

« У Т В Е Р Ж Д А Ю »

Директор ФГБУН Институт проблем

Управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
академик РАН



Д.А. Новиков

« 04 » апреля 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Копосова Антона Сергеевича

«Синтез управления с итеративным обучением для сетевых мультиагентных систем», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (физико-математические науки)

### Актуальность темы диссертационной работы

Метод управления с итеративным обучением (УИО) ориентирован на системы, которые многократно повторяют одну и ту же операцию. Он позволяет улучшать тот или иной показатель от повторения к повторению, используя память. Говоря точнее, на каждом повторении УИО изменяет входное воздействие на основе информации, полученной с текущего и одного или нескольких предыдущих повторений. В сетевых мультиагентных системах УИО обеспечивает синхронное выполнение задачи управления агентами, при этом непосредственный доступ к информации о задаче управления может иметь только некоторая подгруппа агентов, остальные получают информацию от соседей.

В настоящее время метод УИО находит многочисленные практические приложения, прежде всего в робототехнике. Например, в интеллектуальном производстве исполнительные роботы связаны между собой информационной сетью, подвержены внешним возмущениям и кибератакам, и при этом целевая

задача такой сетевой системы может изменяться в связи с изменением производственной программы. В данном случае УИО в классической постановке не дает удовлетворительных результатов и возникает необходимость в разработке новых методов синтеза и алгоритмов УИО, учитывающих новые особенности функционирования современных и перспективных роботизированных систем, поэтому тема исследования является актуальной.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 61 наименование. Общий объем диссертации составляет 108 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, перечислены методы исследования и основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе дается общая характеристика состояния проблемы. Приведен обзор сетевых систем управления и классификация связанных с ними задач теории управления, определены основные понятия данной области. Сформулирована основная концепция УИО, проведен аналитический обзор литературы по данной теме, описаны последние научные и прикладные результаты. Отмечены недостатки УИО и выделены актуальные задачи.

Во второй главе представлено решение задачи синтеза УИО сетевой системой, агенты которой представляют собой динамические стохастические объекты. Целевая задача остается неизменной на всем протяжении работы системы. Представлены два решения задачи. В основу первого лег подход, который заключается в решении задачи минимизации дисперсии ошибок векторов управления, а в основу второго был положен дивергентный метод векторных функций Ляпунова. Проведен сравнительный анализ полученных результатов на основе численного моделирования группы манипуляторов с поворотным гибким звеном. Отмечены преимущества второго решения.

В третьей главе описан алгоритм УИО стохастической сетевой системой с неопределенными параметрами при изменении топологии сети. При смене

топологии может меняться подгруппа функционирующих агентов и/или характер их взаимодействий. Агенты представляют собой динамические объекты с дискретным временем и аффинными моделями неопределенностей. В случае с подключением агентов возникает дополнительная переходная ошибка, что может нарушить требование к точности выполнения операции. Для компенсации этой ошибки предложен алгоритм, который заключается в передаче подключаемому агенту управляющего сигнала от функционирующего агента.

В четвертой главе решается задача синтеза УИО сетевой стохастической системой с изменяемым режимом работы. Режим работы переключается во время функционирования сетевой системы по заранее известному правилу, и устанавливает параметры агентов и желаемую траекторию выходного сигнала одинаково для всех агентов. Для компенсации переходной ошибки предложен специальный алгоритм переключения закона УИО. Законы управления, компенсирующие переходную ошибку, находятся из решения задачи минимизации отклонения выходного сигнала агента от доступных ему образов желаемой траектории. Эффективность такого подхода подтверждена результатами численного моделирования сетевой системы. При этом отмечены ограничения, которые накладываются на топологию сети.

В пятой главе метод синтеза УИО, описанного в предыдущей главе, получил развитие на сетевые системы, в которых помимо переключения режима работы агентов предусмотрено переключение топологии сети. Закон УИО, компенсирующий переходную ошибку в момент изменения топологии, находится из решения задачи минимизации отклонения выходного сигнала от доступных агенту образов желаемой траектории. В рамках решения поставленной задачи дивергентный метод векторных функций Ляпунова получил развитие на новый класс систем.

В заключении сформулированы основные результаты работы и описаны перспективные направления их развития.

## **Обоснованность и новизна основных положений диссертации**

Диссертационная работа содержит ряд новых результатов теоретической и практической направленности. Их научная новизна состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм УИО стохастическими сетевыми системами с изменяемой топологией сети с учетом неопределенностей модели агентов, обеспечивающий сходимость ошибки обучения и компенсацию переходной ошибки, вызванной подключением новых агентов;

2. Метод синтеза УИО с переключаемым законом управления распространен на класс стохастических сетевых систем с изменяемой желаемой траекторией и изменяемыми параметрами агентов. На этой основе разработан алгоритм УИО такими сетевыми системами, обеспечивающий сходимость ошибки обучения и компенсирующий переходную ошибку, вызванную указанными изменениями;

3. Дивергентный метод векторных функций Ляпунова распространен на класс стохастических сетевых систем с изменяемыми параметрами агентов, изменяемой желаемой траекторией и изменяемой топологией сети. На этой основе разработан алгоритм УИО такими сетевыми системами, обеспечивающий сходимость ошибки обучения и компенсирующий переходную ошибку, вызванную указанными изменениями.

Полученные научные результаты корректно сформулированы, их достоверность обеспечена строгостью постановок утверждений и их доказательств, корректным использованием математического аппарата и подтверждена результатами численного моделирования.

Все основные полученные результаты апробированы на ряде международных и всероссийских конференций и опубликованы в статьях диссертанта в рецензируемых научных изданиях, среди которых четыре статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, и две – в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science/Scopus. Список литературы достаточно полон, представленный в диссертации ее обзор адекватно отражает состояние дел в исследуемой области, цитирование работ проведено аккуратно.

## **Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования**

В диссертационной работе рассмотрены новые задачи УИО сетевыми мультиагентными системами, источником которых являются современные роботизированные системы. Научную ценность работы составляют методы синтеза и алгоритмы УИО сетевыми системами:

1. Алгоритм УИО для стохастических сетевых систем с изменяемой топологией сети и наличием неопределенностей в модели агентов;
2. Метод синтеза и алгоритм УИО для стохастических сетевых систем с изменяемыми параметрами агентов и желаемой траекторией;
3. Метод синтеза и алгоритм УИО для стохастических сетевых систем с изменяемой желаемой траекторией, изменяемыми параметрами агентов и изменяемой топологией сети.

Практическая ценность заключается в том, что полученные алгоритмы могут служить основой программно-алгоритмического обеспечения решения задач в различных сетевых системах с использованием УИО.

## **Рекомендации по использованию результатов**

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в научных исследованиях, проводимых в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Нижегородском государственном университете им. Р.Е. Алексеева, Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Институте системного анализа РАН, Санкт-Петербургском государственном университете, Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Институте проблем машиноведения РАН, Университете ИТМО.

## **По работе имеются следующие замечания:**

1. В главе 3 показано, что компенсация ошибок подключаемых агентов происходит в ущерб точности функционирующих агентов. При анализе этого эффекта не учитываются расхождения неопределенных параметров

взаимодействующих агентов, хотя это может в той или иной степени сказаться на величине переходной ошибки.

2. В главах 3 и 5 предполагается, что топология сети меняется в известный момент времени, но как быть в ситуациях, которые нельзя заранее предугадать, например, при отказе одного из узлов сети. Можно ли использовать предложенные подходы в ситуациях, когда заранее не известно, когда потребуется сменить топологию?

3. В главах 4 и 5 результаты моделирования демонстрируют эффективность использования переключаемого закона управления в целях компенсации дополнительных переходных ошибок, возникающих при переключении режима работы агентов. Однако моделирование сетевой системы было проведено с использованием одной и той же модели агентов, и этого недостаточно для исчерпывающей оценки разработанных алгоритмов. Следовало бы дополнительно рассмотреть другие, более сложные модели агентов, желаемые траектории и сценарии работы сетевой системы.

4. Работа содержит небольшое количество неизбежных стилистических неточностей («Последнее время наблюдается», стр. 14; «результаты обобщаются в виде алгоритма», стр. 26; «В качестве демонстрационного пример <...> представлены результаты моделирования», стр. 91; и др.).

5. Наконец, диссертацию заметно бы украсил список обозначений.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки работы.

### **Заключение**

Диссертация Копосова Антона Сергеевича «Синтез управления с итеративным обучением для сетевых мультиагентных систем» представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему. Полученные результаты могут быть использованы для решения ряда задач сетевого управления, например, группой роботов-манипуляторов, выполняющих повторяющиеся операции с заданной точностью.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована, логично построена, ее структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Выносимые на защиту

положения опубликованы и прошли необходимую апробацию. Диссертационная работа соответствует специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Автореферат правильно и полно отражает основные положения диссертации.

На основании изложенного можно сделать вывод, что диссертационная работа Копосова Антона Сергеевича удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (физико-математические науки).

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Лаборатории № 7 «Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина» ИПУ РАН 27 марта 2024 г., протокол № 4.

Заведующий Лабораторией № 7 ИПУ РАН

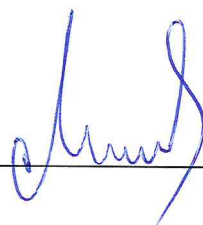
главный научный сотрудник

доктор физико-математических наук

профессор РАН

Тел.: (495) 198-1720 доб. 1434

E-mail: khlebnik@ipu.ru

  
\_\_\_\_\_ М.В. Хлебников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской Академии Наук (ИПУ РАН)

Адрес: 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, д.65

Тел. +7 (495) 334-89-10

E-mail: dan@ipu.ru

Адрес официального сайта: [www.ipu.ru](http://www.ipu.ru)



*Хлебникова М.В.*  
\_\_\_\_\_