

«УТВЕРЖДАЮ»

и.о. проректора по научной работе

д.т.н., профессор

Ю.А. Равикович

2023 г.



**Отзыв ведущей организации
на диссертацию Хапкина, Дмитрия Леонидовича
«Прикладные методы синтеза нейросетевых регуляторов
для объектов управления с ограничителями»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.1. — «Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика»**

Актуальность темы исследования определяется необходимостью разработки новых методов синтеза нейросетевых регуляторов для управления сложными нелинейными динамическими системами в условиях, когда невозможно получить адекватную математическую модель с необходимой для последующей работы точностью. Существующие методы классической теории управления, позволяющие проектировать системы управления для определенных классов нелинейных объектов управления, не способны в полной мере справиться с задачей синтеза регулятора, удовлетворяющего требованиям разработчиков. Применение регуляторов на основе нейронных сетей может быть перспективным подходом для решения таких задач.

Содержание работы

Диссертация Хапкина, Дмитрия Леонидовича состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы из 90 наименований. Общий объём диссертации составляет 142 печатных листа. В конце каждой главы содержатся соответствующие выводы, на основе которых написано заключение.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, указана цель исследования, отмечена научная новизна работы, сформулированы задачи исследования и положения, выносимые на защиту, перечислены конференции, на которых работа проходила апробацию и приведён список публикаций в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базу данных Scopus.

В первой главе рассмотрены существующие типы и структуры искусственных нейронных сетей (ИНС), история их развития и указаны наиболее подходящие ИНС для решения задач управления объектами управления с нелинейностями. Проанализированы известные методы обучения и оптимизации параметров ИНС с указанием сильных и слабых сторон и их применимости для рассматриваемой работы. Приведены примеры применения метода обратного распространения ошибки для ИНС прямого распространения и рекуррентной ИНС. Рассмотрены примеры использования ИНС в системах автоматического управления, где приведены схемы обучения и применения при инверсном нейрорууправлении, а также схемы обучения нейроимитатора и нейрорегулятора. Указаны достоинства и недостатки таких схем. Особое внимание уделено устойчивости неросетевого управления. На основе сделанного анализа выявлена необходимость в разработке метода синтеза нейрорегулятора, обеспечивающего гарантированную асимптотическую устойчивость замкнутых систем с нелинейными объектами управления в заданной локальной области фазового пространства.

Во второй главе предложены модифицированные методы синтеза нейросетевых регуляторов для объектов с ограничителями типа насыщение, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения и рекуррентных ИНС. Описываются разработанные алгоритмы формирования структуры нейроимитатора, нейрорегулятора и обучающей выборки для таких объектов. Приведены в виде графиков реакции на ступенчатый сигнал системы управления с PID-регулятором и с нейрорегулятором без учёта нелинейностей. Рассмотрен тип нелинейностей «насыщение» со звеном первого и второго порядков и предложено воспользоваться функцией активацией ReLU в ИНС прямого распространения для имитации звеньев с нелинейностью «насыщение». Определены схемы ИНС с соответствующими звеньями и размеры скрытых слоёв. Показан пример использования разработанного метода синтеза нейроимитатора объекта управления с демонстрацией реакций на скачкообразный и гармонические сигналы с разными амплитудами при учёте нелинейности типа «насыщение» и их сравнение с соответствующими реакциями модели объекта управления, на которой проходило обучение. Указана ограниченность подхода при возрастании сложности (порядка) объектов управления. Разработан алгоритм формирования обучающей выборки для ИНС с учётом наличия ограничителей типа «насыщение». Сформирован метод синтеза нейрорегулятора объекта управления с нелинейностью на основе схемы обучения инверсного нейрорууправления и приведён пример использования этого метода для обучения четырёхслойной ИНС со 140 и 550 нейронами во внутренних слоях с функциями активации ReLU. Результаты работы, представленные на рисунках 2.21, 2.22, 2.23 и 2.24 в виде гармонического сигнала с разными частотами и амплитудами, позволяют судить о возможности управления объектом управления, представленном в виде звена первого и второго порядка с ограничителем в виде «насыщения», с помощью предложенного нейросетевого регулятора.

В третьей главе предложен метод обеспечения гарантированной устойчивости в локальной области фазового пространства для замкнутой нейросетевой системы управ-

ления, основанный на синтезе нейрорегулятора и функции Ляпунова. Это позволяет в процессе синтеза регулятора обеспечить устойчивость системы в определённой области фазового пространства и избежать неустойчивых режимов.

В четвертой главе представлена методика синтеза нейросетевого регулятора для объектов с ограничителями, основанная на использовании ИНС прямого распространения. Методика объединяет разработанные в предыдущих главах предложения, оптимизирует качество переходного процесса и обеспечивает устойчивость замкнутой системы управления. Она включает синтез нейроимитатора объекта, выбор структуры нейрорегулятора, предварительную настройку нейрорегулятора и его обучение предложенным методом. Для проверки разработанных подходов был выполнен синтез замкнутой системы управления гидроприводом, имеющим нелинейности и выполнено сравнение с квазиоптимальным регулятором, полученным ранее. По результатам моделирования было показано, что синтезированная система имеет приемлемое качество управления.

В заключении приведены основные результаты и выводы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определена аналитическая зависимость минимального количества нейронов в скрытом слое ИНС нейроимитатора от количества ограниченных и неограниченных фазовых переменных вектора состояний;
2. Предложен алгоритм формирования обучающей выборки нейроимитатора и нейрорегулятора с учетом нелинейности в объекте управления типа «насыщение» и квантования во времени;
3. Разработан метод синтеза нейросетевого регулятора на основе схемы обучения «инверсное нейроуправление» для объектов с нелинейностями типа «насыщение», обеспечивающий устойчивость системы.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты имеют теоретическую ценность и могут иметь практическую значимость для синтеза нейросетевых регуляторов объектов управления с учётом нелинейностей. Предложенная методика позволяет решать задачи синтеза систем управления для нелинейных объектов с ограничителями типа «насыщение», математическая модель которых не может быть построена совсем или с необходимой для разработчика точностью.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы. Полученные результаты могут найти применение в исследованиях, проводимых в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет) на кафедрах и в лабораториях института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы».

Замечания по диссертационной работе:

1. В работе отсутствует сравнение предложенного метода синтеза нейрорегулятора с классическими методами и подходами современной теории управления. Например, методами синтеза регуляторов на основе нечеткой логики.

2. В работе не представлен анализ влияния возмущений, действующих на объект управления во время работы, и поведение системы управления с нейросетевым регулятором при их учёте.
3. В представленной работе проведены исследования с одним типом нелинейности – насыщение (в работе этот тип рассматривается как два различных в зависимости от используемой передаточной функции первого или второго порядка). Однако, на практике достаточно часто встречаются нелинейности других типов: люфт, зона нечувствительности, гистерезис, запаздывание по времени и др, которые в работе отсутствуют.
4. Встречаются синтаксические ошибки:
 - точка в конце названий разделов (например, раздел 3.1 на странице 74, глава 4 на странице 94);
 - наклонные греческие буквы в формулах (например, 3.19, 3.20 и т. д.);
 - отсутствие запятых между формулами (стр. 87 формула 3.22);
 - ошибочное использование тире и дефиса;
 - использование англоязычных названий функций (например, $\tanh()$, а не $\text{th}()$ на странице 24).
5. Отсутствует пример реализации предложенных методик, который можно было бы показать в Приложении на использованном языке программирования для возможности повторения с целью сокращения времени при дальнейшем их совершенствовании последующими поколениями.

Однако, приведенные замечания **не снижают** научной ценности диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Хапкина, Дмитрия Леонидовича, посвященная разработке методов синтеза нейросетевых регуляторов для объектов управления с ограничителями, представляет собой актуальную научную работу.

Одним из важных результатов диссертации является разработка методики синтеза нейросетевого регулятора, позволяющей обеспечить устойчивость замкнутой системы с нелинейным объектом управления с учётом квантования во времени и по уровню. Представленная методика является вкладом в развитие теории и практики нейросетевого управления нелинейными объектами.

Диссертация Хапкина, Дмитрия Леонидовича является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит результаты, имеющее важное значение для теории автоматического управления в целом.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, из них 3 в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и 3 статьи, индексируемые в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Хапкин, Дмитрий Леонидович **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. — «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Отзыв составлен доктором технических наук, профессором РАН, профессором кафедры 702 «Системы приводов авиакосмической техники», директором дирекции института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный технический университет)» Александром Владимировичем Кривилевым.

д.т.н., профессор РАН

А.В. Кривилев

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Учёного совета Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» ФГБОУ ВО «МАИ».

Присутствовало на заседании 18 человек из 25 человек.

Результаты голосования: За – 18, Против – нет, Воздержался – нет. Протокол №3 от 23 октября 2023 г.

Председатель Учёного совета института №7
«Робототехнические и интеллектуальные
системы», д.т.н., профессор РАН

А.В. Кривилев

ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) «МАИ»

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

+7 499 158-29-77, mai@mai.ru, www.mai.ru