

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Конькова Артема Евгеньевича

на тему «Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В диссертационной работе А.Е. Конькова «Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках» рассматривается задача, которая относится к проблемам построения новых наукоемких и сложных в технологическом смысле управляемых энергетических систем. Одним из перспективных направлений энергетики будущего является разработка систем на основе реакции термоядерного синтеза, в ходе которой происходит слияние ядер легких элементов, например, водорода. Хотя технологически управляемый термоядерный синтез чрезвычайно сложен, термоядерная энергетика имеет значительные преимущества по сравнению с существующими источниками энергии и при этом термоядерный синтез не производит долгоживущих радиоактивных отходов.

Применение методов автоматического управления для обеспечения устойчивости и равновесия плазмы и термоядерных установок с магнитным удержанием стало общепринятой необходимостью. Следует отметить, что объектом управления в таких системах является плазма в токамаках, созданная магнитным полем токов в обмотках тороидального поля, распределенным током самой плазмы и токами в обмотках тороидального поля. Этот объект автоматического управления обладает рядом особенностей и в первую очередь то, что плазма представляет собой распределенную систему, поэтому даже приближенные уравнения ее динамики, записываются

в виде нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с неполной информацией о параметрах; плазма подвержена воздействию неконтролируемых возмущений, да и сама плазма служит источником широкополосных малоизученных шумов, что затрудняет идентификацию ее параметров. Сложность, не стационарность и чувствительность объекта к возмущающим воздействиям и управлению определяют ситуацию того, что в настоящее время в мире не сложилось общих нормативов для систем управления плазмой в токамаках и общих методик по разработке новых систем управления.

Несмотря на обилие отечественных и зарубежных публикаций по обозначенному направлению, тема диссертации безусловно *актуальна*. Актуальность исследований 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.

Целью диссертационных исследований является разработка и применение численных методов и комплексов программ для полунатурного моделирования цифровых систем магнитного управления плазмой токамаках.

Для достижения указанной цели были *поставлены и решены следующие задачи*:

1. Разработка метода синтеза дискретных многомерных регуляторов на основе техники линейных матричных неравенств и реализация этого метода в комплексе программ.
2. Создание комплекса программ для полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью на стенде реального времени.
3. Проведение полунатурного моделирования разработанных цифровых систем управления положением плазмы в токамаке с инвертором напряжения и разработка комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера.
4. Проведение полунатурного моделирования разработанных цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаке с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи.

Теоретическая часть исследований проводилась с применением современных методов математической теории управления.

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. Для решения систем матричных неравенств использовались программные среды выпуклой оптимизации CVX и YALMIP с численными решателями SDPT3 и MOSEK. Результаты находятся в преимущественном соответствии с общеизвестными результатами, дополняют и развивают их.

Степень научной разработанности темы является высокой, подтверждаемой в достаточном для кандидатской диссертации количеством авторских публикаций по заданной тематике. 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. Зарегистрировано 2 патента.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН в лабораториях № 7, № 41; 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, Управление большими системами, Всероссийское совещание по проблемам управления).

Основными **научно-практическими результатами**, представленными в диссертации, является разработка метода решения задачи синтеза дискретного матричного ПИД-регулятора для управления плазмой в токамаках, обеспечивающий максимально возможное качество управления при заданных ограничениях на H_∞ -нормы передаточных функций замкнутой системы и требуемый запас робастной устойчивости. Разработанный метод был реализован в виде комплекса программ, интегрированных в MATLAB, включающий инструменты для визуализации результатов синтеза. Для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью был создан стенд реального времени и разработан соответствующий комплекс программ для проведения такого моделирования, что использовалось при исследовании систем магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2. Полунатурное моделирование использовалось для исследования систем управления положением плазмы с инвертором напряжения, для чего был создан комплекс программ для реализации цифрового многоуровневого ШИМ-контроллера.

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

Краткий обзор представленных в диссертации материалов исследования:

Глава 1. Метод синтеза дискретных матричных ПИД-регуляторов

Объектом управления в термоядерных системах является плазма в токамаках, созданная магнитным полем токов в обмотках тороидального поля, распределенным током самой плазмы и токами в обмотках тороидального поля. В задачах управления формой, током и положением плазмы в токамаке, как правило, требуется удерживать плазму возле желаемого равновесного положения. Малость отклонений от равновесия, обеспечиваемая системами управления с обратной связью, позволяют описывать объект управления линейной системой второго порядка обыкновенных дифференциальных уравнений с учетом внешних возмущений. В общем случае объект управления описывается линейной моделью в пространстве состояний в непрерывном времени с переменными параметрами (1.1-1.3). Первая глава диссертации посвящена постановке задачи и разработке численного метода синтеза дискретного многомерного регулятора с фиксированной структурой на примере матричного (многомерного) ПИД-регулятора. Основной мотивацией к применению матричных ПИД-регуляторов является необходимость одновременного управления несколькими выходами многомерного объекта со связанными контурами управления.

Важными понятиями для исследования систем с параметрической неопределенностью является введение понятий «качество управления замкнутой системы» и «робастной устойчивости замкнутой системы». Ограничение на функцию чувствительности определяет качество управления замкнутой системы. Аналогично, ограничение на дополнительную функцию чувствительности определяет запас робастной устойчивости замкнутой системы. Эти ограничения обычно называются «границей качества» и «границей робастности». Логично, что «большая область робастности ведет к меньшей области качества управления и наоборот». Улучшенный метод

взаимоотношений между этими понятиями (основа которого изложена в книге Skogestad, S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design* / John Walleyed and Soon) продемонстрированы на рисунках 1.6, 1.7 и применен в диссертации для синтеза систем управления плазмой в токамаках. Используя замкнутые передаточные функции, формулируются критерии качества управления замкнутой системы управления с матричным ПИД-регулятором в терминах ограничений на H_∞ -нормы передаточных функций.

Для реализации метода создан программный комплекс в виде пакета дополнения (toolbox) к MATLAB.

В диссертации отмечено, что: «Передаточные функции замкнутой системы взаимосвязаны, что исключает необходимость наложения «слишком строгих» ограничений на максимальные усиления всех передаточных функций. Наложение таких ограничений может привести к тому, что система не будет иметь численного решения.

В данной главе представлен разработанный метод синтеза дискретного многомерного ПИД-регулятора для управления нестационарными объектами. Синтезируется оптимальный регулятор, который обеспечивает максимально возможную область качества управления при заданном запасе робастной устойчивости. Утверждается, что наличие «плавающей» границы качества управления является преимуществом по сравнению с классическим подходом к формированию контура. Варьированием границы робастности можно достигать компромисса между качеством управления и запасом робастной устойчивости замкнутой системы. Предложенная развязка контуров управления на низких частотах обеспечивает минимаксное качество управления. Регулятор с постоянными параметрами (LTI) настраивается на модели объекта с переменными параметрами (LTV), которая представляется в виде массива передаточных функций с индексом n . Для реализации разработанного метода был создан комплекс программ в

виде пакета дополнения к системе MATLAB, который включает инструменты для визуализации результатов синтеза. Метод и разработанный комплекс программ могут быть использованы для синтеза регуляторов в различных цифровых системах управления. В этой работе метод используется для синтеза систем управления плазмой в токамаках.

В разделе 1.2 представлена идея формирования алгоритма для определения неизвестных параметров матричного (многомерного) ПИД-регулятора с фиксированной структурой, т.е. решения задачи параметрической идентификации такого регулятора.

Замечания

Стр.13-14. *Не исследуются вопросы управляемости и наблюдаемости в системах с переменными параметрами.*

Стр.14. «Согласно [Duan, G.-R. LMIs in Control Systems], для гарантии качества управления и запаса робастной устойчивости системы управления замкнутой системы достаточно синтезировать регулятор на массиве LTI моделей, рассчитанных в экстремальных точках множества параметров возмущения». *В общем случае не точно.*

Стр.31. «Необходимо учитывать контекст задачи, вводя ограничения избирательно — там, где они критически важны для надежной работы замкнутой системы управления».

Задача учета ограничений формально не определена.

Стр.36. «Повторять решение (1.36) до тех пор, пока $|\mu_i / \mu_{opt}| > \tau \dots$ Этот алгоритм останавливает ССР, когда локальный оптимум μ_i считается близким к оптимуму μ . Типичное значение для τ составляет 1%».

Значит для каждого τ будет «локальный минимум»?

Глава 2. Стенд реального времени для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления

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 программными средствами, а другая часть представляет собой физическое оборудование. Это позволяет проводить испытания и отработку систем управления в условиях, максимально приближенных к реальным, но при этом сохраняется возможность более гибкого и безопасного проведения численных экспериментов.

В данной главе был описан стенд реального времени, на котором в данной работе проводится полунатурное моделирование цифровых систем управления плазмой в токамаках. Представлен комплекс программ в виде Simulink-схем верхнего уровня для ЦМРВ «Регулятор» и «Модель объекта» для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью.

Для проведения полунатурного моделирования цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках в лаборатории 41 ИПУ РАН был создан стенд реального времени. Автор принимал непосредственное участие в проектировании стенда реального времени. Сборка стенда, пусконаладочные работы и разработка комплекса программ были выполнены автором диссертации самостоятельно.

Для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью был создан комплекс программ в виде двух Simulink-схем верхнего уровня, скриптов для валидации алгоритмов управления и модели объекта, а также скриптов для сборки, компиляции и развертывания алгоритмов на ЦМРВ.

Таким образом, во второй главе был описан стенд реального времени, на котором в данной работе проводится полунатурное моделирование цифровых систем управления плазмой в токамаках (рис. 2.2). Представлен комплекс программ в виде Simulink-схем верхнего уровня для ЦМРВ

«Регулятор» и «Модель объекта» для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью.

Замечания

Стр. 40. В цифровой части находится цифровой (дискретный) регулятор, который на основе вектора входных ошибок $e(kTs)$ вычисляет управляющий вектор $u(kTs)$.

Задача управления по рассогласованию между задающим сигналом и выходом объекта может быть названа «задачей слежения». Оптимальное решение такой задачи возможно только в случае, когда задающий сигнал полностью известен.

Глава 3. Полунатурное моделирование систем управления положением плазмы с инвертором напряжения

В данной главе рассматривались системы управления положением плазмы в токамаке. В качестве источника питания ОГУП использовался инвертор напряжения. Проведенное полунатурное моделирование систем управления положением плазмы с инверторами напряжения разных типов показало преимущества применения инвертора напряжения в режиме ШИМ. Представлен комплекс программ для реализации многоуровневого ШИМ-контроллера. Проведено моделирование системы управления положением плазмы для проекта токамака ИГНИТОР, которое показало работоспособность разработанной системы управления.

В первом разделе главы приведены результаты полунатурного моделирования систем управления вертикальным положением плазмы в D-образном токамаке, где в качестве источника питания используются инверторы напряжения в релейном автоколебательном режиме (РАК) и в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Во втором разделе представлен комплекс программ, реализующий цифровой многоуровневый ШИМ-контроллер. В третьем разделе приведены результаты моделирования системы управления положением плазмы для проекта токамака ИГНИТОР.

В разделе 3.1 приведено сравнительное исследование и полунатурное моделирование систем управления неустойчивым вертикальным положением плазмы в токамаке с разными типами источников питания обмотки горизонтального управляющего поля при этом используется упрощенная модель вертикального движения плазмы в токамаке [Митришкин, Кузнецов, 1994]. Эта модель была использована для синтеза системы управления положением плазмы в токамаке Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). Возмущения и другие неопределенности, влияющие на плазму во время плазменного разряда, учитываются путем введения в модель аддитивного входного внешнего возмущения $w(t)$.

В разделах 3.2, 3.3 приведены результаты полунатурного моделирования систем управления положением плазмы с инверторами напряжения разных типов показало преимущества применения инвертора напряжения в режиме ШИМ. Проведено моделирование системы управления положением плазмы для проекта токамака ИГНИТОР, которое показало работоспособность разработанной системы управления.

Замечание

Стр. 50. «Возмущения и другие неопределенности, влияющие на плазму во время плазменного разряда, учитываются путем введения в модель аддитивного входного внешнего возмущения $w(t)$ »

Не определена область существования возмущающих воздействий $w(t)$ и не ясно какими средствами «парировются» эти «возмущения и неопределенности». Из рис. 3.4 можно видеть, что рассогласование между выходом системы, который содержит воздействие неопределенных возмущений, и задающим сигналом, зависит от этих возмущений.

Глава 4. Моделирование систем управления формой плазмы в токамаке Глобус-М2

В данной главе была рассмотрена система магнитного управления плазмой для токамака Глобус-М2. Было проведено моделирование системы

магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи, которое подтвердило работоспособность синтезированной системы при слежении за зазорами между сепаратрисой плазмы и лимитером токамака. Представлен комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке, который был внедрен в систему магнитной диагностики токамака Глобус-М2. Для случая, когда в системе управления формой плазмы невозможно использовать алгоритм восстановления равновесия реального времени, был разработан численный метод синтеза робастного наблюдателя состояний, который может вычислять оценки зазоров в реальном времени. В завершении главы 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.

Основные результаты главы 4 нашли отражение в пяти авторских печатных работах.

В четвертой главе представлены результаты работы система магнитного управления плазмой для токамака Глобус-М2. Было проведено моделирование системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия плазмы в обратной связи, которое подтвердило работоспособность синтезированной системы при слежении за зазорами между сепаратрисой плазмы и лимитером токамака.

Представлен комплекс программ для визуализации восстановленного равновесия плазмы в токамаке, который был внедрен в систему магнитной диагностики токамака Глобус-М2. Для случая, когда в системе управления формой плазмы невозможно использовать алгоритм восстановления равновесия реального времени, был разработан численный метод синтеза робастного наблюдателя состояний, который может вычислять оценки зазоров в реальном времени. В завершении главы приведены результаты

моделирования 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.

Замечание

Стр. 80. Рисунок 4.10. Из уравнения наблюдателя (формула под формулой (4.2)) не видно, что учитываются параметрические неопределенности системы. Все параметры известны. Решение построения оценки процесса $x(t)$ по измерениям $y(t)$ можно получить путем организации наблюдателя Луенбергера.

Стр. 82. «Система (4.4) включает $NmM+1$ ЛМН и должна быть решена относительно двух неизвестных матриц, X и V . Матрица наблюдателя определяется как $L = X^{-1}V$.

Так как матрицы X и V «неизвестные», то и матрица наблюдателя L тоже неопределенна.

Общий вывод по диссертационной работе

К основным результатам исследований, представленных в диссертации следует отнести:

1. Разработан метод синтеза дискретного матричного ПИД-регулятора для управления нестационарными объектами, который обеспечивает заданное качество управления при известных ограничениях на H_{∞} -нормы передаточных функций замкнутой системы и требуемый запас робастной устойчивости.

2. Создан комплекс программ, интегрированных в MATLAB, включающий инструменты для визуализации результатов синтеза что открывает возможности для широкого применения метода в различных цифровых системах управления, включая системы управления плазмой в токамаках, что активно применялось в данной работе.

Собран стенд реального времени и разработан комплекс программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с

обратной связью. Полунатурное моделирование позволило проводить моделирование систем магнитного управления плазмой в токамаках.

3. Собран стенд реального времени и разработан комплекс программ для проведения полунатурного моделирования цифровых систем управления с обратной связью. Полунатурное моделирование позволило проводить моделирование систем магнитного управления плазмой в токамаках.

4. Для токамака Глобус-М2 было проведено полунатурное моделирование системы магнитного управления плазмой с алгоритмом восстановления равновесия в обратной связи, разработан комплекс программ для визуализации восстановлено равновесия плазмы, разработан метод идентификации алгоритма восстановления равновесия посредством синтеза робастного наблюдателя состояний.

5. 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.

6. 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 H-мостами инвертора напряжения.

Диссертационная работа А.Е. Конькова «Полунатурное моделирование цифровых систем магнитного управления плазмой в токамаках» вносит существенный вклад в развитие теории, методов, и технологий для построения перспективных систем магнитного и кинетического управления плазмой.

Указанные выше замечания не умаляют значимости представленных результатов 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», а 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 технических наук,

ординарный профессор департамента прикладной математики Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

АФАНАСЬЕВ Валерий Николаевич

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Адрес места работы:

123458, Российская Федерация, г. Москва, Талинская ул., д. 34.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова, департамент прикладной математики.

Тел.: +7 (495) 916-88-29; e-mail: miem@hse.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

В.Н. Афанасьева удостоверяю: