

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Хапкина Дмитрия Леонидовича,

выполненную на тему: «Прикладные методы синтеза нейросетевых регуляторов для объектов управления с ограничителями»

и представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Актуальность темы

Моделирование и синтез нелинейных динамических систем является сложной задачей, не имеющей общего решения. При отсутствии или неполноте информации об исследуемом объекте моделирование (синтез) выполняется в рамках принципа «черного или серого ящика», когда устанавливается соответствие между множеством входных и выходных сигналов. Такое моделирование называется поведенческим, а общими формами математических моделей являются многомерные полиномы и нейронные сети.

В диссертационной работе задача синтеза нелинейных регуляторов рассматривается в представленной выше постановке. Актуальность решения поставленной задачи заключается в следующих аспектах:

– объекты управления часто являются нелинейными (например, с ограничителями), поэтому регуляторы в системах управления строятся также нелинейными;

– синтез нелинейных регуляторов выполняется на базе нейронных сетей, что позволяет создавать их адаптивными, с возможностью повышения точности управления и с удовлетворением заданным критериям качества управления;

– известные подходы не позволяют гарантировать устойчивость синтезированных нейросетевых систем управления, что снижает возможность их применения на практике. Разработка новых методов синтеза регуляторов на базе нейронных сетей, гарантирующих устойчивость замкнутых систем управления, безусловно открывает широкие возможности для развития интеллектуальных систем управления.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– в разработке алгоритмов выбора структуры и формирования обучающей выборки для нейроимитатора и нейрорегулятора при наличии разных видов ограничителей в объекте управления. Разработанные алгоритмы позволяют формировать обучающую выборку для нейроимитатора, а также синтезировать

нейросетевые регуляторы с использованием схем обучения “инверсное нейроуправление” и “обратный пропуск ошибки через нейроимитатор”;

– в разработке метода синтеза нейросетевого регулятора, основанного на схеме обучения «инверсное нейроуправление» и метода синтеза нейросетевого регулятора, основанного на схеме обучения «обратный пропуск ошибки через нейроимитатор». Предложенные методы учитывают разные виды ограничителей, позволяют применять разные типы нейронных сетей и обеспечить устойчивость и качество переходного процесса, близкое к оптимальному в замкнутой системе;

– в разработке метода синтеза нейросетевого регулятора для объектов с ограничителями, гарантирующего устойчивость полученной замкнутой системы в заданной локальной области фазового пространства;

– в разработке методики синтеза нейрорегуляторов, согласно которой выполняется объединение предложенных методов и алгоритмов, гарантируется устойчивость замкнутой системы управления в заданной локальной области и оптимизируется качество переходного процесса.

Практическая значимость.

Разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы имеют важное практическое значение, поскольку задача управления динамическими объектами с существенной нелинейностью, например с ограничителями, широко распространена на практике. Предложенные методы и алгоритмы позволяют сократить сроки проектирования систем управления указанными объектами с удовлетворением требований к качеству управления. Дополнительно гарантируется устойчивость построенной системы, и появляется возможность адаптировать систему к нестационарности параметров объекта управления в определенных пределах. Предложенные нейросетевые регуляторы можно достаточно просто и быстро встроить в контур системы автоматического управления, а лежащие в основе регуляторов нейронные сети представлять в виде разных архитектур и эффективно реализовывать на разных вычислителях и ускорителях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 90 источников, изложена на 142 страницах, включает 90 рисунков и 7 таблиц.

Область исследования и содержание диссертации соответствуют пунктам 1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения

систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, 7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем и 14. Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов систем управления с целью улучшения их технических характеристик паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Во введении обоснована актуальность темы работы, определена ее цель, сформулированы задачи исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются основные понятия и методы теории искусственных нейронных сетей (ИНС), которые составляют основу для разработки новых подходов к синтезу нейрорегуляторов в задачах управления нелинейными объектами. Описываются структуры ИНС, методы их обучения, а также анализируются существующие подходы к нейроуправлению. Определяются основные направления для разработки новых методов, учитывающих особенности объектов управления с ограничителями. Особое внимание уделяется методам инверсного нейроуправления и обратному пропуску ошибки через прямой нейроимитатор, которые далее модифицируются в диссертационной работе для синтеза нейрорегуляторов.

Во второй главе предложены модифицированные методы синтеза нейросетевых регуляторов для управления объектами с ограничителями на основе нейронных сетей прямого распространения и рекуррентных нейронных сетей. Данные методы включают разработанные алгоритмы формирования обучающей выборки и структуры нейронных сетей для нейроимитатора и нейрорегулятора.

Третья глава посвящена решению задачи обеспечения устойчивости нейросетевых систем управления, что является ключевым аспектом для успешного применения нейросетевых технологий в задачах управления реальными объектами. Разработан метод синтеза нейросетевого регулятора, который позволяет обеспечить устойчивость полученной системы в заданной области фазового пространства с использованием функции Ляпунова. Предложенный метод позволяет создавать устойчивые системы, что обеспечивает стабильность работы системы и гарантирует отсутствие неустойчивых режимов.

В четвертой главе диссертации представлена разработанная автором методика синтеза нейросетевых регуляторов, которая позволяет оптимизировать качество управления сложными динамическими объектами с ограничителями и гарантировать устойчивость замкнутой системы. Данная методика объединяет алгоритмы и методы, разработанные в предыдущих главах. Она включает синтез нейроимитатора объекта, выбор структуры нейросетевого регулятора, предварительную настройку регулятора и его обучение. Для апробации предложенной методики был выполнен синтез нейрорегулятора для объемного

следящего гидропривода, имеющего ограничители на фазовые переменные. Результаты моделирования показали приемлемое качество управления и наличие свойств адаптивности при изменении параметров объекта.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 работах, из них 3 из перечня, рекомендованного ВАК, 3 в изданиях, проиндексированных в международной базе данных Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 5 международных и 5 всероссийских научно-технических конференциях.

Соответствие автореферата и публикаций автора требованиям Положения о присуждении ученых степеней. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях в количестве, превышающем требования для кандидатской диссертации, указанных в пункте 9 «Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ».

Замечания по работе и ее оформлению

1. В главе 1 п.1.1–1.5 посвящены общеизвестным положениям о нейронных сетях. В данных пунктах упоминаются основные архитектуры сетей такие, как полносвязные, рекуррентные, сверточные. Однако остаются без внимания радиально-базисные, нейронечеткие, сплайновые и другие нейронные сети, нашедшие широкое применение на практике. В результате, автору диссертации следовало рассмотреть архитектуры тех нейронных сетей, которые используются в системах управления, и посвятить обзор именно этой области.

Кроме того, автор диссертации очень подробно рассматривает метод обратного распространения ошибки (стр. 21-27), представляя как его математическое описание, так и численный пример расчета. Однако задачи исследования и модификации данного метода в диссертации не стоят, следовательно, нет причины представлять столь обширный материал, не относящийся к задачам исследования.

С моей точки зрения, важным материалом главы 1 является лишь п.1.6, в котором рассматриваются метод инверсного нейроуправления и метод обратного пропуска ошибки через прямой нейроимитатор. Именно, эти методы диссертант исследует и модифицирует.

В результате вышесказанного, диссертант не рассмотрел методы управления с применением нейронных сетей, которые популярны на практике и альтернативны подходам, описанным в п.1.6, не представил возможный

сравнительный анализ. В итоге обзор методов нейросетевого управления лишен глубины и обширности.

2. Общим замечанием для всех глав диссертационной работы является низкий уровень содержательности выводов по главам (п.1.7, 2.7, 3.5, 4.1). Указанные пункты содержат лишь перечень задач, которые решены диссертантом, что подчеркивается словами: рассмотрено, разработано, предложено и т.п. Пункты 3.5 и 4.1 содержат лишь один абзац из несколько строк.

С моей точки зрения, выводы должны содержать краткое описание полученных результатов и их анализ, а не перечень исследований, которые выполнил автор.

3. На стр. 53–56 в виде рисунков 2.12–2.19 представлены результаты синтеза нейроимитаторов на основе нейронной сети прямого распространения для звеньев типа насыщение и жесткий механический упор. Однако не описаны множества сигналов, на которых выполнено обучение нейронных сетей (сколько пар вход-выход использовалось, какие параметры гармонического и ступенчатого входных сигналов менялись и в каких диапазонах).

Отсутствует численная оценка точности синтеза нейроимитаторов с применением входного тестового множества. При этом, представляются следующие общие оценки, которые иллюстрированы на одном тестовом воздействии:

«Как видно из рисунков нейронная сеть с предложенной структурой **достаточно хорошо** имитирует простой объект с ограничителем» (стр.55)

«Как видно из рисунков (2.16)–(2.19), нейронная сеть способна имитировать данную нелинейность, однако точность **несколько хуже**, чем для звена с ограничением типа насыщение.» (стр.56)

4. Замечания, указанные в п.3, относятся также к результатам синтеза нейрорегуляторов методом инверсного нейроруправления для звеньев с ограничителем типа насыщение и жесткий механический упор.

Таким образом, в главе 2 отсутствует описание множеств входных сигналов, применяемых для обучения нейронных сетей, а выводы о точности синтеза делаются без представления численных оценок погрешностей, полученных на тестовых множествах. Исключением является лишь один пример: синтез нейрорегулятора методом обратного пропуска ошибки через нейроимитатор для объекта с ограничителем типа насыщение.

5. В главе 4 рассматривается пример синтеза устойчивой замкнутой системы управления гидроприводом (начало на стр.100). В данном примере осуществляется выбор структур нейронных сетей для имитатора, регулятора и функции Ляпунова (стр. 103-105) (указывается число слоев и число нейронов в каждом слое). Однако, отсутствуют разъяснения по выбору этих значений. В

данном пункте важно понимать выбор структур нейронных сетей, поскольку сравнения с другими структурами в диссертационной работе не производится.

На стр. 105 для обучения нейрорегулятора из двух методов обучения: модифицированный метод инверсного нейроуправления и аппроксимация классического регулятора, выбран второй метод. При этом, обоснование данного выбора отсутствует.

6. В диссертационной работе присутствуют следующие неточности и стилистические ошибки:

Стр. 37. «Достоинством этого метода является то, что **ПИД-регулятор становится нелинейным**, ...» ПИД-регулятор – это линейное устройство, поскольку выполняет лишь линейные операции.

Стр. 41. Выражение (2.2) не содержит переменные, которые для него описаны.

Стр. 44. «Таким образом, нейронная сеть **с количеством входов не меньше, чем $2n$** , где n – порядок ОУ, способна качественно повторять динамику линейного объекта.» В этой фразе отсутствует пояснение, что ко входам относятся также выходы обратной связи.

Стр. 45. «Для обучения нейронных сетей использовался сбор данных с объекта (моделирование в Simulink) на гармоническом, ступенчатом и **случайном сигналах**.» Требуется конкретизация описания случайного сигнала.

Стр. 46-46. Рисунки 2.6 и 2.7 содержат переменную y (выходной сигнал). В выражениях (2.10) и (2.11), которые описывают данные рисунки, переменная y отсутствует. Установить связь между выражениями (2.6), (2.7) и рис. 2. и 2.7 затруднительно.

Стр. 47. Переменные в выражениях (2.10), (2.11) не описаны.

Стр. 51. «При этом на вход объекта подается **полный вектор состояния** и значение управления.» В диссертационной работе нигде не описан полный вектор состояния, а именно, какие элементы он включает.

Стр. 126. Содержание главы 4 оформлено так, что она включает лишь один пункт, п.4.1.Выводы. Такое содержание некорректное. Глава должна включать несколько пунктов, по количеству соизмеримому с другими главами, и лишь последний пункт следует представить, как выводы.

Отмеченные замечания не снижают ценность представленной работы, которая заслуживает положительной оценки.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Хапкина Дмитрия Леонидовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача

разработки методов синтеза нейросетевого управления для объектов с ограничителями. Диссертантом получены новые теоретические результаты, которые вносят существенный вклад в развитие теории нейросетевого управления и имеют прикладную направленность. Разработано программное обеспечение для реализации предложенных методов. Исследования выполнены на высоком научном уровне, а указанные недостатки не снижают ее ценности.

Обобщая вышесказанное и учитывая новизну, теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, считаю, что представленная к защите диссертационная работа удовлетворит всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Хапкин Дмитрий Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
заведующий кафедрой
теоретических основ
электротехники



Соловьева
Елена Борисовна

19.10.2023

ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
192022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф
Тел.: 8-812-346-17-96
email: selenabl@yandex.ru

Заверяю подпись заведующей кафедрой Соловьевой Е. Б.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮЩЕГО
НАЧАЛЬНИК ОД
Т.Л. РУСЯЕВА



в 2-х экз.

В диссертационный совет
24.2.417.02, созданный на базе федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Тульский государственный
университет»

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Хапкина Д.Л.

«Прикладные методы синтеза нейросетевых регуляторов для объектов управления с ограничителями», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Актуальность темы

Адаптивные регуляторы широко используются в решении задач, в которых параметры объекта не являются постоянными, а могут меняться в достаточно широких пределах слабо предсказуемым и неочевидным образом. Адаптивный регулятор позволяет существенно повысить качество переходных процессов регулируемых объектов. Однако одной из актуальных проблем при этом является обеспечение устойчивости адаптивного регулятора.

В данной диссертационной работе автор строит адаптивный регулятор с использованием аппарата нейронных сетей. Данный подход известен достаточно давно, более двадцати лет, хорошо известны его преимущества и типовые схемы построения, однако он не находит широкого применения на практике во многом именно из-за невозможности получения в процессе самонастройки гарантированно устойчивого контура управления. Для преодоления этого недостатка автором предложен новый метод анализа устойчивости контура управления с нейросетевым регулятором на основе

построения функции Ляпунова, удовлетворяющей критерию устойчивости, на основе процесса псевдообучения.

В диссертационной работе сформулированы и предложены решения следующих основных задач:

- Разработка алгоритма формирования структуры и параметров нейросетевого регулятора и модели объекта.

- Разработка метода формирования обучающей выборки, учитывающей наличие существенных нелинейностей объекта управления

- Разработаны методы синтеза нейрорегулятора с использованием инверсной динамики и с использованием идентификационной нейросетевой модели объекта управления.

- Разработан метод настройки нейрорегулятора, позволяющий гарантировать устойчивость контура системы управления и при этом обеспечить требуемые критерии качества переходного процесса.

При решении задач, исследуемых в диссертации, были использованы методы классической теории управления, методы теории адаптивного управления, методы идентификации объектов управления, методы теории искусственных нейронных сетей, а также методы математического моделирования для верификации и оценки качества предложенных подходов и методов.

Оценка новизны и достоверности

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке критериев устойчивости системы управления в заданной локальной области фазового пространства с нейросетевым регулятором в контуре управления за счет использования аппарата функций Ляпунова. Функции Ляпунова представлены в виде нейросетевой модели, и построение положительно определённой функции сводится к процессу минимизации функции потерь в процессе обучения нейросети.

Достоверность результатов работы основывается на корректной математической постановке задач. Теоретические решения подтверждаются результатами экспериментов с применением современных методик моделирования и программных вычислительных средств.

Практическая ценность

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что разработанные алгоритмы могут использоваться для построения адаптивных систем регулирования и управления существенно нелинейными объектами, точное математическое описание которых отсутствует либо меняется в процессе функционирования. Это позволит существенно расширить рамки применимости адаптивного управления на широкий класс практически значимых объектов управления с характеристиками, существенно меняющимися в процессе эксплуатации.

Достоверность полученных результатов проведённых исследований подтверждается результатами экспериментов с применением модели системы адаптивного нейрорегулятора для управления моделью гидропривода на основе предложенных методов и алгоритмов.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы общим объемом 142 страницы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задачи, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводятся общие сведения о нейронных сетях, методах их обучения и основные подходы к синтезу нейрорегуляторов. На основе их анализа определяются структуры и методы синтеза нейрорегуляторов для существенно нелинейных объектов с нелинейностью типа ограничение по уровню. Рассмотрен метод обратной динамики и метод обучения нейрорегулятора с эталонной моделью, которые выбраны в качестве основы для дальнейшей реализации.

Вторая глава посвящена исследованию различных структур нейрорегуляторов для существенно нелинейных объектов в классе многослойных сетей прямого распространения и в классе рекуррентных сетей. Приведена методика выбора структуры сети. Сформулированы общие рекомендации по построению обучающей выборки для случая существенно нелинейного объекта управления. Предложены методы синтеза

нейрорегулятора с использованием инверсной динамики и с использованием обучения на формируемой модели.

В третьей главе рассматривается задача определения устойчивости контура управления нелинейным объектом с нейрорегулятором. Предложен метод синтеза нейрорегулятора, обеспечивающий устойчивость контура в заданной локальной области фазового пространства. Метод основан на синтезе функции Ляпунова, которая формируется в виде многослойной сети и обучается вместе с нейрорегулятором.

В четвертой главе представлена методика синтеза нейрорегулятора, обеспечивающего требуемое качество переходного процесса и гарантирующего устойчивость контура управления. Для этого выбирается структура нейрорегулятора, формируется обучающая выборка, задаются начальные веса, не приводящие к поломке системы, и выполняется обучение нейрорегулятора одновременно с построением функций Ляпунова.

Для проверки работоспособности предложенных подходов и методов, а также для исследования их свойств в работе было проведено математическое моделирование, где в качестве объекта управления была взята математическая модель гидропривода с нелинейностями в виде ограничений на угол поворота люльки насоса и давление в гидромоторе. Результаты моделирования показали, что система управления с нейрорегулятором даёт приемлемое качество переходных процессов и обладает адаптивными свойствами, подстраиваясь под изменения параметров объекта из-за изменения нагрузки.

В заключении приведены общие результаты и выводы.

Оформление работы

Диссертация написана технически грамотным языком, иллюстрации выполнены качественно и с достаточным разрешением. Содержание и оформление диссертации соответствует требованиям ВАК. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание и результаты диссертации.

Автором диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и статьи из Перечня международных научных изданий, включенных в базу Scopus.

Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает основное содержание и результаты диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе приведён довольно скромный обзор современных схем адаптивных и нейросетевых регуляторов. На данный момент это направление проработано существенно глубже, нежели представлено в обзоре. Напротив, обзор классических нейронных сетей представляется несколько избыточным.

2. В работе приведен алгоритм, позволяющий определить устойчивость системы с обученным нейросетевым регулятором в контуре. Однако не приводится методика оценки, позволяющая определить, можно ли вообще обучить сеть с выбранной структурой до устойчивого состояния.

3. Основная проблема адаптивного регулятора с обучаемой моделью – необходимость идентификации объекта на всех рабочих частотах для построения адекватной модели. Однако предложенная методика построения обучающей выборки, в общем случае, не гарантирует присутствия всех рабочих частот.

4. Выбор многослойных сетей в качестве основы нейрорегулятора представляется не самым удачным вариантом, поскольку единственным эффективным настраиваемым параметром, влияющим на точность, является размер слоя. Однако просто увеличивать размер слоя не удаётся, поскольку это приводит к переобучению сети. Возможно, здесь следовало бы обратить внимание на современные сети глубокого обучения и LSTM-сети.

5. Выбор элемента ReLu в качестве типовой нелинейности также является достаточно спорным моментом. Нейрорегулятор должен иметь возможность реализовывать типовые управляющие сигналы, и среди его нелинейных элементов на выходе предпочтительно иметь гладкие функции типа синуса и экспоненты, обеспечивающие соответствующие типовые переходные процессы. То же самое будет относиться и к нейромодели объекта.

Перечисленные замечания, между тем, не снижают общей положительной оценки представленной работы.

Заключение

В целом, работа выполнена на высоком научном и техническом уровне, а указанные недостатки не снижают её ценности. Диссертация Хапкина Д.Л. является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые

научные результаты, полученные с применением современных методов теории управления, методов обработки информации и моделирования. В диссертационной работе решена научная задача разработки методов синтеза нейросетевых регуляторов для объектов с ограничителями.

Считаю, что диссертант владеет необходимыми умениями и навыками проведения исследований, а диссертация полностью соответствует квалификационным требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Доцент кафедры ИУ-1

«Системы автоматического управления»,
к.т.н.

Бобков
Александр Валентинович

