



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Университета ИТМО,

доктор технических наук, профессор

В.О. Никифоров

«05» 05 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» о диссертации

Кучмина Андрея Юрьевича на тему: «Идентификация и синтез систем управления динамическими объектами с ограничениями», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности, 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)»

Актуальность темы диссертационного исследования. Создание управляющих систем сложными объектами остаётся важной проблемой в современной теории и практики автоматического управления. Большой интерес в этой области представляют разработки систем реального времени для управления сложными физико-техническими системами, которые в основном являются динамическими объектами, действующими в условиях неопределённости и всевозможных ограничений, в том числе интервальных. Данная проблема имеет много аспектов, к которым следует отнести сложность описания, моделирования и прогнозирования поведения подобных объектов и системы управления в целом. Современный подход в построении таких систем основан на применении технологий проактивного управления, заключающегося в возможности прогнозировать варианты поведения объекта управления и внешней среды, влияющей на объект управления, планировать и реализовывать управление в соответствии с выбранными критериями и ограничениями. Построение таких прогнозирующих моделей и их уточнение должно выполняться в контуре управления. Эти тенденции нашли отражение в диссертационной работе А.Ю. Кучмина, посвященной разработке методов идентификации и синтеза систем управления динамическими объектами, функционирующими в условиях различных ограничениях. Таким образом, развитие данного подхода находится в

соответствии с основными перспективными направлениями в создании высокоточных систем управления сложными физико-техническими объектами, и тема диссертационного исследования А.Ю. Кучмина представляется актуальной.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объём диссертации составляет 323 страницы.

Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, формулируются цели и задачи работы. Показана научная новизна исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту. Описана структура диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу современных тенденций в развитии методов создания высокоточных систем управления сложными физико-техническими объектами, которые в подавляющих случаях являются динамическими объектами, действующими в условиях всевозможных ограничений. Отмечается, что кибернетический подход в решении данных задач стал основой для развития киберфизических систем, одним из классов которых являются интеллектуальные электромеханические системы (ИЭМС). Рассмотрены вопросы создания систем управления с использованием ИЭМС на основе иерархического подхода. Для прогнозирования поведения сложных систем, действующих в условиях различных ограничений, необходимо применение прогнозирующих «нежестких» моделей, формируемых в реальном времени применением методов идентификации. При этом нужно учитывать сохранение физической адекватности прогнозирующих моделей, и реализуемости законов управления. Дается анализ методов идентификации систем управления динамическими объектами. Описаны методы синтеза статистических идентификаторов на основе метода наименьших квадратов для квазистационарных и нестационарных динамических объектов на примере ИЭМС. При таком описании ИЭМС должны учитываться ограничения, обусловленные режимами его функционирования и физическими законами. Для этого предлагается сформулировать задачу синтеза идентификаторов как задачу математического программирования (МП). Предлагается метод идентификации с использованием множественно-функционального подхода для нелинейной нестационарной системы, основанный на решении задачи МП. Такие множественно-функциональные методы позволяют описывать нестационарность и стохастичность систем управления посредством сведения к моделям на основе интервальных методов и систем неравенств. В качестве вспомогательных инструментов применяются различные преобразования над измерительной информацией, что повышает

помехоустойчивость множественно-функциональных методов. Даются примеры идентификации различных систем.

Вторая глава посвящена разработке нового метода оптимизации для решения задач синтеза и идентификации систем управления, а также при анализе и фильтрации данных экспериментов с учётом различных ограничений. Предлагается метод многомерных оболочек (ММО), основанный на построении области допустимых решений путём анализа ограничений произвольного вида. Исходные ограничения аппроксимируются кусочно-полиномиальными ограничениями или ограничениями в виде рациональных дробей. Это позволяет свести исходную задачу оптимизации при ограничениях к набору взаимосвязанных подзадач МП, ограничения которых формируют выпуклые многомерные оболочки. Дан пример использования ММО и его модификаций для решения задачи синтеза траектории движения модуля ИЭМС при наличии ограничений. Метод универсальный и может быть использован для синтеза оптимальных траекторий как самих модулей ИЭМС, так и систем, состоящих из таких модулей.

Третья глава посвящена разработке моделей базовых блоков ИЭМС с исполнительными механизмами параллельной структуры. Предлагаются модели адаптивных платформ ИЭМС на подвижном основании, перемещаемых пакетами актуаторов, с учетом изменения линии действия этих актуаторов, работающих в режиме слежения. Создание подобных моделей является актуальной задачей, которая играет важную роль при расчёте параметров регуляторов и оценивании неизмеряемых компонентов вектора состояния. Предлагаются нелинейные модели кинематики и динамики подобных объектов. Решена задача линеаризации этих моделей в стационарной точке. Предложены простые формулы расчёта матрицы эквивалентной жёсткости адаптивных платформ, перемещаемых пакетами актуаторов. Эти формулы использованы для построения матрицы эквивалентной жёсткости платформы Стюарта (гексапода). Предложен метод идентификации парциальной жёсткости актуатора адаптивных платформ. С помощью данного метода выполнена идентификация парциальной жёсткости актуатора гексапода PI H-810. Дан пример идентификации параметров гексапода при его движении в малых отклонениях относительно заданной траектории.

В четвёртой главе рассматриваются вопросы создания систем управления радиотелескопами миллиметрового диапазона с адаптивными зеркальными системами (ЗС). Отмечается, что модули ИЭМС получили широкое распространение в качестве элементов опорно-поворотных устройств радиотелескопов и исполнительных механизмов элементов ЗС. Предложена многоконтурная система управления радиотелескопом, основанная на методе автофокусировки зеркальной системы. Система управления состоит

из 5 контуров. Положение элементов ЗС и их деформации прогнозируются с помощью модели пространственной металлоконструкции. Управление адаптивной ЗС предусматривает использование электродинамической модели для расчёта прохождения радиоизлучения, основанная на лучевом методе. На основании этой информации решается задача определения желаемого положения элементов ЗС радиотелескопа. Предлагается алгоритм определения удлинений актуаторов адаптивных поверхностей элементов ЗС на примере поверхности главного зеркала. Предложена методика аппроксимации оптимального управления приводами элементов ЗС с помощью прямого метода Ляпунова, позволяющая учитывать линейные ограничения.

В пятой главе описана идентификация характеристик материалов в информационно-измерительной системе (ИИС) испытательного стенда с разрезными стержнями Гопкинсона-Кольского, предназначенного для проведения динамических испытаний образцов различных материалов на прочность. Предлагается повысить эффективность ИИС стенда применением разработанных модулей обработки измерительной информации с использованием методов идентификации на основе множественно-функционального подхода. Разработка методов и их верификация осуществлялись на основе экспериментальных данных по динамической прочности известняка, битума и фибробетона, габбро-диабазы. Показано, что данная задача сводится к последовательности задач квадратичного программирования, когда выполняется согласованная фильтрация импульсов, и расчет фазовых сдвигов между ними. Предложены алгоритмы идентификации, учитывающие влияние экспериментальной установки и ИИС, которые позволили обнаружить новый эффект.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

Автореферат диссертации соответствует её содержанию, отражает актуальность темы исследования, её цели и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов диссертации обеспечена строгой математической постановкой задач, применением обоснованных методов решения, подтверждением полученных результатов методами численного моделирования и сравнением с экспериментальными данными.

Основные результаты их научная новизна и значимость.

Научную новизну диссертационной работы А.Ю. Кучмина представляют следующие результаты, выносимые на защиту:

1. Предложены модификации статистических идентификаторов на основе метода наименьших квадратов для систем управления квазистационарными и нестационарными динамическими объектами с применением матричного оператора сдвига во временной области, что позволяет в математической, а не в алгоритмической форме описывать разностные фильтры с различной скважностью отсчетов, а также проводить выбор параметров серии отсчетов для обеспечения оптимальной информационной насыщенности данных. Для случая низкого отношения сигнал/шум дано описание процесса идентификации как решения системы неравенств на основе множественно-функционального подхода, позволяющего при использовании интервальной невязки между выходом идентификатора и реальным динамическим объектом проводить редукцию модели.

2. Предложен метод идентификации с использованием множественно-функционального подхода для нелинейной нестационарной системы управления, основанный на анализе типов асимптотических решений при учете физических закономерностей и соответствующих ограничений на параметры и фазовые координаты, при сохранении физической адекватности модели протекающим в объекте процессам и реализуемости законов управления.

3. Впервые показано, что для динамических объектов синтез и идентификация систем управления, сформулированные как задачи математического программирования, могут быть сведены к эквивалентному при заданной точности множеству задач оптимизации при линейных ограничениях путём аппроксимации произвольных ограничений кусочно-полиномиальными функциями или рациональными дробями. Показано, что данный подход эффективен при расчёте оптимальных траекторий движения базовых модулей интеллектуальных электромеханических систем, так как он сводится к интервальным задачам от одной переменной, а именно времени переходного процесса. Подобные алгоритмы позволяют с применением простых минимаксных процедур найти решение задачи.

4. Разработаны новые методы синтеза и идентификации сложных распределённых систем управления на основе модели базового блока интеллектуальных электромеханических систем как динамического объекта с параллельной кинематической схемой для управления элементами зеркальных систем больших полноповоротных радиотелескопов.

5. Разработаны методы анализа экспериментальных данных по динамической прочности материалов с учетом влияния информационно-измерительной системы и

сохранении адекватности физики процессов в материале при удалении влияния сторонних факторов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В качестве теоретической значимости диссертации следует отметить разработку методов синтеза и идентификации систем управления динамическими объектами, функционирующих в условиях ограничений. Предлагаемые методы объединены одной идеей, которая заключается в сведении задач идентификации и синтеза к последовательности задач математического программирования, что позволяет эффективно учитывать различные ограничения. Полученные результаты имеют большую практическую значимость и могут быть использованы при создании высокоточных систем управления сложными физико-техническими объектами. Предложены методы и алгоритмы управления ИЭМС с исполнительными механизмами параллельной структуры, которые могут быть использованы при создании высокоточных станков, транспортных средств, манипуляторов и т.д. Разработанная система управления адаптивной ЗС может быть использована при создании перспективных радиотелескопов миллиметрового диапазона. Предложенные методы идентификации позволят повысить эффективность обработки экспериментальных данных по динамической прочности материалов для установки с разрезным стержнем Гопкинсона-Кольского и стенда с газовой пушкой.

Апробация работы. Все основные положения работы в полной мере опубликованы в научных изданиях по специальности диссертации, в том числе 10 в изданиях, реферируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus, 14 статей в журналах из списка ВАК Минобрнауки РФ, главы в 2 совместных монографиях. Проведённые исследования стали основой для 4 патентов РФ. Результаты докладывались соискателем на международных и всероссийских научных конференциях по профилю научной специальности.

Замечания по диссертационной работе. Несмотря на общий положительный отзыв на диссертацию имеются и отдельные замечания:

1. В первой главе используется оператор сдвига. Он имеет некоторую специфику и сложную структуру. Как он появился?

2. «Для восстановления внешнего воздействия используются идентификаторы вида... где M_1, M_2, M_3, M_4 - матрицы параметров модели». Как выбирать данные матрицы? Какова размерность идентификатора? И т.д.

3. В качестве некоторого единого подхода автор использует сведение к задачам математического программирования. В теории оптимального управления используются и другие подходы, например, динамическое программирование Р. Беллмана, принцип

максимума Л.С. Понтягина. Хотелось бы видеть сравнение с альтернативными подходами.

Заключение по диссертации. Диссертационная работа А.Ю. Кучмина на тему: «Идентификация и синтез систем управления динамическими объектами с ограничениями» вносит значительный вклад в решение крупной научной проблемы создания высокоточных систем управления динамическими объектами с учётом влияния различного рода ограничений и внешних воздействий. Диссертационная работа является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, соответствует паспорту специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)» и имеет важное научное значение и практические приложения. Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук в соответствии с Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а её автор, Кучмин Андрей Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)».

Отзыв на диссертационную работу рассмотрен и одобрен на научном семинаре факультета систем управления и робототехники 05.05.2022 г.

Заместитель декана по учебной работе факультета систем управления и робототехники, кандидат технических наук



Олег Игоревич Борисов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Адрес: Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А

Телефон: +7(812) 607-02-83

E-mail: od@itmo.ru

Подпись О.И. Борисова удостоверяю

Менеджер ОТС
Шенников О.А.
05.05.2022

