

На правах рукописи

Решетникова Наталия Викторовна

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре управления в технических системах.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шишлаков Владислав Федорович

Официальные оппоненты: **Имаев Дамир Хабибович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра автоматики и
процессов управления, профессор кафедры

Жиленков Антон Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный морской
технических университет, факультет цифровых
промышленных технологий, декан

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет ИТМО»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 18 июня 2025 года в 16.00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.038.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.038.03,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ускоряющееся развитие и появление новых инновационных технологий требует от разработчиков систем автоматического управления (САУ) все большей точности, что неизбежно влечет за собой необходимость учета дрейфа параметров неизменяемой части системы, т.е. учет влияния нестационарности параметров на динамику системы.

Как известно, методы анализа и синтеза классической теории управления достаточно разработаны и алгоритмизированы прежде всего для линейных систем, не учитывающих нестационарность параметров и нелинейность звеньев и характеристик. В нелинейной теории задачи анализа и синтеза имеют большое количество ограничений, связанных с количеством имеющихся нелинейностей, ограничением зоны нелинейной характеристики и т.д., что говорит о необходимости разработки единого алгоритма, позволяющего решать задачу синтеза нелинейных нестационарных систем.

В работе предлагается использовать алгоритм решения задачи синтеза линейных и нелинейных параметрически нестационарных САУ путем распространения на решение данной задачи обращения прямого вариационного метода анализа – обобщенного метода Галеркина (метода ортогональных проекций) на основании проведенных экспериментальных исследований, демонстрирующих степень влияния дрейфа параметров на качество управления.

Степень разработанности темы. Исследованию и разработке нестационарных САУ посвящены работы А.А. Красовского, В.В. Солодовникова, А.И. Лурье, А.А. Бобцова, А.Ю. Кучмина, Н.И. Зубова, Г.Л. Вышковского, Н.Д. Егупова, К.А. Пупкова, Н.П. Семичевской, В.И. Гаркушенко, Е.Л. Еремина, Т.А. Галаган и др. Подавляющее большинство известных работ сводит задачи анализа и синтеза нестационарных систем управления либо к линеаризации и упрощению, либо к адаптивным алгоритмам управления, что говорит о необходимости разработки единого алгоритма решения подобных задач.

Объектом исследования являются линейные и нелинейные параметрически нестационарные системы автоматического управления.

Предметом исследования является параметрический синтез операторов управления линейных и нелинейных непрерывных и импульсных нестационарных САУ.

Целью диссертационной работы является повышение качества синтеза параметрически нестационарных систем автоматического управления за счет расширения возможностей математического аппарата обобщенного метода Галеркина.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- 1) обзор известных методов анализа и синтеза линейных и нелинейных параметрически нестационарных САУ;
- 2) распространение метода параметрического синтеза линейных и нелинейных систем, приближенно обеспечивающего показатели качества управления САУ при нестационарности параметров неизменяемой части системы;
- 3) разработка алгоритма решения задачи синтеза нестационарных САУ;
- 4) решение прикладных задач для систем рассматриваемого класса, подтверждающее достаточную для инженерных расчетов точность получаемого результата.

Научная задача, решаемая в работа, состоит в разработке алгоритма решения задачи синтеза линейных и нелинейных параметрически нестационарных систем автоматического управления на основе модификации обобщенного метода Галёркина, позволяющего с достаточной точностью обеспечивать требуемые показатели качества при нестационарности параметров неизменяемой части системы.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

- 1) обобщённый метод Галеркина впервые распространен на параметрически нестационарные непрерывные и импульсные САУ;
- 2) разработан алгоритм решения задачи синтеза параметрически нестационарных САУ.

Разработанные подходы позволяют решать задачу синтеза на основании экспериментальных исследований по уровню влияния дрейфа параметров на качество работы системы.

Теоретическая значимость заключается в распространении обобщенного метода Галеркина на параметрически нестационарные САУ, что позволяет расширить

теоретические подходы в исследовании данного класса систем. Предложена общая схема решения задачи синтеза линейных и нелинейных нестационарных САУ.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в прикладном применении алгоритма синтеза нестационарных САУ в непрерывных и импульсных системах автоматического управления высокого порядка с целью нахождения параметров закона управления. Разработанный алгоритм позволяет повышать эффективность и качество синтеза сложных технических систем с учетом нестационарности параметров объекта.

Внедрение результатов диссертационной работы осуществлено в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». Внедрение результатов диссертации подтверждено актом.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы фундаментальные положения теории автоматического управления и методы математического моделирования. Теоретические результаты, полученные в работе, подтверждаются иллюстрируемыми примерами и решением технических задач.

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. модификация обобщенного метода Галеркина для применения в линейных и нелинейных непрерывных нестационарных системах автоматического управления;
2. модификация обобщенного метода Галеркина для применения в линейных и нелинейных импульсных нестационарных системах автоматического управления;
3. результаты практического применения модифицированного обобщенного метода Галеркина для синтеза параметрически нестационарных непрерывных и импульсных САУ.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований, моделирования и аналитических расчётов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на VII международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» (Барнаул, 2018), XIII, XV, XVI Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Санкт-Петербург, 2018-2021 гг.), на XXII, XXVI Международной научной конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (WECONF-2019, 2023 гг.), на

международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» (Санкт-Петербург, 2021-2022 гг.). Отдельные этапы работы нашли свое применение в государственном задании С-16 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 26 печатных работах, в том числе 6 работ по искомой специальности в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 публикаций в журналах, рецензируемых SCOPUS, 1 отчет о НИР и 14 работ в других изданиях и материалах конференций.

Личный вклад автора. В работе предлагается использовать модифицированный обобщенный метод Галеркина для решения задачи синтеза параметров оператора управления линейных и нелинейных непрерывных и импульсных САУ с учетом их параметрической нестационарности.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 4 и 11 паспорта научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Проведенные исследования соответствуют формуле специальности.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации 159 страниц, включая 157 страниц основного текста, 75 рисунков, 20 таблиц, список литературы состоит из 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертационного исследования и степень её разработанности, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, описываются новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены области применения и физические свойства нестационарных САУ; приведена классификация нестационарности по степени негативного влияния дрейфа параметров системы управления на качество её работы; представлены методы исследования устойчивости и синтеза нестационарных систем

автоматического управления. На основании выполненного обзора формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводятся общая схема решения задачи параметрического синтеза непрерывных нестационарных САУ с применением модифицированного обобщенного метода Галеркина; исследование влияния дрейфа параметров неизменяемой части системы на динамические показатели качества на примере исполнительного двигателя и влияния на его динамику реакции якоря и изменения температуры обмотки; решение задачи синтеза нестационарной системы автоматического управления турбоагрегатом с применением рассматриваемого подхода с описанием математической модели рассматриваемой системы.

Задача синтеза нелинейных нестационарных САУ заключается в поиске параметров регулятора с учетом влияния нестационарных параметров неизменяемой части системы на её динамику. Задача решается при технических ограничениях на варьируемые параметры:

$$c_k^-(t) \leq c_k(t) \leq c_k^+(t), \quad k=1,2,\dots,m,$$

где $c_k^+(t)$ – максимально допустимые значения варьируемых параметров; $c_k^-(t)$ – минимально допустимые значения варьируемых параметров, которые являются в общем случае функциями времени, а также ограничениях на грубость и устойчивость синтезируемой системы.

Динамика нелинейной непрерывной нестационарной САУ, содержащий один нелинейный элемент, описывается следующим дифференциальным уравнением

$$Q(c_k(t), D)x(t) + R(c_k(t), D)y(t) = S(c_k(t), D)f(t), \quad y(t) = F[x(t), \dot{x}(t)],$$

где $x(t)$ – исследуемая координата на входе нелинейного элемента, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ; $f(t)$ – внешнее входное воздействие на входе нелинейного элемента; $y(t)$ – нелинейная функция;

$$Q(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^n a_i(c_k(t))D^i; \quad R(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^u b_i(c_k(t))D^i;$$

$$S(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^v e_i(c_k(t))D^i$$

– полиномы оператора обобщенного дифференцирования D с вещественными коэффициентами степеней n, u, v соответственно.

Программное движение задается в виде общего решения линейного дифференциального уравнения 2-го порядка

$$x^0(t) = [x_y + He^{-\alpha t} \cos(\beta t - \varphi_0)]1(t), \quad (1)$$

поскольку для него существует взаимно-однозначное соответствие между показателями качества работы САУ в переходном режиме и коэффициентами уравнения.

Образуется невязка:

$$\psi(c_k(t), t) = Q(c_k(t), D)x^0(t) + R(c_k(t), D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}] - S(c_k(t), D)f(t).$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искомых параметров определяются из условия ортогональности невязки координатным функциям:

$$\int_0^\infty \psi(c_k(t), t) \varphi_q(t) dt = 0, \quad k, q = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где φ_q — непрерывно дифференцируемые линейно-независимые координатные функции $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_q(t), \dots, \varphi_m(t)$.

Система из m непрерывно дифференцируемых линейно-независимых координатных функций выбирается в виде ряда вещественных экспонент, представляющих собой полную систему функций

$$\varphi_q(t) = e^{-\rho_1 t}, e^{-\rho_2 t}, \dots, e^{-\rho_q t}, \dots, e^{-\rho_m t}, \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

Это приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty Q(c_k(t), D)x^0(t) \varphi_q(t) dt + \int_0^\infty R(c_k(t), D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}] \varphi_q(t) dt - \\ - \int_0^\infty S(c_k(t), D)f(t) \varphi_q(t) dt, \quad k, q = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (3)$$

При решении системы из m алгебраических уравнений определяются значения варьируемых параметров оператора управления как функций времени.

Так как задача синтеза решается при ограничениях на значения искомых параметров, наложенных исходя из возможности их технической реализации, ограничениях на устойчивость и грубость САУ с синтезированными параметрами, а также в силу того, что имеет место нелинейная зависимость между варьируемыми параметрами, то строгое равенство (2) выполняться не будет. Поэтому задача синтеза параметров обобщенным методом Галеркина в вычислительном плане представляет

собой задачу нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений (3) и имеющей вид

$$J = \sum_{q=1}^m \left\{ \sum_{i=0}^{n_j} a_{ij}(c_k(t)) A_{qij} + \sum_{i=0}^{u_j} b_{ij}(c_k(t)) B_{qij} - \sum_{i=0}^{v_j} e_{ij}(c_k(t)) C_{qij} \right\}^2, \quad \min_{c_k(t)} J \rightarrow 0, \quad (4)$$

оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченные выше, путем использования процедуры сжимающего случайного поиска, предложенной Ю. А. Сушковым. Здесь

$$\begin{aligned} A_{qij} &= \int_0^{\infty} D^i F \left[\left\{ x^0(t) \right\} \right] e^{-\rho_q t} dt = A_q \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, n; \\ B_{qij} &= \int_0^{\infty} D^i F \left[\left\{ x^0(t) \right\} \right] e^{-\rho_q t} dt = B_q \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, u; \\ C_{qij} &= \int_0^{\infty} D^i F \left[\left\{ f(t) \right\} \right] e^{-\rho_q t} dt = C_q \rho_q^{i-1}, \quad i = 0, 1, \dots, v, \end{aligned}$$

где A_q , B_q , C_q – рекуррентные соотношения, определяющие интегралы Галеркина, полученные при кусочно-линейной аппроксимации для однозначных и неоднозначных характеристик и при полиномиальной аппроксимации для однозначных характеристик.

Замечания.

– Если в результате решения задачи синтеза при заданной структуре регулятора и ограничениях на параметры показатели качества не удовлетворяют заявленным требованиям, необходимо либо менять технические ограничения, либо структуру регулятора.

– На каждом шаге поиска параметров проверяется ограничение на абсолютную устойчивость нелинейной синтезируемой системы. В случае одного нелинейного элемента абсолютная устойчивость проверяется по критерию устойчивости В.М. Попова. Если в системе имеется большее число нелинейных элементов, то для оценки устойчивости необходимо осуществить линеаризацию нелинейных характеристик (гармоническую или обобщенную) и проводить проверку по критерию устойчивости Рауса.

– Если входы нелинейных элементов не совпадают с координатами выходов системы или сигналом ошибки, необходимо использовать уравнение связи для пересчета процессов.

– Если устанавливается, что нестационарность параметров может быть описана математической зависимостью, параметры синтезируемого оператора управления также должны изменяться по установленной зависимости.

– При решении задачи синтеза полагается, что известна структура системы автоматического управления – неизменяемой части системы и регулятора. В ходе решения задачи приближенно обеспечиваются требуемые показатели качества управления – время переходного процесса и перерегулирование.

В качестве примера исследования влияния дрейфа параметров неизменяемой части системы на показатели качества рассматривалось влияние реакции якоря и изменения температуры обмотки на динамику работы исполнительного двигателя. Результаты моделирования показывают, что дрейф параметров может приводить к реальному уходу показателей качества синтезируемой системы за пределы требуемых значений, что говорит о необходимости учета нестационарности при синтезе операторов управления.

В ходе решения поставленной задачи были определены значения параметров регулятора турбоагрегата k_v , T_{v1} , T_{v2} , T_{v3} , k_e , T_e . В результате решения задачи синтеза при стационарных параметрах рассматриваемой системы обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: $k_e=140$, $T_e=0,0025$ с, $k_v=70,56$, $T_{v1}=0,51$ с, $T_{v2}=0,0054$ с, $T_{v3}=2,53$ с, которые обеспечивают в системе процессы, показанные на рис. 1, из которого следует, что показатели качества управления удовлетворяют заданным по желаемому программному движению (перерегулирование не более 22%, время переходного процесса не более 40 мс).

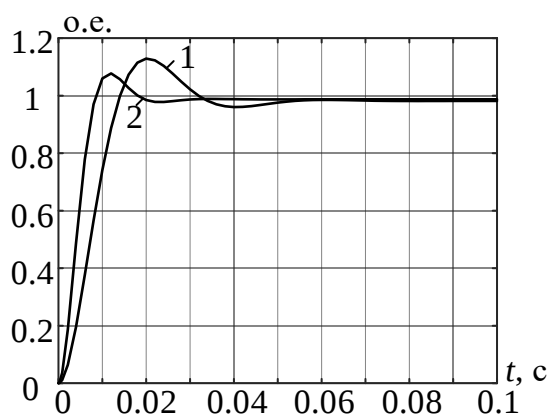


Рисунок 1 – Переходные процессы по скорости (1) и напряжению (2) в системе управления турбоагрегатом при стационарных параметрах

В связи с возможным дрейфом параметров неизменяемой части системы (постоянных времени турбоагрегата $T_M(t)$, цепи обмотки возбуждения синхронного генератора $T_{B2}(t)$ и электромагнитной постоянной времени $T_{B1}(t)$) было проведено исследование динамики.

Несмотря на то, что в рассматриваемой системе дрейф параметров приводит к ухудшению показателей качества, они остаются в пределах требуемых значений. Таким образом, рассматриваемая задача синтеза сводится к однократному синтезу операторов управления с использованием модифицированного обобщенного метода Галеркина, распространенного на новый класс нестационарных САУ.

В третьей главе рассматривается общая схема решения задачи синтеза нестационарных импульсных САУ и ее применение на примере импульсной многосвязной САУ турбоагрегатом. Приведен разработанный алгоритм синтеза нестационарных САУ.

Система автоматического управления, содержащая амплитудно-импульсный модулятор и нелинейный элемент, в общем виде описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} Q(c_k(t), D)x(t) + Q^*(c_k(t), D)x^*(t) + R(c_k(t), D)y(t) + R^*(c_k(t), D)y^*(t) = \\ = S(c_k(t), D)f(t) + S^*(c_k(t), D)f^*(t), \\ y(t) = F[x(t), \dot{x}(t)], y^*(t) = F^*[x^*(t), \dot{x}^*(t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $x(t)$, $x^*(t)$ – исследуемая координата на входе и выходе модулятора соответственно, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ; $f(t)$, $f^*(t)$ – внешнее входное воздействие на входе и выходе модулятора соответственно; $y(t) = F[x(t), \dot{x}(t)]$, $y^*(t) = F^*[x^*(t), \dot{x}^*(t)]$ – нелинейные функции;

$$\begin{aligned} Q(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^n a_i(c_k(t))D^i; \quad Q^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{n^*} a_i^*(c_k(t))D^i; \\ R(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^u b_i(c_k(t))D^i; \quad R^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{u^*} b_i^*(c_k(t))D^i; \\ S(c_k(t), D) &= \sum_{i=0}^v e_i(c_k(t))D^i; \quad S^*(c_k(t), D) = \sum_{i=0}^{v^*} e_i^*(c_k(t))D^i \end{aligned}$$

– полиномы оператора обобщенного дифференцирования D с вещественными коэффициентами степеней n , n^* , u , u^* , v , v^* соответственно.

По аналогии с непрерывными системами подставим желаемое программное движение (1) в уравнение движения системы (5) и образуем невязку

$$\begin{aligned} \Psi(c_k(t), t) = & Q(c_k(t), D)x^0(t) + Q^*(c_k(t), D)x^{0*}(t) + \\ & + R(c_k(t), D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}] + R^*(c_k(t), D)F[x^{0*}(t), D\{x^{0*}(t)\}] - \\ & - S(c_k(t), D)f(t) - S^*(c_k(t), D)f^*(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искоемых параметров определяются из условия ортогональности невязки (6) координатным функциям, что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty Q(c_k(t), D)x^0(t)\varphi_q(t)dt + \int_0^\infty Q^*(c_k(t), D)x^{0*}(t)\varphi_q(t)dt + \\ & + \int_0^\infty R(c_k(t), D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}]\varphi_q(t)dt + \\ & + \int_0^\infty R^*(c_k(t), D)F[x^{0*}(t), D\{x^{0*}(t)\}]\varphi_q(t)dt - \\ & - \int_0^\infty S(c_k(t), D)f(t)\varphi_q(t)dt - \int_0^\infty S^*(c_k(t), D)f^*(t)\varphi_q(t)dt, \\ & k, q = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (7)$$

При решении системы из m алгебраических уравнений (7) определяются значения варьируемых параметров оператора управления.

Решение задачи синтеза импульсной нестационарной САУ рассматривалось на примере синтеза САУ турбоагрегатом с идеальным амплитудно-импульсным модулятором с периодом прерывания 0,01 с и экстраполятором нулевого порядка. Исследование влияния дрейфа параметров показало, что дрейф постоянной времени турбоагрегата $T_M(t)$ приводит к выходу показателей качества за пределы требуемых значений по скорости вращения.

В ходе решения задачи синтеза рассматриваемой импульсной многосвязной САУ турбоагрегатом обобщенным методом Галеркина при стационарных параметрах были получены следующие значения варьируемых параметров: $k_e=44,4$, $T_e=0,0021$ с, $k_v=9,34$, $T_{v1}=0,421$ с, $T_{v2}=0,0034$ с, $T_{v3}=7,53$ с. Переходные процессы синтезируемой системы представлены на рис. 2.

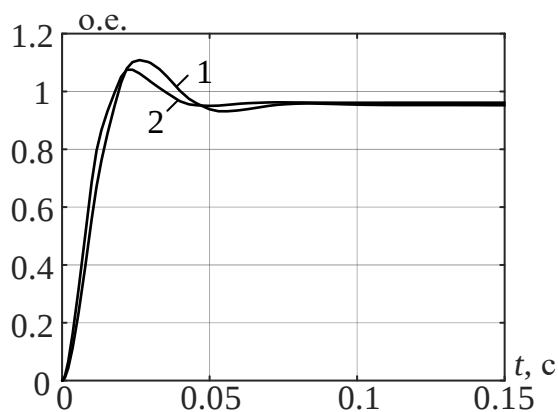


Рисунок 2 – Переходные процессы по скорости (1) и напряжению (2) при стационарных параметрах объекта управления

В ходе повторного решения задачи синтеза рассматриваемой импульсной многосвязной САУ при критическом дрейфе параметров были получены следующие значения варьируемых параметров: $k_e=44,4$, $T_e=0,0021$ с, $k_0=9,34$, $T_{v1}=0,6315$ с, $T_{v2}=0,0034$ с, $T_{v3}=7,53$ с. Переходные процессы повторно синтезируемой системы представлены на рис. 3.

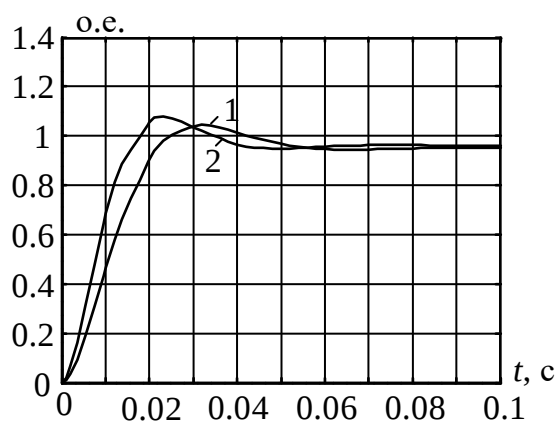


Рисунок 3 – Переходные процессы по скорости (1) и напряжению (2) при стационарных параметрах объекта управления и пересчитанных параметрах регулятора

Поскольку для разных величин $T_M(t)$ необходимо использовать различные параметры регулятора, для решения задачи синтеза системы в условиях нестационарности предлагается выполнять электронную коммутацию между двумя стационарными структурами регулятора. Структурная схема модели с

коммутирующим устройством, срабатывающим по величине $T_M(t)$, представлена на рис. 4.

Результат моделирования работы коммутатора, осуществляющего переключения между параметрами регулятора, представлен на рис. 5. Как видно из рис. 5, при использовании метода коммутации между параметрами регулятора показатели качества удовлетворяют требованиям – время переходного процесса $t_{\text{ПП}}=36$ мс, перерегулирование $\sigma=5,6$ %, установившаяся ошибка $e_{\text{уст}}$ в пределах 5%.

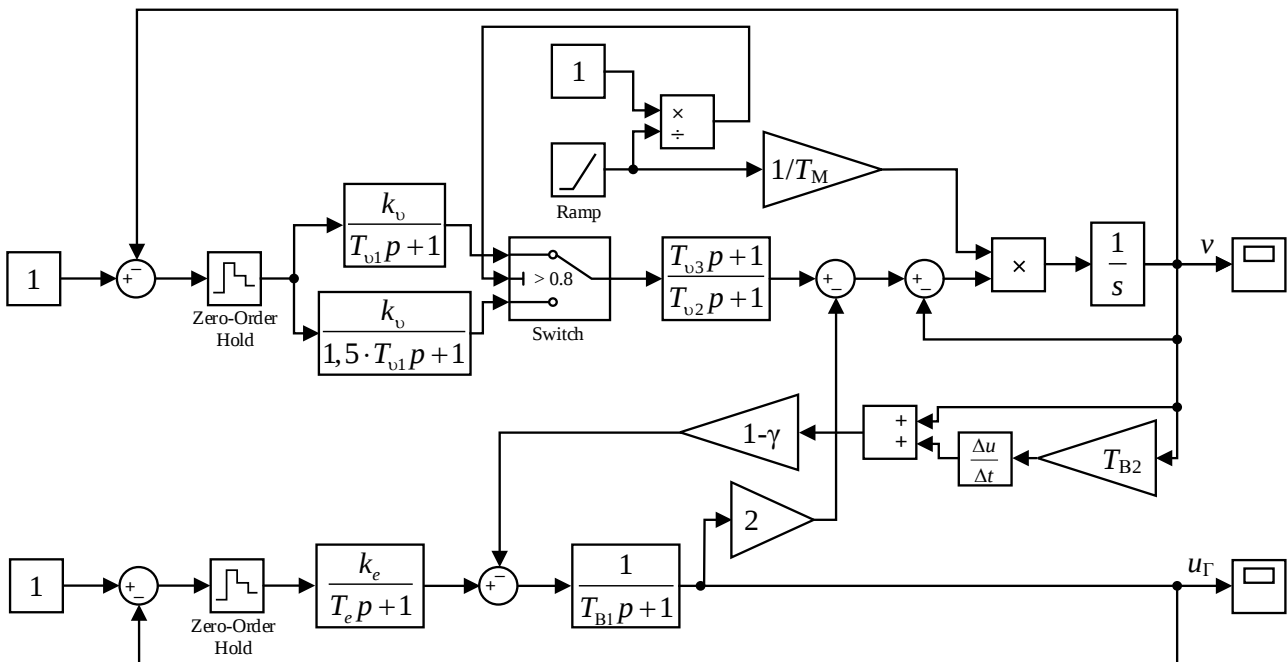


Рисунок 4 – Структурная схема системы управления в среде *Matlab/Simulink*

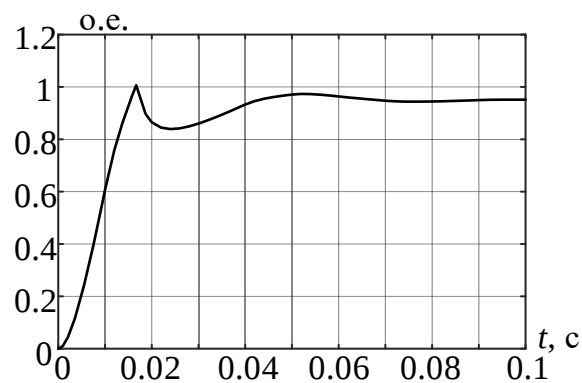


Рисунок 5 – Результат работы коммутирующего устройства – переходный процесс по скорости

Разработанный алгоритм решения задачи синтеза нестационарных САУ, позволяющий определять количество стационарных структур регулятора, рассчитанного с применением модифицированного обобщенного метода Галеркина, приведен на рис. 6.

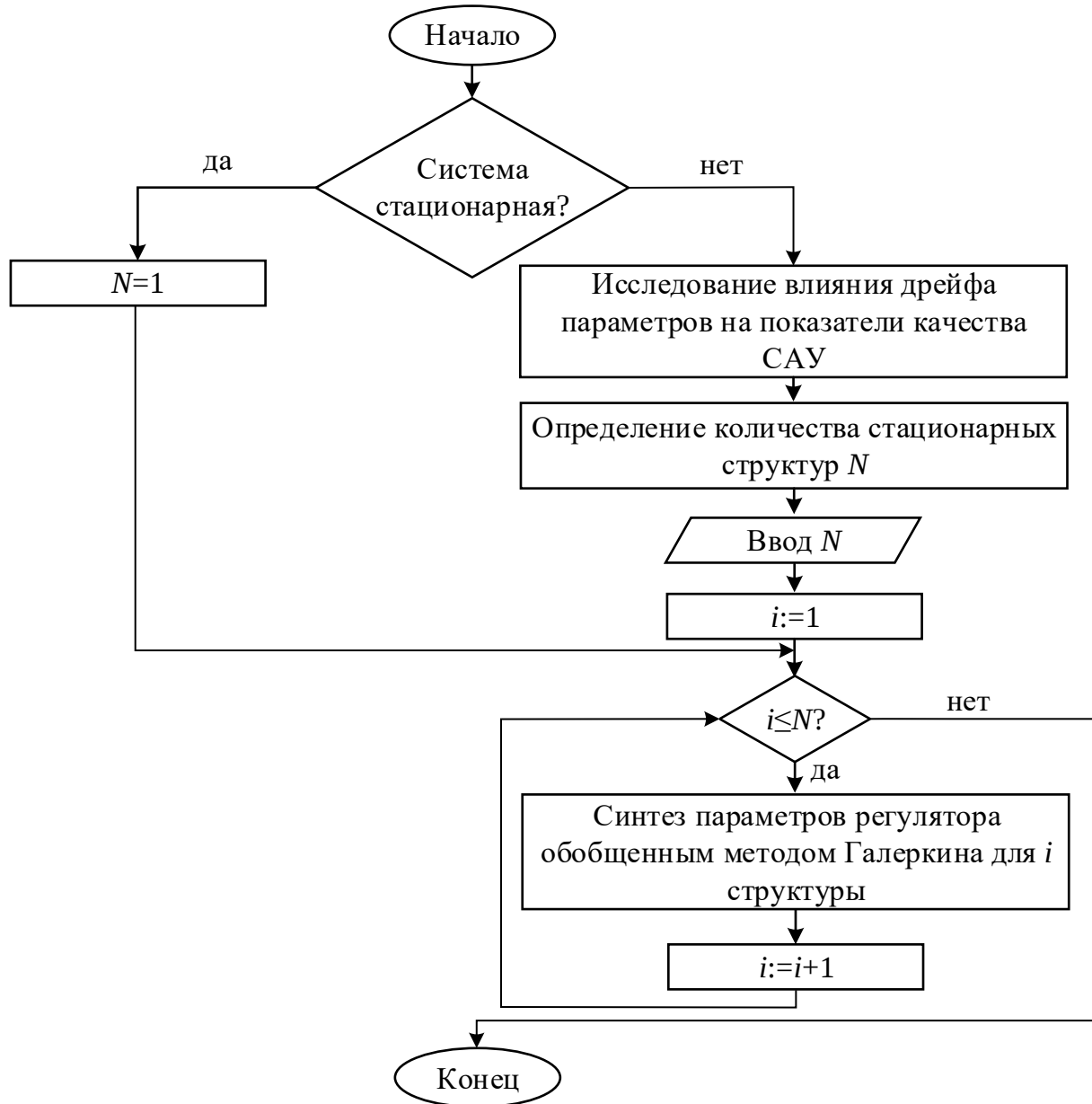


Рисунок 6 – Алгоритм решения задачи синтеза нестационарных САУ

В четвертой главе рассматривается апробация полученных теоретических положений – решение технических задач: синтез автономной электроэнергетической установки (ЭЭУ) со сверхпроводниковыми электротехническими устройствами и синтез системы автоматического управления торможением колес (САУ ТК)

транспортного средства (ТС). Приводятся подробные математические модели рассматриваемых систем.

Структурная схема математической модели рассматриваемой системы управления ЭЭУ приведена на рис. 7.

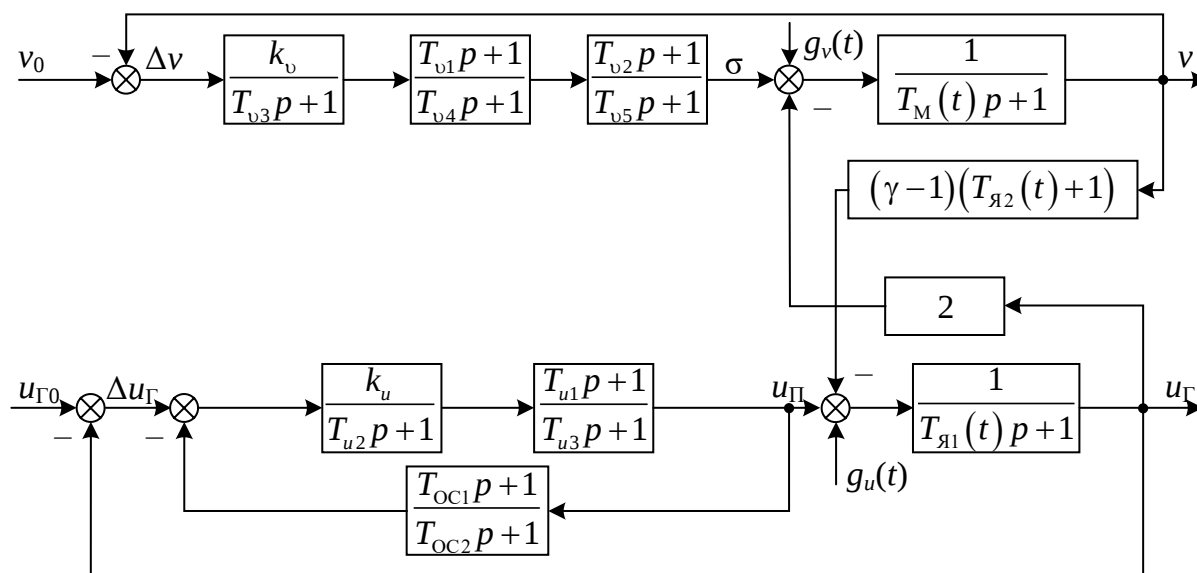


Рисунок 7 – Структурная схема математической модели ЭЭУ

На рис. 7: $T_M(t)$ – постоянная времени приводного двигателя; $T_{я1}(t)$, $T_{я2}(t)$ – постоянные времени синхронного генератора; T_{u1} , T_{u2} , T_{u3} , k_u – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора напряжения ЭЭУ; T_{v1} , T_{v2} , T_{v3} , T_{v4} , T_{v5} , k_v – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора скорости вращения приводного двигателя соответственно; $(1-\gamma)$ – коэффициент, характеризующий режим работы синхронного генератора; σ – сигнал на выходе регулятора скорости; $g_v(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале изменения частоты; u_Γ – напряжение на выходе ЭЭУ; v – скорость вращения приводного двигателя; Δv – относительное изменение скорости вращения приводного двигателя, v_0 – заданное значение скорости; $g_u(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале регулирования напряжения, действующее на синхронный генератор; T_{OC1} , T_{OC2} – постоянные времени звена коррекции в цепи гибкой обратной связи, u_Π – напряжение на выходе регулятора напряжения.

Таким образом, для решения поставленной задачи требуется определить значения варьируемых параметров T_{v1} , T_{v2} , T_{v3} , T_{v4} , T_{v5} , k_v , T_{u1} , T_{u2} , T_{u3} , k_u , T_{OC1} , T_{OC2} ,

обеспечивающих в синтезируемой системе следующие показатели качества: время переходного процесса не выше 0,5 с; перерегулирование по напряжению – 5%, по частоте – 10%.

При решении задачи параметрического синтеза ЭЭУ были получены следующие значения искомых параметров: $k_v=340$, $T_{v1}=2,53$ с, $T_{v2}=0,15$ с, $T_{v3}=1,751$ с, $T_{v4}=0,0054$ с, $T_{v5}=3$ с, $k_u=170$, $T_{u1}=0,01$ с, $T_{u2}=0,001$ с, $T_{u3}=0,005$ с, $T_{OC1}=0,037$ с, $T_{OC2}=0,31$ с.

Результаты моделирования динамических процессов изменения напряжения и частоты в САУ ЭЭУ показаны на рис. 8.

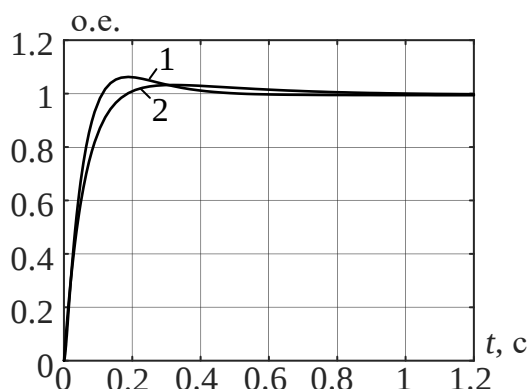


Рисунок 8 – Процессы изменения частоты (1) и напряжения (2) ЭЭУ в нормальном режиме работы

Применение обобщенного метода Галеркина при решении задачи синтеза двусвязной системы автоматического управления обеспечило достижение заданных показателей качества переходных процессов по частоте и напряжению.

Для исследования системы при критических (предаварийных) условиях работы было выполнено моделирование при дрейфе параметров объекта $T_M(t)$, $T_{Я1}(t)$, $T_{Я2}(t)$. Исследование, изложенное в диссертационной работе, показало, что реально возможный дрейф параметров неизменяемой части системы ЭЭУ не приводит к выходу показателей качества за пределы требуемых значений. Таким образом, для рассматриваемого примера дрейф параметров является некритическим.

Так как повышение частоты оборотов генератора на старте может приводить к возможному износу, были скорректированы требуемые показатели качества: переходные процессы по напряжению и частоте оборотов должны иметь экспоненциальный характер, время переходного процесса по обеим величинам не должно превышать 0,2 с.

Для достижения поставленных показателей качества требуется выполнить пересчет параметров регулятора. Пересчитанные значения варьируемых параметров: $k_v=68000$, $T_{v1}=2,53$ с, $T_{v2}=0,15$ с, $T_{v3}=1,751$ с, $T_{v4}=0,0054$ с, $T_v=3$ с, $k_u=200$, $T_{u1}=0,01$ с, $T_{u2}=0,000001$ с, $T_{u3}=0,005$ с, $T_{OC1}=0,037$ с, $T_{OC2}=0,62$ с.

Переходные процессы по скорости и напряжению с пересчитанными коэффициентами регуляторов приведены на рис. 9.

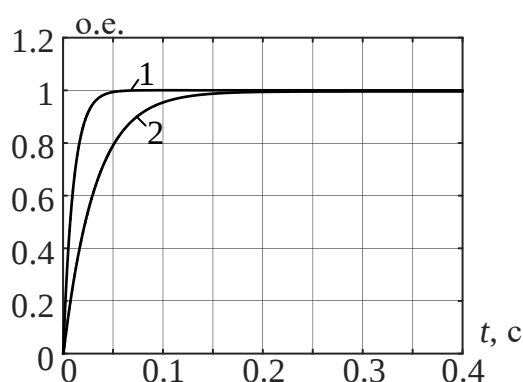


Рисунок 9 – Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2) после пересчета параметров регуляторов

Полученные показатели качества соответствуют желаемым.

В качестве математической модели синтезируемой экстремальной системы управления рассматривается экспериментально полученная упрощенная модель САУ ТК, структурная схема которой показана на рис. 10.

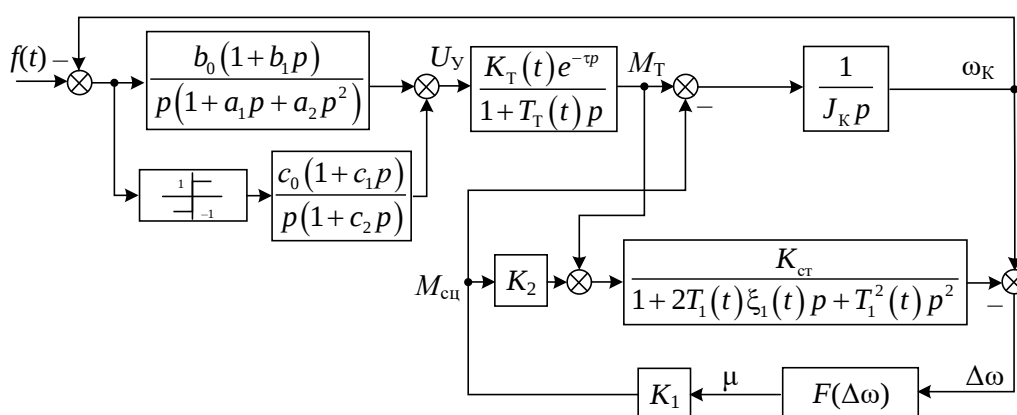


Рисунок 10 – Структурная схема упрощенной модели САУ ТК

На рис. 10: K_T – коэффициент передачи исполнительской части САУ ТК; τ – запаздывание, обусловленное движением жидкости в гидравлической системе передачи давления; T_T – постоянная времени тормоза; J_K – приведенный момент

инерции тормозящегося колеса в плоскости, перпендикулярной направлению качения; $K_{ст}$ – коэффициент передачи модели стойки; T_1 – постоянная времени стойки; ξ_1 – показатель колебательности стойки; $K_1 = P_K R_K$, где P_K – нагрузка, приведенная к тормозящемуся колесу; R_K – радиус тормозящегося колеса; $F = \mu(\Delta\omega)$ – характеристика сцепления; $f(t) = \Delta\omega \cdot 1(t)$ – внешнее воздействие, амплитуда которого соответствует $\Delta\omega$; U_y – сигнал управления, поступающий с выхода регулятора в исполнительную часть системы; M_T – тормозной момент; $M_{сц}$ – момент сцепления тормозящегося колеса с опорной поверхностью. Работа САУ ТК рассматривается при трех значениях скорости свободно катящегося колеса ω_c – 96,3 рад/с, 64,2 рад/с и 32,1 рад/с. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам данного класса, время переходного процесса не должно превышать $1,5 \div 2$ с. Амплитуда колебаний в районе экстремума характеристики $\mu(\Delta\omega)$ (на мокрой опорной поверхности) не должна превышать $10 \div 20\%$ от значения $\Delta\omega$.

В результате решения задачи синтеза были определены значения параметров регулятора, обеспечивающие требуемое качество работы САУ ТК во всех режимах торможения. Таблица с параметрами регулятора и результирующие графики переходных процессов для всех скоростей и типов поверхностей приведены в диссертационной работе.

Показатели качества для угловых скоростей свободно катящегося колеса $\omega_c = 32,1$ рад/с, $\omega_c = 64,2$ рад/с, $\omega_c = 96,3$ рад/с приведены в табл. 1, где σ – перерегулирование, A – амплитуда колебаний, $t_{пп}$ – время переходного процесса, T – период колебаний, $e_{уст}$ – установившаяся ошибка.

Таблица 1 – Показатели качества системы для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса

Параметры объекта	σ , %	A , рад/с	$t_{пп}$, с	T , с	$e_{уст}$	
Тип поверхности	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
Угловая скорость $\omega_c = 96,3$ рад/с						
$T_T(t) = \text{const}$, $T_1(t) = \text{const}$, $K_T(t) = \text{const}$, $K_{ст}(t) = \text{const}$, $\xi_1(t) = \text{const}$	0	3,395	1,856	0,592	0	-
Угловая скорость $\omega_c = 64,2$ рад/с						
$T_T(t) = \text{const}$, $T_1(t) = \text{const}$, $K_T(t) = \text{const}$, $K_{ст}(t) = \text{const}$, $\xi_1(t) = \text{const}$	0	0,837	1,870	0,503	0	-
Угловая скорость $\omega_c = 32,1$ рад/с						
$T_T(t) = \text{const}(t)$, $T_1(t) = \text{const}$, $K_T(t) = \text{const}$, $K_{ст}(t) = \text{const}$, $\xi_1(t) = \text{const}$	0	0,1455	1,968	0,461	0	-

Параметры неизменяемой части системы могут быть подвержены дрейфу, поэтому было произведено исследование динамики при изменении постоянных времени и коэффициентов передачи на мокрой и сухой поверхностях для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса.

В табл. 2 приведены результаты исследования случаев критического «отрицательного» (в сторону уменьшения) дрейфа постоянных времени и коэффициентов передачи на мокрой и сухой поверхностях для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса. В табл. 3 приведены результаты исследования случаев критического «положительного» (в сторону увеличения) дрейфа постоянных времени и коэффициентов передачи на мокрой и сухой поверхностях для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса.

Таблица 2 – Показатели качества работы системы

Параметры объекта		σ , %	A , рад/с	t_{III} , с	T , с
$\omega_c=96,3$ рад/с					
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_1=\text{const}$, $K_T=\text{const}$, $K_{ct}=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$T_T \downarrow 10\%$	0	3,655	1,871	0,577
	$T_T \downarrow 20\%$	0	4,000	1,886	0,563
$T_T=\text{const}$, $T_1=\text{const}$, $K_{ct}=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$K_T \downarrow 10\%$	0	1,535	2,098	0,577
	$K_T \downarrow 20\%$	0	0,74	2,397	0,562
$\omega_c=64,2$ рад/с					
$T_T=\text{const}$, $T_1=\text{const}$, $K_{ct}=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$K_T \downarrow 10\%$	0	0,188	2,115	0,484
	$K_T \downarrow 20\%$	0	0,152	2,419	0,483
$\omega_c=32,1$ рад/с					
$T_T=\text{const}$, $T_1=\text{const}$, $K_{ct}=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$K_T \downarrow 10\%$	0	0,065	2,218	0,542
	$K_T \downarrow 20\%$	0	0,0195	2,528	0,875

Таблица 3 – Показатели качества работы системы

Параметры объекта		σ , %	A , рад/с	t_{III} , с	T , с
$\omega_c=96,3$ рад/с					
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T=\text{const}$, $T_1=\text{const}$, $K_{ct}=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$K_T \uparrow 10\%$	0	4,755	1,653	0,610
	$K_T \uparrow 20\%$	0	4,835	1,479	0,618
$\omega_c=32,1$ рад/с					
$T_1=\text{const}$, $K_T=\text{const}$, $T_T=\text{const}$, $\xi_1=\text{const}$	$K_{ct} \uparrow 20\%$	0	0,1455	2,019	0,461

В ходе повторного решения задачи синтеза для критических режимов работы были получены графики переходных процессов для сухой и мокрой опорных поверхностей при трех скоростях ω_c , соответствующие требуемым показателям качества. Таким образом, показана эффективность использования метода Галеркина при решении задачи синтеза двусвязных систем автоматического управления, изложенный подход обеспечивает достижение заданных показателей качества регулируемых величин.

В заключении изложены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях приведены блок-схема разработанного алгоритма и акт о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Получена общая схема решения задачи синтеза линейных и нелинейных непрерывных и импульсных нестационарных систем автоматического управления при помощи распространения обобщенного метода Галеркина, заключающаяся в нахождении параметров регулятора с учетом влияния нестационарности параметров неизменяемой части системы.

2. Произведено исследование влияния дрейфа параметров неизменяемой части системы на динамические показатели качества на примере исполнительного двигателя и влияния на его динамику реакции якоря и изменения температуры обмотки. Исследование показало, что дрейф параметров может приводить к реальному уходу показателей качества синтезируемой системы за пределы требуемых значений, что говорит о необходимости учета нестационарности при синтезе операторов управления.

3. Разработан алгоритм решения задачи синтеза параметрически нестационарных САУ, предлагающий проводить исследование влияния дрейфа параметров неизменяемой части системы на уход показателей качества синтезируемой системы за пределы требуемых значений с целью установления количества стационарных структур регулятора. В случае, если дрейф параметров является критическим, предлагается синтезировать ограниченное количество стационарных

структур регулятора обобщенным методом Галеркина и осуществлять электронную коммутацию между ними в зависимости от величины дрейфующих параметров.

4. Задача синтеза нестационарных САУ с распространением модифицированного обобщенного метода Галеркина решена на примере нахождения параметров регулятора системы управления турбоагрегатом. Использование метода электронной коммутации между стационарными структурами регулятора позволяет добиться требуемых показателей качества.

5. Решена задача синтеза параметров регулятора параметрически нестационарных САУ на примере двух прикладных технических задач – системы автоматического управления автономной электроэнергетической установкой со сверхпроводниковыми электротехническими устройствами и системы управления торможением колёс транспортного средства. Обеспечено требуемое качество работы в условиях нестационарности параметров неизменяемой части систем.

6. Распространение обобщенного метода Галеркина на новый класс систем позволяет унифицировать решение задачи синтеза линейных и нелинейных нестационарных САУ, что подтверждается решением практических задач.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Моделирование и синтез нелинейных систем автоматического управления / В. Ф. Шишляков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова [и др.] // Датчики и системы. – 2019. – № 11(241). – с. 17-24.

2. Синтез нелинейных импульсных систем при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишляков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишляков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 9. – с. 834-842.

3. Общая схема решения задачи синтеза нелинейных нестационарных САУ во временной области / В. Ф. Шишляков, Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева, Д. В. Шишляков // Датчики и системы. – 2020. – № 7(249). – с. 12-16.

4. Параметрический синтез операторов управления импульсных САУ при полиномиальной аппроксимации характеристик нелинейных элементов /

В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишлаков // Датчики и системы. – 2022. – № 5(264). – с. 12-18.

5. Методы решения задачи синтеза законов управления электромеханическими устройствами в условиях параметрической нестационарности / Н. В. Решетникова // Датчики и системы. – 2023. – № 4(1). – с. 17-20.

6. Решение задачи синтеза регулятора турбоагрегата при параметрической нестационарности / Н. В. Решетникова // Датчики и системы. – 2024. – № 4(276). – с. 20-24.

В изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

7. Synthesis of control laws of electromechanical systems under polynomial approximation of characteristics of nonlinear elements / V. Shishlakov, E. Vataeva, N. Reshetnikova, D. Shishlakov // MATEC Web of Conferences: Volume 161, 2018.

8. Parametric synthesis of nonlinear automatic control systems with polynomial approximation / E. Y. Vataeva, V. F. Shishlakov, D. V. Shishlakov, N. V. Reshetnikova // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. P. 8840123.

9. Simulation of non-stationary systems / E. Y. Vataeva, V. F. Shishlakov, I. G. Krivolapchuk, N. V. Reshetnikova // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020). 2020. P. 9131430.

10. Shishlakov, V. F. General scheme for solving the problem of synthesis of nonlinear non - Stationary automatic control systems in the time domain / V. F. Shishlakov, N. V. Reshetnikova, E. Y. Vataeva // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021). 2021. P. 9470639.

11. Synthesis of nonlinear impulse systems Shishlakov, V., Vataeva, E., Reshetnikova, N., Shishlakov, D., Solenaya, O. // Smart Innovation, Systems and Technologies, 2021, 187, pp 469–476.

В других изданиях и сборниках научных трудов и конференций

12. Алгоритм синтеза параметров законов управления технических систем при полиномиальной аппроксимации нелинейностей / В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, И. Г. Криволапчук, Н. В. Решетникова // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 10. – с. 97-102.

13. Шишляков, В. Ф. Синтез параметров САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик / В. Ф. Шишляков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова // Инновации в науке и практике : Сборник статей по материалам VII международной научно-практической конференции. В 5-ти частях, Барнаул, 28 апреля 2018 года. Том Часть 2. – Барнаул: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. – с. 92-98.

14. Синтез параметров законов управления нелинейных САУ при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишляков, Д. В. Шишляков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова // Завалишинские чтения 18 : сборник докладов, Санкт-Петербург, 16–20 апреля 2018 года / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. – с. 114-118.

15. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишляков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишляков // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – с. 297-302.

16. Решетникова, Н. В. Особенности исследования нестационарных САУ / Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – с. 287-291.

17. Решетникова, Н. В. Методы исследования САУ в условиях нестационарности / Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева // Завалишинские чтения 20 : Сборник докладов, Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. – с. 148-151.

18. Синтез нестационарных непрерывных нелинейных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина / В. Ф. Шишляков,

Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева, Д. В. Шишлаков // Научные технологии. – 2021. – Т. 22, № 8. – с. 75-79.

19. Полиномиальная аппроксимация нелинейных звеньев при решении задачи синтеза систем автоматического управления / В. Ф. Шишлаков, Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева, Д. В. Шишлаков // Научные технологии. – 2021. – Т. 22, № 8. – с. 69-74.

20. Приближенное решение дискретно-непрерывных уравнений при полиномиальной аппроксимации характеристик нелинейных элементов / В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишлаков // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Тезисы докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – с. 51-52.

21. Приближенное решение нелинейных дифференциальных уравнений при полиномиальной аппроксимации характеристик нелинейных элементов / В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишлаков // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Тезисы докладов I Международного форума, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – с. 48-50.

22. Шишлаков, В. Ф. Решение задачи синтеза нелинейных нестационарных систем автоматического управления / В. Ф. Шишлаков, Н. В. Решетникова, Е. Ю. Ватаева // Завалишинские чтения 21 : XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – с. 163-165.

23. Полиномиальная и аналитическая аппроксимации при решении задачи синтеза нелинейных САУ / Е. Ю. Ватаева, В. Ф. Шишлаков, Н. Л. Гречкин, Н. В. Решетникова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве : Сборник тезисов докладов II Международного форума, Санкт-Петербург, 09 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – с. 164-167.

24. Моделирование магнитного поля двигателя постоянного тока ПЛ-072 УЗ / Н. В. Решетникова, А. Г. Панкратов, Д. С. Швецов, И. А. Шишков // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2023 года. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – с. 183-192.

25. Учет в математических моделях влияния реакции якоря двигателя постоянного тока / Н. В. Решетникова, И. А. Шишков, А. Г. Панкратов, М. А. Монахов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Материалы XXVI Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2023 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – с. 196-202.

Отчеты о НИР

26. Ватаева Е.Ю., Шишлаков В.Ф., Гречкин Н.Л., Решетникова Н.В., Статкевич А.В., Гончарова В.И. Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга, раздел «Разработка методов синтеза операторов управления существенно нелинейных САУ во временной области» Отчет о НИР/ СПб.: ГУАП, 2024. 24 с.