

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Конькова Артема Евгеньевича
на тему: «Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного
управления плазмой в токамаках»
по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ»**

Диссертационная работа посвящена полунатурному моделированию цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках. В работе предложен метод синтеза дискретного многомерного ПИД-регулятора с использованием техники линейных матричных неравенств, используемого для управления нестационарными объектами. Представлены результаты полунатурного моделирования цифровых систем управления положением плазмы с полной моделью инвертора напряжения, цифровой системы управления формой плазмы с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи, а также ряд сопутствующих методов и комплексов программ.

Актуальность работы обусловлена сложностью систем магнитного управления плазмой в токамаках, которые включают силовые источники питания обмоток в обратной связи, и где любые сбои могут привести к серьезным последствиям для оборудования. Полунатурное моделирование позволяет выявить и устранить недостатки алгоритмов управления на этапе проектирования и тестирования системы, тем самым снизить вероятность возникновения критических ошибок в реальных условиях эксплуатации, повышая надежность и безопасность.

Содержание диссертации. Во введении дается обзор работ по теме диссертации. Первая глава содержит описание разработанного автором численного метода синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов. Во второй главе описаны стенд реального времени и комплекс программных средств, с помощью которых проводится полунатурное моделирование

разработанных автором систем управления плазмой в токамаках. В третьей главе изложены результаты полунатурного моделирования системы управления положением плазмы в токамаке с инвертором напряжения в обратной связи, а также сравнительного исследования систем управления с различными типами инверторов напряжения. Показано преимущество применения инвертора напряжения в режиме ШИМ. В этой же главе представлен комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера, управляющего H-мостами инвертора напряжения. Четвертая глава посвящена результатам полунатурного моделирования систем магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2, включает комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке, а также описывает метод идентификации алгоритма восстановления равновесия посредством синтеза робастного наблюдателя состояний.

Научная новизна работы заключается в разработке ряда методов и программных комплексов для полунатурного моделирования цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках:

- Предложен метод и комплекс программ для синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств, позволяющий настраивать регулятор на массиве линейных моделей объекта управления со связанными каналами управления. Метод обеспечивает заданный запас робастной устойчивости замкнутой системы управления и позволяет осуществлять формирование контура.
- Разработаны комплексы программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления на стенде реального времени, для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера и для визуализации восстановленного равновесия плазмы.
- Разработан метод идентификации алгоритма восстановления равновесия плазмы с использованием робастного наблюдателя состояния.

- Проведено полунатурное моделирование различных цифровых систем магнитного управления плазмой: системы управления положением плазмы с инвертором напряжения, используемым в качестве источника питания обмотки горизонтального управляющего поля, а также качественное сравнение результатов моделирования систем управления положением плазмы с инверторами напряжения разных типов; системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2 с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи и с внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях.

Достоверность полученных результатов подтверждается полунатурным моделированием систем управления на стенде реального времени с использованием систем SimulinkRT, RTLinux и QNX Neutrino. Достоверность метода синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов обеспечивается строгостью используемого аппарата линейных матричных неравенств. Для решения систем матричных неравенств использовались программные среды выпуклой оптимизации CVX и YALMIP с численными решателями SDPT3 и MOSEK.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Диссертационная работа представляет собой самостоятельное научное исследование, выполненное в соответствии с современными требованиями. Научные положения, выводы, сформулированные в диссертации, основаны на использовании строгого математического аппарата и подтверждены результатами экспериментов полунатурного моделирования.

Обоснованность основных научных положений, выводов работы не вызывает сомнений, подтверждается наличием **публикаций** в рецензируемых журналах. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из которых 3 статьи опубликованы в журналах из Q1 по WoS и 3 статьи – в журналах из Q1 по RSCI, зарегистрированы 2 патента на изобретения. Имеется акт о внедрении системы магнитной диагностики в ФТИ им. А.Ф.

Иоффе РАН. Основные результаты работы прошли апробацию на научных семинарах и конференциях различного уровня.

Замечания к диссертации:

1. В главе 1 рассмотрен только один способ инициализации матричного ПИД-регулятора, применимый для устойчивых моделей объекта. Целесообразно было бы рассмотреть дополнительные способы инициализации.
2. В главе 3 проведено сравнительное исследование двух систем управления положением плазмы – с инверторами напряжения в релейном автоколебательном режиме и в режиме 9-уровневой ШИМ. Было бы полезно дополнить анализ сравнениями с другими типами инверторов, например, с 3-уровневой ШИМ, используемой в работе для токамака ИГНИТОР.
3. В главе 4 был синтезирован робастный наблюдатель состояния для идентификации алгоритма восстановления плазмы, однако не было выполнено моделирование системы управления формой плазмы с робастным наблюдателем состояния в обратной связи.
4. В заключении диссертации следовало бы отметить рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание

ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Коньков Артем Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
директор института естественных и точных наук, заведующий кафедрой
прикладной математики и программирования Федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

ЗАМЫШЛЯЕВА Алёна Александровна

02.12.2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 351 267-90-74, e-mail: zamyshliaevaaa@susu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Адрес места работы:

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Институт естественных и точных наук,
кафедра прикладной математики и программирования
Тел.: +7 351 267-90-74; e-mail: prima@susu.ru

Подпись с _____ника (Ф)
А.А. Замышляева

«ЮУрГУ (НИУ)»