

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Белова Михаила Петровича на диссертационную работу
Шипагина Виктора Игоревича по теме: «Нейросетевая реализация
полиномиального метода синтеза регуляторов с детерминированным способом
выбора архитектуры и инициализации весовых коэффициентов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

На отзыв представлены:

- диссертация на 169 страницах машинописного текста, включая 74 рисунка и 2 таблицы.

- автореферат диссертации на 20 страницах, включая список из основных публикаций автора по теме в количестве 19 шт., в том числе 7 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК (из них 5 публикаций в изданиях, включенных в перечень ВАК по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

Актуальность темы выполненной работы. Нейросетевые регуляторы являются инновационным средством автоматического управления, основанным на искусственном интеллекте. Они предлагают ряд преимуществ, которые могут значительно улучшить эффективность и точность регулирования в различных областях, таких как промышленность, транспорт, медицина и другие. Одним из преимуществ данного подхода является возможность применения нейрорегуляторов для систем, описываемых нелинейными параметрами. Однако при реализации данного подхода на практике существуют некоторые вопросы, требующие более тщательной формализации. В представленной работе автором предложен алгоритм, который формализует некоторые из них, а именно: инициализация структуры и весовых коэффициентов нейронной сети, выбор обучающей выборки. Поэтому актуальность темы диссертационной работы Шипагина Виктора Игоревича и ее практическая значимость не вызывают сомнений.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертационная работа Шипагина Виктора Игоревича состоит из: введения; четырех глав; заключения; перечня сокращений и условных обозначений; библиографического списка, включающего 207 наименований; четырех приложений.

Во введении описывается степень разработанности темы и обосновывается ее актуальность, формулируются цель, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных

результатов, положения, выносимые на защиту, а также дается краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен краткий обзор модальных методов синтеза регуляторов, включая многоканальные методы, которые позволяют задать расположение полюсов замкнутой системы. Рассмотрены различные методики описания систем автоматического управления (САУ), такие как представление через матричные передаточные функции, описание в пространстве состояний и полиномиальное матричное описание. Особое внимание уделяется модальной методике синтеза регулятора, использующей полиномиальное разложение системы. Приводятся преимущества и недостатки данного подхода.

Приведен обзор различных вариантов построения САУ. Указано, что в основном, расчеты в представленной работе проводятся для случая, когда модель объекта и регулятор находятся в прямой связи. Уточняется терминология, используемая при полиномиальном матричном описании передаточной функции многоканальных объектов, регуляторов или замкнутых систем.

Рассматривается один из способов, связанный с моделированием запаздываний в системе с помощью звеньев, полученных аппроксимацией Паде для звена запаздывания. Указано, что в данном случае повышается порядок рассматриваемой матричной передаточной функции (МПФ) модели объекта. В системе появляются новые устойчивые полюса и неустойчивые нули. Повышение порядка МПФ модели объекта усложняет процесс синтеза САУ.

Представлена модификация алгоритма САУ с использованием полиномиального метода. Эта модификация позволяет применять алгоритм для синтеза регуляторов в системах, содержащих многоканальные объекты с учетом запаздывания в их структуре. Указано, что при использовании модифицированного алгоритма синтеза, возможно снижение порядка системы, что означает, что наличие запаздывающих звеньев в системе не повышает сложность расчета параметров регулятора. Для этого в алгоритме сохраняются некоторые устойчивые полюса и нули модели объекта с запаздыванием в замкнутой системе

Во второй главе исследования обсуждаются преимущества и некоторые недостатки нейросетевого подхода. В качестве преимущества отмечена возможность учета нелинейных параметров модели объекта управления при проектировании САУ. К не до конца формализованным вопросам – отсутствие структурированного подхода к выбору архитектуры и инициализации весовых коэффициентов нейронной сети, а также отсутствие общих рекомендаций по обучению рекуррентных нейронных сетей, связанных с проблемой взрывных и угасающих градиентов.

Представлен обзор различных подходов к инициализации весовых коэффициентов, рассматривается процесс настройки весовых коэффициентов для нейронных сетей прямого распространения и рекуррентного типа. Обсуждаются проблемы взрывных и угасающих градиентов, которые могут

возникнуть при использовании методов обучения, основанных на вычислении градиента от функции ошибки.

На основе проведенного анализа преимуществ и недостатков исследуемых методов синтеза регуляторов и нейросетевого подхода, делается вывод о необходимости разработки нейросетевой реализации модального метода синтеза регуляторов для многоканальных объектов с нелинейными характеристиками.

В *третьей главе* представлен разработанный алгоритм, который позволяет решить вопросы выбора исходной архитектуры и инициализации весовых коэффициентов нейронной сети. Формализация данных вопросов происходит на основании знаний о представлении исходного регулятора и в виде МПФ. В качестве исходного регулятора выступает регулятор, полученный полиномиальным методом синтеза. Для предотвращения появления проблемы взрывного или угасающего градиента при настройке нейрорегулятора с обратными связями используется метод структурных преобразований исходного регулятора.

Для повышения возможностей нейросетевого регулятора в управлении системой с нелинейными характеристиками, предлагается процедура модификации архитектуры нейронной сети. Она заключается в последовательном усложнении архитектуры нейрорегулятора до достижения необходимой сложности, необходимой для управления объектом с нелинейными характеристиками. Предлагаются следующие виды модификаций: замена функций активации по слоям, добавление новых нейронов в слой и увеличение количества слоев. Весовые коэффициенты модифицированной нейронной сети подбираются таким образом, чтобы переходные процессы исследуемой системы оставались устойчивыми. Рекомендации к выбору метода обучения, настройке его параметров и критериям остановки обучения также предоставляются.

На основе описанных методов, алгоритмов и процедур разработан алгоритм синтеза нейросетевых регуляторов с детерминированным способом выбора архитектуры и инициализации весовых коэффициентов. Рассмотрен пример синтеза нейросетевого регулятора для многоканальной неустойчивой системы, содержащей линеаризованную модель объекта «инверсный маятник на подвижном основании».

Четвертая глава посвящена рассмотрению прикладной задачи – синтез нейросетевых регуляторов для системы гироскопической стабилизации оптического устройства кругового обзора. Для проведения численного моделирования свойств данной системы, использовались упрощенные модели. В первом случае, была рассмотрена система с двумя независимыми элементами на мобильном основании позиционера с возможностью перемещения в одной плоскости. Во втором случае, был рассмотрен один независимый элемент на мобильном основании позиционера, который может перемещаться в двух плоскостях как для основания, так и для самого элемента. Особенностью вышеописанных моделей является неравное число входных и выходных

каналов. Для синтеза регулятора полиномиальным методом используется линейризованный вариант моделей объектов. Данный регулятор выступает в качестве исходного. На основании исходного регулятора проводится синтез нейросетевого регулятора по предложенному в третьей главе алгоритму. Этот регулятор предназначен для управления системой, содержащей объект, описываемый МПФ с нелинейными параметрами. С помощью приведенного алгоритма решается вопрос выбора начальной архитектуры и весовых коэффициентов нейронной сети, а также вопрос обучения получившегося нейросетевого регулятора рекуррентного типа. В результате удастся повысить качественные характеристики на выходе САУ по сравнению с САУ, использующей исходный регулятор.

Также рассматривается задача синтеза САУ для системы «инверсный маятник на подвижном основании» с помощью метода обратного пропуска ошибки через прямой нейроэмулятор. Данный метод исследуется с целью повышения качественных характеристик САУ, содержащей нейрорегулятор.

В *заключении* диссертации отражены результаты диссертационного исследования, приведены выводы, обобщающие результаты выполненного исследования. Перечислены случаи практического использования результатов, полученных в диссертационном исследовании.

Приложения представлены: четырьмя актами об использовании и внедрении результатов диссертационного исследования (два акта внедрения в производство и два акта внедрения в учебный процесс); тремя свидетельствами о регистрации программ; разделом «определение понятий и терминов, используемых в диссертационном исследовании»; модифицированным алгоритмом синтеза многоканальных регуляторов с учетом наличия звеньев запаздывания в составе объекта управления.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационном исследовании задач применялся аппарат теории автоматического управления и теории матриц, некоторые разделы линейной алгебры, аппарат полиномиального матричного разложения, нейросетевые и оптимизационные методы. Вычислительные эксперименты проводились посредством моделирования в программной среде разработки MATLAB (Simulink), MathCAD.

Научная новизна и соответствие полученных результатов паспорту специальности. Следующие результаты диссертационного исследования характеризуют научную новизну работы:

1. Предложена модификация алгоритма синтеза регуляторов для объектов с неквадратной МПФ, позволяющая применять его для синтеза регулятора в случае наличия в модели объекта звеньев запаздывания. Отличительной особенностью данной модификации является возможность применения модифицированного алгоритма для многоканальных моделей объектов (соответствует п. 4, 5 паспорта специальности 2.3.1).

2. Разработана методика выбора исходной архитектуры нейросетевого регулятора и инициализации его весовых коэффициентов, позволяющий получить изначальную архитектуру и весовые коэффициенты по МПФ регулятора. Полученный нейрорегулятор без дополнительной настройки позволяет обеспечить устойчивость переходных процессов системы для объекта, описываемого линеаризованной моделью (соответствует п. 2, 4, 5 паспорта специальности 2.3.1).

3. Предложен метод решения проблемы взрывного и угасающего градиента, возникающий при обучении нейросетевого регулятора рекуррентного типа методами, основанными на вычислении градиента и обратном распространении ошибки. Данное решение использует структурные преобразования дискретного регулятора, позволяющие перейти к нейронной сети прямого распространения вместо рассмотрения нейронной сети рекуррентного типа (соответствует п. 2, 4, 5 паспорта специальности 2.3.1).

4. Предложена методика модификации архитектуры нейрорегулятора с учетом нелинейного характера и неопределенностей в составе модели объекта, позволяющий модифицировать структуру нейрорегулятора таким образом, чтобы он смог управлять объектом на основе модели с нелинейными параметрами в требуемом диапазоне возможных заданий системы. При этом модификации составлены таким образом, чтобы полученный нейрорегулятор позволял обеспечить устойчивость переходных процессов системы еще до начала его обучения (соответствует п. 4, 5 паспорта специальности 2.3.1).

5. Разработана методика формирования обучающей выборки для тренировки нейросети, позволяющий сформировать обучающую выборку таким образом, чтобы нейрорегулятор смог успешно обучиться управлению объектом до заданных диапазонов значений задания. Способ формирования обучающей выборки основан на постепенном расширении диапазона возможных заданий при обучении нейрорегулятора до заданных пределов (соответствует п. 2, 4, 5 паспорта специальности 2.3.1).

6. Предложен алгоритм синтеза нейрорегуляторов, которые способны управлять в заданных пределах объектами, содержащими в своем составе нелинейные характеристики. При работе алгоритма обеспечивается устойчивость переходных процессов системы на этапах выбора архитектуры, инициализации весовых коэффициентов и формировании обучающей выборки нейрорегуляторов (соответствует п. 5, 14 паспорта специальности 2.3.1).

Практическая значимость и реализация результатов. Разработан алгоритм синтеза нейрорегуляторов, предназначенных для управления многоканальными объектами, описываемыми нелинейными моделями. Учет нелинейных параметров позволяет получить САУ с более высокими показателями качества переходных процессов по сравнению с САУ, использующими регуляторы, полученные по линеаризованным моделям объектов.

Результаты, полученные в диссертации в ходе проведения теоретических, прикладных и экспериментальных исследований, нашли применение при разработке следующих программ:

1) программа для синтеза нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021610428, 14.01.2021. Заявка № 2020667800 от 28.12.2020;

2) программа для расчета регулятора для объекта с запаздыванием // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021681431, 10.12.2021. Заявка № 2021680525 от 21.12.2021;

3) программа для расчета регулятора полиномиальным матричным методом для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при существенном запаздывании управляющего сигнала // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023618298, 21.04.2023. Заявка № 2023616685 от 08.04.2023.

Результаты диссертационной работы использованы для расчета системы гироскопической стабилизации оптического устройства кругового обзора (АО «Новосибирский приборостроительный завод», г. Новосибирск), которая позволила повысить точность стабилизации линии визирования за счет учета нелинейных характеристик в подшипниках; для расчета САУ бетоносмесительного комплекса (АО «Кульбтыстрой», г. Красноярск), которая позволила уменьшить рывки при трогании и останове установки, а также повысить износостойкость оборудования.

Результаты исследований использованы в рамках учебного процесса на кафедре автоматики Новосибирского государственного технического университета (НЭТИ), г. Новосибирск, по дисциплине «Многоканальные системы управления»; на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), г. Новосибирск, по дисциплине «Теплогазоснабжение».

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается их апробацией через представление на конференциях различного уровня и публикациями в рецензируемых журналах и изданиях. С использованием разработанного алгоритма решены задачи синтеза для ряда иллюстративных примеров, что подтверждается численным моделированием в пакетах MATLAB SIMULINK и MathCAD. Кроме этого, разработанный алгоритм применялся для решения задачи синтеза регуляторов на готовых изделиях, что подтверждается актами об использовании результатов диссертационного исследования на предприятиях.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на Всемирном конгрессе по искусственному интеллекту и интернету вещей 2021 «IEEE World AI IoT Congress 2021» (г. Сиэтл, США, 2021 г.); Международной научно-практической

конференции «Технические науки и инженерное образование для устойчивого развития» (г. Душанбе, Таджикистан, 2020 г.); Международной научно-технической конференции «RusAutoCon» (г. Сочи, 2021 г.); Международной конференции «Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (2022 ElConRus)» (г. Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2022 г.); III Международной конференции по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2022) (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) 2022 (Горный Алтай, НГТУ, 2022 г.); XIII, XIV, XV Международных научно-технических конференциях «Actual Issues of Architecture and Civil Engineering» (г. Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин), 2020 – 2022 г.); XIX Международной научно-практической конференции (г. Саратов, СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2023 г.); Международной конференции «IEEE XIV, XVI International Scientific Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE – 2021, 2023)» (г. Новосибирск, НГТУ (НЭТИ), 2021, 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Цифровизация и искусственный интеллект» (г. Душанбе, Таджикистан, 2023 г.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука Технологии Инновации» (г. Новосибирск, НГТУ (НЭТИ), 2020 г.); 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ (г. Москва, МФТИ, 2023 г.), а также на конференциях «Научная сессия» (г. Новосибирск, НГТУ (НЭТИ), АВТФ 2020 – 2022).

Публикации. Всего опубликовано 30 печатных работ, в том числе 30 работ по теме диссертационного исследования, из них: количество публикаций, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации 2.3.1 – 5; по смежным специальностям – 2; 8 статей в изданиях, проиндексированных в Scopus или Web of Science; 12 статей в материалах сборников международных и всероссийских конференций; монография – 1. Получено 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе

1. Рассмотренные примеры свидетельствуют о присутствии в объектах управления довольно ограниченного числа видов нелинейностей (в представленных примерах приведены тригонометрические функции, а также операции умножения, деления). Однако, при рассмотрении реальных объектов довольно часто приходится иметь дело с существенными нелинейностями типа «трение», «люфт», звено релейного типа, логическое звено и т.д. К сожалению, примеров применения разработанного алгоритма синтеза нейрорегуляторов к такому типу систем в диссертации не предложено.

2. Предложенная методика обучения нейросетевого регулятора основана на обучении с учителем. У такого подхода имеется существенный недостаток. Он выражен в необходимости наличия информативной обучающей выборки. Для формирования такой выборки предлагается использовать исходный

регулятор. При этом на практике довольно часто невозможно синтезировать регулятор аналитическими методами ввиду неизвестности, например, параметров модели объектов управления. Возможно ли какое-либо развитие предложенного автором алгоритма для систем, содержащих объекты управления, структурный вид моделей которых определен, но параметры неизвестны?

3. По всей видимости в представленном алгоритме происходит многократное предъявление различных обучающих выборок для обучения нейросетевому регулятору. Однако при этом не до конца раскрыт вопрос выбора числа таких выборок. От чего он зависит? На что влияет увеличение или уменьшение числа обучающих выборок?

4. К сожалению, не достаточно обоснован выбор используемой потерь, используемой для оценки при обучении нейросетевого регулятора.

5. В автореферате нет пояснения для некоторых используемых переменных, так, например, на рисунках 1, 2 показаны числовые матрицы регулятора (X_0 , X_1 , Y_0), однако по тексту не дается расшифровки данных обозначений.

6. В автореферате имеются неаккуратности при использовании принятых автором обозначений. Например: на рисунках 5, 6 показаны векторы входного и выходного каналов соответственно – $e(s)$, $u(s)$ как скалярные величины (согласно принятым автором обозначениям). То есть на рисунках 5, 6 следовало бы придерживаться единого правила обозначения как во всей остальной части работы, иначе это может вводить в заблуждение.

Указанные замечания не снижают теоретической и практической значимости представленной диссертационной работы.

Общая оценка работы. Диссертация является завершенной научной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение научно-технической задачи, имеющей важное значение для разработки систем автоматического управления с применением регуляторов, построенных на базе использования методов искусственного интеллекта. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

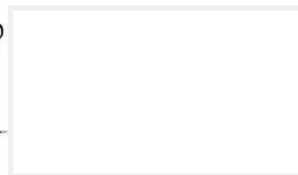
Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов, написана грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе сделаны четкие выводы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы. В автореферате представлены основные положения диссертации и список работ автора, в которых опубликованы основные результаты диссертационного исследования.

Заключение. Считаю, что диссертационная работа Шипагина Виктора Игоревича «Нейросетевая реализация полиномиального метода синтеза регуляторов с детерминированным способом выбора архитектуры и инициализации весовых коэффициентов» по своей актуальности, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, в части, касающейся кандидатских диссертаций, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент

Профессор кафедры Робототехники и автоматизации производственных систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» доктор технических наук, профессор

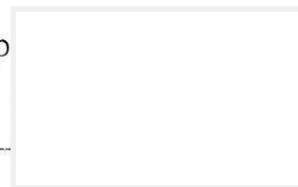


Белов Михаил Петрович

«12» февраля 2024 г.

«Я, Белов Михаил Петрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку».

Доктор технических наук, профессор



Белов Михаил Петрович

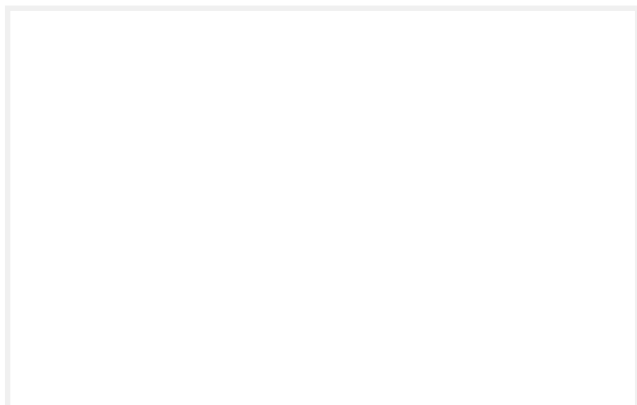
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Почтовый адрес: 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5 лит. Ф

Электронная почта: mpbelov@etu.ru

Контактный телефон: +7(812) 346-12-48,

Подпись профессора кафедры Робототехники и автоматизации производственных систем, д.т.н., профессора Белова М. П. удостоверяю:



Отзыв поступил в совет
26.02.2024

С отзывом ознакомлен
26.02.2024