

Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук Фомичева Василия Владимировича
на диссертационную работу Хомутова Дмитрия Константиновича
«Методы согласования характеристик в многоагентных системах с запаздыванием и
несвязной сетью»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Актуальность исследования

Представленная работа посвящена актуальной задаче анализа свойств управляемых многоагентных систем с запаздыванием в каналах передачи информации. Запаздывание в каналах передачи информации является одной из причин, по которой применение математической модели управления на практике может быть неэффективным и даже приводить к потере свойства устойчивости. Так передача сигнала между управляющим центром и элементами системы может пройти лишь спустя какое-то время, при этом математическая модель предполагает, что она осуществится мгновенно. Такая проблема возникает, например, в нефтегазовой отрасли, где расстояние между управляющим центром и элементами системы может исчисляться десятками километров. При этом такие системы сложны для анализа устойчивости, т.к. в отличие от классических линейных систем они фактически имеют бесконечномерное пространство решений, бесконечный (хотя и счетный) спектр.

С другой стороны, в последнее время важное значение имеют децентрализованные системы управления, когда управление частью системы (независимым агентом) осуществляется на основе локальной информации, т.е. реализуется не централизованный подход в управлении, который предполагает наличие управляющего центра, а подход на основе взаимодействия соседних элементов друг с другом. Ярким примером таких систем являются многоагентные системы с информационными влияниями, в которых в качестве элементов выступают автономные агенты, обладающие собственными характеристиками. Так при применении протоколов консенсуса агенты изменяют свои характеристики, что при выполнении определенных условий может привести к достижению согласованных характеристик всеми агентами. Данный подход используется, например, в задачах управления движением и формацией группы автономных объектов.

Однако фактор задержки при передаче данных между агентами может оказать существенное влияние на устойчивость многоагентной системы. Более того, отсутствие связности сети коммуникаций может привести к тому, что в многоагентной системе не будет достигнут консенсус даже при наличии устойчивости. Поэтому, исходя из вышесказанного, тема диссертационного исследования является актуальной.

Содержание и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 128 страниц и 12 рисунков. Список литературы содержит 128 наименований.

Во введении показаны актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулирована цель исследования и поставлены соответствующие задачи, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены основные термины и результаты из области теории многоагентных систем с запаздыванием, на которые опираются дальнейшие исследования.

Приведен подробный обзор текущего состояния исследований в данной области, в том числе показана проблема характеризации скорости сходимости, которая актуальна даже для многоагентных систем без запаздывания и с ориентированной сетью.

Во второй главе рассматривается степень сходимости базового протокола консенсуса с запаздыванием, которая является экспоненциальной оценкой скорости сходимости многоагентной системы в целом. С помощью W -функции Ламберта получено значение запаздывания, при котором достигается максимальная степень сходимости. В частных случаях скорость сходимости при найденном значении запаздывания больше, чем при нулевом, однако она не является максимальной. С помощью методов линейной алгебры, операционного исчисления и алгебраической теории графов найдена формула предельных характеристик агентов при применении устойчивого базового протокола консенсуса с запаздыванием. Как следствие, получено условие достижения консенсуса при любом векторе начальных значений (т.е. при условии, что на начальном отрезке состояние системы задано постоянным вектором).

Третья глава посвящена анализу характеристик протоколов консенсуса с частичным запаздыванием. С помощью расширения метода Цыпкина, основанного на критерии Найквиста и примененного для квазиполиномов с комплексными коэффициентами, найдено условие, при котором устойчивость данных протоколов не зависит от запаздывания. Также найдено граничное значение запаздывания, когда упомянутое ранее условие не выполняется. С помощью расширения метода, полученного в предыдущей главе, найдена формула предельных характеристик агентов при применении рассматриваемых протоколов.

В четвертой главе рассматриваются методы и протоколы, которые позволяют достичь согласованной характеристики в многоагентных системах с несвязной сетью. Показано, что предложенный ранее метод ортогональной проекции является естественным обобщением протокола согласования характеристик, приведена его графовая интерпретация. Также было найдено граничное значение запаздывания для протокола латентного консенсуса со слабыми фоновыми связями и запаздыванием. Доказано, что при применении устойчивого протокола в системе достигается консенсус даже при несвязной сети коммуникаций.

В заключении сформулированы выводы по работе.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Научная новизна

В диссертационной работе впервые получены и изложены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1) Разработан метод нахождения значения запаздывания, при котором достигается максимальная степень сходимости в базовом протоколе консенсуса для многоагентных систем с запаздыванием и действительным спектром лапласовской матрицы.

2) Приведено условие независимости устойчивости от запаздывания для протоколов управления в многоагентных системах с частичным запаздыванием.

3) Получена аналитическая формула граничного значения запаздывания для протоколов управления в многоагентных системах с частичным запаздыванием, при котором сохраняется устойчивость.

4) Разработан метод вычисления предельных характеристик агентов в многоагентных системах с запаздыванием с помощью собственного проектора

соответствующей лапласовской матрицы, который позволяет получить условие достижения консенсуса.

5) Приведена графовая интерпретация метода ортогональной проекции в общем случае с небазовыми агентами и получено представление выражения для консенсуса с помощью псевдообратной матрицы при его применении.

Данные результаты соответствуют пп. 1, 3 и 4 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью применяемого математического аппарата и приводимых доказательств, а также непротиворечивостью математических выкладок. Обоснованность полученных результатов иллюстрируется с помощью математического моделирования процесса согласования характеристик при применении рассматриваемых протоколов. Стоит также отметить, что результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях и представлены на большом количестве конференций.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в диссертационной работе результаты обладают по большей части теоретической значимостью, так как расширяют и развивают теорию многоагентных систем и могут быть применены для анализа устойчивости и асимптотического поведения протоколов консенсуса второго порядка с запаздыванием. Однако полученные результаты могут быть применены также для решения задач в технических, экономических и биологических системах, что обуславливает их практическую значимость.

Замечания по диссертации

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В работе при описании постановки задачи начальные значения указываются на отрезке $[-\tau, 0]$, хотя формально для корректной постановки задачи необходимо задавать начальные условия на полусегменте $(-\tau, 0]$.

2. При анализе асимптотического поведения приведенных протоколов рассматривается слишком узкий класс функций, соответствующих начальным условиям (рассматриваются только постоянные на начальном этапе функции).

3. В главе 2 стоит отметить, что при представлении корня s через W -функцию Ламберта, его значение не определено при $\tau = 0$. Верно ли, что при стремлении τ к нулю, значение s будет стремиться к $-\lambda$?

4. В главе 3 для обобщенного протокола консенсуса с запаздыванием не хватает численного примера и иллюстраций.

5. В автореферате используется без пояснений обозначение φ_j при описании результатов в главе 3, которое определено в диссертации.

Заключение

Данные замечания не являются критическими и не снижают научную ценность полученных результатов. Диссертация Хомутова Дмитрия Константиновича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, и обладает теоретической и практической значимостью.

Материалы по теме диссертации изложены в 13 научных работах, из которых 2 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, относящихся к категории К1 Перечня ВАК, 3 статьи – в изданиях, индексируемых в международных базах данных, приравненных к журналам категории К1 Перечня ВАК, и 8 публикаций – в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Таким образом, диссертационная работа Хомутова Дмитрия Константиновича «Методы согласования характеристик в многоагентных системах с запаздыванием и несвязной сетью» соответствует специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой нелинейных
динамических систем и процессов управления
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова»,
доктор физико-математических наук,
доцент

Фомичев Василий Владимирович



«28» 08 2026 г.

ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова»

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1.

E-mail: fomichev@cs.msu.ru

Телефон: +7 495 932-88-53

