

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Коньков Артем Евгеньевич

**Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного
управления плазмой в токамаках**

Специальность 1.2.2 —
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Диссертация подготовлена в лаборатории № 41 Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук, чл.-корр. РАН
Галяев Андрей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Афанасьев Валерий Николаевич**,
доктор технических наук, проф. (уч. зв.),
Московский институт электроники и математики
им. А.Н. Тихонова Национального исследователь-
ского университета «Высшая школа экономики»,
профессор

Хайрутдинов Рустам Рашитович,
доктор физико-математических наук,
Акционерное общество «Государственный науч-
ный центр Российской Федерации «Троицкий
институт инновационных и термоядерных исследо-
ваний» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»),
ведущий научный сотрудник

Замышляева Алёна Александровна,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
директор института естественных и точных наук,
заведующий кафедрой прикладной математики и
программирования ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Защита состоится 12.12.2024 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертаци-
онного совета МГУ.012.1 Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 52,
факультет ВМК, ауд. 685.

E-mail: ds@cs.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3219>.

Автореферат разослан «9» ноября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н, чл.-корр. РАН

Ильин А. В.

Общая характеристика работы

Работа посвящена полунатурному моделированию цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках. При рассмотрении плазмы в D-образных токамаках как динамического объекта управления выделяются следующие особенности: плазма представляет собой неустойчивый, многосвязный и нестационарный объект управления, который подвержен различным внешним возмущениям. Для обеспечения устойчивого протекания плазменных разрядов в требуемой конфигурации применяются системы управления с обратной связью.

Магнитное управление плазмой осуществляется посредством изменения токов в системе обмоток полоидального поля токамака. Токи, протекающие через обмотки в тороидальном направлении, создают полоидальное магнитное поле сложной конфигурации, которое воздействует на плазму внутри вакуумной камеры токамака и обеспечивает формирование требуемой конфигурации плазмы в течение разряда. Форму плазмы нельзя измерить напрямую, для этого применяются алгоритмы восстановления плазменного равновесия, которые включаются в обратную связь системы управления и должны оценивать форму плазмы в реальном времени. В работе представлены результаты полунатурного моделирования цифровых систем управления положением плазмы, включающего полную модель инвертора напряжения, цифровой системы управления формой плазмы с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи, ряд сопутствующих комплексов программ.

В рамках исследования был разработан метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств. Метод позволяет настраивать регулятор на массиве линейных моделей объекта без проведения предварительной развязки каналов управления, обеспечивает заданный запас робастной устойчивости замкнутой системы и позволяет осуществлять формирование контура (Loop Shaping).

Актуальность данной работы обусловлена тем, что системы магнитного управления плазмой в токамаках являются сложными системами управления с силовыми источниками питания обмоток в обратной связи, в которых любые сбои могут привести к серьезным последствиям для оборудования. Полунатурное моделирование позволяет выявлять недостатки алгоритмов управления на этапе тестирования и модернизировать систему для повышения ее надежности и безопасности.

Объектом исследования являются системы магнитного управления плазмой в токамаках и их цифровые модели, а **предметом исследования** выступают численные методы и комплексы программ для проведения полунатурного моделирования и синтеза дискретных регуляторов в многомерных и многосвязных цифровых системах управления.

Цель диссертационной работы состоит в применении численных методов и комплексов программ для полунатурного моделирования цифровых систем

магнитного управления плазмой токамаках. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать метод синтеза дискретных многомерных регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств и реализовать его в комплексе программ;
2. Создать комплекс программ для полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью на стенде реального времени;
3. Провести полунатурное моделирование разработанных цифровых систем управления положением плазмы в токамаке с инвертором напряжения и разработать комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера;
4. Провести полунатурное моделирование разработанных цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаке с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи.

Степень разработанности темы исследования. Полунатурное моделирование широко используется для тестирования различных технических систем, таких как автомобильные и авиационные системы управления. В последнее время проводятся исследования по его использованию для систем управления плазмой в токамаках. Системы управления положением и током плазмы применяются на D-образных токамаках с момента их появления. Наибольший интерес исследователей в настоящее время сосредоточен на системах управления формой плазмы, в обратной связи которых должен находиться алгоритм восстановления равновесия плазмы, часто нелинейный. Необходимо синтезировать многомерный регулятор на модели объекта с переменными параметрами, неопределенностями и связанными каналами управления. Система магнитного управления должна обладать значительным запасом робастной устойчивости и способностью эффективно отражать внешние возмущения, но синтез регуляторов часто проводится на моделях в непрерывном времени из-за недостаточной проработки методов синтеза многомерных дискретных регуляторов, что приводит к проблемам с их дискретизацией.

Научная новизна:

1. Создан и реализован в виде комплекса программ метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств. Метод позволяет настраивать регулятор на массиве линейных моделей объекта управления со связанными каналами управления, обеспечивает заданный запас робастной устойчивости замкнутой системы управления и позволяет осуществлять формирование контура (Loop Shaping) [пп. 2, 3 паспорта специальности 1.2.2];
2. Разработан комплекс программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления на стенде реального времени. Комплекс программ реализован в Simulink в виде двух Simulink-схем верхнего уровня для целевых машин реального времени «Регулятор» и «Модель объекта». Simulink-схема «Регулятор» содержит внутреннюю

- модель объекта управления, что позволяет осуществлять моделирование в нескольких режимах [пп. 1, 2, 3, 8 паспорта специальности 1.2.2];
3. Проведено полунатурное моделирование разработанных цифровых систем управления положением плазмы с инвертором напряжения в качестве источника питания обмотки горизонтального управляющего поля и качественное сравнение результатов моделирования систем управления с инверторами напряжения разных типов. Создан комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера, который осуществляет управление инвертором напряжения [пп. 1, 2, 3, 4, 5, 8 паспорта специальности 1.2.2];
 4. Проведено полунатурное моделирование разработанной системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2 с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи. Создан комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы, который был внедрён в систему магнитной диагностики токамака Глобус-М2. Разработан метод идентификации алгоритма восстановления равновесия плазмы с помощью робастного наблюдателя состояния. Проведено моделирование системы управления формой плазмы с внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях [пп. 1, 2, 3, 8 паспорта специальности 1.2.2].

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные и промоделированные в реальном времени системы магнитного управления плазмой готовы к применению в экспериментах на токамаках. В настоящее время автором осуществляется внедрение цифровой системы магнитного управления на токамак Глобус-М2 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Стенд реального времени с комплексом программ позволяет осуществлять полунатурное моделирование широкого класса многомерных цифровых систем управления с обратной связью. Численный метод синтеза дискретных многомерных регуляторов, реализованный в виде комплекса программ, может применяться для широкого класса многомерных и многосвязных цифровых систем управления с обратной связью.

Методология исследования заключается в использовании методов полунатурного моделирования в реальном времени, линейных матричных неравенств и численных методов их решения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов и его реализация в виде комплекса программ;
2. Комплекс программ для полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью на стенде реального времени;
3. Результаты полунатурного моделирования систем управления положением плазмы в токамаках и комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера для управления инверторами напряжения;

4. Результаты полунатурного моделирования систем магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи в токамаке Глобус-М2, комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке и метод идентификации алгоритма восстановления равновесия плазмы с помощью робастного наблюдателя состояния.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами полунатурного моделирования синтезированных систем управления на стенде реального времени под управлением операционных системы реального времени 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. Общая структура и подход к решению вышеозначенных задач опубликованы в рецензируемых журналах. Результаты находятся в преимущественном соответствии с общеизвестными результатами, дополняют и развивают их.

Апробация работы. Основные результаты работы неоднократно докладывались на научных семинарах ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН в лаборатории № 41, на семинаре Б.Т. Поляка «Теория автоматического управления» в лаборатории № 7, на семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе в лаборатории физики высокотемпературной плазмы, на инженерно-физическом семинаре по токамакам в НИЦ «Курчатовский институт», на всемирном конгрессе IFAC 2020, на симпозиуме по силовой электронике (CPES) IFAC 2022, ИНТЕЛС 2021, а также на отечественных конференциях: Ломоносовские чтения (2018, 2019, 2020, 2024), Управление большими системами (2021), Всероссийское совещание по проблемам управления (2019, 2024). Также были получены два патента на изобретения.

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Синтез систем управления и их полунатурное моделирование в реальном времени были проведены автором самостоятельно. Разработка метода и комплекса программ для синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов также была осуществлена автором самостоятельно. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-31-90136 и РНФ № 21-79-20180.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Зарегистрированы 2 патента.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 114 страниц, включая 44 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 84 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена численному методу синтеза дискретного многомерного регулятора с фиксированной структурой на примере матричного (MIMO) ПИД-регулятора. Для реализации метода создан программный комплекс в виде пакета дополнения (toolbox) к MATLAB.

Матричный ПИД-регулятор (рис. 1) с q входами и m выходами состоит из $q \cdot m$ одномерных (SISO) ПИД-регуляторов, соединенных перекрестно таким образом, что q -ый вход подается на каждый q -ый SISO ПИД-регулятор, а все m -ые выходы суммируются. Основной мотивацией к применению матричных ПИД-регуляторов является необходимость одновременного управления несколькими выходами многомерного объекта со связанными контурами управления.

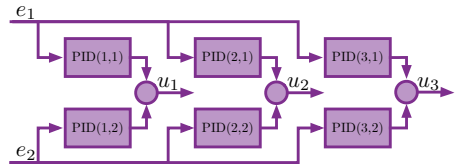


Рисунок 1 — Пример матричного ПИД-регулятора с двумя входами (e_1, e_2) и тремя выходами (u_1, u_2, u_3).

В общем случае объект управления описывается линейной моделью в пространстве состояний в непрерывном времени с переменными параметрами:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t), \end{cases}$$

где $y(t) \in \mathbb{R}^q$ — вектор выхода, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ — вектор входа, $x(t) \in \mathbb{R}^s$ — вектор состояния, q — количество выходов, m — количество входов, а s — количество состояний (порядок модели). Матрицы $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ и $D(t)$ изменяются во времени. Рассматриваются два случая позволяющих аппроксимировать данную модель массивом моделей с постоянными параметрами с индексом n :

1. LPV-модель (Linear Parameter Varying),
2. Модель с неопределенностями (Uncertain State Space).

После проведения дискретизации каждой модели в массиве получим массив дискретных передаточных функций:

$$P_n(z) = C_n^d(zI_s - A_n^d)^{-1}B_n^d + D_n^d, \quad P_n(z) \in \mathbb{C}^{q \times m}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Используется схема обратной связи, показанная на рис. 2, являющаяся классической схемой для следящих систем управления. Вектор r обозначает задающее воздействие, вектор e — ошибку, вектор u — вход, вектор y — выход, вектор w — входное возмущение, а вектор v — выходное возмущение. Матричный

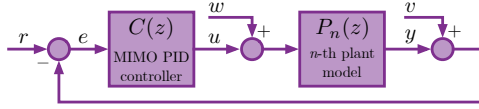


Рисунок 2 — Структурная схема следящей системы управления.

ПИД-регулятор в законе управления $u(z) = C(z) e(z)$ представлен дискретной передаточной функцией

$$C(z) = K_P + K_I \frac{zT_s}{z-1} + K_D \frac{z-1}{zT_s}, \quad C(z) \in \mathbb{C}^{m \times q},$$

где коэффициенты матричного ПИД-регулятора $\{K_P, K_I, K_D\} \in \mathbb{R}^{m \times q}$ являются произвольными (не диагональными) матрицами. В соответствии со схемой на рис. 2, определяется массив дискретных передаточных функций:

- Передаточная функция разомкнутой системы: $L_n(z) = P_n(z)C(z)$,
- Функция чувствительности: $S_n(z) = \left(I_q + L_n(z)\right)^{-1}$,
- Дополнительная функция чувствительности: $T_n(z) = L_n(z)S_n(z)$,
- Функция статической и низкочастотной чувствительности: $F_n(z) = \left(P_n(1)K_I T_s\right)^{-1} (z-1)$, $F_n(z) \approx S_n(z)$ для малых ω , $z = \exp(j\omega T_s)$,
- Q -параметр: $Q_n(z) = C(z)S_n(z)$,
- Передаточная функция от вектора входных возмущений w до вектора ошибки e : $W_n(z) = -S_n(z)P_n(z)$,
- Передаточная функция от вектора выходных возмущений v до вектора ошибки e : $V_n(z) = -S_n(z)$.

Требуемые показатели качества и запас робастной устойчивости замкнутой системы управления задаются функциями формы, которые ограничивают сингулярные числа частотных откликов передаточных функций в частотной области как это показано в примере на рис. 3. Функции формы могут быть заданы в произвольном виде. При этом минимизируется матрица статической и низкочастотной чувствительности, что обеспечивает развязку контуров управления и максимизацию качества управления.

Через серию преобразований задача синтеза дискретного матричного ПИД-регулятора формулируется в виде системы квадратичных матричных неравенств (QMI). Численное решение системы QMI происходит через выпукло-вогнутую процедуру (ССР), когда осуществляется итерационное решение эквивалентной системы линейных матричных неравенств (LMI). Была получена итоговая система LMI, решение которой для каждой n -й модели объекта и на каждой k -й частоте на каждой i -й итерации ССР даст параметры регулятора $\{K_P, K_I, K_D\}_i$,

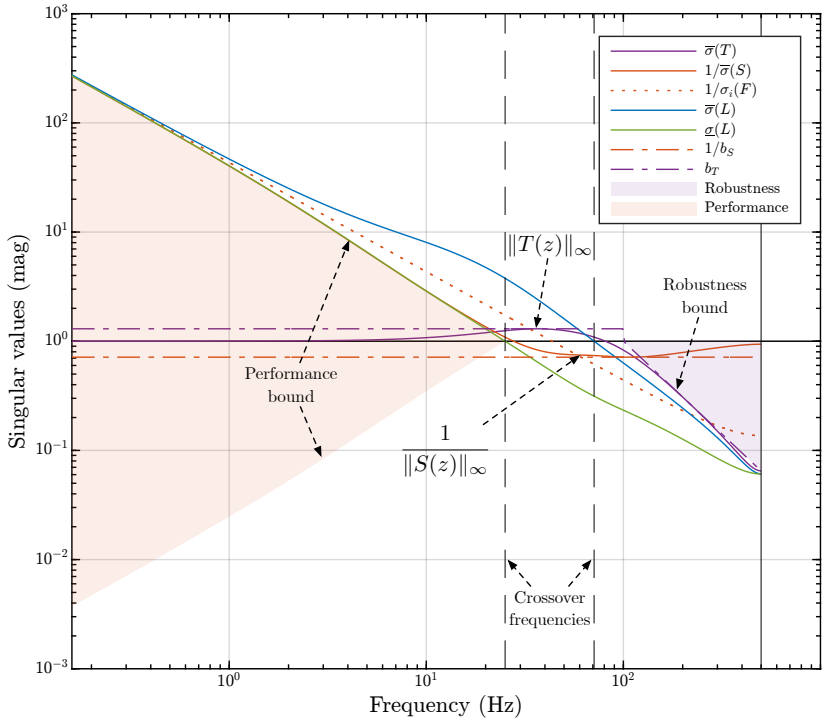


Рисунок 3 — Пример, иллюстрирующий метод синтеза. Сингулярные значения частотных откликов передаточных функций $L(z)$, $S(z)$ и $T(z)$ многомерной цифровой системы управления и функции формы (b_S , b_T).

которые соответствуют локальному оптимуму μ_i :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \max & \mu_i, \\ \text{s.t.} & X_n^H \check{X}_n + \check{X}_n^H X_n - \check{X}_n^H \check{X}_n - \mu T_s^{-2} I_q \succeq 0, \\ & Z_{nk}^H \check{Z}_{nk} + \check{Z}_{nk}^H Z_{nk} - \check{Z}_{nk}^H \check{Z}_{nk} - b_{Sk}^{-2} I_q \succeq 0, \\ & \begin{bmatrix} Z_{nk}^H \check{Z}_{nk} + \check{Z}_{nk}^H Z_{nk} - \check{Z}_{nk}^H \check{Z}_{nk} & b_{Tk}^{-1} L_{nk}^H \\ b_{Tk}^{-1} L_{nk} & I_q \end{bmatrix} \succeq 0, \\ & \begin{bmatrix} Z_{nk}^H \check{Z}_{nk} + \check{Z}_{nk}^H Z_{nk} - \check{Z}_{nk}^H \check{Z}_{nk} & b_{Qk}^{-1} C_k^H \\ b_{Qk}^{-1} C_k & I_m \end{bmatrix} \succeq 0, \\ & \begin{bmatrix} Z_{nk} \check{Z}_{nk}^H + \check{Z}_{nk} Z_{nk}^H - \check{Z}_{nk} \check{Z}_{nk}^H & b_{Wk}^{-1} P_{nk} \\ b_{Wk}^{-1} P_{nk}^H & I_m \end{bmatrix} \succeq 0, \\ \text{for each} & n, k, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\check{X}_{nk} = P_n(1)\check{K}_I$, $\{\check{K}_P, \check{K}_I, \check{K}_D\} = \{K_P, K_I, K_D\}_{i-1}$ – параметры матричного ПИД-регулятора, полученные на предыдущей итерации ССР, а

$$\check{Z}_{nk} = I_q + P_{nk} \left(\check{K}_P + \check{K}_I \frac{\exp(j\omega_k T_s) T_s}{\exp(j\omega_k T_s) - 1} + \check{K}_D \frac{\exp(j\omega_k T_s) - 1}{\exp(j\omega_k T_s) T_s} \right).$$

Значение локального оптимума μ_i не уменьшается с каждой новой итерацией ССР. Алгоритм синтеза матричного ПИД-регулятора с использованием выпукловогнутой процедуры следующий:

- определить параметры;
- установить $\check{Z}_{nk} = Z_{nk}^{\text{init}}$, $\check{X}_k = X_k^{\text{init}}$;
- повторять решение (1) до тех пор, пока $\left| \mu_i / \mu_{i-1} \right| - 1 > \tau$.

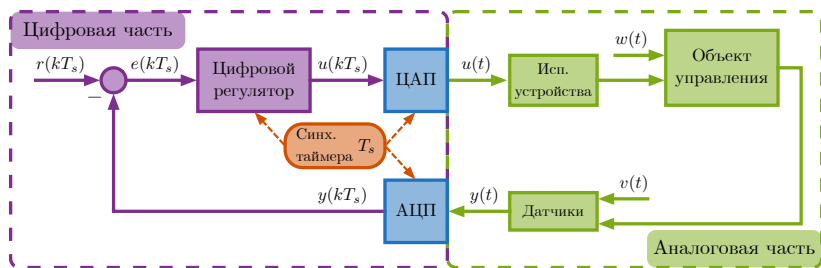
Алгоритм останавливается, когда локальный оптимум μ_i считается близким к оптимуму μ . Для реализации алгоритма синтеза регулятора разработан комплекс программ в виде пакета дополнения (toolbox) в MATLAB, который доступен по ссылке: <https://gitlab.com/konkov/mimo-pid-lmi-synthesis-toolbox>.

Во **второй главе** описывается стенд реального времени и комплекс программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью. Полунатурное моделирование представляет собой метод испытаний, который сочетает в себе как реальные физические компоненты, так и их цифровые модели. В этом процессе реальное оборудование или его часть интегрируется с компьютерной моделью, в которой часть элементов управляется программно, а другая часть представляет собой физическое оборудование. Это позволяет проводить испытания систем управления в условиях, максимально приближенных к реальным.

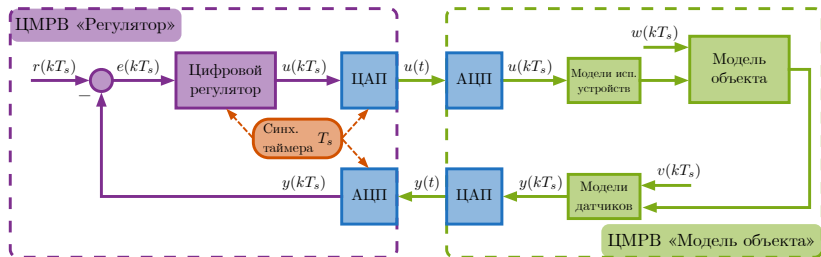
Для проведения полунатурного моделирования цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках 29 марта 2021 г. в лаборатории № 41 ИПУ РАН был создан стенд реального времени. Стенд состоит из двух целевых машин реального времени (ЦМРВ) Speedgoat Performance: «Регулятор» и «Модель объекта». Обе ЦМРВ могут работать под управлением операционной системы реального времени QNX Neutrino или SimulinkRT. На текущий момент стенд реального времени позволяет моделировать системы управления с использованием аналоговых каналов в следующей конфигурации:

- до 16 выходов и до 40 входов у ЦМРВ «Регулятор»;
- до 40 выходов и до 16 входов у ЦМРВ «Модель объекта».

На рис. 4 показаны структурные схемы цифровой системы управления. Левая часть схемы на рис. 4б полностью совпадает с левой частью схемы на рис. 4а. Таким образом, ЦМРВ «Регулятор» является реальным управляющим устройством, функционально идентичный тому, который будет использоваться в реальной цифровой системе управления. На ЦМРВ «Модель объекта» моделируются процессы в объекте управления. Между двумя ЦМРВ находятся аналоговые сигналы, поэтому на входе и выходе ЦМРВ «Модель объекта» находятся АЦП и ЦАП.



а) При управлении реальным объектом.



б) При полунатурном моделировании.

Рисунок 4 — Структурная схема цифровой системы управления.

Для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью был создан комплекс программ в виде двух Simulink-схем верхнего уровня (рис. 5), скриптов для валидации, сборки, компиляции и развертывания алгоритмов на ЦМРВ. Simulink-схема верхнего уровня для ЦМРВ «Регулятор» содержит драйверы используемых модулей АЦП/ЦАП и подсистему, реализованную через блок Model reference, в которой находятся алгоритмы управления. На рис. 56 приведена Simulink-схема верхнего уровня для ЦМРВ «Модель объекта», она так же содержит драйверы АЦП/ЦАП и Model reference с моделью объекта. ЦМРВ «Регулятор» содержит внутреннюю модель объекта, при этом блок Model reference ссылается на ту же подсистему, которая используется в Simulink-схеме для ЦМРВ «Модель объекта». Это позволяет реализовать три режима моделирования:

1. Моделирование системы на внутренней модели объекта в Simulink на компьютере разработчика, без использования ЦМРВ;
2. Моделирование системы на внутренней модели объекта в реальном времени. Моделирование осуществляется только на ЦМРВ «Регулятор», АЦП и ЦАП при этом не используются;
3. Полунатурное моделирование в реальном времени в полном соответствии со схемой на рис. 46. При этом используется внешняя модель объекта, которая находится на ЦМРВ «Модель объекта», а обратная связь осуществляется через АЦП и ЦАП.

Моделирование на внутренней модели объекта позволяет осуществлять быструю перестройку алгоритма управления, так как блоки «PLANT MODEL» в обоих Simulink-схемах верхнего уровня ссылаются на одну и ту же подсистему с моделью объекта.

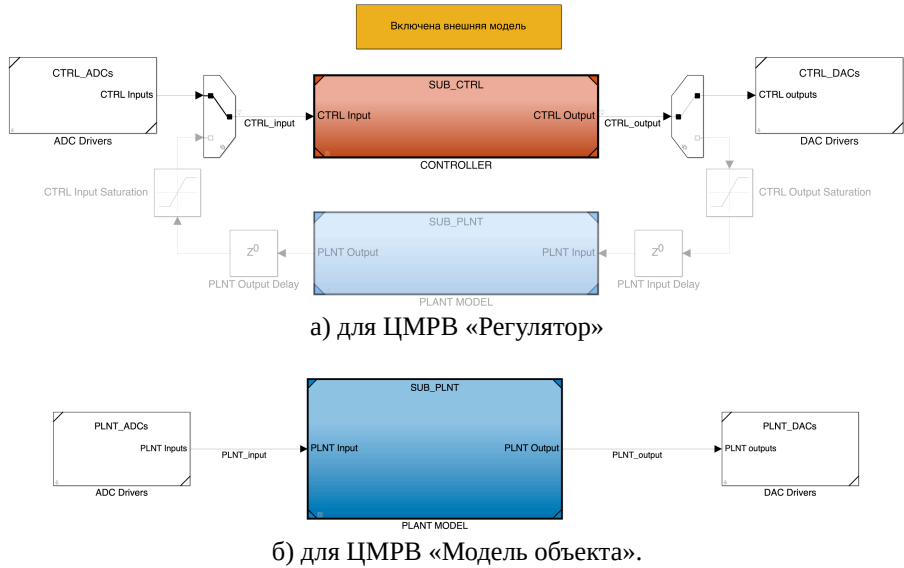


Рисунок 5 — Simulink-схемы верхнего уровня.

Третья глава посвящена полунатурному моделированию систем управления положением плазмы с инвертором напряжения.

В первом разделе главы проведено сравнение систем управления вертикальным положением плазмы в D-образном токамаке, где в качестве источника питания обмотки горизонтального управляющего поля (ОГУП) используются инверторы напряжения в релейном автоколебательном режиме и в режиме 9-уровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На рис. 6 показана схема расположения блоков системы управления при полунатурном моделировании, а на рис. 7 – его результаты.

Был смоделирован плазменный разряд длительностью 2 секунды: в течение первой секунды вертикальное положение плазмы смещалось на 5 см вверх, а

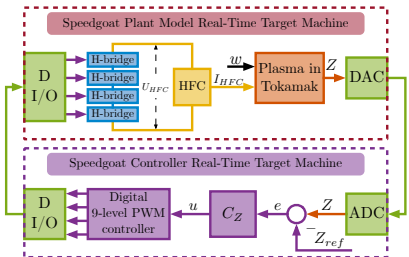
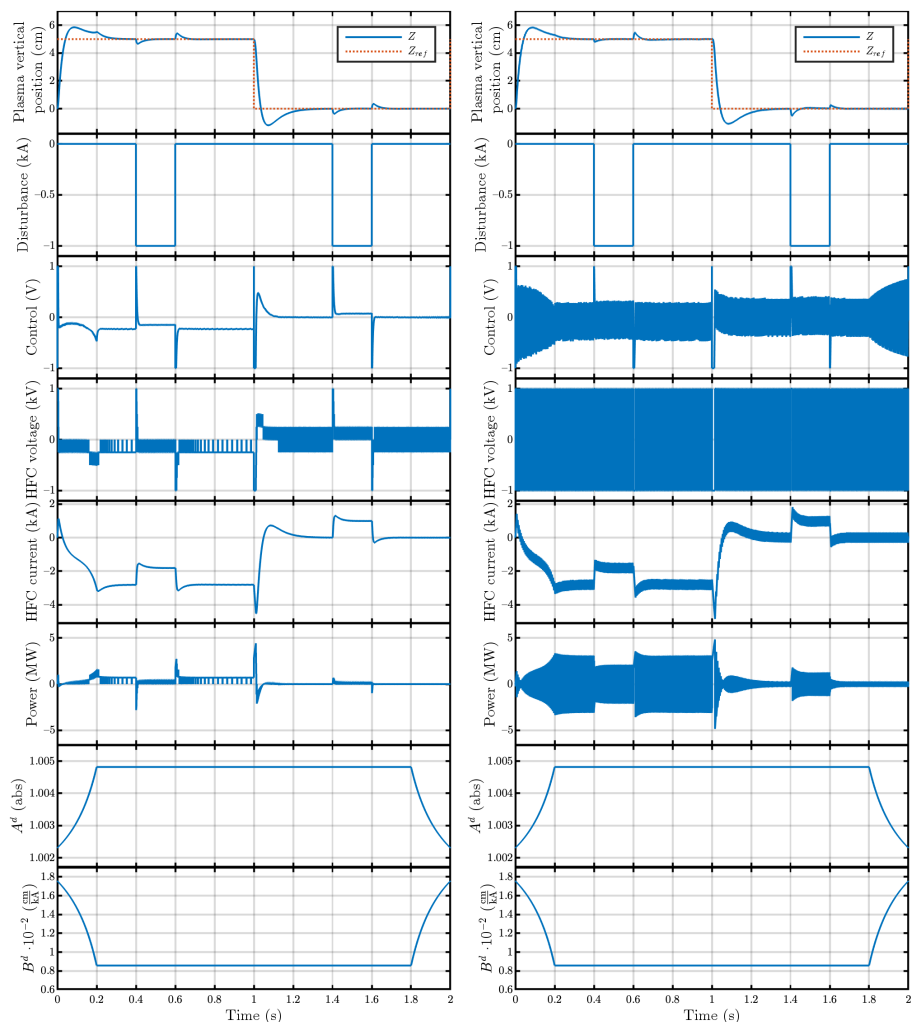


Рисунок 6 — Структурная схема системы управления с инвертором напряжения в режиме 9-уровневой ШИМ при проведении полунатурного моделирования.

в течение следующей секунды удерживалось на нулевом уровне. Обе системы управления обеспечивают практически идентичные переходные процессы по вертикальному положению плазмы. Сравнение проводилось по таким критериям, как мощность управления и спектры напряжения на ОГУП.



а) С инвертором напряжения в режиме 9-ти уровневой ШИМ

б) С инвертором напряжения в релейном автоколебательном режиме.

Рисунок 7 — Результаты полунатурного моделирования системы управления положением плазмы.

Во втором разделе представлен комплекс программ, реализующий цифровой многоуровневый ШИМ-контроллер, который управляет Н-мостами инвертора напряжения, при этом количество Н-мостов не ограничивается. Многоуровневый ШИМ контроллер реализован в Simulink как Reference subsystem. Алгоритм расчета импульсов на открытие БТИЗ-транзисторов, напряжения и среднего за период ШИМ напряжения реализован в виде Matlab function. Используя пакет Simulink Coder можно генерировать C/C++ код для последующей компиляции контроллера в виде приложения реального времени. Программный пакет HDL Coder позволяет сгенерировать прошивку для ПЛИС. Цифровой многоуровневый ШИМ контроллер был протестирован на операционных системах реального времени SimulinkRT, QNX Neutrino и RTLinux.

В третьем разделе приведены результаты моделирования (рис. 8) системы управления положением плазмы для проекта токамака ИГНИТОР.

В **четвертой главе** представлены результаты полунатурного моделирования (рис. 9) системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи для токамака Глобус-М2 (рис. 10). Также в данной главе представлен комплекс программ VisualPSI для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке (рис. 11)

В случае, если оборудование не позволяет обеспечить работу системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи в реальном времени, то есть когда $T_{ET} > T_s$, алгоритм восстановления равновесия может быть заменен идентифицированной моделью. Была решена задача идентификации алгоритма восстановления плазмы FCDI-IT с $T_{ET} \approx 200$ мкс с помощью робастного наблюдателя состояния. С помощью алгоритма восстановления равновесия плазмы FCDI-IT вычисляется серия линейаризованных LPV-моделей плазмы для серии плазменных разрядов. Зазоры включаются в вектор состояния всех моделей, а выходной вектор включает в себя сигналы, измеряемые системой магнитной диагностики токамака. Затем через LMI синтезируется робастный наблюдатель состояния, который обеспечивает минимальную ошибку между состояниями и оценками состояния для серии LPV моделей плазмы. Сравнение вариаций зазоров δg , полученных из LPV-моделей, и оценки вариаций зазоров $\delta \tilde{g}$, полученной с помощью робастного наблюдателя для плазменного разряда № 37263, показано на рис. 12.

В систему магнитного управления плазмой может быть добавлен внутренний каскад управления с потоками на магнитных петлях в обратной связи. С помощью этого каскада управления можно улучшить показатели качества управления и ограничить влияние внешнего возмущения на переходные процессы в замкнутой системе. Структурная схема системы магнитного управления плазмой с таким каскадом представлена на рис. 13. Регулятор $K(s)$ во внутреннем каскаде является динамическим регулятором по выходу произвольной структуры. Он синтезируется с использованием Обобщенной теоремы Ляпунова для размещения полюсов замкнутой системы в $\mathbb{D}$ -области и Bounded Real Lemma

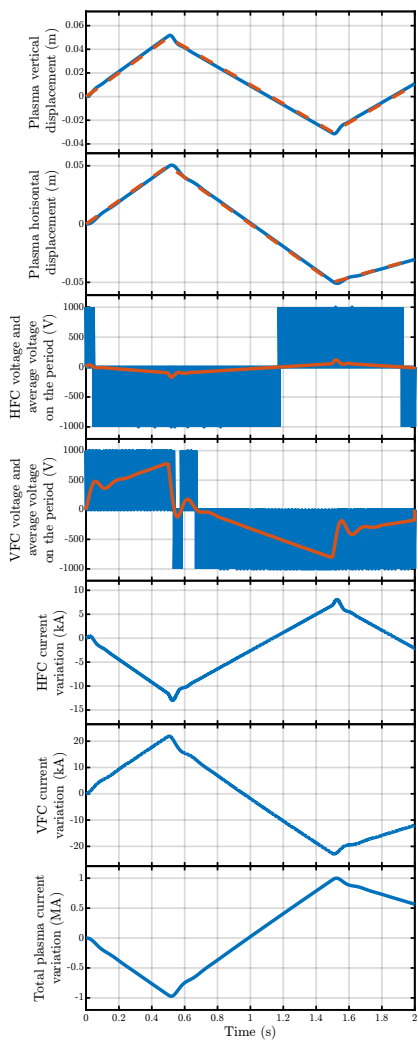


Рисунок 8 — Результаты моделирования системы управления положением плазмы в токамаке ИГНИТОР, напряжения на ОГУП и ОВУП и их средние за период ШИМ, которые показаны красными линиями, смещения токов в ОГУП и ОВУП и отклонение тока плазмы. Красные пунктирные линии являются задающими воздействиями.

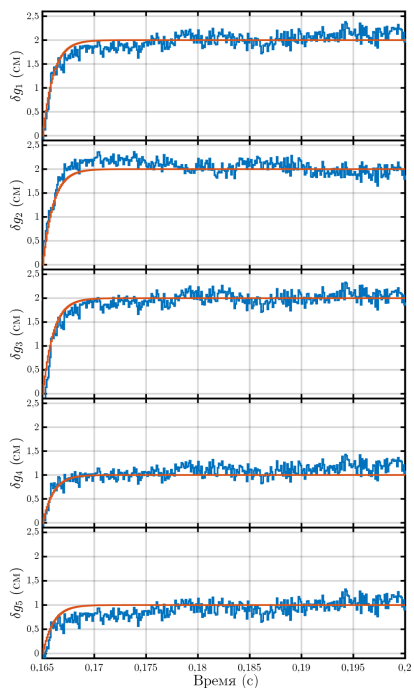


Рисунок 9 — Результаты полунатурного моделирования системы управления ударными точками g_{1-2} и зазорами g_{3-5} во время диверторной фазы разряда № 37326 токамака Глобус-М2. Красные линии - задающие воздействия.

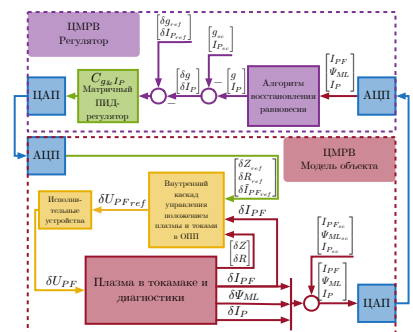


Рисунок 10 — Структурная схема системы магнитного управления плазмой для токамака Глобус-М2 при полунатурном моделировании.

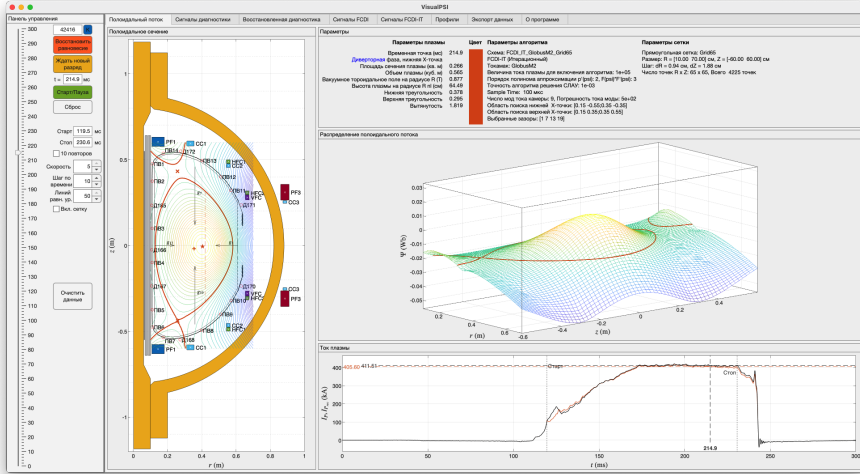


Рисунок 11 — VisualPSI отображает равновесие плазмы в течение разряда № 42416 токамака Глобус-М2, восстановленное алгоритмом FCDI-IT.

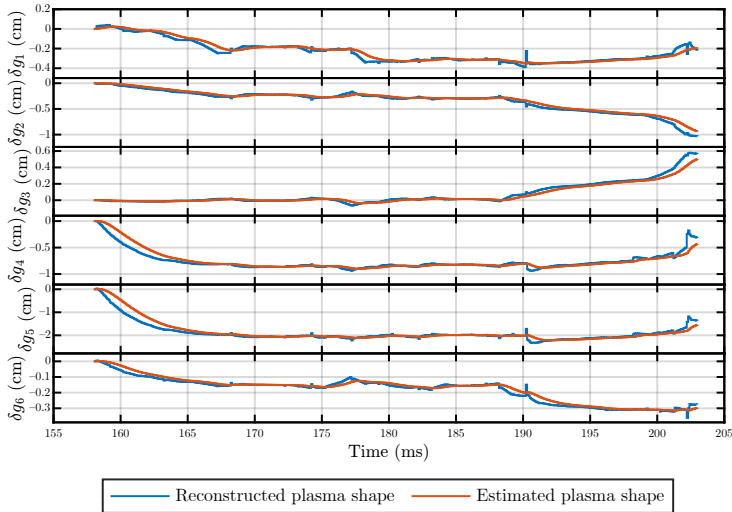


Рисунок 12 — Сравнение вариаций зазоров δg на выходе LPV-модели, вычисленной по восстановленному алгоритмом FCDI-IT равновесию (синяя линия), и оценки вариаций зазоров $\delta \tilde{g}$, полученных с помощью робастного наблюдателя (красная линия). Разряд № 37263 токамака Глобус-М2.

для ограничения $\mathcal{H}_\infty$ -нормы передаточных функций замкнутой системы. Результаты моделирования представлены на рис. 14, который содержит изменения отклонений зазоров δg_{1-5} , тока плазмы δI_p , полоидальной беты $\delta \beta_p$ и внутренней индуктивности плазмы δI_i при «малом срыве» плазмы, когда система магнитного управления перемещает границу плазмы на новое место. Моделирование показало работоспособность синтезированной системы управления, она обеспечивает требуемое качество управления и способна отражать внешнее возмущения. Представленный здесь регулятор внутреннего каскада управления по потокам на магнитных петлях был синтезирован в непрерывном времени. Метод может быть изменен для синтеза регулятора в дискретном времени, тогда его можно будет использовать в составе цифровой системы магнитного управления плазмой в токамаке.

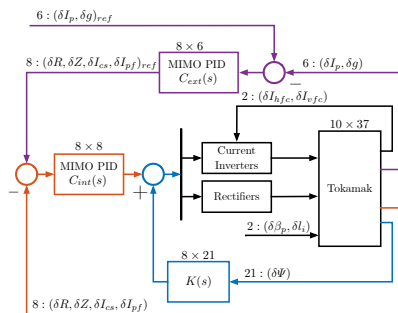


Рисунок 13 — Структурная схема системы управления формой плазмы с внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях (выделен синим).

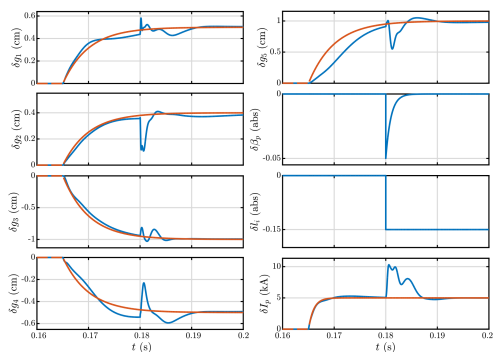


Рисунок 14 — Результаты моделирования системы магнитного управления плазмой с внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях на модели разряда №37239 токамака Глобус-М2. Красным обозначены задающие воздействия.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем. Разработан метод синтеза дискретного матричного ПИД-регулятора для управления нестационарными объектами. Синтезируется оптимальный регулятор, поскольку обеспечивается максимально возможное качество управления при заданных ограничениях на $\mathcal{H}_\infty$ -нормы передаточных функций замкнутой системы и требуемый запас робастной устойчивости. Варьированием границы робастности можно достигать компромисса между качеством управления и запасом робастной устойчивости замкнутой системы. Большая область робастности ведет к меньшей области качества управления и наоборот. Обеспечивается развязка контуров управления на низких частотах и максимизируется качество управления. Частоты среза в замкнутой системе управления располагаются максимально близко друг к другу, что позволяет получить схожие

времена переходных процессов по всем каналам управления. Разработанный метод был реализован в виде комплекса программ, интегрированных в MATLAB, и включает инструменты для визуализации результатов синтеза. Это открывает возможности для широкого применения метода в различных цифровых системах управления, включая системы управления плазмой в токамаках, что активно применялось в данной работе.

Основное внимание в работе было уделено применению полунатурного моделирования для разработки и исследования систем магнитного управления плазмой в токамаках. Был собран стенд реального времени и разработан комплекс программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью. Полунатурное моделирование позволило проводить моделирование в условиях, максимально приближенных к реальным. Для токамака Глобус-М2 было проведено полунатурное моделирование системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи, разработан комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы, разработан метод идентификации алгоритма восстановления равновесия посредством синтеза робастного наблюдателя состояний. Также было проведено моделирование системы магнитного управления с внутренним каскадом управления по потокам на магнитных петлях, с помощью которого можно улучшить показатели качества управления и ограничить влияние внешнего возмущения на переходные процессы. Полунатурное моделирование использовалось для исследования систем управления положением плазмы с инвертором напряжения, для чего был создан комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера, который управляет Н-мостами инвертора напряжения. Эти результаты позволили автору к настоящему времени приступить к внедрению цифровой системы магнитного управления плазмой на токамаке Глобус-М2.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему учителю д.т.н., профессору Юрию Владимировичу Митришкину (26.11.1946 — 22.01.2024) за постановку задачи и научное руководство на протяжении семи лет. Светлая ему память.

Особую благодарность автор выражает научному руководителю д.т.н., чл.-корр. РАН Андрею Алексеевичу Галяеву за моральную поддержку, обсуждения и научные консультации по подготовке диссертации. Также автор выражает благодарность своему коллеге Павлу Сергеевичу Кореневу за совместную плодотворную работу, направленную на общее дело, а также всем коллегам из ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН и ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автор благодарит разработчиков проекта *Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template* за предоставленный $\text{\LaTeX}$ -шаблон, который значительно облегчил процесс оформления диссертации, особенно в части списка литературы.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus

1. *Konkov A. E., Mitrishkin Y. V.* Synthesis Methodology for Discrete MIMO PID Controller with Loop Shaping on LTV Plant Model via Iterated LMI Restrictions // *Mathematics*. — 2024. — Mar. — Vol. 12, no. 6. — P. 810. — DOI: [10.3390/math12060810](https://doi.org/10.3390/math12060810). — (WoS Q1: JIF – 2,3; 2,4/2,3).
Работа опубликована в открытой печати. Все результаты получены автором, Ю.В. Митришкин осуществлял научное руководство и консультирование.
2. *Konkov A. E., Mitrishkin Y. V.* Comparison Study of Power Supplies in Real-Time Robust Control Systems of Vertical Plasma Position in Tokamak // *IFAC-PapersOnLine*. — 2022. — Vol. 55, no. 9. — P. 327–332. — DOI: [10.1016/j.ifacol.2022.07.057](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.057). — (Scopus Q3: SJR – 0,37; 0,38/0,37).
Работа опубликована в открытой печати. Все результаты получены автором, постановка задачи и научное руководство осуществлено Ю.В. Митришкиным.
3. *Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kartsev N. M., Smirnov I. S.* New horizontal and vertical field coils with optimised location for robust decentralized plasma position control in the IGNITOR tokamak // *Fusion Engineering and Design*. — 2022. — Vol. 174. — P. 112993. — DOI: [10.1016/j.fusengdes.2021.112993](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112993). — (WoS Q1: JIF – 1,9; 1,25/0,4).
Работа опубликована в открытой печати. Автором осуществлена разработка и моделирование системы управления положением плазмы, остальные результаты получены соавторами.
4. *Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kruzhkov V. I., Ovsiannikov N. E.* New Identification Approach and Methods for Plasma Equilibrium Reconstruction in D-Shaped Tokamaks // *Mathematics*. — 2021. — Dec. — Vol. 10, no. 1. — P. 40. — DOI: [10.3390/math10010040](https://doi.org/10.3390/math10010040). — (WoS Q1: JIF – 2,3; 1,44/0,43).
Работа опубликована в открытой печати. Автором получены результаты по робастному наблюдателю состояния. Остальные результаты получены соавторами.
5. *Konkov A. E., Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Patrov M. I.* Robust Cascade LMI Design of MIMO Control System for Plasma Position, Current, and Shape Model with Time-Varying Parameters in a Tokamak // *IFAC-PapersOnLine*. — 2020. — Vol. 53, no. 2. — P. 7344–7349. — DOI: [10/gr4bxz](https://doi.org/10/gr4bxz). — (Scopus Q3: SJR – 0,37; 0,38/0,3).
Работа опубликована в открытой печати. Автором получены основные результаты: осуществлены разработка и моделирование системы магнитного управления плазмой. Соавторы решали вспомогательные задачи.

В изданиях из списка ВАК

6. Коньков А. Е., Корнев П. С., Митришкин Ю. В., Балаченков И. М., Киселев Е. О. Система магнитного управления плазмой реального времени с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи для токамака Глобус-М2 // Физика плазмы. — 2023. — Т. 49, № 12. — С. 1348–1356. — DOI: [10.31857/S0367292123600760](https://doi.org/10.31857/S0367292123600760). — (RSCI Q1: R – 0,41; 0,56/0,4) — [Перевод: Konkov A. E., Korenev P. S., Mitrishkin Y. V., Balachenkov I. M., Kiselev E. O. Real-Time Plasma Magnetic Control System with Equilibrium Reconstruction Algorithm in the Feedback for the Globus-M2 Tokamak // Plasma Physics Reports. — 2023. — Vol. 49, no. 12. — P. 1552–1559. — DOI: [10.1134/S1063780X23601827](https://doi.org/10.1134/S1063780X23601827). — (WoS Q4: JIF – 0,9; 0,5/0,4)].
Работа опубликована в открытой печати. Автором получены основные результаты: осуществлены разработка и полунатурное моделирование системы магнитного управления плазмой. Соавторы решали вспомогательные задачи.
7. Корнев П. С., Коньков А. Е., Митришкин Ю. В., Балаченков И. М., Киселев Е. О., Минаев В. Б., Сахаров Н. В., Петров Ю. В. Усовершенствованный алгоритм FCDI для восстановления равновесия плазмы в токамаке // Письма в журнал технической физики. — 2023. — Т. 49, № 7. — С. 36–39. — DOI: [10.21883/PJTF.2023.07.54920.19468](https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.07.54920.19468). — (RSCI Q1: R – 0,37; 0,25/0,13) — [Перевод: Korenev P. S., Konkov A. E., Mitrishkin Y. V., Balachenkov I. M., Kiselev E. O., Minaev V. B., Sakharov N. V., Petrov Y. V. Improved FCDI algorithm for tokamak plasma equilibrium reconstruction // Technical Physics Letters. — 2023. — Vol. 49, no. 4. — P. 34–37. — DOI: [10.21883/TPL.2023.04.55873.19468](https://doi.org/10.21883/TPL.2023.04.55873.19468). — (WoS Q4: JIF – 0,8; 0,25/0,13)].
Работа опубликована в открытой печати. Разработка комплексов программ «VisualPSI» и «Tokamak Datasets Processing Toolbox» осуществлена автором самостоятельно. Остальные результаты были получены совместно с соавторами.
8. Митришкин Ю. В., Корнев П. С., Коньков А. Е., Карцев Н. М. Подавление смещений плазмы по вертикали системой управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в D-образном токамаке // Автоматика и телемеханика. — 2022. — № 4. — С. 100–124. — DOI: [10.31857/S0005231022040067](https://doi.org/10.31857/S0005231022040067). — (RSCI Q1: R – 0,694; 1,56/0,47) — [Перевод: Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Konkov A. E., Kartsev N. M. Suppression of Vertical Plasma Displacements by Control System of Plasma Unstable Vertical Position in D-Shaped Tokamak // Automation and Remote Control. — 2022. — Vol. 83, no. 4. — P. 579–599. — DOI: [10.1134/S0005117922040051](https://doi.org/10.1134/S0005117922040051). — (WoS Q4: JIF – 0,6; 1,31/0,4)].
Работа опубликована в открытой печати. Автором осуществлена разработка и моделирование системы управления положением плазмы, остальные результаты получены соавторами.

9. Митришкин Ю. В., Коньков А. Е., Корнев П. С. Сравнительное исследование систем управления реальным временем вертикальным положением плазмы в токамаке с разными источниками питания обмотки горизонтального управляющего поля // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. — 2022. — Т. 45, № 3. — С. 34–49. — (RSCI Q2: R – 0,27; 1/0,7) — [Перевод: Mitrishkin Y. V., Konkov A. E., Korenev P. S. Comparative Study of Real-Time Control Systems of Vertical Plasma Position in Tokamak with Different Power Supplies for Horizontal Control Field Coil // Physics of Atomic Nuclei. — 2023. — Vol. 86, no. 7. — P. 1616–1628. — DOI: [10.1134/S1063778823070165](https://doi.org/10.1134/S1063778823070165). — (WoS Q4: JIF – 0,3; 0,81/0,57)].

Работа опубликована в открытой печати. Все основные результаты получены автором, Ю.В. Митришкин осуществлял научное руководство и консультирование, П.С. Корнев вычислил фазовые траектории модели объекта управления.

Зарегистрированные патенты

10. Заявка 2022117879 Россия, МПК⁷ G 21 B 1/00. Способ импульсного цифрового каскадного управления положением плазмы в D-образном токамаке / Ю. В. Митришкин, А. Е. Коньков (Россия) ; заявитель ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ) (RU). — № RU 2 788 188 C1 ; опубл. 17.01.2023, приоритет 30.06.2022 (Рос. Федерация). — 18 с. : ил.
11. Заявка 2022117882 Россия, МПК⁷ G 21 B 1/00. Способ быстродействующего определения формы плазмы в камере токамака в течение диверторной фазы плазменных разрядов / Ю. В. Митришкин, А. Е. Коньков, П. С. Корнев, В. И. Кружков (Россия) ; заявитель ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ) (RU). — № RU 2 787 571 C1 ; опубл. 11.01.2023, приоритет 30.06.2022 (Рос. Федерация). — 20 с. : ил.

Коньков Артем Евгеньевич

Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного
управления плазмой в токамаках

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 07.11.2024. Заказ № 5196/11

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,37. Тираж 80 экз.

Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова
119192 Москва, Ломоносовский проспект, д. 27