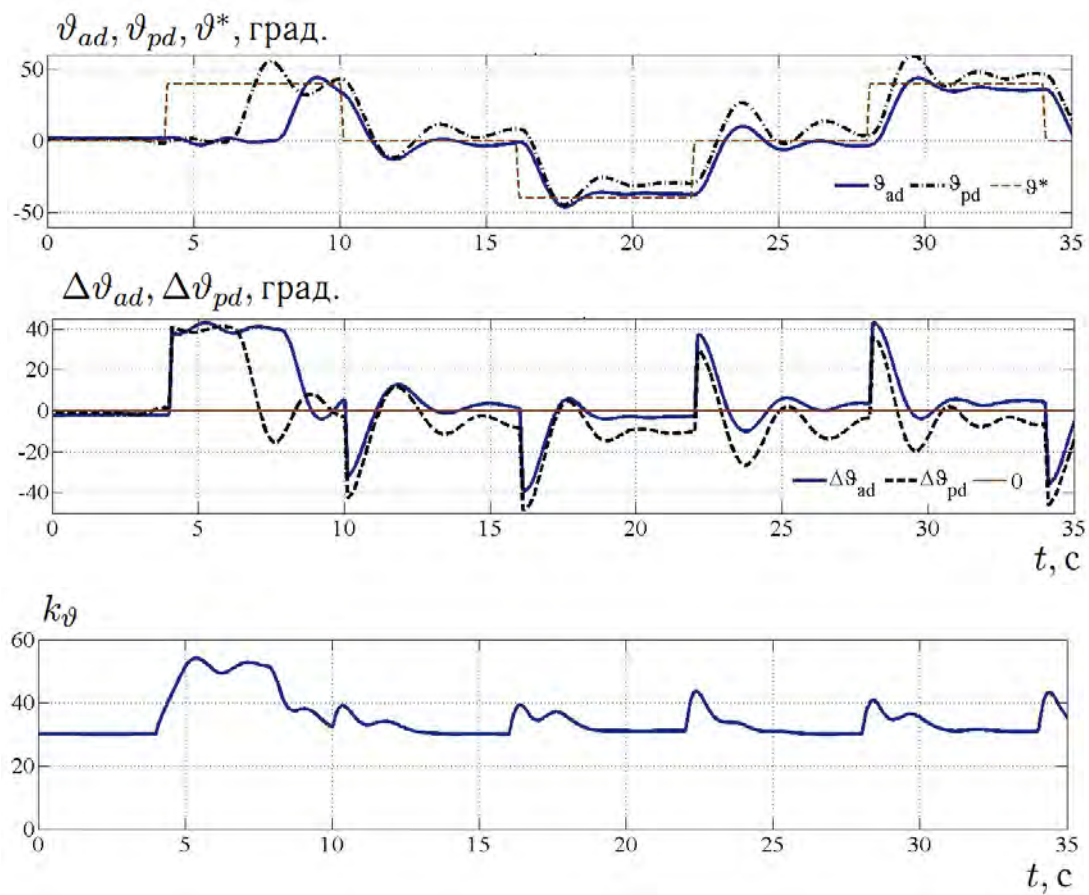


Рисунок 4.13 — Номинальный режим. Верхний график: процессы изменения угла тангажа для адаптивного – ϑ_{ad} , неадаптивного (ПД) – ϑ_{pd} регуляторов, задающего угла тангажа ϑ^* .

Средний график: ошибка слежения для адаптивного – $\Delta\vartheta_{ad}$, неадаптивного (ПД) – $\Delta\vartheta_{pd}$ регуляторов. Нижний график: процесс изменения коэффициентов адаптивного регулятора k_{ϑ} .

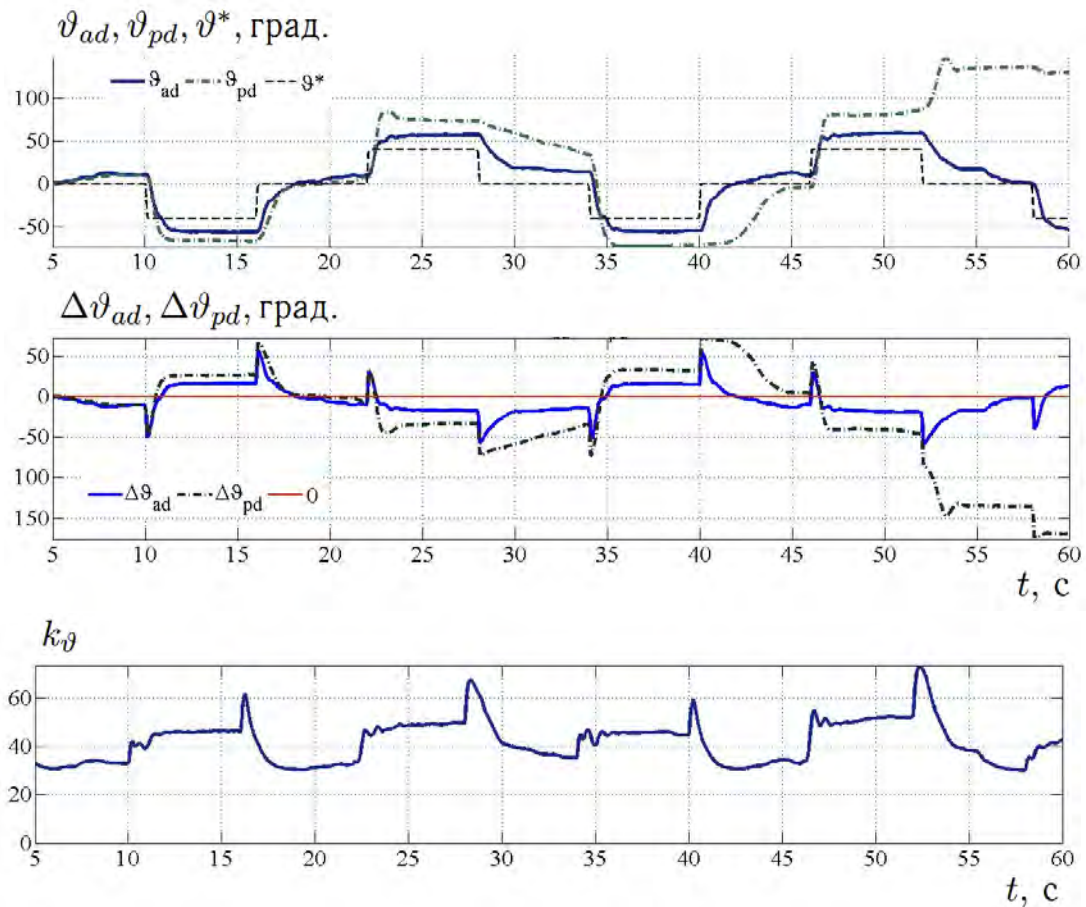


Рисунок 4.14 — Параметрически возмущенный режим. Верхний график: процессы изменения угла тангажа для адаптивного – ϑ_{ad} , неадаптивного (ПД) – ϑ_{pd} регуляторов, задающего угла тангажа ϑ^* . Средний график: ошибка слежения для адаптивного – $\Delta\vartheta_{ad}$, неадаптивного (ПД) – $\Delta\vartheta_{pd}$ регуляторов. Нижний график: процесс изменения коэффициентов адаптивного регулятора k_{ϑ} .

были одинаковы в обоих случаях. Как было указано, адаптивный регулятор был реализован в виде программы, добавлен в автопилот, что дает возможность использовать разработанные регуляторы вне лабораторных помещений. Траектория полета квадрокоптера задавалась в ручном режиме в реальном времени оператором посредством радиоаппаратуры. Соответствующие процессы изменения углов наклона крена, тангажа и рыскания, полученные с помощью встроенной инерциальной системы, а также процесс изменения коэффициентов адаптивных регуляторов $k_\gamma(t)$, $k_\vartheta(t)$ представлены на рисунках 4.15, 4.16.

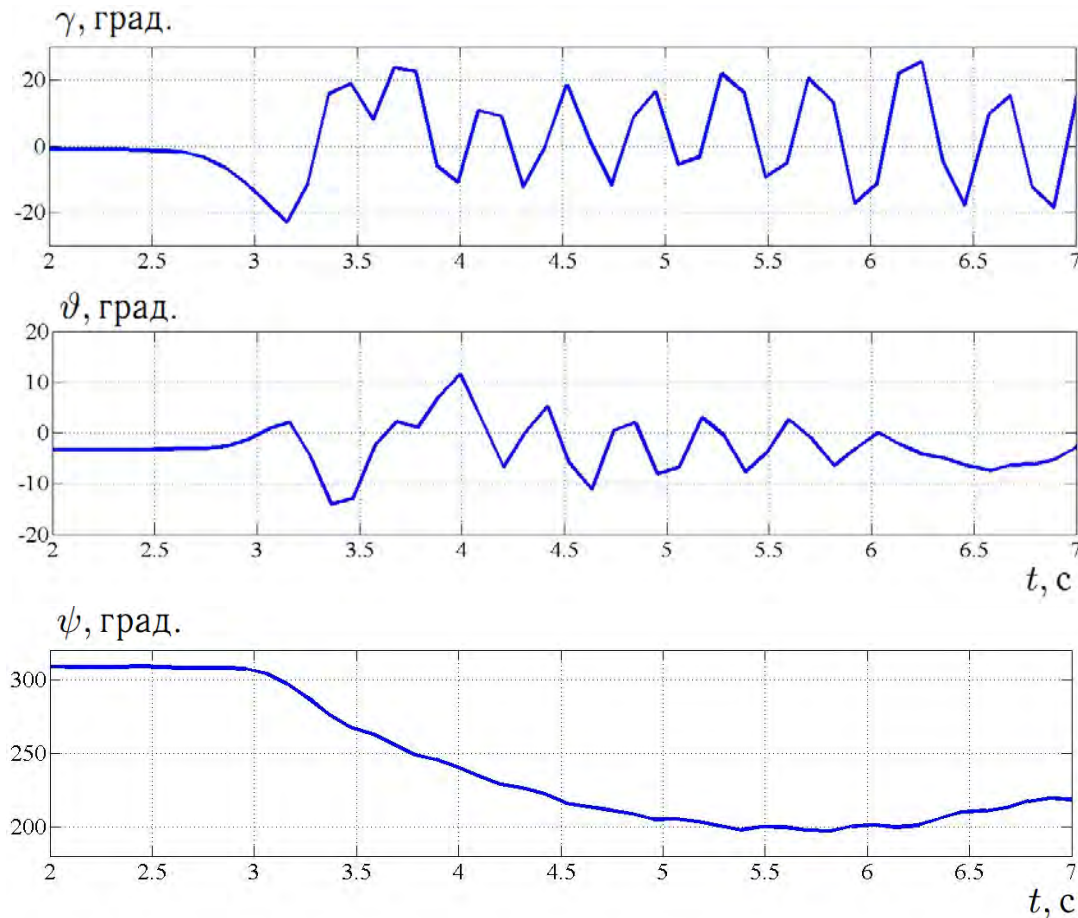


Рисунок 4.15 — Процессы изменения углов крена, тангажа и рыскания во время полета.

4.4 Аппаратно-программная реализация алгоритма кодирования

4.4.1 Аппаратная реализация

Предложенный алгоритм был реализован на радиомодемах, и полученные результаты были сравнены с результатами моделирования. Рассматриваемый канал связи представляет собой универсальный цифровой канал передачи данных [211]. В качестве приемника и передатчика были выбраны модемы Xbee Pro S1, позволяющие реализовать связь, которую впослед-

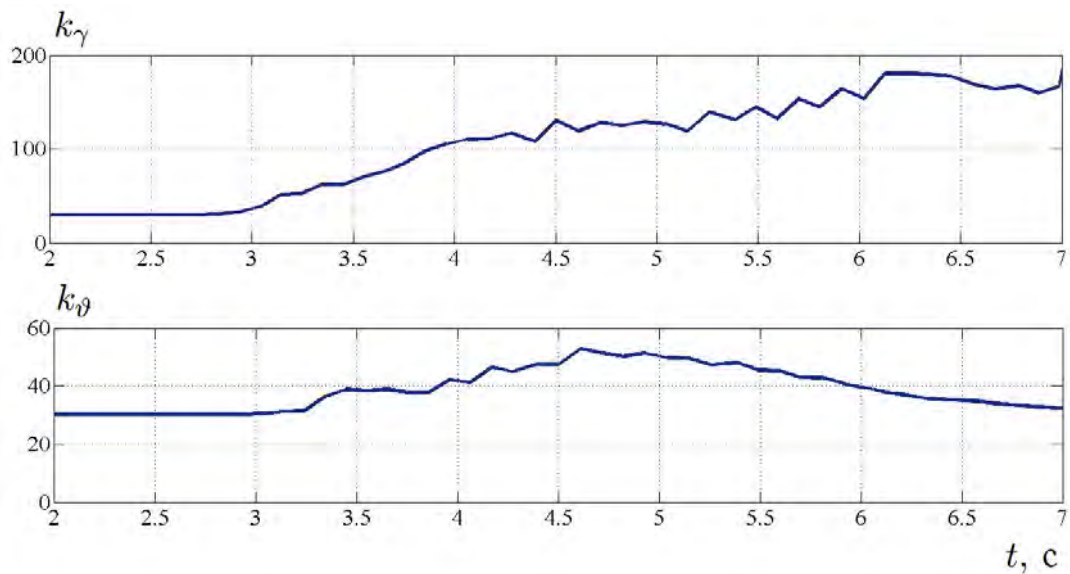


Рисунок 4.16 — Процессы изменения настраиваемых коэффициентов $k_\gamma(t)$, $k_\theta(t)$ во время полета.

ствии легко перенести на квадрокоптеры. Эти модемы базируются на беспроводном протоколе *IEEE802.15.4*, обеспечивающем работу на частоте 2.4 Гц. Скорость передачи данных ограничена 250 Кбит/с. Подключение к компьютеру осуществляется по USB интерфейсу с рабочей скоростью до 115200 бит/с.

4.4.2 Программная реализация

В качестве языка программирования был выбран Python, на нем для кодера и декодера написаны две программы, которые запускаются отдельно. Для сравнения с результатами моделирования была выбрана скорость передачи данных $R = 10$ бит/с. Основной цикл программы кодера работает на частоте 10 Гц.

Данные кодируются одним байтом, имеющим формат М;D;В;N, где М – два бита, отвечающие за сообщение режима работы декодеру; D – два бита, обозначающие номер устройства, передающего команду; В – передаваемый бит; N – три бита номера переданного пакета. В приемнике осуществляется обновление внутреннего счетчика номеров сообщений на каждом 8 шаге. Предполагается, что все пакеты передаются последовательно и не пропадают. Полученный байт обрабатывается драйвером серийного порта и информационный бит передается декодеру. Фактически, происходит эмуляция передачи только одного бита с помощью одного байта, то есть использовано искусственное занижение скорости. Стоит отметить, что используемый формат сообщений предполагает несколько устройств в одной сети и несколько режимов работы, что позволяет перенести рассматриваемые алгоритмы в реальную многоагентную си-

стему. Для других случаев размер полного сообщения может быть уменьшен, однако размер пакета в один байт является стандартным для множества протоколов передачи данных.

Система реализована без внешних прерываний, поэтому программа декодера работает на частоте 100 Гц, тем самым чаще проверяется наличие новых сообщений (которые определяются ростом номера N в формате сообщения). При нахождении нового сообщения декодер его обрабатывает, производится весь цикл вычислений, после чего включается режим ожидания нового сообщения. После запуска программы декодер переходит в режим ожидания до того момента, как от кодера не придет сообщение с нужным символом режима работы. Этот символ сообщает о начале вещания кодера, и обе программы запускают алгоритмы кодирования-декодирования.

4.4.3 Результаты эксперимента

Результат эксперимента с использованием данных из моделирования показан на рисунке 4.17. Небольшое расхождение результатов эксперимента с результатами моделирования объясняется использованием различных языков программирования: сказывается разный подход к точности хранения значений и их округлению.

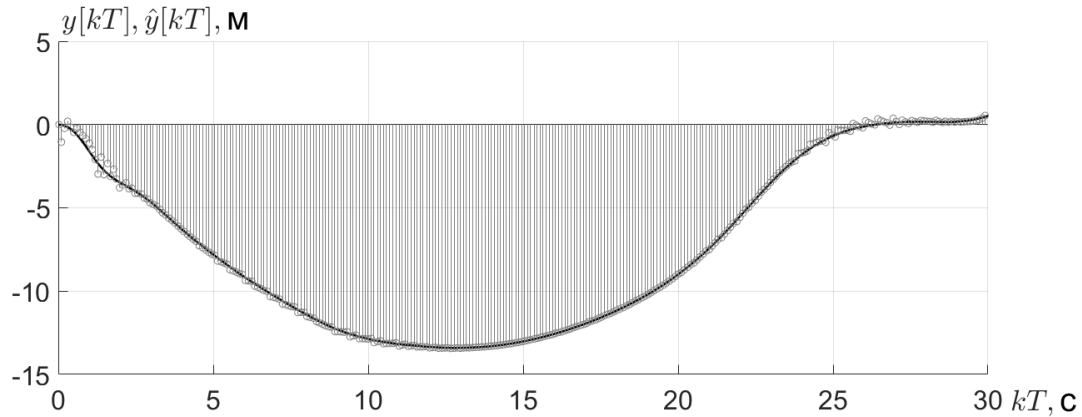


Рисунок 4.17 — Кодированный сигнал $y[k]$ (сплошная линия) и его дискретные оценки $\hat{y}[k]$, полученные на декодере в результате эксперимента.

Для оценки точности кодирования-декодирования использовано среднеквадратичное отклонение

$$e[n] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n (\hat{y}[k] - y[k])^2}, \quad (4.54)$$

и проведены эксперименты с кодированием сигнала вида $y[k] = 30 \sin \omega k$ для различных

значений частот ω от 0.05 до 1 рад/с с шагом 0.05 рад/с. Параметры кодера и декодера остаются такими же, как в моделировании и предыдущем эксперименте. Результаты экспериментальных исследований показаны на рисунке 4.18

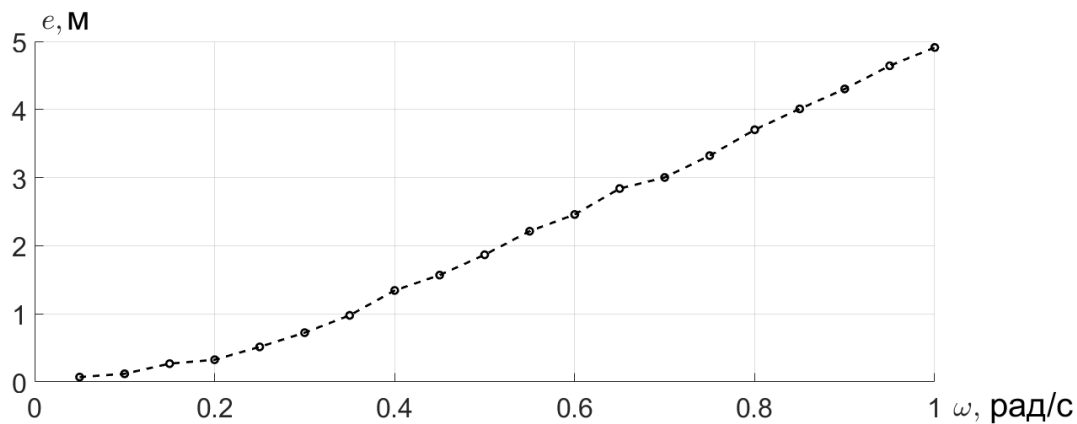


Рисунок 4.18 — Зависимость среднеквадратичных отклонений (4.4.3) для отрезка времени 30 секунд от частоты кодированной синусоиды ω .

Для работы с алгоритмом адаптивного кодирования была написана программа *XbeeVisualizator* для персональных компьютеров с операционной системой на базе Linux. Проект был реализован с использованием языка программирования C++ и фреймворка Qt, позволяющего включить в программу визуальный интерфейс для наглядного отображения информации. Программа связывает настольный компьютер и квадрокоптер на тестовом стенде посредством использования радиоканала с использованием модемов *Xbee*. Реализованные возможности программы позволяют переводить квадрокоптер в режим готовности и обратно, а также задавать ему угол наклона с использованием предложенного метода адаптивного кодирования. На рисунке 4.19 представлен пользовательский интерфейс программы.

4.5 Взаимодействие нескольких стендов для экспериментов с многоагентными системами

Объединение пары тестовых стендов (см. рисунок 4.20), подключенных по радиоканалу через модемы *Xbee* в одну сеть напрямую или через распределяющий компьютер может использоваться для разработки и экспериментального изучения консенсусных протоколов. Целью исследований является синхронизация квадрокоптеров с использованием различных видов алгоритмов, в том числе и предложенными в настоящей диссертации.

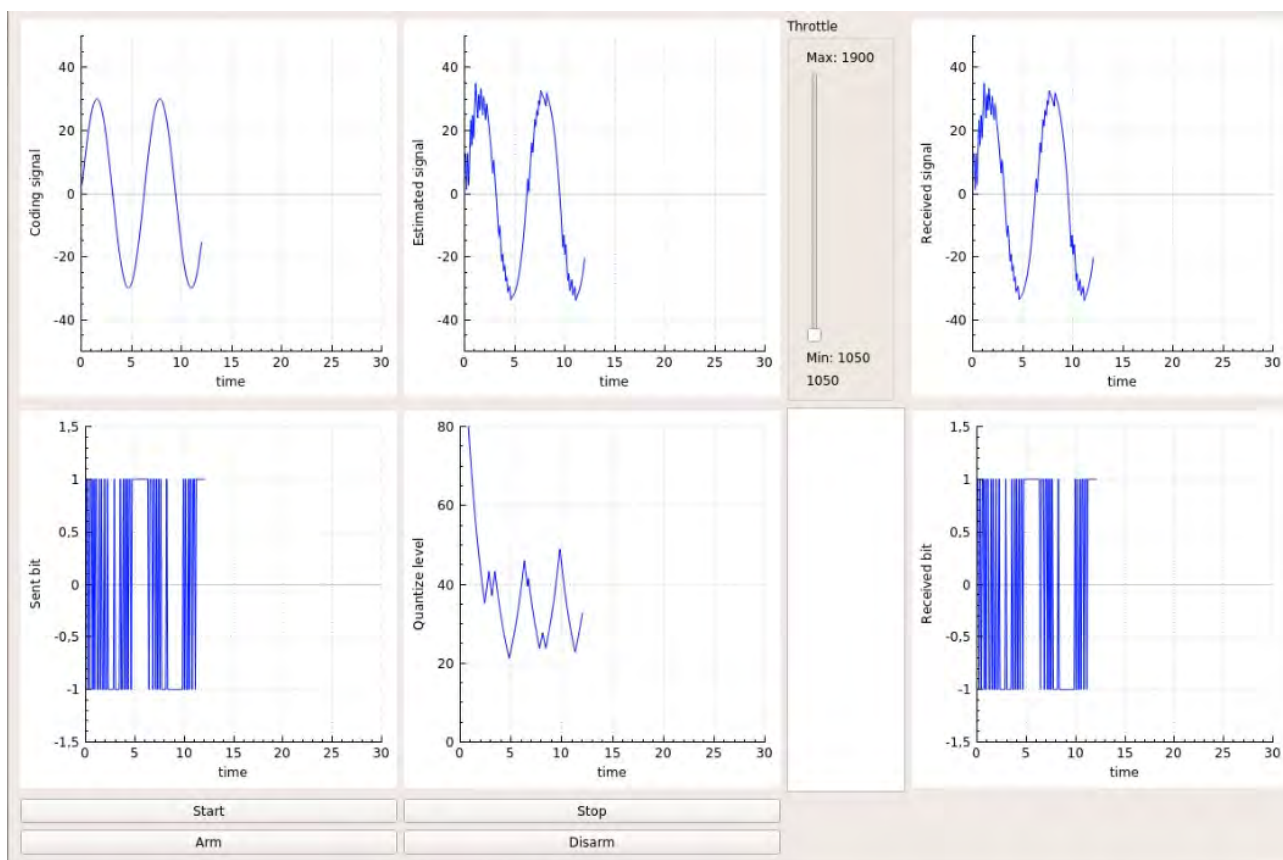


Рисунок 4.19 — Пользовательский интерфейс программы XbeeVisualizator.

Использование углов поворота ϑ и γ каждого квадрокоптера в качестве независимых агентов позволяет увеличить количество агентов в формации до четырех без использования дополнительного тестового стенда. В этом случае может быть реализовано множество различных сетей обмена информации. Более того, такой случай облегчает эксперименты с системами, где динамика агентов может существенно различаться: особенность конструкции стенда заключается в том, что вращение на углы тангажа и крена осуществляется с различными инерциями.

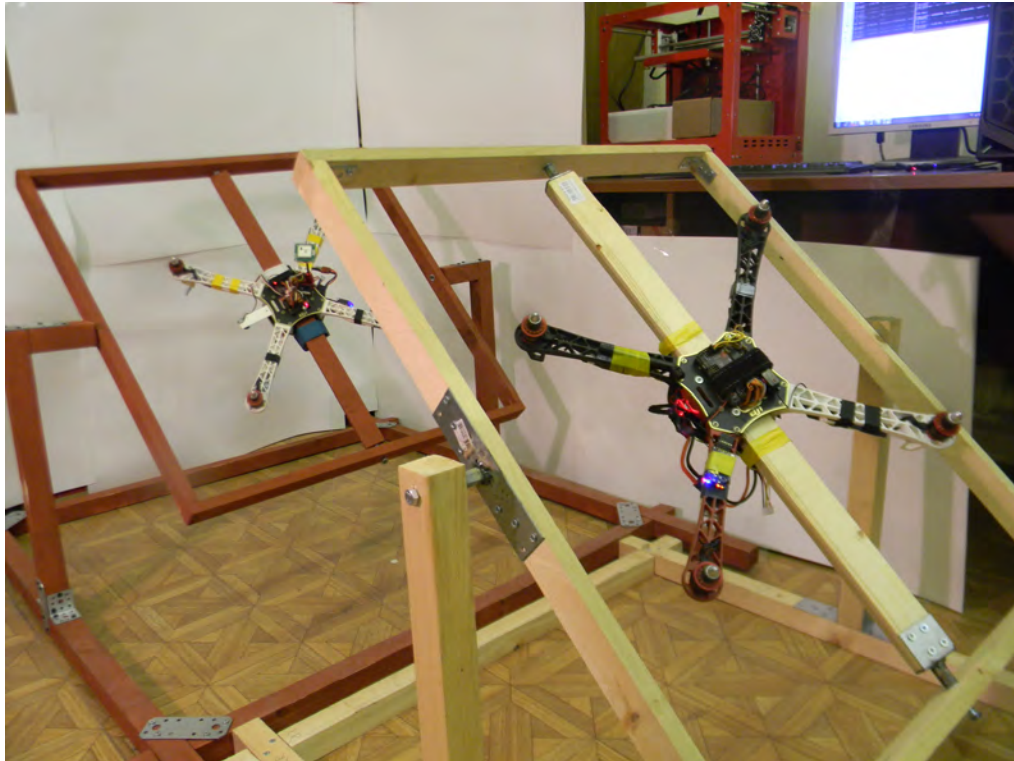


Рисунок 4.20 — Эксперимент по синхронизации на двух квадрокоптерных стендах
«КОМЕКС-1»

Каждый квадрокоптер на лабораторном стенде помимо полетного контроллера (автопилота) на основе Ardupilot имеет ведущий бортовой компьютер Raspberry Pi с операционной системой на основе Debian GNU/Linux. Основные датчики уже включены в автопилот и представляют собой встроенную инерциальную систему, включающую в себя гироскоп, акселерометр и магнитометр. На основе комплексирования данных, полученных с датчиков, формируются значения полетных углов (углов Эйлера) и линейных ускорений. Для обработки данных используется расширенный фильтр Калмана и фильтр Маджвика (нужны ли ссылки??). Также квадрокоптер на стенде имеет GPS-приемник, который может получать информацию о своем

абсолютном положении вне пределов лаборатории для экспериментов в условиях свободного полета. Бортовой компьютер связывается с автопилотом посредством последовательного порта и получает всю доступную информацию с помощью программы, написанной на языке C++. Бортовой компьютер с помощью радиомодемов Xbee связывается с другими бортовыми компьютерами квадрокоптеров и наземными станциями (например, персональными компьютерами). Программа, реализующая взаимодействие с радиомодемами и кодирование передаваемой информации, также написана на языке C++. Для запуска всех указанных программ используются скриптовые языки Bash и Python, позволяющие системе управлять работой остальных системных приложений. Аналогичный функционал для обработки и передачи сигналов реализован для персональных компьютеров на основе Ubuntu Linux и использует графический фреймворк Qt5 для визуализации данных и элементов управления квадрокоптером. Такой подход позволяет не использовать радиоаппаратуру для управления автопилотом квадрокоптеров, а применять для этих целей уже имеющиеся в системе радиомодемы. Таким образом, разработанный тестовый стенд может быть представлен в виде обособленного агента, которого можно включать и выключать из общей сети посредством простого добавления радиомодема, позволяющего легко организовывать информационную сеть между бортовыми компьютерами.

4.6 Выводы по разделу 4

В данном разделе приведены результаты реализации предложенного адаптивного алгоритма управления на основе метода пассивации, а также предложенного адаптивного алгоритма кодирования передаваемой информации в реальной физической системе БЛА типа квадрокоптер. Приведены рекомендации по построению алгоритмов управления с учетом особенностей цифровой реализации полетного контроллера, а также физических особенностей квадрокоптера. Проведенные эксперименты проводились на специально разработанном стенде, позволяющем не только разрабатывать алгоритмы для управления одним квадрокоптером, но и алгоритмов для децентрализованного управления группой квадрокоптеров. Предлагаемый тестовый экспериментальный стенд может быть также использован в учебном процессе, в разделе приведены примеры необходимых шагов (процессов идентификации и построения простейших регуляторов), которые могут быть использованы в качестве лабораторных работ для студентов, обучающихся по соответствующим специальностям, и подготовке операторов БЛА. Основные результаты раздела опубликованы в [2, 4, 8, 10, 12, 13, 15, 16, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены задачи разработки адаптивных законов управления агентами в условиях параметрической неопределенности для обеспечения консенсуса в сети с неизвестной структурой сети. Также решена задача разработки алгоритма кодирования информации, передаваемой агентами друг другу по каналам связи с ограниченной пропускной способностью. Проведено численное моделирование предложенных методов и алгоритмов на примере управления группой квадрокоптеров. Разработан тестовый квадрокоптерный лабораторный стенд, с помощью которого проведены экспериментальные исследования алгоритмов, рассматриваемых в работе.

Первый раздел содержит подробный обзор задач, которые ставятся перед многоагентными системами, а также рассматриваются существующие методы их решения. Рассмотрены алгоритмы адаптивного управления, применяемые в многоагентных системах в условиях полного или частичного отсутствия информации о связях между агентами.

Во втором разделе предлагаются два адаптивных алгоритма управления агентами в сети в условиях неизвестного графа связей, описывающего взаимодействие между узлами сети. В диссертационной работе предлагается два адаптивных алгоритма управления объектами в многоагентных системах, позволяющие обеспечить консенсусное поведение и слежение многоагентной системой в условиях неизвестной структуры сети и неопределенности параметров агентов. Каждый из алгоритмов применим к агентам с различной динамикой. Для алгоритма на основе алгоритма адаптации высокого порядка накладываются достаточно строгие требования к структуре сети, однако область допустимой динамики агентов достаточно широкая. Алгоритм на основе метода пассивации, наоборот, достаточно жесткий при выборе динамики агентов, но структура сети может быть совершенно произвольной. Проведены численные моделирования, показывающие эффективность предложенных алгоритмов.

В третьем разделе представлен алгоритм адаптивного кодирования информации, позволяющий использовать каналы данных с ограниченной пропускной способностью между агентами в сети. Проведены численные моделирования, показывающие зависимость качества функционирования всей системы от скорости передачи данных в канале связи.

В четвертом разделе представлен тестовый стенд, позволяющий реализовать предлагаемые алгоритмы управления для беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер. Представлена физическая реализация адаптивного алгоритма управления агентами на основе

пассификации, а также физическая реализация алгоритма адаптивного кодирования информации. Проведены экспериментальные исследования на базе разработанной установки.

В будущем планируется развитие исследований в области децентрализованного управления агентами в сети. Большой интерес представляет задача реализации физической системы группы квадрокоптеров, осуществляющих совместное движение с использованием предложенных алгоритмов в свободном полете. На основе разработанных алгоритмов и тестового стенда ожидается получение новых и развитие имеющихся методов управления в многоагентных системах.

СЛОВА БЛАГОДАРНОСТИ

Соискатель выражает огромную благодарность научному руководителю профессору Андриевскому Борису Ростиславичу за множество ценных советов, предоставленных материалов, идей для воплощения и всевозможную помощь в научной деятельности. Его рекомендации позволили сформировать и упорядочить фундаментальные знания, способствовали их применению не только в теории, но и на практике, а также научили смело браться за новые задачи. Оказанные поддержку и помощь сложно переоценить, так как они затронули все сферы в работе соискателя: от глобальных научных вопросов до мелких административных.

Также соискатель выражает благодарность профессору Фуртату Игорю Борисовичу за помощь в работе над модификацией алгоритма адаптации высокого порядка, за ряд проведенных ценных лекций, натолкнувших на множество новых и интересных идей в области теории управления.

Соискатель благодарит профессора Фрадкова Александра Львовича за предоставленные многочисленные возможности для профессионального роста соискателя, создание доброжелательного и успешного научного коллектива, а также поддержку всех его членов. Его мудрость как ученого и руководителя позволила и позволяет всецело окунуться в мир науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Томашевич, С. И. Устойчивость мультиагентных линейных скалярных систем и ее зависимость от графа связей [Текст] / С. И. Томашевич // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 2. – С. 72–78.

2 Белявский, А. О. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации [Текст] / А. О. Белявский, С. И. Томашевич // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2016. – Т. 63. – С. 155–181.

3 Передача данных с адаптивным кодированием между квадрокоптерами в формации [Текст] / К. С. Амелин, Б. Р. Андриевский, С. И. Томашевич, А. Л. Фрадков // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2016. – № 62. – С. 188–213.

4 Томашевич, С. И. Двухступенной стенд для исследования алгоритмов управления движением квадрокоптера в условиях порывистого ветра [Текст] / С. И. Томашевич, А. О. Белявский // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2016. – Т. 2, № 92. – С. 50–54.

5 Томашевич, С. И. Управление системой линейных агентов на основе алгоритма адаптации высокого порядка [Текст] / С. И. Томашевич // Автомат. и телемех. – 2017. – № 2. – С. 99–114.

6 Tomashevich, S. Stability and performance of networked control of quadrocopters formation flight [Text] / S. Tomashevich, B. Andrievsky // Proc. 6th Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT 2014), St. Petersburg, Russia. – 2014. – P. 331–336.

7 Andrievsky, B. Passification based signal-parametric adaptive controller for agents in formation [Text] / B. Andrievsky, S. Tomashevich // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, no. 11. – P. 222–226.

8 Amelin, K. Recursive identification of motion model parameters for ultralight UAV [Text] / K. Amelin, S. Tomashevich, B. Andrievsky // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48, no. 11. – P. 233–237.

9 Quadrocopters Formation Control Over the Limited-band Communication Network [Text] / B. Andrievsky, S. Tomashevich, A. L. Fradkov, K. Amelin // IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2015. – Vol. 48, no. 9. – P. 85–90.

- 10 Tomashevich, S. 2DOF indoor testbed for quadrotor identification and control [Text] / S. Tomashevich, A. Belyavskiy // 23rd Saint Petersburg Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016. – 2016. – P. 373–376.
- 11 Adaptive coding for data exchange between quadrotors in the formation [Text] / A. L. Fradkov, S. Tomashevich, B. Andrievsky [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, no. 13. – P. 275–280.
- 12 Tomashevich, S. Passification based simple adaptive control of quadrotor [Text] / S. Tomashevich, A. Belyavskiy // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, no. 13. – P. 281–286.
- 13 Tomashevich, S. Passification based simple adaptive control of quadrotor attitude: Algorithms and testbed results [Text] / S. Tomashevich, A. Belyavskiy, B. Andrievsky // AIP Conf. Proc. – Melville, NY, USA: AIP, 2017. – P. 020161–13.
- 14 Simple adaptive control of quadrotor attitude. Algorithms and experimental results [Text] / S. Tomashevich, A. Fradkov, B. Andrievsky [et al.] // Proc. 25th Mediterran. Conf. Control and Automation (MED 2017), Valletta, Malta. – 2017. – P. 933–938.
- 15 Belyavskiy, A. Application of 2DOF Quadrotor-based Laboratory Testbed for engineering education [Text] / A. Belyavskiy, S. Tomashevich, B. Andrievsky // Proc. 25th Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED 2017), Valletta, Malta. – 2017. – P. 939–944.
- 16 Experimental study on robust output control for quadcopters [Text] / S. Tomashevich, O. Borisov, V. Gromov [et al.] // Proc. 25th Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED 2017), Valletta, Malta. – 2017. – P. 1029–1034.
- 17 Tomashevich, S. Navigation data transfer in a quadrotor formation via a binary communication channel with adaptive coding and data erasure [Text] / S. Tomashevich, A. Belyavsky // Proc. 24th St.Petersburg Intern. Conf. Integrated Navigation Systems (ICINS 2017). – 2017. – P. 1–3.
- 18 Tomashevich, S. Formation control of a group of unmanned aerial vehicles with data exchange over a packet erasure channel [Text] / S. Tomashevich, B. Andrievsky, A. L. Fradkov // Proc. 2018 IEEE Conf. Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS 2018), St. Petersburg, Russia. – 2018. – P. 38–43.
- 19 Robust high-gain generalization of PID controllers with anti-windup compensation [Text] / O. Borisov, S. Tomashevich, V. Gromov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, no. 4. – P. 352–357.

- 20 Проблемы сетевого управления [Текст] / А. Л. Фрадков, М. С. Ананьевский, Н. О. Амелина [и др.]; Под ред. А. Л. Фрадкова. – Ижевск: "Ижевск. ин-т компьют. исслед. 2015. – 329 с.
- 21 Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches [Text] / F. L. Lewis, H. Zhang, K. Hengster-Movric [et al] – London: Springer, 2014. – 307 p.
- 22 Li, Z. Cooperative control of multi-agent systems: A consensus region approach [Text] / Z. Li, Z. Duan // Automation and Control Engineering. – CRC Press: 2014. – 262 p.
- 23 Fax, J. Information flow and cooperative control of vehicle formations [Text] / J. Fax, R. Murray // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 8. – P. 1465–1476.
- 24 Olfati-Saber, R. Consensus and cooperation in network multi-agent system [Text] / R. Olfati-Saber, J. A. Fax, R. M. Murray // Proc. IEEE. – 2007. – Vol. 95. – P. 215–233.
- 25 Olfati-Saber, R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [Text] / R. Olfati-Saber, R. Murray // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 49, no. 9. – P. 1520–1533.
- 26 Pecora, L. M. Synchronization in Chaotic Systems [Text] / L. M. Pecora, T. L. Carroll // Phys. Rev. Lett. – 1990. – Vol. 64. – P. 821–823.
- 27 Pecora, L. M. Master stability functions for synchronized coupled systems [Text] / L. M. Pecora, T. L. Carroll // Physical Review Letters. – 1998. – Vol. 80, no. 10. – P. 2109–2112.
- 28 Mogilner, A. A nonlocal model for a swarm [Text] / A. Mogilner, L. Edelstein-Keshet // J. Math. Biol. – 1999. – Vol. 38. – P. 534–570.
- 29 Topaz, C. M. Swarming patterns in a two-dimensional kinematic model for biological groups [Text] / C. M. Topaz, A. L. Bertozzi // SIAM J. Appl. Math. – 2004. – Vol. 65, no. 1. – P. 152–174.
- 30 Gazi, V. Stability analysis of swarms [Text] / V. Gazi, K. M. Passino // IEEE Trans. Autom. Control. – 2003. – Vol. 48, no. 4. – P. 692–697.
- 31 Ilie, S. Multi-agent approach to distributed ant colony optimization [Text] / S. Ilie, C. Badica // Science of Computer Programming. – 2013. – Vol. 78, no. 1. – P. 762–774.

32 Franchi, E. A multi-agent implementation of social networks [Text] / E. Franchi // Proceedings of WOA 2010 Undicesimo Workshop Nazionale «Dagli Oggetti agli Agentt», Rimini, Italy. – 2010. – P. 1–6.

33 Hexmoor, H. Modeling social norms in multiagent systems [Text] / H. Hexmoor, S. Gunnu, D. Hayes // J. Experimental and Theoretical Artificial Intelligence. – 2006. – Vol. 18, no. 1. – P. 49–71.

34 Gazis, D. C. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow Operations research [Text] / D. C. Gazis, R. Herman, R. W. Rothery // Operation Research. – 1961. – Vol. 9, no. 4. – P. 545–567.

35 Chandler, R. E. Traffic dynamics: studies in car following [Text] / R. E. Chandler, R. Herman, E. W. Montroll // Oper. Res. Inform. – 1958. – Vol. 6, no. 2. – P. 165–184.

36 Newell, G. F. Nonlinear effects in the dynamics of car following [Text] / G. F. Newell // Oper. Res. – 1961. – Vol. 9, no. 2. – P. 209–229.

37 Nebylov, A. V. An Adaptive Algorithm for Estimating the Mutual Arrangement of Small Satellites in a Group [Text] / A. V. Nebylov, A. I. Panferov, V. K. Ponomarev // 1st IFAC Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles (ACNAAV'15). – 2015. – Vol. 48, no. 9. – P. 228–232.

38 Nebylov, A. V. Relative Motion Control of Nano-Satellites Constellation [Text] / A. V. Nebylov, A. M. Padron // 1st IFAC Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles (ACNAAV'15). – 2015. – Vol. 48, no. 9. – P. 245–250.

39 Nebylov, A. Synthesis of a control system for relative motion of closely spaced satellites [Text] / A. Nebylov, A. Panferov, S. Brodsky // J. Aeronautics & Aerospace Engineering. – 2017. – Vol. 6, no. S2. – P. 79.

40 Porfiri, M. Tracking and formation control of multiple autonomous agents: A two-level consensus approach [Text] / M. Porfiri, D. Roberson, D. Stilwell // Automatica. – 2007. – Vol. 43, no. 8. – P. 1318–1328.

41 Ni, W. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies [Text] / W. Ni, D. Cheng // Systems & Control Letters. – 2010. – Vol. 59, no. 3–4. – P. 209–217.

42 Distributed containment control of multi-agent systems with general linear dynamics in the presence of multiple leaders [Text] / Z. Li, W. Ren, X. Liu [et al.] // Int. J. Robust and Nonlinear Control. – 2013. – Vol. 23. – P. 534–547.

43 Task allocation algorithm for the cooperating group of light autonomous unmanned aerial vehicles [Text] / K. Amelin, N. Amelina, O. Granichin [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2013. – Vol. 2, no. 1. – P. 152–155.

44 Decentralized control of cooperative robotic system [Text] / V. Sheludko, V. Putov, A. Putov [et al.] // Proc. 2016 IEEE 5th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches, Science. Education. Innovations. – 2017. – P. 15–18.

45 Jadbabaie, A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbour rules [Text] / A. Jadbabaie, J. Lin, A. S. Morse // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2003. – Vol. 48. – P. 988–1001.

46 Фрадков, А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта [Текст] / А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 1974. – № 12. – С. 96–103.

47 Фрадков, А. Л. Квадратичные функции Ляпунова в задаче адаптивной стабилизации линейного динамического объекта [Текст] / А. Л. Фрадков // Сибирский математический журнал. – 1976. – Т. 17, № 2. – С. 436–445.

48 Деревицкий, Д. П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления [Текст] / Д.П. Деревицкий, А. Л. Фрадков – М.: Наука, 1981. – 216 с.

49 Фомин, В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами [Текст] / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат литературы, 1981. – С. 448.

50 Борцов, Ю. А. Электро-механические системы с адаптивным и модальным управлением [Текст] / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 216 с.

51 Ioannou, P. Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control [Text] / P. Ioannou, P. Kokotović // Automatica. – 1984. – Vol. 20, no. 5. – P. 583–594.

52 Андриевский, Б. Р. Алгоритмы скоростного градиента в задачах управления и адаптации [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. А. Стоцкий, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 1988. – № 12. – С. 3–39.

53 Åström, K. Adaptive Control [Text] / K. Åström, B. Wittenmark – Addison-Wesley, 1989. – 573 p.

54 Фрадков, А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: Бесписковые методы [Текст] / А. Л. Фрадков – М.: Наука, 1990. – 292 с.

55 Morse, A. S. High-order parameter tuners for the adaptive control of nonlinear systems [Text] / A. S. Morse; Ed. by A. Isidori, T. J. Tarn. // *Systems, Models and Feedback: Theory Appl.* – Birkhauser, 1992. – P. 339–364.

56 Никифоров, В. О. Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой [Текст] / В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков // *Автомат. и телемех.* – 1994. – № 9. – С. 3–22.

57 Nikiforov, V. Robust high-order tuner of simplified structure [Text] / V. Nikiforov // *Automatica.* – 1999. – Vol. 35, no. 8. – P. 1409–1415.

58 Мирошник, И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами [Текст] / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.

59 Фрадков, А. Л. Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных от выхода [Текст] / А.Л. Фрадков // *Докл. РАН.* – 1994. – Т. 337, № 5. – С. 592–594.

60 Цыкунов, А. М. Модифицированный адаптивный алгоритм высокого порядка для управления линейным объектом по выходу [Текст] / А. М. Цыкунов // *Автомат. и телемех.* – 2006. – Т. 67, № 8. – С. 143–153.

61 Andrievskii, B. R. Feedback Kalman–Yakubovich Lemma and its applications to adaptive control [Text] / B. R. Andrievskii, A. N. Churilov, A. L. Fradkov // *Proc. 35th IEEE Conf. Dec. Control.* Kobe, Japan: IEEE Press. – 1996. – P. 4537–4542.

62 Фуртат, И. Б. Модифицированный алгоритм адаптации высокого порядка для систем с запаздыванием по состоянию [Текст] / И. Б. Фуртат, А. М. Цыкунов // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та.* – 2006. – № 1. – С. 24–33.

63 Nikiforov, V. Nonlinear adaptive controller with integral action [Text] / V. Nikiforov, K. Voronov // *IEEE Trans. Autom. Control.* – 2001. – Vol. 46, no. 12. – P. 2035–2037.

64 Бобцов А. А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова [Текст] / А. А. Бобцов, Н. А. Николаев // *Автомат. и телемех.* – 2005. – № 1. – С. 118–129.

65 Бобцов, А. А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением [Текст] / А. А. Бобцов // *Автомат. и телемех.* – 2008. – № 8. – С. 25–32.

66 Бобцов, А. А. Адаптивное управление по выходу с компенсацией гармонического смещенного возмущения [Текст] / А. А. Бобцов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2009. – Т. 1. – С. 45–48.

67 Мышляев, Ю. И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе настраиваемого скользящего режима [Текст] / Ю. И. Мышляев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – С. 11–16.

68 Фуртат, И. Б. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью [Текст] / И. Б. Фуртат, А. М. Цыкунов // Автомат. и телемех. – 2010. – Т. 71, № 6. – С. 109–118.

69 Бобцов, А. А. Компенсация гармонического возмущения для параметрически и функционально не определенного нелинейного объекта [Текст] / А. А. Бобцов, А. С. Кремлев, А. А. Пыркин // Автомат. и телемех. – 2011. – № 1. – С. 121–129.

70 Бобцов, А. А. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу [Текст] / А. А. Бобцов – СПб: Наука, 2011. – С. 174.

71 Бобцов, А.А. Адаптивное управление по выходу: проблематика, прикладные задачи и решения [Текст] / А. А. Бобцов, В. О. Никифоров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Т. 1, № 83. – С. 1–14.

72 Bobtsov, A. A. Simple output feedback adaptive control based on passification principle [Text] / A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin, S. A. Kolyubin // Intern. J. of Adaptive Control and Signal Processing. – 2014. – Vol. 28, no. 7-8. – P. 620–632.

73 Мышляев, Ю. И. Адаптивное управление линейными двухкаскадными объектами (задача слежения) [Текст] / Ю. И. Мышляев, Я. Тар, Ч. Пью // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 3-1. – С. 37–41.

74 Адаптивное управление роботизированными подвижными объектами [Текст] / Б. Р. Андриевский, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2016. – Т. 5. – С. 61–77.

75 Адаптивное управление продольным движением беспилотного летательного аппарата [Текст] / В. В. Путов, В. Ф. Нгуен, А. В. Путов [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2017. – № 4. – С. 35–43.

76 Адаптивная система управления нелинейным упругим летательным аппаратом, построенная по выходу методом последовательного компенсатора [Текст] / В. В. Путов,

В. Н. Шелудько, В. Ф. Нгуен [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2018. – № 5. – С. 61–67.

77 Ishii, H. Limited data rate in control systems with networks [Text] / H. Ishii, B. Francis – New York: Springer-Verlag, 2002. – 180 p.

78 A moving horizon approach to networked control system design [Text] / G. Goodwin, H. Haimovich, D. Quevedo [et al.] // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 49, no. 9. – P. 1427–1445.

79 De Persis, C. Practical encoders for controlling nonlinear systems under communication constraints [Text] / C. De Persis, D. Nešić // Proc. 44th IEEE Conf. Decision Control, and European Control Conf. (CDC-ECC 2005), Seville, Spain. – 2005. – P. 434–439.

80 Networked sensor management and data rate control for tracking maneuvering targets [Text] / R. Evans, V. Krishnamurthy, G. Nair [et al.] // IEEE Trans. Signal Process. – 2005. – Vol. 53, no. 6. – P. 1979–1991.

81 Джунусов, И. А. Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам [Текст] / И. А. Джунусов, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 2011. – Т. 72, № 8. – С. 41–52.

82 Джунусов И. А. Адаптивная синхронизация сети взаимосвязанных нелинейных систем Лурье [Текст] / И. А. Джунусов, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 2009. – № 7. – С. 111–126.

83 Zheng, Y. Networked Coordination-Based Distributed Model Predictive Control for Large-Scale System [Text] / Y. Zheng, S. Li, H. Qiu // IEEE Trans. Control Syst. Technol. – 2013. – Vol. 21, no. 3. – P. 991–998.

84 Pasqualetti, F. Controllability metrics, limitations and algorithms for complex networks [Text] / F. Pasqualetti, S. Zampieri, F. Bullo // IEEE Trans. Control Netw. Syst. – 2014. – Vol. 1, no. 1. – P. 40–52.

85 Xiaofeng, W. Distributed control of uncertain networked systems: A decoupled design [Text] / W. Xiaofeng, N. Hovakimyan // IEEE Trans. Autom. Control. – 2013. – Vol. 58, no. 10. – P. 2536–2549.

86 Antonelli, G. Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control [Text] / G. Antonelli // IEEE Control Syst. Mag. – 2013. – Vol. 33, no. 1. – P. 76–88.

87 DeLellis, P. Adaptive pinning control of networks of circuits and systems in Lur'e form [Text] / P. DeLellis, M. di Bernardo, F. Garofalo // IEEE Trans. Circuits Syst. I. – 2013. – Vol. 60, no. 11. – P. 3033–3042.

88 Проскурников, А. В. Частотные критерии консенсуса в многоагентных системах с нелинейными секторными связями [Текст] / А. В. Проскурников // Автомат. и телемех. – 2014. – № 11. – С. 110–126.

89 Проскурников, А. В. Консенсус в нелинейных стационарных сетях с идентичными агентами [Текст] / А. В. Проскурников // Автомат. и телемех. – 2015. – № 9. – С. 44–63.

90 Проскурников, А. В. Задачи и методы сетевого управления [Текст] / А. В. Проскурников, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 2016. – № 10. – С. 3–39.

91 Андриевский, Б. Р. Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. А. Бобцов, А. Л. Фрадков – Москва, Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – 336 с.

92 Topological feedback entropy and nonlinear stabilization [Text] / G. Nair, R. Evans, I. Mareels [et al.] // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 49, no. 9. – P. 1585–1597.

93 Bazzi, L. Endcoding complexity versus minimum distance [Text] / L. Bazzi, S. Mitter // IEEE Trans. Inf. Theory. – 2005. – Vol. 51, no. 6. – P. 2103–2112.

94 Feedback control under data rate constraints: an overview [Text] / G. Nair, F. Fagnani, S. Zampieri [et al.] // Proc. IEEE. – 2007. – Vol. 95, no. 1. – P. 108–137.

95 Matveev, A. Estimation and Control over Communication Networks [Text] / A. Matveev, A. Savkin – Boston: Birkhäuser, 2009. – 533 p.

96 Андриевский, Б. Р. Управление и наблюдение через каналы связи с ограниченной пропускной способностью [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков // Гироскопия и навигация. – 2009. – Т. 4, № 67. – С. 103–114.

97 Андриевский, Б. Р.. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычислений и связи [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. С Матвеев., А. Л Фрадков // Автомат. и телемех. – 2010. – № 4. – С. 34–39.

98 Nair, G. Stabilizability of stochastic linear systems with finite feedback data rates [Text] / G. Nair, R. Evans // SIAM J. Control Optim. – 2004. – Vol. 43, no. 2. – P. 413–436.

99 Fradkov, A. Chaotic observer-based synchronization under information constraints [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky, R. Evans // Physical Review E. – 2006. – Vol. 73. – P. 066209.

100 Fradkov, A. State estimation of passifiable Lurie systems via limited-capacity communication channel [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky // Proc. 35th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009), Porto, Portugal. – IEEE, 2009. – P. 3039–3044.

101 Fradkov, A. Estimation and control under information constraints for LAAS helicopter benchmark [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky, D. Peaucelle // IEEE Trans. Control Syst. Technol. – 2010. – Vol. 18, no. 5. – P. 1180–1187.

102 Fradkov, A. L. Multipendulum mechatronic setup: Design and experiments [Text] / A. L. Fradkov, B. Andrievsky, K. B. Boykov // Mechatronics. – 2012. – Vol. 22, no. 1. – P. 76–82.

103 Andrievsky, B. Adaptive coding for maneuvering UAV tracking over the digital communication channel [Text] / B. Andrievsky, A. L. Fradkov // Proc. 6th Intern. Congress Ultra Modern Telecommunic. and Control Systems and Workshops (ICUMT 2014), St. Petersburg, Russia. – 2014. – P. 236–241.

104 Cover, T. Elements of Information Theory [Text] / T. Cover, J. Thomas – New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1991. – 542 p.

105 Rizzo, L. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols [Text] / L. Rizzo // Computer Communication Review. – 1997. – Vol. 27, no. 2. – P. 24–36.

106 Tatikonda, S. Control over noisy channels [Text] / S. Tatikonda, S. Mitter // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 49, no. 7. – P. 1196–1201.

107 Shokrollahi, A. Raptor codes [Text] / A. Shokrollahi // IEEE Trans. Inf. Theory. – 2006. – Vol. 52, no. 6. – P. 2551–2567.

108 Köetter, R. Coding for errors and erasures in random network coding [Text] / R. Köetter, F. Kschischang // IEEE Trans. Inf. Theory. – 2008. – Vol. 54, no. 8. – P. 3579–3591.

109 Patterson, S. Convergence rates of distributed average consensus with stochastic link failures [Text] / S. Patterson, B. Bamieh, A. El Abbadi // IEEE Trans. Autom. Control. – 2010. – Vol. 55, no. 4. – P. 880–892.

110 Diwadkar, A. Robust synchronization in nonlinear network with link failure uncertainty [Text] / A. Diwadkar, U. Vaidya // Proc. 50th IEEE Conf. Decision and Control and European Control Conf. (CDC-ECC 2011), Orlando, FL, USA. – 2011. – P. 6325–6330.

111 Wang, J. Coding scheme based on spherical polar coordinate for control over packet erasure channel [Text] / J. Wang, Z. Yan // Int. J. Robust and Nonlinear Control. – 2014. – Vol. 24, no. 7. – P. 1159–1176.

112 Амелина, Н. О. Мультиагентные технологии, адаптация, самоорганизация, достижение консенсуса [Текст] / Н. О. Амелина // Стохаст. оптимизация в информатике. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 149–185.

113 Consensus based formation control and trajectory tracing of multi-agent robot systems [Text] / Z. Wu, Z. Guan, X. Wu [et al.] // J. of Intelligent Robot. Syst. – 2007. – Vol. 48, no. 3. – P. 397–410.

114 Cheng, Z. Consensus and rendezvous predictive control for multi-agent systems with input constraints [Text] / Z. Cheng, H. T. Zhang, M. C. Fan // Proc. 33rd Chinese Control Conf. (CCC). – 2014. – P. 1438–1443.

115 Approximate consensus in stochastic networks with application to load balancing [Text] / N. Amelina, A. L. Fradkov, Y. Jiang [et al.] // IEEE Trans. Inf. Theory. – 2015. – Vol. 61, no. 4. – P. 1739–1752.

116 Leonard, N. E. Virtual leaders, artificial potentials, and coordinated control of groups [Text] / N. E. Leonard, E. Fiorelli // Proc. 40 IEEE Conf. Decision Control (CDC 2001). – 2001. – P. 2968–2973.

117 Фуртат И. Б. Адаптивное управление динамической сетью с линейными подсистемами [Текст] / И. Б. Фуртат // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управл., вычислит. техника и информатика. – 2012. – № 1. – С. 69–78.

118 Chen, Y. Cooperative control of multi-agent moving along a set of given curves [Text] / Y. Chen, Y. Yuping Tian // J. Syst. Sci. Complex. – 2011. – Vol. 24. – P. 631–646.

119 Парсегов, С. Э. Сцепление координат и иерархические алгоритмы в задаче равноудаленного расположения агентов на отрезке [Текст] / С. Э. Парсегов // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2012. – № 39. – С. 264–287.

120 Zhongkui, L. Leader-follower consensus of multi-agent systems [Text] / L. Zhongkui, D. Zhisheng, H. Lin // Proc. American Control Conf. (ACC 2009). – 2009. – P. 3256–3261.

121 Leader selection in multi-agent systems for smooth convergence via fast mixing [Text] / A. Clark, B. Alomair, L. Bushnell [et al.] // Proc. IEEE 51st Annual Conf. Decision and Control (CDC 2012). – 2012. – P. 818–824.

122 Olfati-Saber, R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory [Text] / R. Olfati-Saber // IEEE Trans. Autom. Control. – 2006. – Vol. 51, no. 3. – P. 401–420.

- 123 Saber, R. Flocking with obstacle avoidance: Cooperation with limited communication in mobile networks [Text] / R. Saber, R. Murray // Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control (CDC 2003). – 2003. – Vol. 2. – P. 2022–2028.
- 124 Ribichini, G. Efficient coordination of multiple-aircraft systems [Text] / G. Ribichini, E. Frazzoli // Proc. 42nd IEEE Conf. Decision and Control (CDC 2003). – 2003. – Vol. 1. – P. 1035–1040.
- 125 Coverage control for mobile sensing networks [Text] / J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas [et al.] // IEEE Trans. Robot. Autom. – 2004. – Vol. 20, no. 2. – P. 243–255.
- 126 Фрадков, А. Л. Робастное управление сетью электрических генераторов [Текст] / А. Л. Фрадков, И. Б. Фуртат // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 11. – С. 100–113.
- 127 Козлов, В. Н. Синтез координирующего робастного управления взаимосвязанными синхронными генераторами [Текст] / В. Н. Козлов, В. Н. Шашихин // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 20–26.
- 128 Ren, W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control [Text] / W. Ren – London: Springer-Verlag, 2008. – 319 p.
- 129 Агаев, Р. П. Согласование характеристик в многоагентных системах и спектры лапласовских матриц орграфов [Текст] / Р. П. Агаев, П. Ю. Чеботарёв // Автомат. и телемех. – 2009. – Т. 70, № 3. – С. 136–151.
- 130 Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика [Текст] / А. Л. Фрадков – СПб.: Наука, 2003. – 207 p.
- 131 On self-synchronization and controlled synchronization [Text] / I. I. Blekhman, A. L. Fradkov, H. Nijmeijer [et al.] // Systems Control Letters. – 1997. – Vol. 31. – P. 299–305.
- 132 Управление мехатронными вибрационными установками [Текст] / Б. Р. Андриевский, И. И. Блехман, Ю. А. Борцов [и др.]; Под ред. И. И. Блехмана, А. Л. Фрадкова. – СПб.: Наука, 2001. – С. 278.
- 133 Леонов, Г. А. Математические проблемы теории фазовой синхронизации [Текст] / Г. А. Леонов, В. Б. Смирнова – СПб.: Наука, 2000. – 400 p.
- 134 Lindsey. W. C. Synchronization Systems in Communication and Control [Text] / W. C. Lindsey – Carmel: Pearson Education, 1972. – 704 p.
- 135 Rosenblum, M. G. Phase synchronization of chaotic oscillators [Text] / M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky, J. Kurths // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 79. – P. 1804–1807.

- 136 Афраимович, В. С. Стохастическая синхронизация колебаний в диссипативных системах [Текст] / В. С. Афраимович, Н. Н. Веричев, М. И. Рабинович // Изв. вузов. Радиофизика. – 1986. – Т. 29, № 9. – С. 1050–1060.
- 137 Generalized synchronization of chaos [Text] / N. F. Rulkov, M. Sushchik, L. S., Tsimring [et al.] // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 51. – P. 980–994.
- 138 Fax, J. A. Optimal and cooperative control of vehicle formations. PhD dissertation. – California Institute of Technology, Pasadena, California. – 2002.
- 139 Godsil, C. R. G. Algebraic graph theory [Text] / C. R. G. Godsil – N.Y.: Springer-Verlag, 2001. – 443 p.
- 140 Харари, Ф. Теория графов [Текст] / Ф. Харари – М.: Мир, 1973. – 301 с
- 141 Chung, F. R. K. Spectral graph theory [Text] / F. R. K. Chung // Regional Conf. Series in Mathematics. – Providence, USA: Amer. Math. Soc., 1997. – Vol. 92. – 212 p.
- 142 Observability and controllability verification in multi-agent systems through decentralized Laplacian spectrum estimation [Text] / M. Franceschelli, S. Martini, M. Egerstedt [et al.] // Proc. 49th IEEE Conf. Decision and Control (CDC 2010). – 2010. – P. 5775–5780.
- 143 Franceschelli, M. Decentralized Laplacian eigenvalues estimation for networked multi-agent systems [Text] / M. Franceschelli, A. Giua, C. Seatzu // Proc. 48th IEEE Conf. Decision Control and 28th Chinese Control Conf. (CDC/CCC 2009), Shanghai, China. – 2009. – P. 2717–2722.
- 144 Поляк, Б. Т. Устойчивость и робастная устойчивость однотипных систем [Текст] / Б. Т. Поляк, Я. З. Цыпкин // Автомат. и телемех. – 1996. – Т. 57, № 11. – С. 91–104.
- 145 Агаев, Р. П. Остовные леса орграфа и их применение [Текст] / Р. П. Агаев, П. Ю. Чеботарёв // Автомат. и телемех. – 2001. – Т. 62, № 3. – С. 108–133.
- 146 Агаев, Р. П. Матрица максимальных исходящих лесов орграфа и ее применения [Текст] / Р. П. Агаев, П. Ю. Чеботарёв // Автомат. и телемех. – 2000. – Т. 61, № 9. – С. 15–43.
- 147 Ren, W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies [Text] / W. Ren, R. W. Beard // IEEE Trans. Autom. Control. – 2005. – Vol. 50, no. 5. – P. 655–661.

148 Wen, G. Distributed consensus of linear multi-agent systems with switching directed topologies [Text] / G. Wen, V. Ugrinovskii // Proc. Australian Control Conf. AUCC 2014). – 2014. – P. 146–151.

149 Guanghui, W. Leader-following consensus control for linear multi-agents systems with switching directed topologies [Text] / W. Guanghui, H. Guoqiang, Y. Wenwu // Proc. 10th IEEE Intern. Conf. on Control and Automation (ICCA 2013). – 2013. – P. 111–116.

150 Xiao, F. State consensus for multi-agent systems with switching topologies and time-varying delays [Text] / F. Xiao, L. Wang // Intern. J. Control. – 2006. – Vol. 79, no. 10. – P. 1277–1284.

151 Proskurnikov, A. Consensus in switching symmetric networks of first-order agents with delayed relative measurements [Text] / A. Proskurnikov // Proc. IEEE 52nd Annual Conf. on Decision and Control (CDC 2013). – 2013. – P. 917–921.

152 Proskurnikov, A. Average consensus in networks with nonlinearly delayed couplings and switching topology [Text] / A. Proskurnikov // Automatica. – 2013. – Vol. 49, no. 9. – P. 2928–2932.

153 Randomly changing leader-following consensus control for Markovian switching multi-agent systems with interval time-varying delays [Text] / M. Parka, O. Kwona, J. H. Park [et al.] // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. – 2014. – Vol. 12. – P. 117–131.

154 Proskurnikov, A. V. Consensus between nonlinearly coupled delayed agents [Text] / A. V. Proskurnikov // Proc. Intern. Physics and Control Conf. (PhysCon-2013). – 2013. – P. 693–698.

155 Proskurnikov, A. V. The Popov criterion for consensus between delayed agents [Text] / A. V. Proskurnikov // IFAC Proc. Volumes. – 2013. – Vol. 46, no. 23. – P. 693–698.

156 Adaptive consensus control for a class of nonlinear multiagent time-delay systems using neural networks [Text] / C. Chen, G. X. Wen, Y. J. Liu [et al.] // IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. – 2014. – Vol. 25, no. 6. – P. 1217–1226.

157 Consensus design for continuous-time multi-agent systems with communication delay [Text] / Z. Wang, K. You, J. Xu [et al.] // J. of Systems Science and Complexity. – 2014. – Vol. 27, no. 4. – P. 701–711.

158 Yu W. Some necessary and sufficient conditions for second-order consensus in multi-agent dynamical systems [Text] / W. Yu, G. Chen, M. Cao // Automatica. – 2010. – Vol. 46, no. 6. – P. 1089–1095.

159 Consensus of multiagent systems and synchronization of complex networks: A unified viewpoint [Text] / Z. Li, Z. Duan, G. Chen [et al.] // IEEE Trans. Circuits Syst. I. – 2010. – Vol. 57, no. 1. – P. 213–224.

160 Hara, S. Consensus in hierarchical multi-agent dynamical systems with low-rank interconnections: analysis of stability and convergence rates [Text] / S. Hara, H. Shimizu, T. H. Kim // Proc. Amer. Control Conf. (ACC 2009). – 2009. – P. 5192–5197.

161 Проскурников, А. В. Частотные критерии консенсуса в многоагентных системах с нелинейными секторными связями [Текст] / А. В. Проскурников // Автомат. и телемех. – 2014. – Т. 75, № 11. – С. 110–126.

162 Hara, S. Stability analysis of systems with generalized frequency variables [Text] / S. Hara, H. Tanaka, T. Iwasaki // IEEE Trans. Autom. Control. – 2014. – Vol. 59, no. 2. – P. 313–326.

163 Бесекерский, В. А. Теория автоматических систем. Изд. 4-е, перераб. и доп. [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – СПб: «Профессия», 2003. – 768 с.

164 Selivanov, A. Robust and adaptive passification based consensus control of dynamical networks [Text] / A. Selivanov, A. L. Fradkov, I. Junussov // IFAC Proc. Volumes. – 2013. – Vol. 46, no. 11. – P. 707–711.

165 Фуртат, И. Б. Консенсусное управление линейной динамической сетью по выходу с компенсацией возмущений [Текст] / И. Б. Фуртат // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 12–18.

166 Consensus of multi-agent systems with general linear and lipschitz nonlinear dynamics using distributed adaptive protocols [Text] / Z. Li, W. Ren, X. Liu [et al.] // IEEE Trans. Autom. Control. – 2012. – Vol. 58, no. 7. – P. 1786–1791.

167 Li, Z. Distributed consensus of linear multi-agent systems with adaptive dynamic protocols [Text] / Z. Li, W. Ren, X. Liu // Automatica. – 2013. – Vol. 49, no. 7. – P. 1986–1995.

168 Селиванов, А. А. Управление синхронизацией сетей с нелинейностями и запаздывающими связями [Текст] / А. А. Селиванов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2014. – Т. 1, № 3. – С. 265–271.

169 Hara, S. Eigenvector-based intergroup connection of low rank for hierarchical multi-agent dynamical systems [Text] / S. Hara, D. Tsubakino // Syst. Control Lett. – 2012. – Vol. 61, no. 2. – P. 354–361.

170 Чурилов, А. Н. Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам [Текст] / А. Н. Чурилов, А. В. Гессен – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2004. – 148 с.

171 Linear Matrix Inequalities in system and control theory [Text] / S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron [et al.] // Studies in Applied Mathematics. – Philadelphia: SIAM, 1994. – Vol. 15. – 193 p.

172 Semsar-Kazerooni, E. Optimal consensus seeking in a network of multiagent systems: an LMI approach [Text] / E. Semsar-Kazerooni, K. Khorasani // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. – 2010. – Vol. 40, no. 2. – P. 540–547.

173 Atassi, A. N. A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems [Text] / A. N. Atassi, H. K. Khalil // IEEE Trans. Autom. Control. – 1999. – Vol. 44, no. 9. – P. 1672–1687.

174 Фуртат, И. Б. Робастное управление определенным классом неминимально-фазовых динамических сетей [Текст] / И. Б. Фуртат // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 35–48.

175 Брусин, В. А. Об одном классе сингулярно возмущенных адаптивных систем. I [Текст] / В. А. Брусин // Автомат. и телемех. – 1995. – Т. 56, № 4. – С. 552–559.

176 Furtat, I. B. Robust control of multi-machine power systems with compensation of disturbances [Text] / I. B. Furtat, A. L. Fradkov // Electr. Power Energy Syst. – 2015. – Vol. 73. – P. 584–590.

177 Fradkov, A. L. Passification of nonsquare linear systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma [Text] / A. L. Fradkov // Europ. J. Control. – 2003. – Vol. 6. – P. 573–582.

178 Андриевский, Б. Р. Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 2006. – № 11. – С. 3–37.

179 Андриевский, Б. Р. Новые результаты по применению метода пассивации. Обзор [Текст] / Б. Р. Андриевский, А. А. Селиванов // Автомат. и телемех. – 2018. – № 6. – С. 3–48.

180 Peaucelle, D. Passification-based adaptive control of linear systems: Robustness issues [Text] / D. Peaucelle, A. Fradkov, B. Andrievsky // Intern. J. of Adaptive Control and Signal Processing. – 2008. – Vol. 22, no. 6. – P. 590–608.

- 181 Peaucelle, D. Robust adaptive L_2 -gain control of polytopic MIMO LTI systems – LMI results [Text] / D. Peaucelle, A. Fradkov // Systems & Control Letters. – 2008. – Vol. 57, no. 11. – P. 881–887.
- 182 Емельянов, С. В Новый класс алгоритмов скольжения второго порядка [Текст] / С. В Емельянов, С. К. Коровин, Л. В. Левантовский // Матем. моделирование. – 1990 – Т. 2, № 3. – С. 89–100.
- 183 Levant, A. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control [Text] / A. Levant // Int. J. Control. – 1993. – Vol. 58, no. 6. – P. 1247–1263.
- 184 Adaptive second-order sliding mode control with uncertainty compensation [Text] / G. Bartolini, A. Levant, A. Pisano [et al.] // Intern. J. Control. – 2016. – Vol. 89, no. 9. – P. 1747–1758.
- 185 Quevedo, D. Control over unreliable networks affected by packet erasures and variable transmission delays [Text] / D. Quevedo, E. Silva, G. Goodwin // IEEE J. Sel. Areas Commun. – 2008. – Vol. 26, no. 4. – P. 672–685.
- 186 Quevedo, D. Design of multiple actuator-link control systems with packet dropouts [Text] / D. Quevedo, E. Silva, D. Nešić // IFAC Proc. Volumes. – 2008. – Vol. 41, no. 2. – P. 6642–6647.
- 187 Andrievskiy, B. Numerical evaluation of controlled synchronization for chaotic Chua systems over the limited-band data erasure channel [Text] / B. Andrievskiy // Cybernetics and Physics. – 2016. – Vol. 5, no. 2. – P. 43–51.
- 188 Andrievsky, B. Adaptive coding for position estimation in formation flight control [Text] / B. Andrievsky, A. Fradkov // Proc. IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2010), Antalya, Turkey. – 2010. –P. 72–76.
- 189 Goodman, D. Theory of an adaptive quantizer [Text] / D. Goodman., A. Gersho // IEEE Trans. Commun. – 1974. – Vol. 22, no. 8. – P. 1037–1045.
- 190 Andrievsky B. Adaptive coding for transmission of position information over the limited-band communication channel [Text] / B. Andrievsky // Proc. 9th IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP'2007), St. Petersburg, Russia. – 2007. – Vol. 40, no. 13. – P. 447–452.
- 191 Andrievsky, B. State estimation over the limited-band communication channel for pitch motion control of LAAS Helicopter benchmark [Text] / B. Andrievsky, A. Fradkov, D. Peaucelle

// Proc. 17th IFAC Symp. Aut. Contr. Aerospace (ACA'2007), Toulouse, France. 2007. – Vol. 40, no. 7. – P. 407–412.

192 Adaptive delta-modulation coding for networked controlled systems [Text] / F. Gomez-Estern, C. Canudas de Wit, F. Rubio [et al.] // Proc. Amer. Contr. Conf. (ACC 2007), N.Y., USA. – 2007. – P. 4911–4916.

193 Tatikonda, S. Control under communication constraints [Text] / S. Tatikonda, S. Mitter // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2004. – Vol. 49, no. 7. – P. 1056–1068.

194 Nair, G. State estimation via a capacity-limited communication channel [Text] / G. Nair, R. Evans // Proc. 36th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'97), San Diego, USA. – 1997. – P. 866–871.

195 Nair, G. Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates [Text] / G. Nair, R. Evans // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 585–593.

196 Nair, G. Stabilising decentralised linear systems under data rate constraints [Text] / G. Nair, R. Evans, P. Caines // Proc. 43rd IEEE Conf. on Decision and Control (CDC 2004), Atlantis, Bahamas. – 2004. – P. 3992–3997.

197 Fradkov, A. Synchronization of passifiable Lurie systems via limited-capacity communication channel [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky, R. Evans // IEEE Trans. Circuits Syst. I. – 2009. – Vol. 56, no. 2. – P. 430–439.

198 Fradkov, A. Controlled synchronization under information constraints [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky, R. Evans // Physical Review E. – 2008. – Vol. 78. – P. 036210 1–6.

199 Fradkov, A. Passification based synchronization of nonlinear systems under communication constraints [Text] / A. Fradkov, B. Andrievsky // IFAC Proc. Volumes. – 2011. – Vol. 44, no. 1. – P. 6562–6566.

200 Fradkov, A. L. Passification based synchronization of nonlinear systems under communication constraints and bounded disturbances [Text] / A. L. Fradkov, B. Andrievsky, M. S. Ananyevskiy // Automatica. – 2015. – Vol. 55. – P. 287–293.

201 Luukkonen, T. Modeling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics [Электронный ресурс] // sal.aalto.fi: сайт университета Аалто, Эспоо, Финляндия. 2018. URL: http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf (дата обращения: 23.09.2018).

202 Fantoni, I. Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems. Series: Communications and Control Engineering [Text] / I. Fantoni, R. Lozano / Ed. by E. Sontag, M. Thoma – London: Springer-Verlag Ltd., 2002. – 295 p.

203 Altug, E. Control of a quadrotor helicopter using visual feedback [Text] / E. Altug, J. Ostrowski, R. Mahony // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2002), Washington, DC, USA. – 2002. – P. 72–76.

204 Castillo, G. P. Modelling and Control of Mini-Flying Machines. Series: Advances in Industrial Control [Text] / G. P. Castillo, R. Lozano, A. E. Dzul – Springer-Verlag Ltd., 2005. – 252 p.

205 Das, A. Dynamic Inversion of Quadrotor with Zero-Dynamics Stabilization [Text] / A. Das, K. Subbarao, F. Lewis // Proc. 17th IEEE Intern. Conf. on Control Applications, Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2008), San Antonio, USA. – 2008. – Vol. 3, no. 3. – P. 303–314.

206 Janusz, W. C. Model identification and data fusion for the purpose of the altitude control of the VTOL aerial robot [Text] / W. C. Janusz, R. Czyba, G. Szafranski // Proc. 2nd IFAC Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS 2013), Compiegne, France. – 2013. – Vol. 46, no. 30. – P. 263–269.

207 A platform for aerial robotics research and demonstration: The Flying Machine Arena [Text] / S. Lupashin, M. Hehn, M. W. Mueller [et al.] // Mechatronics. – 2014. – Vol. 24, no. 1. – P. 41–54.

208 Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л. Льюнг – Москва: Наука, 1991. – 432 с.

209 Barkana, I. Parallel feedforward and simplified adaptive control [Text] / I. Barkana // Int J. Adaptive Control and Signal Processing. – 1987. – Vol. 1, no. 2. – P. 95–109.

210 Деревицкий, Д. П. Две модели для анализа динамики алгоритмов адаптации [Текст] / Д. П. Деревицкий, А. Л. Фрадков // Автомат. и телемех. – 1974. – № 1. – С. 67–75.

211 Кулешов, С. В. Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных [Текст] / С. В. Кулешов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 17–20.