

**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»**

**Актуальность** работы обусловлена сложностью систем магнитного управления плазмой в токамаках, в которых силовые источники питания обмоток находятся в обратной связи, и любые сбои могут вызвать серьезные последствия для оборудования. Полунатурное моделирование дает возможность выявлять и устранять недостатки алгоритмов управления еще на стадии тестирования, что позволяет повысить надежность и безопасность системы в целом.

**Содержание диссертации.** Во введении представлен обзор научных работ, посвященных теме диссертации. В первой главе описан метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов. Вторая глава содержит описание стенда реального времени и комплекса программ, с помощью которых проводится полунатурное моделирование разработанных систем магнитного управления плазмой. В третьей главе изложены результаты полунатурного моделирования системы управления положением плазмы в токамаке ИГНИТОР с инвертором напряжения в обратной связи, а также проведено сравнительное исследование систем управления с разными типами инверторов напряжения. В этой главе также представлен комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера, управляющего H-мостами инвертора напряжения. Четвертая глава включает результаты полунатурного моделирования систем магнитного управления плазмой в токамаке Глобус- M2, комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы и метод идентификации алгоритма восстановления

равновесия плазмы с использованием робастного наблюдателя состояния. В заключении подводятся итоги работы.

**Научная новизна.** В рамках работы были 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 в токамаке. Также разработан метод идентификации алгоритма восстановления равновесия плазмы с использованием робастного наблюдателя состояния. Проведено полунатурное моделирование различных цифровых систем магнитного управления плазмой, включая систему управления положением плазмы с инвертором напряжения и систему магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2 с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи и внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях. Положения, выносимые на защиту, представлены с достаточным обоснованием.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается данными полунатурного моделирования на стенде реального времени, функционирующем на базе операционных систем реального времени SimulinkRT и QNX Neutrino. Достоверность метода синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов обеспечивается строгой теоретической базой линейных матричных неравенств. Для решения матричных неравенств использовались программные пакеты выпуклой оптимизации CVX и YALMIP с численными решателями SDPT3 и MOSEK.

**Заключение.** Диссертация содержит оригинальные результаты, которые имеют значимую теоретическую и практическую ценность для разработки цифровых систем управления плазмой в токамаках. Предполагается использование результатов диссертации при разработке системы магнитного управления проектируемого токамака ТРТ.

### **Достоинства работы:**

1) Автором разработан метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств. Подготовлен программный комплекс для дискретных матричных ПИД-регуляторов, который применяется в работе для синтеза цифровых систем магнитного управления плазмой.

2) Автором выполнена разработка систем управления и их полунатурное моделирование в реальном времени. Разработаны Simulink-схемы для цифрового регулятора и модели объекта управления, размещенных на двух отдельных целевых машинах реального времени.

3) Для валидации алгоритмов систем управления и модели объекта был разработан стенд реального времени, в создании которого автор принимал активное участие.

4) Моделирование систем управления вертикальным положением плазмы проводилось с полной моделью инвертора напряжения.

5) Автором выполнена разработка метода идентификации алгоритма восстановления равновесия плазмы в режиме реального времени с помощью робастного наблюдателя состояния.

6) Создание и внедрение на установке Глобус-М2 комплекса программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке.

### **Замечания:**

1) На рис. 4.2 и 4.4 присутствуют параметры  $(\delta g_{ref}, \delta I_{pref})$  и  $(g_{sc}, I_{psc})$ . Непонятно как получены параметры  $(\delta g_{ref}, \delta I_{pref})$ . В работе не описано, как из внешнего каскада управления зазорами и током плазмы, наряду с воздействиями на токи в обмотках  $(\delta I_{PFref})$ , получают воздействия  $(\delta Z_{ref}, \delta R_{ref})$ .

2) недостаточно изучено влияние малого срыва на управляемость, рекомендуется в дальнейшем уделить больше внимания, так как стабилизация

плазмы при малых срывах является существенной частью системы управления.

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,  
ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

ХАЙРУТДИНОВ Рустам Рашитович

19.11.2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 495 841 5308, e-mail: khayr@triniti.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.08 – «Физика плазмы».

Адрес места работы:

108840, Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12,

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

Тел.: +7 495 841 5308; e-mail: liner@triniti.ru

Подпись сотрудника АО «Государственный научный центр Российской Федерации «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» Р.Р. Хайрутдинова удостоверяю:

Учёный секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

канд. физ.-мат. наук

А.А. Ежов

2024 г.