МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи

Решетникова Наталия Викторовна

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор В.Ф. Шишлаков

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. 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 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 (Приложение А).

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 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.

1 ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ САУ

В настоящем разделе приводится обзор методов анализа и синтеза нестационарных систем автоматического управления, приводятся их достоинства и недостатки. На основе проведенного обзора формулируются цели и задачи диссертационной работы.

1.1 Область применения и физические свойства нестационарных САУ

Нестационарными системами автоматического управления называются системы, параметры которых изменяются с течением времени [1]. Данный тип систем имеет математическую модель, описываемую дифференциальными уравнениями с переменными параметрами.

Коэффициенты уравнений нестационарных систем в связи с этим являются функциями времени. Если говорить строго, то, видимо, все системы автоматического регулирования нестационарны, поскольку и у стационарных систем невозможно гарантировать идеальную стабильность их параметров в процессе эксплуатации [2]. Поэтому целесообразно рассматривать системы с изменяющимися параметрами объекта управления в течение времени переходного процесса, а также системы, работа которых происходит при изменении условий эксплуатации, например, антиблокировочные системы транспортных средств. В качестве примеров подобных САУ можно привести движение транспортного средства с выработкой топлива или системы, чьи элементы приобретают эксплуатационный износ в течение времени своей эксплуатации.

Для линейных нестационарных систем справедлив принцип суперпозиции и их поведение описывается или системой линейных дифференциальных уравнений, или одним уравнением, к которому после исключения переменных сводится система уравнений

$$a_n(t)\frac{d^n x}{dt^n}+a_{n-1}(t)\frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}}+\ldots+a_1(t)\frac{dx}{dt}+a_0(t)x= \\ =b_0(t)g(t)+b_1(t)\frac{dg}{dt}+\ldots+b_m(t)\frac{d^m g}{dt^m}, \qquad (1)$$

где x – выходная величина системы, $g(t)$ – входное воздействие, $a_i(t)$ при (i=0,1,2,…,n) – коэффициенты левой части дифференциального уравнения, $b_i(t)$ при (i=0,1,2,…,m) – коэффициенты правой части дифференциального уравнения при заданной функции $g(t)$ и ее производных.

Реальные элементы систем управления, как правило, имеют нелинейные статические характеристики, однако во многих случаях точность, даваемая линейным приближением, является вполне достаточной [3]. Наличие в системе нестационарности накладывает на разработчика системы управления необходимость учитывать эту особенность при решении задач анализа и синтеза.

Может быть использована следующая классификация нестационарности по степени негативного влияния дрейфа её параметров на САУ в целом [4].

1) *Некритическая.*

В случае, если нестационарность, возникающая в элементах объекта (системы), не оказывает существенного деструктивного влияния на показатели качества и может быть скомпенсирована, например, отрицательной обратной связью [5], систему в общем случае можно рассматривать как стационарную.

2) *Докритическая.*

В данном случае возникающий дрейф параметров приводит к ощутимому ухудшению показателей качества системы управления, метод введения обратной связи не позволяет скомпенсировать этот эффект, что приводит к необходимости разработки дополнительных, более сложных, алгоритмов управления [6].

3) *Критическая.*

Если в течение времени, сопоставимого с длительностью переходного процесса, дрейф параметров превышает допустимые пределы, возможна потеря устойчивости САУ [7].

При наличии каждой из степеней нестационарности требуется применение наиболее оптимальных алгоритмов анализа и синтеза, не обладающих избыточностью, но при этом позволяющих нивелировать негативное влияние дрейфа параметров.

Можно выделить два вида нестационарности в САУ – структурную и параметрическую [8].

Под системами с переменной (случайной) структурой (СПС) следует понимать динамические системы, поведение которых на случайных интервалах характеризуется различными структурами и описывается различными уравнениями. Другими словами, СПС – системы, в которых связи между функциональными элементами меняются тем или иным образом в зависимости от состояния системы [9]. В системах с переменной структурой возможно при определенных условиях получать виды движения более высокого качества, чем в любой из отдельно взятых структур, образующих СПС [10].

Класс систем с переменной структурой достаточно широк и включает системы, имеющие несколько детерминированных структур, переход в которые возможен в случайные моменты времени по случайному закону или в зависимости от значений некоторых фазовых координат или их комбинаций.

Назначение, структура и конструкция таких систем различны, но их главной особенностью является резкое изменение некоторых параметров, структуры управляющего устройства (закона управления), структуры в целом, включение новых звеньев в случайные моменты времени и по случайному закону.

Следует отметить, что переходы в системе от одной структуры к другой происходят в случайные моменты времени. Следовательно, система в каждый момент времени имеет случайную структуру, так как с определенной вероятностью находится в одном из N детерминированных состояний [11].

На рис. 1 представлена достаточно общая схема системы с переменной структурой [12].

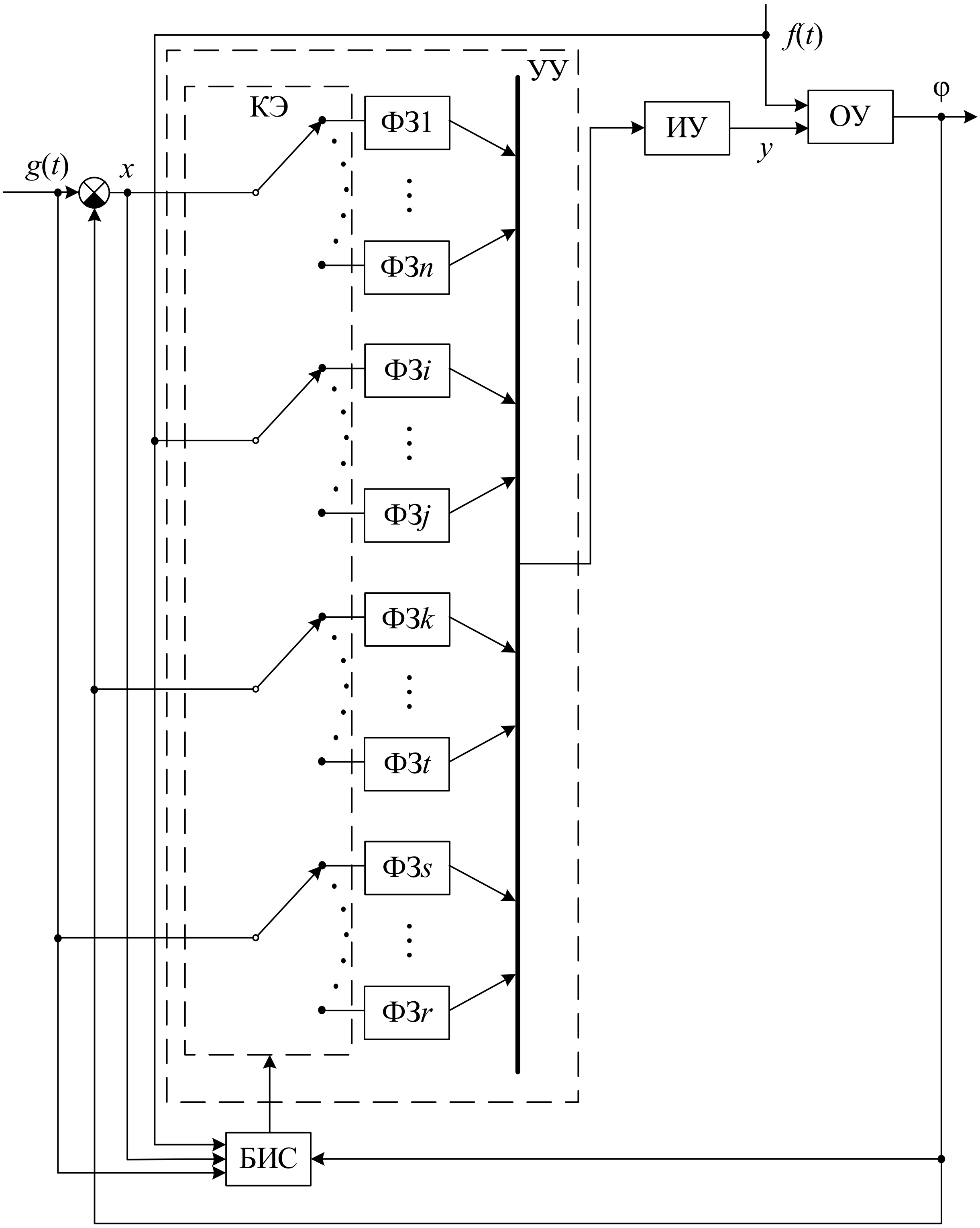


Рисунок 1 – Общая структурная схема системы с переменной структурой

В зависимости от того, какие координаты системы и внешние воздействия доступны для измерения, на вход управляющего устройства (УУ) может поступать информация о величине ошибки x, выходной координате исполнительного устройства (ИУ) y, задающем и возмущающем воздействиях $g(t)$ и $f(t)$, о регулируемой величине φ, о промежуточных координатах объекта управления (ОУ) $\varphi_1, \ldots, \varphi_i$ и исполнительного устройства $y_1, \ldots, y_k$. Управляющее устройство содержит некоторую совокупность функциональных звеньев (ФЗ), оператор каждого из них обозначен на рис. 1 соответствующими индексами. Каждая из входных величин управляющего устройства может поступать на входы только «своих» звеньев. Управляющее воздействие является суммой выходных величин всех звеньев. В УУ содержатся ключевые элементы (КЭ). Каждый КЭ замыкает один из предусмотренных каналов передачи информации. Всевозможные сочетания положений контактов КЭ определяют совокупность имеющихся в распоряжении фиксированных структур. Блок изменения структуры (БИС) на основе анализа всей поступающей на УУ информации дает команду на изменение структуры системы. Задача синтеза такой системы сводится к выбору операторов всех звеньев и логических законов, в соответствии с которыми изменяется структура системы.

Параметры, определяющие характеристики системы, могут быть детерминированными или случайными. Детерминированные параметры – это параметры, известные как функции времени. Случайные параметры – это параметры, сведения о которых не полны [13].

Детерминированными процессами называются процессы, которые можно описать явными математическими формулами [14]. Однако, отнести те или иные физические процессы к детерминированному либо случайному типу зачастую не получается столь очевидно. Причиной тому является то, что невозможно исключить вероятность происшествия событий, порождающий процесс, который не получится заранее предсказать. На рис. 2 представлена классификация детерминированных процессов.

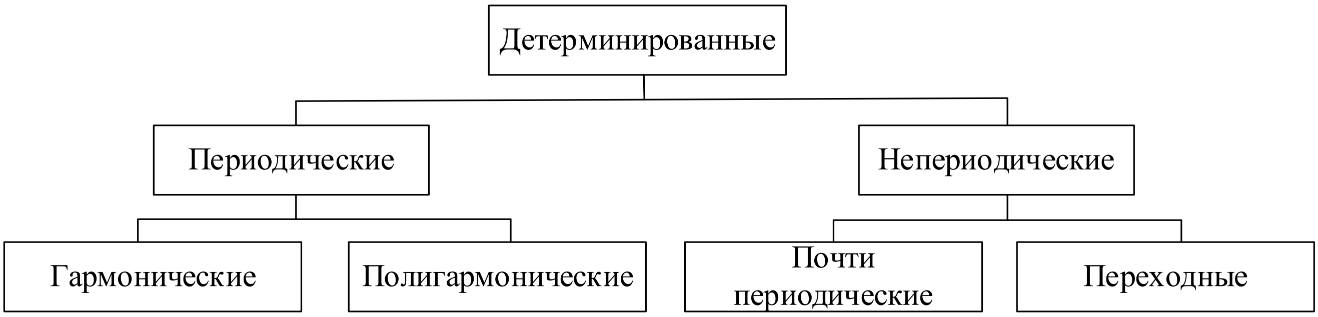


Рисунок 2 – Классификация детерминированных процессов

Процессы, описывающие детерминированные явления, делятся на периодические и непериодические [15]. В свою очередь, периодические делятся на гармонические (например, синусоидальный процесс) и полигармонические (периодические процессы, которые математически представляются функцией времени), а непериодические – на «почти периодические» и переходные. Также важно отметить, что может встречаться любое сочетание вышеупомянутых типов.

Если же процесс нельзя описать явной математической зависимостью и наблюдение дает невоспроизводимый результат, – такой процесс можно назвать случайным [16].

Конкретная реализация процесса, описывающего случайное явление, называется *выборочной функцией* (или *реализацией*, если речь идет о наблюдении конечной длительности). Совокупность всех возможных выборочных функций, которые может дать случайно явление, называется *случайным* или *стохастическим процессом*. Под реализацией случайного физического явления понимается один из возможных исходов случайного процесса.

На рис. 3 приведена классификация таких процессов.

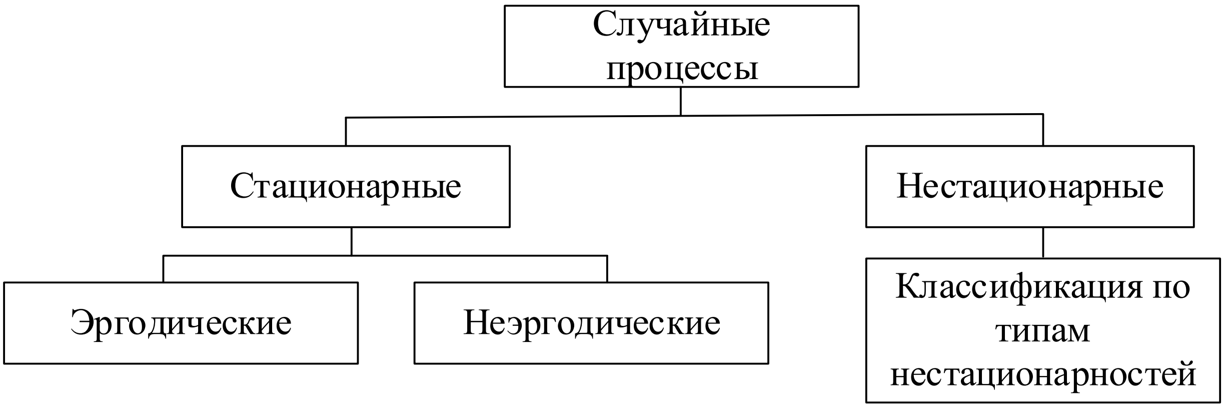


Рисунок 3 – Классификация случайных процессов

Под *стационарными* случайными процессами (или *слабо стационарными*) поднимаются такие процессы, в которых среднее значение $\mu_\chi(t_1)$ и ковариационная функция $R_{\chi\chi}(t_1,\ t_1+\tau)$ не зависят от момента времени t_1. Среднее значение слабо стационарного процесса постоянно, а ковариационная функция зависит только от сдвига времени τ (т.е. $\mu_\chi(t_1)=\mu_\chi$ и $R_{\chi\chi}(t_1,\ t_1+\tau)=R_{\chi\chi}(t_1)$). В случае, когда $R_{\chi\chi}$ и μ_χ зависят от момента времени t_1, процесс называется *нестационарным*.

Для *эргодических* процессов справедливо утверждение, что каждая реализация случайного процесса достаточной продолжительности несет практически полную информацию о свойствах всего *ансамбля* (совокупности выборочных функций) реализаций, что позволяет существенно упростить процедуру определения статистических характеристик, заменяя усреднение значений по ансамблю реализаций усреднением значений одной реализации за длительный интервал времени [17].

В качестве одного из наглядных примеров рассмотрим системы торможения колес транспортного средства [18].

Момент сцепления тормозящегося колеса с опорной поверхностью $M_{\text{сц}}$ представляет собой существенно нелинейную функцию из-за его зависимости от коэффициента сцепления μ. Коэффициент сцепления μ нелинейно зависит от величины относительного проскальзывания (скольжения) S эластичной шины колеса, а также от скорости движения транспортного средства, состояния опорной поверхности, давления воздуха в шине, рисунка протектора шины и ее эластичных свойств и многих других факторов. За время торможения наиболее существенно изменяются скорость движения транспортного средства, состояние опорной поверхности, а также величина относительного проскальзывания колеса S. Поэтому коэффициент сцепления μ обычно оценивают по семейству характеристик сцепления $\mu=\mu(S)$ (рис. 4).

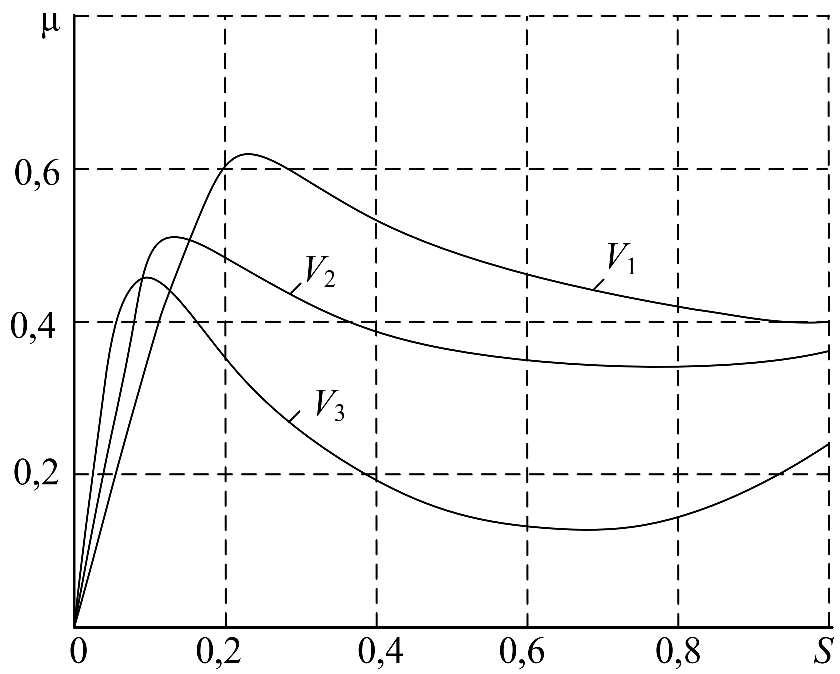


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента сцепления μ от величины относительного проскальзывания колеса S при разных поступательных скоростях V_1, V_2, V_3 при торможении $V_1<V_2<V_3$

Приведенные на рис. 4 характеристики $\mu(S)$ для различных поступательных скоростей иллюстрируют выраженный экстремальный характер [19]. Из рассмотрения этих кривых видно, что с увеличением поступательной скорости объекта максимум значения коэффициента μ смещается в сторону меньших значении S, что иллюстрирует классическую параметрическую нестационарность.

По этой причине всегда сложно оценить динамику торможения конкретного колеса транспортного средства, так как даже для одного и того же транспортного средства в зависимости от степени изношенности протектора шины можно получить совершенно различные зависимости $\mu=\mu(S)$ и, соответственно, динамику торможения.

1.2 Обзор методов исследования устойчивости нестационарных САУ

Для проведения исследований нестационарных систем прежде всего необходимо оценить устойчивость САУ.

Для нестационарных систем понятие устойчивости имеет некоторую специфику. Действительно, если предположить, что входная величина систем $g(t)=g_0=\text{const}$, и к моменту времени t_1 переходные процессы в системе закончились, т.е. если принять $d/dt=0,$ то из (1) для $t>t_1$ имеем

$$x(t)=\frac{b_m(t)}{a_n(t)}g_0. \tag{2}$$

Из (2) видно, что в зависимости от характера изменения коэффициентов $a_n(t)$ и $b_m(t)$ даже при постоянной входной величине выходная величина может изменяться неограниченно долго. Т.к. время работы реальных систем ограничено, установившегося значения в нестационарной системе не наблюдается и поэтому понятие асимптотической устойчивости отчасти теряет свой смысл [20].

В нестационарных системах нельзя оценивать качество переходного режима по переходной характеристике [21], т.к. ее вид будет зависеть от момента подачи на вход системы единичной функции. Так, например (рис. 5), для момента t_1 переходная характеристика может иметь монотонный характер, а для t_2 – колебательный.

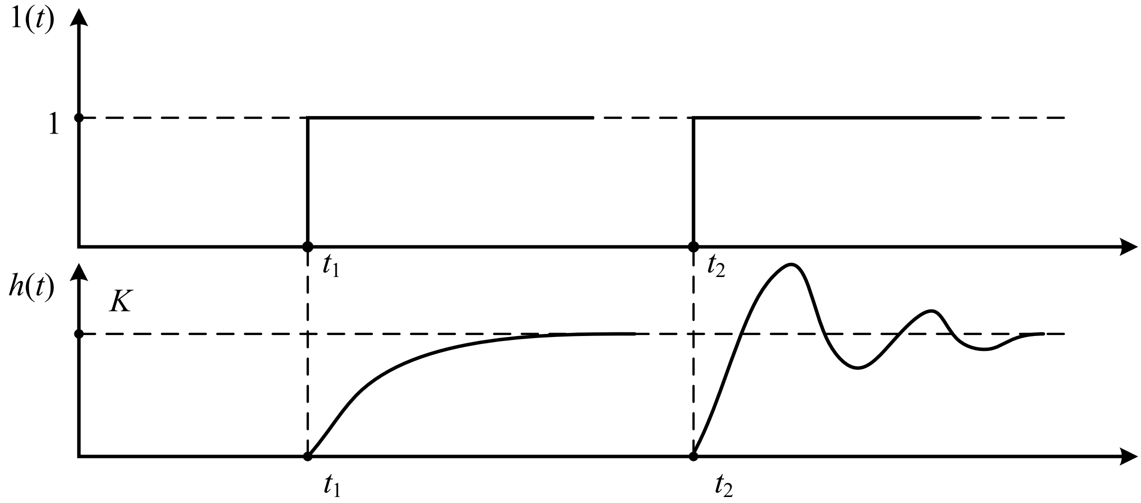


Рисунок 5 – Переходные характеристики нестационарной системы

Частотные характеристики нестационарных систем также зависят от времени. Например, если постоянная времени апериодического звена T в процессе работы системы увеличивается, то система становится более узкополосной и т.д.

Существуют точные методы исследования устойчивости линейных нестационарных систем, но они довольно сложны и на практике обычно пользуются приближенными методами.

– *Метод замороженных коэффициентов* – наиболее простой из известных методов исследования устойчивости нестационарных систем [22-25], однако являющийся недостаточно точным. Замораживание коэффициентов дифференциального уравнения достигается путем замораживания переменных во времени параметров в фиксированный момент времени t=ϑ. При этом нестационарная система сводится к системе с постоянными параметрами, но исследование системы должно последовательно проводиться для различных моментов времени t=ϑ, $0<\vartheta<T$, где T – время работы системы [26]. Если во всем рабочем интервале времени T условия устойчивости стационарной системы, получаемой методом замороженных коэффициентов, выполняются, то исходную нестационарную систему на этом интервале считают устойчивой.

При исследовании устойчивости нестационарных систем методом «замороженных» коэффициентов системе чисто формально ставится в соответствие «квазихарактеристическое» уравнение.

Для одномерной системы оно будет иметь вид:

$$p^n + a_1(t)p^{n-1} + a_2(t)p^{n-2} + ... + a_n(t) = 0.$$

Для многомерной системы:

$$\begin{vmatrix} a_{11}(t)-p & a_{12}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t)-p & \dots & a_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \dots & a_{nn}(t)-p \end{vmatrix} = 0.$$

В качестве примера можно рассмотреть систему, представленную на рис.6.

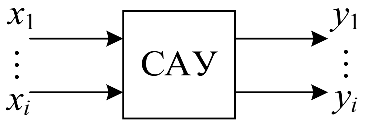


Рисунок 6 – Система управления

Входные воздействия примем равными нулю.

Пусть динамика системы (рис. 6) описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a_{11}(t)y_1 + a_{12}(t)y_2, \\ \dot{y}_2 = a_{21}(t)y_1 + a_{22}(t)y_2. \end{cases}$$

«Квазихарактеристическое» уравнение будет иметь вид:

$$\begin{vmatrix} a_{11}(t)-p & a_{12}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t)-p \end{vmatrix} = \Big(\big(a_{11}(t)-p\big)\big(a_{22}(t)-p\big)\Big) - a_{21}(t)a_{12}(t) =$$

$$= a_{11}(t)a_{22}(t) - a_{22}(t)p - a_{11}(t)p + p^2 - a_{21}(t)a_{12}(t) =$$

$$= p^2 + \big(-a_{11}(t) - a_{22}(t)\big)p + \big(a_{11}(t)a_{22}(t) - a_{21}(t)a_{12}(t)\big).$$

Т.к. коэффициенты этих уравнений зависят от времени, то и корни характеристического уравнения также будут зависеть от t.

Если для любого времени t $p_i(t)$ находятся в левой комплексной полуплоскости

$$\operatorname{Re} p_i(t) < 0,$$

то в силу «замороженных» коэффициентов исходная система может считаться устойчивой.

Однако существуют системы, у которых все $p_i(t)$ всё время находятся в левой полуплоскости, а собственные колебания системы возрастают и система неустойчива. И наоборот, есть системы, у которых один или несколько корней находятся в правой полуплоскости, а система устойчива. При использовании некоторых дополнительных условий метод «замороженных» коэффициентов применим и дает надежные результаты.

Эффективность данного метода напрямую зависит от правильности выбора фиксированных моментов времени (необходимо выбирать их так, чтобы охватить все возможные варианты значений коэффициентов, обратив особое внимание на точки, в которых происходит значительное изменение коэффициента или смена его знака), но стоит отметить, что результаты, полученные данным методом, не являются вполне достоверными.

– Использование понятия *технической устойчивости* (устойчивости на конечном интервале времени) [20, 27, 28]. Систему считают устойчивой (устойчивой на данном интервале времени работы системы T), если выходная величина $x(t)$ не превосходит некоторой заданной величины $x_{\text{доп}}$ при $0 \le t \le T$. Допустимое значение величины $x_{\text{доп}}$ выбирается в каждом конкретном случае исходя из технических соображений.

На рис. 7 изображены возможные графики $x(t)$ для нестационарных систем.

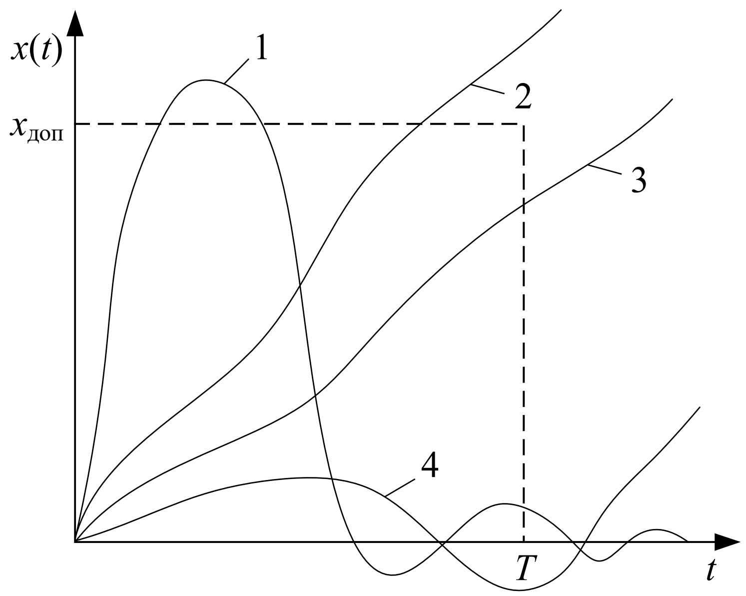


Рисунок 7 – Возможные графики изменения $x(t)$ для нестационарных систем

На рис. 7 кривые 3 и 4 соответствуют технически устойчивой системе, а 1 и 2 – технически неустойчивой, при том на примере кривой 3 видно, что система может быть одновременной устойчивой технически и неустойчивой асимптотически (кривая 4) и, наоборот, система может быть неустойчивой технически и устойчивой асимптотически (кривая 1).

Данный способ может использоваться в случае, когда коэффициенты уравнения (1) значительно изменяются.

В настоящее время не существует достаточно простых и достаточно общих критериев технической устойчивости. По существу, единственный способ проверки устойчивости нестационарных систем заключается в нахождении кривой выходной величины $x(t)$ при заданном входном воздействии $g(t)$ (внешнем возмущении). Определение $x(t)$ производят обычно либо с помощью различных приближенных аналитических методов, либо методами математического моделирования.

Также оценка устойчивости линейных нестационарных систем может быть выполнена известными методами исследования стационарных систем применительно для исследуемого класса [29].

– *Оценка устойчивости по функции Ляпунова [29-32].*

Многим системам управления может быть поставлена в соответствие математическая модель

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(t, \mathbf{X}). \qquad (3)$$

Если в качестве желаемого движения рассматривается решение $\mathbf{X}g$ системы управления (3), то модель, которая получается из (3) заменой переменных $\mathbf{X} = \mathbf{X}g + \widehat{\mathbf{X}}$, по терминологии А.М. Ляпунова называется моделью возмущенного движения

$$\frac{d\widehat{\mathbf{X}}}{dt} = \mathbf{F}\left(t, \mathbf{X}g + \widehat{\mathbf{X}}\right) - \mathbf{F}(t, \mathbf{X}g) = \widehat{\mathbf{F}}\left(t, \widehat{\mathbf{X}}\right), \qquad (4)$$

где $\mathbf{X}g$ – вектор координат желаемого движения, $\widehat{\mathbf{X}}$ – вектор координат возмущенного движения.

Для неоднородных систем автоматического управления

$$\frac{d\widehat{\mathbf{X}}}{dt} = \left[A + B(t)\right]\widehat{\mathbf{X}}, \qquad (5)$$

где A – матрица постоянных коэффициентов, $B(t)$ – матрица переменных коэффициентов при векторе управляющих сигналов.

Решения $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ систем уравнений (4)-(5), соответствующие ненулевым начальным условиям $\widehat{\mathbf{X}}(0) \neq 0$, называются возмущенными движениями исследуемых систем управления. Решения систем уравнений (4)-(5), соответствующие нулевым начальным условиям $\widehat{\mathbf{X}}(0) = 0$, называются возмущенными движениями $\widehat{\mathbf{X}}^*(t)$. Благодаря замене переменных $\mathbf{X} = \mathbf{X}g + \widehat{\mathbf{X}}$ условием совпадения решения $\mathbf{X}$ с желаемым решением $\mathbf{X}g$ становится условие обращения в ноль решения $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ системы (4), соответствующего ненулевым начальным условиям.

Невозмущенное движение $\widehat{\mathbf{X}}^*(t)$ называется устойчивым по Ляпунову по отношению к переменным $\widehat{\mathbf{X}}(t)$, если при всяком заданном положительном числе ε>0, как бы мало оно ни было, найдется другое положительное число λ(ε)>0 такое, что для всех начальных возмущений $\widehat{\mathbf{X}}(0)$, удовлетворяющих условию $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(0)\right\| < \lambda(\varepsilon)$, возмущенное движение $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ при всяком $t>0$ будет удовлетворять неравенству $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(t)\right\| < \varepsilon$, где $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(t)\right\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$ – норма вектора $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ или любая другая эквивалентная норма.

Если при $t\to\infty$ возмущенное движение стремится к нулю, т.е. $\lim_{t\to\infty}\widehat{\mathbf{X}}(t) = 0$, то невозмущенное движение и исходная система (4) называются асимптотически устойчивыми по Ляпунову по отношению к переменной $\widehat{\mathbf{X}}(t)$.

Для большинства нелинейных и нестационарных систем строгим математическим аппаратом исследования устойчивости при больших отклонениях от равновесных значений координат является математический аппарат, основанный на использовании функции Ляпунова.

– *Оценка устойчивости нестационарных систем по характеристическим показателям Ляпунова* [29, 33, 34]

$$\lambda_{\mathbf{X}(t)} = \overline{\lim_{t\to+\infty}}\left(\frac{1}{t}\ln\left|\mathbf{X}(t)\right|\right),$$

где $\lambda_{\mathbf{X}(t)}$ – характеристический показатель Ляпунова решения нестационарной системы уравнений; $\mathbf{X}(t)=[x_1(t), \ \ldots, \ x_n(t)]$ – решение однородной линейной нестационарной системы обыкновенных дифференциальных уравнений $\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t)$; $\mathbf{A}(t)=(a_{ij}(t))$ – матрица переменных коэффициентов $a_{ij}(t)$, суммируемых на каждом конечном отрезке функций времени; i, j=1, …, n; $\overline{\lim_{t\to+\infty}}(\cdot)$ – верхний предел функции, стоящей в скобках; $\left|\mathbf{X}(t)\right| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$ – норма вектора решений.

Для оценки устойчивости линейных нестационарных систем с ограниченными коэффициентами принципиальное значение имеет следующая теорема Ляпунова о характеристических показателях:

если $\overline{\lim\limits_{t\to+\infty}}\left(\frac{1}{t}\int\limits_0^t\left\|A(\tau)\right\|d\tau\right)<+\infty$, то:

– для всякого решения $\mathbf{X}(t)\neq 0$ характеристические показатели Ляпунова $\lambda=(\lambda_1, \dots , \lambda_n)$ являются действительными ограниченными по модулю числами;

– если $\lambda_1(\mathbf{X})<0$, то решения системы уравнений асимптотически устойчивы;

– если дополнительно известно, что однородная система первого приближения $\dot{\mathbf{X}}=A(t)\mathbf{X}$ – приводимая линейная система, то из $\lambda_1(\mathbf{X})<0$ следует, что нулевое решение и неоднородной системы $\dot{\mathbf{X}}=A(t)\mathbf{X}+O\left(\left|\mathbf{X}\right|^2\right)$ устойчиво по Ляпунову.

Данный метод используется для оценки устойчивости нестационарных систем без особых точек.

– *Устойчивость систем с особой точкой* [29, 35, 36].

Невозмущенное движение системы $\widehat{\mathbf{X}}^*(t)$ называется устойчивым по отношению к переменным $\widehat{\mathbf{X}}(t)$, если при неограниченном увеличении полного времени маневрирования t_0 при заданном значении разности t_0-t>0 и при всяком заданном положительном числе $\varepsilon>0$, как бы мало оно ни было, найдется другое положительное число $\lambda(\varepsilon)>0$ такое, что для всех начальных возмущений $\widehat{\mathbf{X}}(0)$, удовлетворяющих условию $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(0)\right\|<\lambda(\varepsilon)$, возмущенное движение $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ будет удовлетворять неравенству $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(t_0-t)\right\|<\varepsilon$, где $\left\|\widehat{\mathbf{X}}(t)\right\|$ – норма вектора $\widehat{\mathbf{X}}(t)$.

Фактически это определение соответствует устойчивости системы в точке t_0-t>0, находящейся от особой точки траектории на расстоянии $D=U(t_0-t)$, где U – скорость сближения; t_0 – полное время (длительность) маневрирования. Если при $t_0\to\infty$ и $t_0-t\to 0$ возмущенное движение $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ стремится к нулю, то система называется асимптотически устойчивой по отношению к переменным $\widehat{\mathbf{X}}(t)$ в особой точке траектории.

– *Анализ устойчивости методом фазовых траекторий* [29, 37].

Данный метод может быть использован для демонстрации свойств устойчивости и неустойчивости в т.ч. нестационарных систем. Для этого следует вычислить значения переходных процессов по различным координатам вектора состояния и их производным и построить траекторию двух-трех наиболее интересных для исследования фазовых координат. Предпочтение обычно отдается тем фазовым координатам, которые входят в качестве аргументов в наиболее существенные нелинейности. Если известны аналитические выражения для импульсных переходных или параметрических функций многомерных нестационарных систем, метод фазовых траекторий может быть использован и для решения задач анализа и синтеза аналитическими методами.

1.3 Обзор методов синтеза нестационарных САУ

Нестационарный нелинейный объект в пространстве состояний в общем виде описывается уравнениями

$$\begin{cases} \dfrac{dx(t)}{dt} = A(x,t)\cdot x(t) + B(t)\cdot u(t) + f_{\xi}(t), \\ y(t) = L^{\mathrm{T}}(t,\xi)\cdot x(t). \end{cases} \tag{6}$$

где $x(t)$ – вектор состояния объекта управления; $y(t)$ – вектор выходов объекта управления; $A(x,t)$ – нестационарная и нелинейная матрица состояния; $B(t)$ – нестационарная матрица при управляющем воздействии; $u(t)$ – вектор управляющих воздействий; $f_{\xi}(t)$ – вектор внешних возмущений; $L^{\mathrm{T}}(t, \xi)$ – квазипостоянная матрица выхода; ξ – набор всех изменяющихся параметров [38].

Задача синтеза закона управления нелинейного нестационарного объекта [39, 40] может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти закон управления для нелинейных нестационарных объектов [41, 42], которые описываются системой уравнений (6), обеспечивающий ограниченность всех сигналов в замкнутой системе, заданные динамические параметры (устойчивость и требуемые показатели качества САУ) [43] при любых начальных условиях и ограниченных внешних возмущениях

$$\int_0^\infty \left\| f_\xi(t) \right\|^2 dt < \infty,\ \forall \xi \in \Xi$$

или при ограничении по норме

$$\left\| f_\xi(t) \right\| < f_0^2 = \mathrm{const},$$

где ξ – вектор изменяющихся параметров; Ξ – множество возможных значений набора изменяющихся параметров ξ при исполнении целевого условия [38].

В настоящее время для решения задачи синтеза нестационарных САУ можно применять следующие подходы [44]:

– аналитические или графоаналитические методы исследования, применимые лишь к определенным классам систем;

– методы математического моделирования и экспериментального исследования при помощи средств вычислительной техники [45-49], основанные на воспроизведении или структурных преобразованиях исходных уравнений системы, если они известны, или на их экспериментальном получении, если, например, объект представляет собой «черный ящик», а также создание интеллектуальных систем управления на базе экспертных оценок [50];

– общие методы исследования, представляющие собой обобщение и дальнейшее развитие классических методов математического анализа, которые также требуют применения вычислительной техники.

Наиболее распространенные методы синтеза приводятся ниже.

- Метод преобразований подобия, приведение гладкой нестационарной системы к канонической фробениусовой форме (перевод матрицы системы в матрицу Фробениуса) с помощью замены $y=T(t)x$ [51].

Замкнутая система представлена в векторно-матричной форме вида

$$\begin{cases} \dot{x} = A(t)x + b(t)u(t,x), \\ u(t,x) = s^*(t)x. \end{cases} \qquad \mathbf{(7)}$$

где $b(t)$ – вектор распределения управления, $s^*(t)$ – вектор обратных связей.

При условии невырожденности и ограниченности матрицы $T(t)$ замена $y=T(t)x$ [52, 53] приводит систему (7) к виду [54]

$$\begin{cases} \dot{y} = \tilde{A}(t)y + \tilde{b}u, \\ u = \tilde{s}^{*}y, \end{cases}$$

где $\tilde{A}(t)$ представляет собой матрицу Фробениуса, $\tilde{b}$ – произвольный вектор, для которого $0 < m < \det T(t) \le H < \infty$, $\tilde{s} = e_1 = (1,0,...,0)^{*}$ [55].

Для достижения экспоненциальной устойчивости системы [56, 57], управляемости и наблюдаемости матриц $T(t)$ и $G(t)$, подбираются параметры и значения векторов $b(t)$, $s(t)$ [51].

При практической реализации может возникнуть ситуация, при которой матрица управляемости $T(t)$ станет вырожденной и неограниченной в определенный момент времени t, это связано с зависимостью матриц $T(t)$ и $G(t)$, что приведет к потере устойчивости рассматриваемой системы [58]. Также метод преобразований подобия ограничивается вычислительными возможностями при учете динамики регулятора [59, 60]

$$\begin{cases} \dot{x} = A(t)x + b(t)u(t,x), \\ u(t,x) = s^{*}(t)x - p(t)u, \end{cases}$$

где $p(t)$ – функция, определяющая инерциальность регулятора.

Полученная замкнутая система может иметь девятый или десятый порядок, что значительно осложнит вычисления и синтез системы управления.

- Метод скоростного градиента в дифференциальной форме [61], представляющий применение функций Ляпунова с целью минимизации значения некоторой гладкой неотрицательной целевой функции (функционала) [62].

Динамическая система описывается в виде

$$\dot{x} = F(x,u,t),$$

где x – вектор переменных состояния объекта, u – вектор управления, $F(x, u, t)$ – кусочно-непрерывная вектор-функция [63]. Цель управления может быть сформулирована в следующей форме [64-66]

$$Q_t \le \Delta,\ t > t_0,$$

где Q_t – целевой функционал. Выделяется два типа целевых функционалов: интегральный и локальный.

Локальный функционал описывается видом

$$Q_t = Q\big(x(t), t\big),$$

где $Q(x(t),\ t)$ – скалярная функция n+1 переменных.

Интегральный функционал представлен в виде

$$Q_t = \int_0^t R\big(x(\tau), u(\tau), \tau\big) d\tau,\ 0 \le \tau \le t,$$

где $R(x,\ u,\ t)$ – скалярная функция n+m+1 переменных.

Для синтеза управления $u(t)=U[x(t)\ ,u(t)]$, заданного целевой функцией локального типа $Q_t=Q(x(t),\ t)$, вычисляется скорость изменения Q_t (первая производная величины)

$$\dot{Q} = w(x,u,t) = \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \left[\nabla_x Q(x,t)\right]^{\mathrm{T}} F(x,u,t).$$

Затем находится градиент $w(x,u,t)$ по входу

$$\nabla_u w(x,u,t) = \left[\frac{\partial w}{\partial u}\right]^{\mathrm{T}} = \left[\frac{\partial F}{\partial u}\right]^{\mathrm{T}} \nabla_x Q(x,t).$$

Определяется закон изменения управления во времени

$$\dot{u} = -\Gamma \nabla_u w(x,u,t),$$

где $\Gamma=\Gamma^{\mathrm{T}}>0$ – симметрическая положительно определенная матрица [62].

Полученный закон управления описывает пропорциональное изменение $u(t)$ к градиенту скорости изменения Q_t, при этом решается проблема отсутствия явной зависимости $Q(x(t),t)$ от $u(t)$ путем уменьшения $\dot{Q}$ до выполнения неравенства $\dot{Q} < 0$ [67].

Метод скоростного градиента разрешим лишь для управления по состоянию и не применим при синтезе управления по выходу [68].

- Метод синтеза, основывающийся на концепции расширенной ошибки, представляет собой алгоритм управления линейными объектами по выходу при помощи введения в систему дополнительного сигнала [69].

Система представлена в векторно-матричной форме вида

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu,\ y = cx, \\ u = -w(t)^{\mathrm{T}}\hat{Q},\ \dot{\hat{Q}} = -\Theta\left(y, w, \hat{Q}\right). \end{cases}$$

Для решения задачи синтеза вводится вспомогательный динамический фильтр

$$\dot{W} = AW + bw(t)^{\mathrm{T}},\ \overline{w}^{\mathrm{T}} = cW,$$

$$\dot{\eta} = A\eta - W\dot{\hat{Q}},\ \varsigma = cn.$$

Концепция расширенной ошибки определяется моделью [70]

$$\hat{y} = y + \varsigma = \overline{w}^{\mathrm{T}}\tilde{Q} + ce,$$

где e – возможное решение уравнения $\dot{e} = Ae$ при

$$e_0 = x_0 + \eta_0 - W_0\hat{Q}_0.$$

Закон управления гарантирует ограниченность настраиваемого вектора $\hat{Q}$

$$\dot{\hat{Q}} = \gamma\frac{1}{1 + \overline{w}^{\mathrm{T}}\overline{w}}\overline{w}\hat{y}.$$

Главным недостатком метода синтеза, основывающегося на концепции расширенной ошибки, является невозможность исследования и оценки полученных переходных процессов по настраиваемой переменной y [71, 72], также синтез методом расширенной ошибки требует повышенного количества времени в связи с долгой настройкой регулятора [63].

- Метод адаптации высоких порядков, преобразование изначально заданной системы в параметрическую форму и выбор закона управления в соответствии с относительной степенью модели [73].

Поведение настраиваемой выходной переменной $y(t)$ системы описывается в параметризированном виде [63]

$$y = kH\left(p\right)\left[w\left(t\right)^{\mathrm{T}}\theta + u\right],$$

где k – положительный параметр, $w(t)$ – регрессор известной формы, θ – вектор неизвестных параметров.

Передаточная функция $H(p)$, определяющая динамику системы, описывается в форме

$$H(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \ldots + b_1 p + b_0}{p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \ldots + a_1 p + a_0}.$$

При замене

$$W(p) = (p + \lambda) H(p)$$

модель преобразовывается к виду

$$y = \frac{k}{p + \lambda}\left[\left(W(p) w(t)\right)^{\mathrm{T}} \theta + W(p) u\right] + e,$$

где $e(t)$ – экспоненциально затухающая функция времени.

Для выбора алгоритма адаптации исследуется относительная степень (n-m=p) функции. При нахождении в пределах 1≤p≤2, применяется закон управления [74]

$$\begin{gathered} u = -W(p)^{-1}\left\lfloor \bar{w}(t)\hat{\theta} \right\rfloor, \\ \dot{\hat{\theta}} = \gamma \bar{w} \gamma,\ \gamma > 0. \end{gathered} \tag{8}$$

Для систем с относительными степенями p=1 закон управления подлежит стандартизированному расчету. При относительной степени p=2 применение закона управление (8) невозможно, поэтому вычисляются производные $\dot{\hat{\theta}}$ и $\dot{\bar{w}}$. При p>2 происходит расчет производных $\hat{\theta}$ более высоких порядков, для закона управления исследуется 3(p-2) дифференциальных выражений [63].

Метод адаптации высоких порядков на практике сложен в применении в связи с долгим временем настройки коэффициентов модели и расчета старших производных [75-77].

- Метод обратной задачи динамики, заключающийся в выборе эталонного (дифференциального) уравнения по заданному описанию системы и желаемым динамическим параметрам, решении данного уравнения относительно старшей производной и подстановке найденного значения в уравнение объекта с последующим нахождением закона управления [63].

Рассматриваемый объект описывается уравнением [78]

$$\ddot{x} + f(x, \dot{x}, t) = b(t)u, \; b(t) \neq 0.$$

Желаемое поведение системы описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_2 x = 0. \tag{9}$$

Из уравнения (9) следует

$$\ddot{x} = -a_1\dot{x} - a_2 x.$$

Закон управления синтезируемого объекта после подстановки выраженной величины принимает вид

$$u = \frac{1}{b(t)}\left[-a_1\dot{x} - a_2 x + f(x, \dot{x}, t)\right].$$

Полученный закон справедлив при линейном вхождении управления в объект, в случае нелинейного вхождения очевидное определение эталонного уравнения по заданным требованиям невозможно, необходим дополнительный анализ, выполнение вспомогательных условий и соотношений [79].

Сложность применения метода обратной задачи динамики на практике связана с подбором оптимальной эталонной модели системы, учитывающей предъявляемые требования, физическую реализуемость и соответствие реальным процессам объекта [80].

- Метод синтеза нелинейных систем за счет предварительного преобразования в линейную модель. Заданному нелинейному объекту рассчитывается система управления, обладающая линейными характеристиками, с последующим выбором управления уже известными методами: скоростного градиента, адаптации высоких порядков, метода синтеза, основывающегося на концепции расширенной ошибки и т.д. [81].

Большинство методов линеаризации нелинейных систем основываются на обработке сигнала, пришедшего с обратной связи по выходу, и генерации нового управляющего импульса [82]. Создание управления осуществляется заранее спроектированным блоком (рис. 8) таким образом, чтобы на основе вектора состояния x, вектора выхода y, нового управления $\tilde{u}$ изменённая модель $\dot{x} = Ax + B\tilde{u}$ являлась линейной.

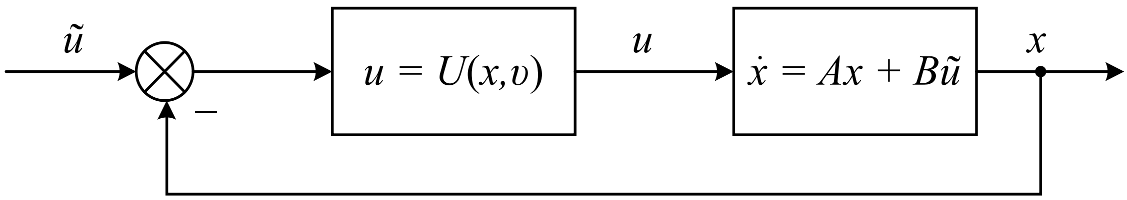


Рисунок 8 – Блочная схема линеаризованной системы

Линеаризация исходных моделей может осуществляться такими методами как [63]:

– приближенный метод локальной линейной аппроксимации, линеаризация осуществляется при помощи разложения исходных функция в ряд Тейлора вблизи точки равновесия $x = x^{\bullet}$

$$f(x) = f\left(x^{\bullet}\right) + F\left(x^{\bullet}\right)\tilde{x} + o_f(\tilde{x}),$$
$$g(x) = g\left(x^{\bullet}\right) + G\left(x^{\bullet}\right)\tilde{x} + o_g(\tilde{x}),$$

где $o_f(\tilde{x}),\ o_g(\tilde{x})$ – остаточные члены в форме Пеано, $\tilde{x}$ – вектор ошибки.

Далее происходит вывод модели ошибки $\dot{\tilde{x}}$ и вычисление элементов исходной системы в форме

$$\dot{x} = \tilde{f}(x) + g(x)\tilde{u}.$$

– метод гармонической линеаризации, разложение функции нелинейного звена в ряд Фурье

$$\sigma(t) = \frac{1}{2}a_0 + b_1 \sin \omega t + a_1 \cos \omega t + \ldots,$$

где $\sigma(t)$ – нелинейная функция, с дальнейшим приведением функции нелинейного звена при условии, что линейная часть системы является фильтром низких частот, к виду

$$W_{\text{Н}} = \frac{b_1}{A} + \frac{a_1}{A\omega} p,$$
$$A = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \left| W_{\text{Л}} \right|.$$

- Метод функций Ляпунова [83].

Нелинейная система описывается уравнением [63]

$$\dot{x} = f(x) + W(x)\xi,$$

где ξ – вектор состояния цепи интеграторов, $f(x)$ – определенный гладкий вектор, $W(x)$ – матрица функции. Для заданной системы функция Ляпунова ищется в форме [84]

$$V(x) = \frac{1}{2} x^{\text{T}} P x + \frac{1}{2} \xi^{\text{T}} \Gamma \xi,$$

где P и C – симметричные матрицы. Первая производная данной функции имеет вид

$$\dot{V}(x) = x^{\text{T}} P \dot{x} + \xi^{\text{T}} \Gamma \dot{\xi} = x^{\text{T}} P f(x) + \xi^{\text{T}} \left(x^{\text{T}} P W(x) + \Gamma \dot{\xi} \right).$$

При управлении вида

$$\dot{\xi} = \Gamma^{-1} x^{\text{T}} P W(x)$$

происходит обнуление значений в скобке и приведение выражения к форме

$$\dot{V}(x) = x^{\text{T}} P f(x),$$

при которой устойчивость системы определяется гладким вектором $f(x)$. В случае соблюдения неравенства $\dot{V}(x) \le 0$ синтезированный закон управления обеспечивает необходимую стабилизацию объекта управления в точке x=0.

Метод функций Ляпунова для синтеза систем управления при решении практических задач применяется крайне редко в связи с отсутствием однозначного подхода к выбору функций Ляпунова и возможным высоким порядком реальных систем [85].

- Подход, связанный с обращением одного из методов математической физики (обобщенного метода Галеркина) для решения задачи синтеза стационарных линейных и нелинейных непрерывных и импульсных систем, который позволяет с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать подобные задачи для САУ широкого класса. В работе предлагается распространить данный метод на системы при нестационарности параметров.

Следует отметить, что в работе рассматривается нестационарность параметров системы, в связи с чем теория оптимальной фильтрации, которая рассчитана на нестационарные и стохастические процессы, не являлась предметом исследования.

1.4 Постановка задач исследования

Обобщенный метод Галеркина позволяет эффективно синтезировать параметры регулятора для решения задачи синтеза непрерывных и импульсных систем при задании желаемого программного движения [44, 86-88]. Предлагается распространить данный метод для решения задачи синтеза линейных и нелинейных непрерывных систем при нестационарности параметров, линейных и нелинейных импульсных систем при наличии амплитудно-, широтно- и частотно-импульсных модуляторов. Поскольку метод является приближенным, в работе будет рассматриваться решение технических задач, подтверждающих эффективность и достаточную для практического применения точность предлагаемого решения.

1.5 Выводы по главе 1

1. В главе рассмотрены области применения и физические свойства нестационарных САУ; приведена классификация нестационарности по степени негативного влияния дрейфа параметров системы управления на качество её работы; описаны виды параметров, определяющие характеристики САУ;

представлены методы исследования устойчивости и синтеза нестационарных систем автоматического управления.

2. Обозначена сложность использования точных методов исследования устойчивости нестационарных систем ввиду зависимости характера переходного процесса от момента подачи задающего воздействия. Рассматривается использование приближенных методов оценки устойчивости.

3. Выполненный обзор методов синтеза нестационарных систем автоматического управления показал сложность использования большинства подходов в связи с долгим временем настройки и расчета параметров системы, а также высокой трудоемкостью использования при решении большинства практических задач. Использование обобщенного метода Галеркина позволит эффективно синтезировать параметры регулятора для широкого класса САУ ввиду единых математических, методологических и алгоритмических позиций решения.

Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [88-92].

2 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕПРЕРЫВНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ САУ

В настоящей главе приведена общая схема решения задачи синтеза параметров регулятора для односвязных и многосвязных систем с параметрической нестационарностью с применением обобщенного метода Галеркина. Приведено исследование дрейфа параметров двигателя, обусловленного реакцией якоря и различными собственными сопротивлениями обмотки якоря. Рассмотрено решение задачи синтеза на примере нахождения коэффициентов передачи и постоянных времени регулятора турбоагрегата.

2.1 Общая схема решения

В качестве математического аппарата для решения задачи синтеза параметров нелинейных непрерывных САУ предлагается распространить на класс нестационарных САУ обобщенный метод Галеркина, позволяющий с единых математических, методологических и алгоритмических позиций решать подобные задачи для САУ широкого класса [44].

2.1.1 Синтез односвязных систем обобщенным методом Галеркина

Задача синтеза нелинейных нестационарных односвязных 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:

$$c_k^-(t) \le c_k(t) \le c_k^+(t),\ k = 1, 2, \ldots, m, \qquad (10)$$

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 ограничения на грубость и устойчивость синтезируемой системы.

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

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

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;

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

– 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 [44]

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

поскольку для решения линейного дифференциального уравнения второго порядка существует взаимно-однозначное соответствие между показателями качества работы САУ в переходном режиме (перерегулированием, колебательностью и временем переходного процесса) и коэффициентом затухания процесса α и собственной частотой колебаний β.

Так как не существует точных методов решения нелинейного дифференциального уравнения общего вида, образуется невязка:

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

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

$$\int_0^\infty \psi\left(c_k\left(t\right),t\right)\varphi_q\left(t\right)dt=0,\ k,q=1,2,\ldots,m, \qquad (11)$$

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

Систему из m непрерывно дифференцируемых линейно-независимых координатных функций выбираем в виде ряда вещественных экспонент [86-99], представляющих собой полную систему функций

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

Для наибольшей сходимости желаемого программного движения и реального движения системы коэффициент затухания целесообразно выбрать

$$\rho_1=\alpha,$$

где α – коэффициент затухания составляющей желаемого программного движения, которая оказывает наибольшее влияние на длительность переходного процесса.

Остальные коэффициенты затухания ряда ρ_{m-1} следует выбрать в виде геометрической прогрессии (со знаменателем прогрессии r=2), т. е.

$$\rho_q=\rho_1 r^{q-1}=\rho_2 r^{q-1},\ q=1,2,\ldots,m.$$

что обеспечивает меньшее время затухания каждой из m–1 экспонент по сравнению со временем затухания первой координатной функции [44].

Это приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\int_0^\infty Q\left(c_k(t),D\right)x^0(t)\varphi_q(t)dt +$$
$$+\int_0^\infty R\left(c_k(t),D\right)F\left[x^0(t),D\left\{x^0(t)\right\}\right]\varphi_q(t)dt - \qquad (12)$$
$$-\int_0^\infty S\left(c_k(t),D\right)f(t)\varphi_q(t)dt,$$
$$k,q=1,2,\ldots,m.$$

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 (11) 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 (12) и имеющей вид

$$J=\sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^\infty \psi\left(c_k(t),t\right)\varphi_q(t)dt\right\}^2,\ \min_{c_k(t)} J\to 0, \qquad (13)$$

оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченные выше, путем использования процедуры сжимающего случайного поиска, предложенной Ю. А. Сушковым [113]. Данная процедура позволяет определять глобальный минимум функционала (13) в многомерном пространстве, что подтверждалось решением практических задач [44, 103].

Интегральные соотношения (12), определяющие интегралы Галеркина на семействе элементарных функций для кусочно-линейной, алгебраической и полиномиальной аппроксимаций получены в работах [18, 100-105]:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i\left(c_k(t)\right)A_{qi}+\sum_{i=0}^{u} b_i\left(c_k(t)\right)B_{qi}-\sum_{i=0}^{v} e_i\left(c_k(t)\right)C_{qi}=0,$$
$$q=1,2,\ldots,m,$$

где

$$A_{qi}=\int\limits_0^\infty D^i\left\{x^0\left(t\right)\right\}e^{-\rho_q t}dt=A_q\rho_q^{i-1},\ i=0,1,\ldots,n;$$

$$B_{qi}=\int\limits_0^\infty D^i\left\{F\left[x^0\left(t\right),\dot{x}^0\left(t\right)\right]\right\}e^{-\rho_q t}dt=B_q\rho_q^{i-1},\ i=0,1,\ldots,u;$$

$$C_{qi}=\int\limits_0^\infty D^i\left\{f\left(t\right)\right\}e^{-\rho_q t}dt=C_q\rho_q^{i-1},\ i=0,1,\ldots,v.$$

Поскольку параметры звеньев САУ могут являться функциями времени, т.е. некоторые из них могут быть нестационарными по определению, то при решении задачи синтеза нелинейных систем данного класса возможны следующие варианты решения:

– в том случае, когда показатели качества работы нелинейной системы не уходят за заданную зону ограничения, т.е. влияние параметров неизменяемой части системы не оказывают на протекающий процесс дестабилизирующего влияния, задача синтеза решается один раз;

– в случае, если показатели качества в процессе работы САУ уходят за заданную зону ограничения, необходимо знать либо экспериментально установить закон изменения параметров неизменяемой части системы и в соответствии с ним решать задачу синтеза, либо изменять параметры синтезируемого регулятора по тому же закону.

При реализации регулятора в виде электронной схемы возможно рассматривать решение задачи выхода показателей качества системы из заданной зоны ограничений при помощи многократного синтеза и перехода от одной структуры регулятора к другой с помощью электронного коммутатора с учётом возникающих при переключении флуктуационных процессов. Также возможна реализация регулятора в виде программы для контроллера путем непрерывного изменения параметров регулятора, которые найдены в процессе синтеза. Однако в этом случае следует учитывать, что практическая реализация возможна лишь в том случае, когда все параметры неизменяемой части системы отслеживаются в реальном времени и обработка информации так же, как и длительность решения задачи синтеза, т.е. транспортное запаздывание, не будет превышать 5÷15% от длительности переходного процесса.

2.1.2 Синтез многосвязных систем обобщенным методом Галеркина

Для решения задачи синтеза многосвязной системы автоматического управления (МСАУ) предполагается, что известна структура синтезируемой САУ и параметры объекта управления. Параметры регулятора (оператора управления), структура которого задана в самом общем виде, определяются из условия приближенного обеспечения заданных показателей качества работы САУ в переходном режиме (времени переходного процесса $t_{\text{ПП}}$, перерегулирования σ, колебательности μ). При этом, безусловно, должны обеспечиваться устойчивость и грубость системы по варьируемым параметрам.

Как и в случае односвязных систем, задача синтеза решается при технических ограничениях, которые накладываются на значения варьируемых параметров (10).

Ограничения на грубость системы по варьируемым параметрам имеют следующий вид:

$$\Delta = \frac{\delta c_k\left(t\right)}{c_k\left(t\right)} \le \Delta^0,$$

где Δ_0 – заданное значение грубости системы; $\delta c_k(t)$ – вариации параметров, в пределах которых обеспечивается устойчивость системы.

Для определенности задачу синтеза рассмотрим при внешнем скачкообразном входном воздействии $f(t)= H\cdot 1(t)$ и нулевых начальных условиях для момента времени $t = -0$, т.е. до приложения к системе воздействия амплитудой H:

$$x_{-0} = 0,\ \dot{x}_{-0} = 0,\ \ddot{x}_{-0} = 0,\ \dots ,\ x_{-0}^{(n-1)} = 0. \qquad (14)$$

Поскольку при синтезированных параметрах система должна быть устойчива, то

$$x(\infty)=H,\ \dot{x}(\infty)=0,\ \ddot{x}(\infty)=0,\ \ldots,\ x^{(n-1)}=0. \qquad (15)$$

Выбираем систему из m непрерывно дифференцируемых линейно-независимых координатных функций в виде ряда вещественных экспонент [44, 86-93, 100, 106]

$$\varphi_1(t),\ \varphi_2(t),\ \ldots,\ \varphi_q(t),\ \ldots,\ \varphi_m(t).$$

В соответствии с требуемыми показателями качества работы синтезируемой системы управления в переходном режиме зададимся желаемым программным движением в виде

$$x^0(t)=\Omega_0(t)+\sum_{i=1}^{l}a_i\Omega_i(t),\ i=1,2,\ldots,l, \qquad (16)$$

где $\Omega_0(t)=\omega_0(t)\cdot 1(t)$ – функция, удовлетворяющая заданным граничным (начальным (14) и конечным (15) условиям; $\Omega_i(t)=\omega_i(t)\cdot 1(t)$ – функции, удовлетворяющие однородным граничным условиям; a_i – известные коэффициенты.

Невязка, образованная желаемым программным движением, имеет вид

$$\psi(c,t)=Q(c_k(t),p)x^0(t)+R(c_k(t),p)F\left[x^0(t)\right]-\sum_{l=1}^{m_1}S_l(c_k(t),p)f_l(t).$$

Ортогональность невязки системе координатных функций приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\int_0^\infty \psi(c,t)\varphi_q(t)\,dt=0,\ i=1,2,\ldots,r.$$

В общем случае при нелинейной зависимости между варьируемыми параметрами и вследствие необходимости введения ограничений на устойчивость и грубость САУ безусловная ортогональность невязки координатным функциям выполняться не будет. Поэтому задача синтеза многосвязной системы автоматического управления произвольно высокого порядка в вычислительном плане сводится к задаче нелинейного программирования с целевой функцией, построенной на основе уравнений Галеркина:

$$J=\sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^\infty \psi(c,t)\varphi_q(t)\,dt\right\}^2,\ i=1,2,\ldots,r;\ q=1,2,\ldots,m$$

либо

$$J=\sum_{q=1}^{m}\left\{\sum_{i=0}^{n}a_i\left(c_k\left(t\right)\right)A_{qi}+\sum_{i=0}^{u}b_i\left(c_k\left(t\right)\right)B_{qi}-\sum_{i=0}^{v}e_i\left(c_k\left(t\right)\right)C_{qi}\right\}^2,\ \min_{c_k(t)}J,$$

где

$$A_{qi}=\int_0^\infty D^i\left\{x^0\left(t\right)\right\}e^{-\rho_q t}dt=A_q\rho_q^{i-1},\ i=0,1,\ldots,n;$$

$$C_{qi}=\int_0^\infty D^i\left\{f\left(t\right)\right\}e^{-\rho_q t}dt=C_q\rho_q^{i-1},\ i=0,1,\ldots,v.$$

Здесь A_q, C_q – аналитические рекуррентные соотношения, определяющие интегралы Галеркина для процессов различного вида [44, 100]. Варьируемые параметры оператора управления (регулятора) определяются путем минимизации функционала с помощью известных [86, 93] методов поиска экстремума целевой функции. 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.

Таким образом, решение задачи синтеза линейных многосвязных САУ в случае одного выхода и нескольких входов с математической точки зрения не отличается от решения подобной задачи для одномерной САУ.

В случае многосвязной системы управления с несколькими выходами и в общем случае несколькими входами вектор желаемого программного движения подставляем в уравнение и образуем вектор невязки [101]

$$\mathbf{\Psi}\left(\mathbf{c},t\right)=\mathbf{Qx}^0-\mathbf{Sf}, \qquad (17)$$

где $\mathbf{\Psi}(\mathbf{c},\ t)$ – вектор-столбец невязки, определяемый следующим образом:

$$\mathbf{\Psi}\left(\mathbf{c},t\right)=\left\|\psi_1\left(c,t\right),\ \psi_2\left(c,t\right),\ \ldots,\ \psi_s\left(c,t\right)\right\|^{\mathrm{T}},$$

а x^0=|| $x^0{}_1(t)$, $x^0{}_2(t)$, ..., $x^0{}_s(t)$ $||^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец желаемых процессов на выходах системы управления, s – число выходов САУ.

В общем случае задача синтеза МСАУ произвольно высокого порядка с несколькими входами и выходами в вычислительном плане сводится к задаче нелинейного программирования с целевой функцией:

$$J = \sum_{i=1}^{s}\sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^\infty \psi_i\left(c,t\right)\varphi_q\left(t\right)dt\right\}^2,\ i=1,2,...,s;\ q=1,2,...,m.$$

Особенностью задачи синтеза в данном случае является то, что для ее решения требуется формирование вектора желаемых программных движений на всех выходах системы исходя из требований, предъявляемых к динамическим свойствам синтезируемой САУ по каждой управляемой координате в соответствии с рекомендациями [44, 100].

Динамические свойства МСАУ, содержащих в общем случае r нелинейных элементов, описываются векторно-матричным уравнением вида

$$\mathbf{Qx} + \mathbf{Ry} = \mathbf{Sf},$$

где x=|| $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_r(t)$ $||^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на r входах импульсных элементов; y=|| $y_1(t)$, $y_2(t)$, ..., $y_r(t)$ $||^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на r выходах импульсных элементов; f=|| $f_1(t)$, $f_2(t)$, ..., $f_l(t)$ $||^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на l входах систем управления [103]; **Q** – квадратная матрица порядка s вида

$$\mathbf{Q} = \begin{Vmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & \cdots & Q_{1s} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & \cdots & Q_{2s} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & \cdots & Q_{3s} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Q_{s1} & Q_{s2} & Q_{s3} & \cdots & Q_{ss} \end{Vmatrix};$$

R – квадратная матрица порядка r вида

$$\mathbf{R} = \begin{Vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1r} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2r} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \dots & R_{3r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{r1} & R_{r2} & R_{r3} & \dots & R_{rr} \end{Vmatrix};$$

S – квадратная матрица порядка l вида

$$\mathbf{S} = \begin{Vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1l} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2l} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \dots & S_{3l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{l1} & S_{l2} & S_{l3} & \dots & S_{ll} \end{Vmatrix}.$$

Матрицы **Q**, **R**, **S** являются функциями оператора обобщенного дифференцирования D и в общем случае функциями варьируемых параметров $\mathbf{C}=||c_k(t)||^{\mathrm{T}}$, $k = 1, 2, ..., m$.

2.2 Исследование нестационарности параметров исполнительного двигателя

Одним из примеров нестационарных систем является двигатель постоянного тока с управлением скоростью вращения за счет изменения напряжения на якоре (рис. 9). При взаимодействии подвижных и неподвижных частей электромеханического преобразователя происходит искажение магнитного поля возбуждения, смещение физической нейтрали, ухудшение процесса коммутации в связи с увлечением напряжения между коллекторными пластинами.

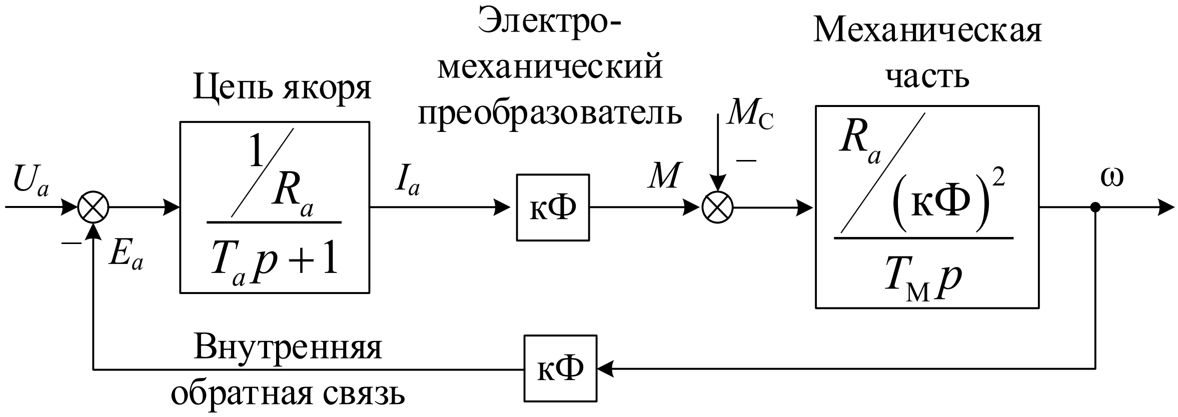


Рисунок 9 – Структурная схема двигателя постоянного тока с управлением скоростью вращения за счет изменения напряжения

Изменение реакции якоря влечет за собой изменение результирующего магнитного потока, а, следовательно, и обратной ему величины коэффициента передачи двигателя

$$k_{\text{дв}} = \frac{1}{C_e \Phi_{\text{рез}}},$$

где $\Phi_{\text{рез}}$ – результирующий магнитный поток; C_e – конструктивная постоянная двигателя.

Для подтверждения дрейфа параметра коэффициента передачи двигателя требуется найти зависимость тока возбуждения, эквивалентного реакции якоря, от тока нагрузки, и вывести закон изменения результирующего магнитного потока. Для этого необходимо определить реальное собственное сопротивление обмотки якоря электромеханического преобразователя (работа выполнена для двигателя ПЛ-072 У3) с помощью построения характеристического треугольника на нагрузочной характеристике и характеристике холостого хода (снятых при $I_а$=0,44 А и n=1191 об/мин). Через рабочие точки при токе якоря $I_а$=0,44 А и оборотах n=1191 об/мин в двигательном и генераторном режимах проводятся прямые, параллельные оси абсцисс ($I_В$) и оси ординат ($U_а$) (рис. 10). Отрезок BC=3,38266 пропорционален собственному сопротивлению якоря. Сопротивление якоря $r_а$ = 17,26 Ом [107].

После уточнения собственного сопротивления якоря электромеханического преобразователя требуется определить зависимость изменения тока возбуждения, эквивалентного реакции якоря, от тока нагрузки. В режиме генератора происходит получение еще двух нагрузочных характеристик при токах якоря $I_а$=0,294 А, $I_а$=0,643 А и постоянных оборотов n=1191 об/мин (рис. 11).

От нагрузочных характеристик на графиках откладывается собственное сопротивление якоря в размере 17,26 Ом, определяются значения тока возбуждения, эквивалентные реакции якоря, с помощью построения отрезка от величины сопротивления якоря до пересечения с линией холостого хода (рис. 12).

Полученные значения тока возбуждения эквивалентные реакции якоря

$$\Delta i_{\text{В}(I_a=0,294)} = 0,02972\ A,\ \Delta i_{\text{В}(I_a=0,44)} = 0,035\ A,\ \Delta i_{\text{В}(I_a=0,643)} = 0,0572\ A$$

наносятся на координатную плоскость, соединяются в единую линию для получения зависимости тока возбуждения, эквивалентного реакции якоря, от тока нагрузки (рис. 13).

Выводится закон изменения результирующего магнитного потока на основании полученной аппроксимированной зависимости

$$\Delta i_{\text{В}} = 0,1523 I_a^{\ 3} + 7,417 \cdot 10^{-15} \cdot I_a^{\ 2} - 0,02619 \cdot I_a + 0,03355.$$

Дрейф магнитного потока возбуждения, обусловленный реакцией якоря, приводит к изменению обратной ему величины – коэффициента передачи двигателя.

Взаимодействие электромагнитных полей неподвижных и подвижных частей электромеханического преобразователя способствует ухудшению коммутации, искажению поля возбуждения как в генераторном (рис. 14), так и в двигательном режимах (рис. 15), приводит к нагреванию конструкционных частей машины и изменению постоянных двигателя [108].

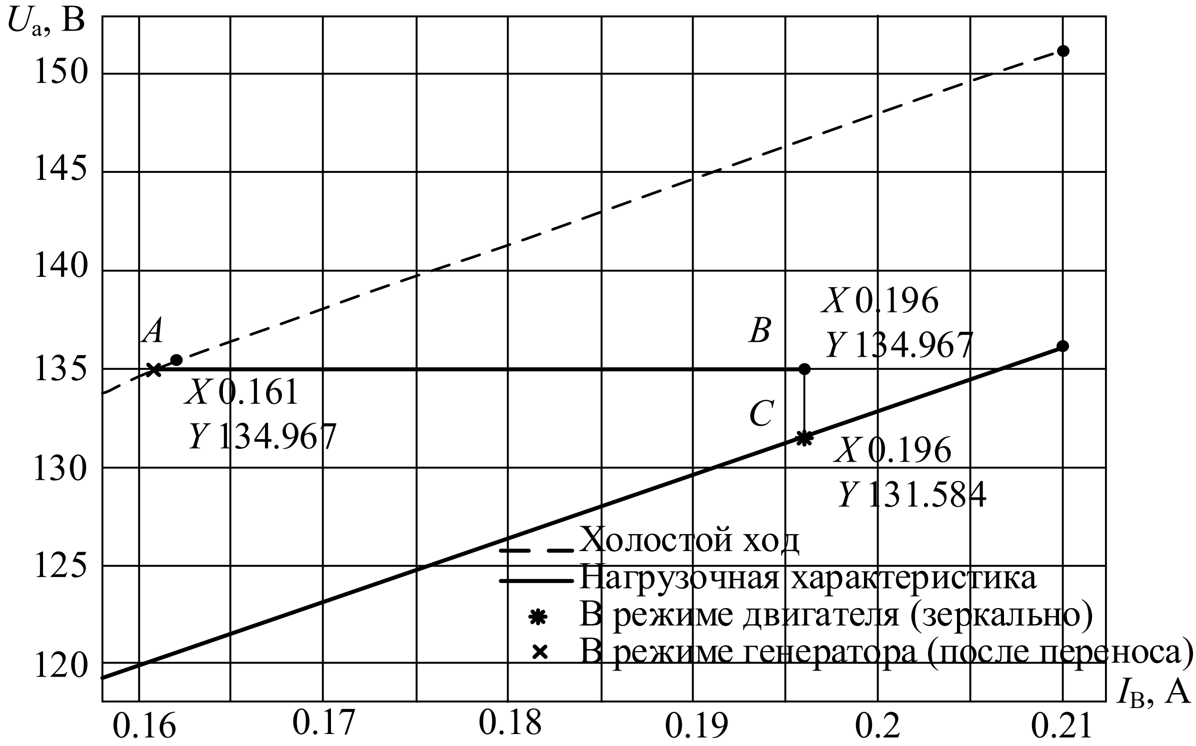


Рисунок 10 – Определение собственного сопротивления якоря

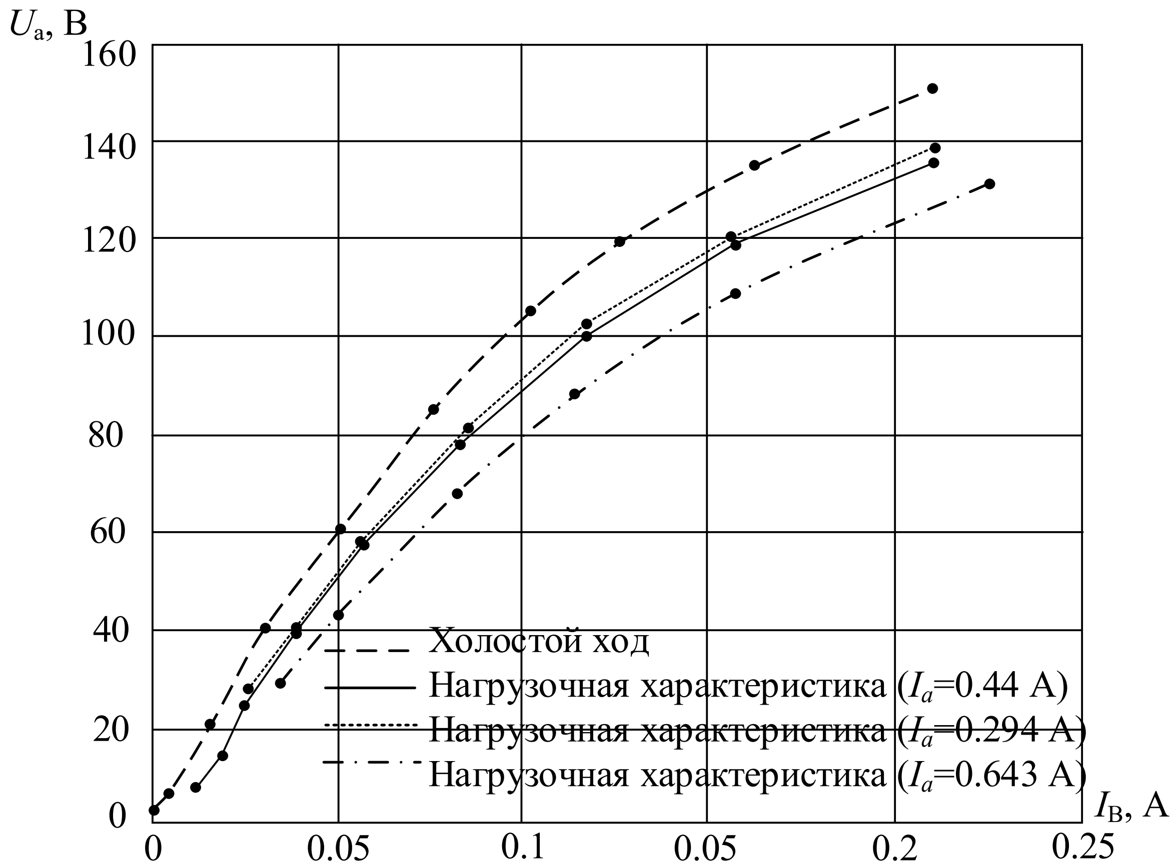


Рисунок 11 – Построение всех нагрузочных характеристик и характеристики холостого хода

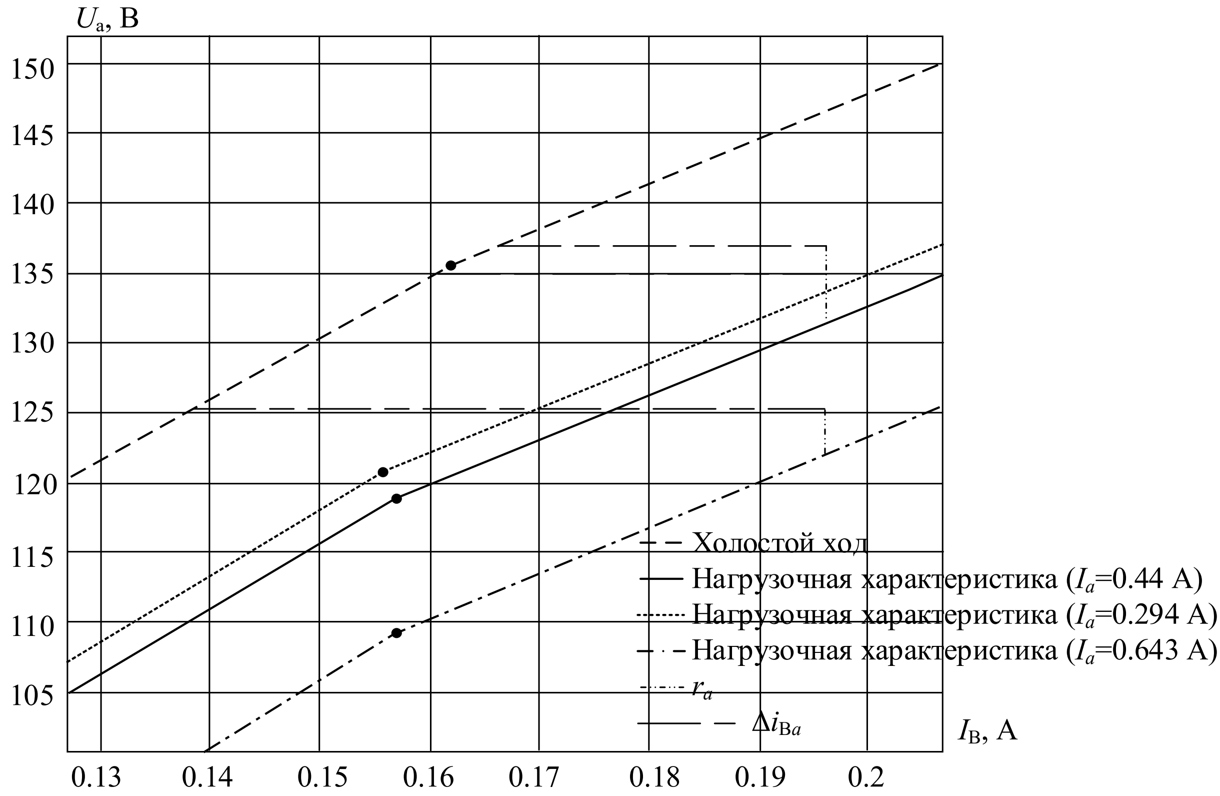


Рисунок 12 – Реакция якоря при различных токах якоря

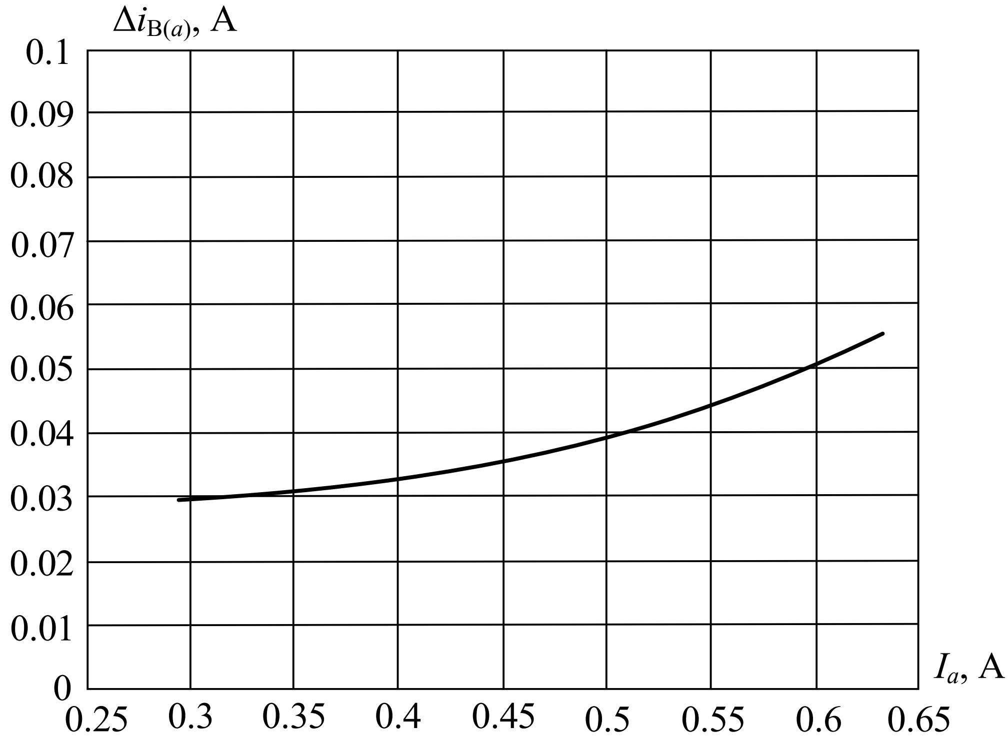


Рисунок 13 – Зависимость тока возбуждения, эквивалентного реакции якоря, от тока нагрузки

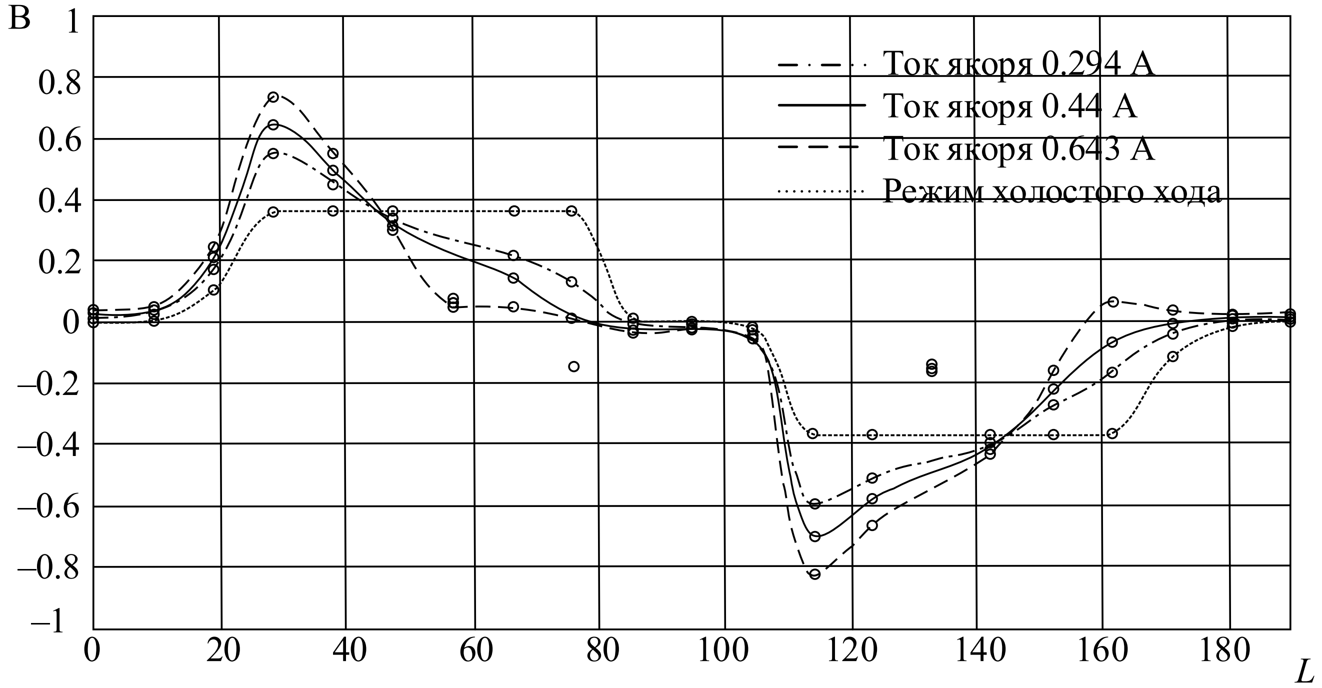


Рисунок 14 – График искажения магнитного поля при действии реакции якоря в генераторном режиме

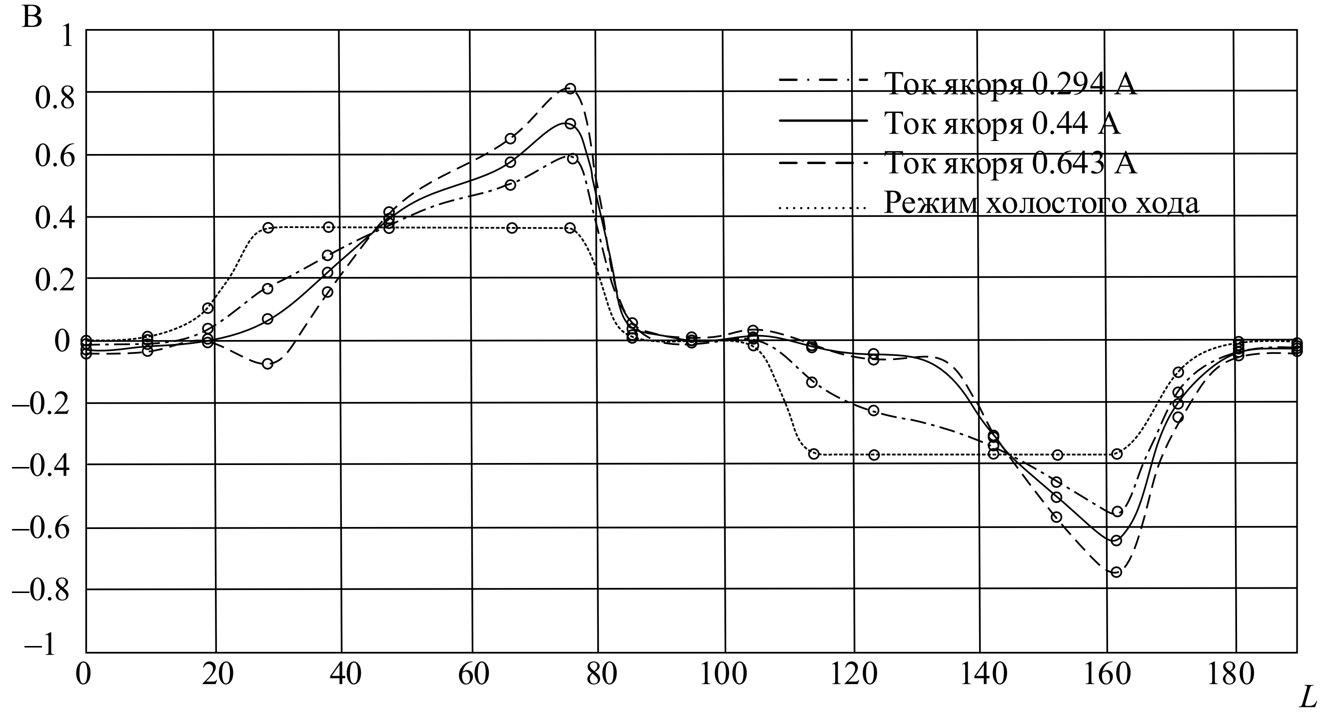


Рисунок 15 – График искажения магнитного поля при действии реакции якоря в двигательном режиме

Нестационарность величины магнитного потока и зависящего от него коэффициента передачи двигателя требуется учитывать при проектировании систем управления, в состав которых входит электромеханический преобразователь такого типа.

Для исследуемого двигателя радиус момента инерции R=29,75 мм, масса ротора m_1=2,21 кг, момент инерции

$$J_1 = \frac{R^2}{2} m_1 = 977{,}99 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

сопротивление обмотки якоря при постоянной температуре 20°С

$$r_{20} = 17{,}26 \text{ Ом},$$

электрическая постоянная времени двигателя

$$T_{\text{Э}20} = \frac{L_1}{r_{20}} = 17{,}225 \text{ мс}.$$

Пуск двигателя проводится при различных моментах сопротивления на валу, а, следовательно, и при различных величинах реакции якоря.

Для исследования рассматривается момент сопротивления при холостом ходе и нагрузке и соответствующих этим режимам токах 0,12 А, 0,5 А, 1,2 А.

Определение ЭДС

$$E_{0,12,\ 0,5,\ 1,2} = U - I_{a0,12,\ 0,5,\ 1,2} r_{20},$$

$$E_{0,12} = 220 - 0{,}12 \cdot r_{20} = 217{,}924 \text{ В},$$

$$E_{0,5} = 220 - 0{,}5 \cdot r_{20} = 211{,}35 \text{ В},$$

$$E_{1,2} = 220 - 1{,}2 \cdot r_{20} = 199{,}24 \text{ В},$$

$I_{a0,12,\ 0,5,\ 1,2}$ – это величина тока якоря, соответствующая моменту сопротивления при холостом ходе, половине величины номинальной нагрузки и номинальному значению момента сопротивления на валу; напряжение питания U=220 В.

Результирующий магнитный поток, являющийся обратной величиной коэффициенту передачи,

$$C_e\Phi_{0,12} = \frac{E_{0,12}}{\omega_0} = 1{,}301\ \text{Вб},$$

$$C_e\Phi_{0,5} = \frac{E_{0,5}}{0{,}85\cdot\omega_0} = 1{,}484\ \text{Вб},$$

$$C_e\Phi_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{0{,}74\cdot\omega_0} = 1{,}607\ \text{Вб}.$$

Механическая постоянная двигателя при различных значениях $C_e\Phi$

$$T_{\text{М}0,12} = \frac{J_1\cdot r_{20}}{C_e\Phi^2_{0,12}} = 10{,}002\ \text{мс},\ T_{\text{М}0,5} = \frac{J_1\cdot r_{20}}{C_e\Phi^2_{0,5}} = 7{,}683\ \text{мс},\ T_{\text{М}1,2} = \frac{J_1\cdot r_{20}}{C_e\Phi^2_{1,2}} = 6{,}552\ \text{мс}.$$

Статический момент $M_{\text{С}}$ будет переменной величиной, которая зависит и от коэффициента передачи, и от тока якоря I_a

$$M_{\text{С}} = \frac{I_a\cdot E}{\omega_0};\ M_{\text{С}0,12} = \frac{0{,}12\cdot E_{0,12}}{\omega_0} = 0{,}156\ \text{Нм},$$

$$M_{\text{С}0,5} = \frac{0{,}5\cdot E_{0,5}}{\omega_0} = 0{,}742\ \text{Нм},\ M_{\text{С}1,2} = \frac{1{,}2\cdot E_{1,2}}{\omega_0} = 0{,}742\ \text{Нм}.$$

Собственная индуктивность L_1=298 мГн. На рис. 16 приведены результаты моделирования переходных процессов по скорости, где 1, 2, 4 – переходные процессы по скорости при различных моментах сопротивления и токах якоря (0,12 А, 0,5 А, 1,2 А соответственно) с учетом компенсации действия реакции на коэффициент передачи двигателя, 3 – переходный процесс по скорости при моменте сопротивления и токе якоря в 1,2 А без учета компенсации действия реакции на коэффициент передачи двигателя; на рис. 17 для более детального исследования сведены графики переходных процессов по скорости, где 1 – переходный процесс без учета реакции якоря, 2 – с учетом реакции якоря при одинаковом моменте сопротивления; на рис. 18 1, 2, 4 – переходные процессы по току при различных моментах сопротивления и токах якоря (0,12 А, 0,5 А, 1,2 А соответственно) с учетом компенсации действия реакции на коэффициент передачи двигателя, 3 – переходный процесс по току при моменте сопротивления и токе якоря в 1,2 А без учета компенсации действия реакции на коэффициент передачи двигателя.

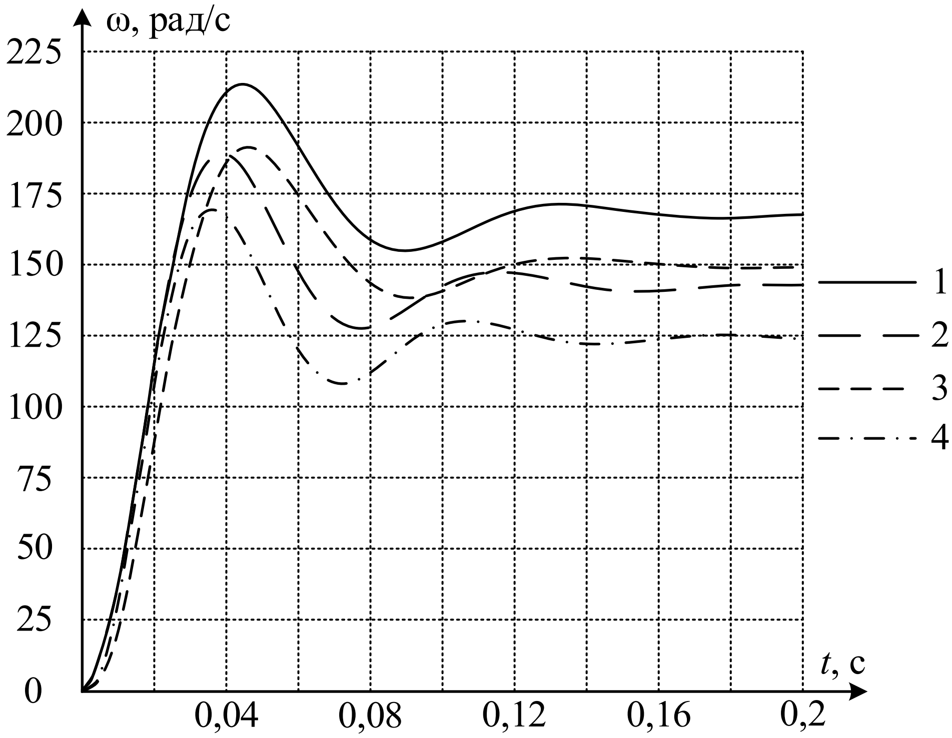


Рисунок 16 – Переходные процессы по скорости

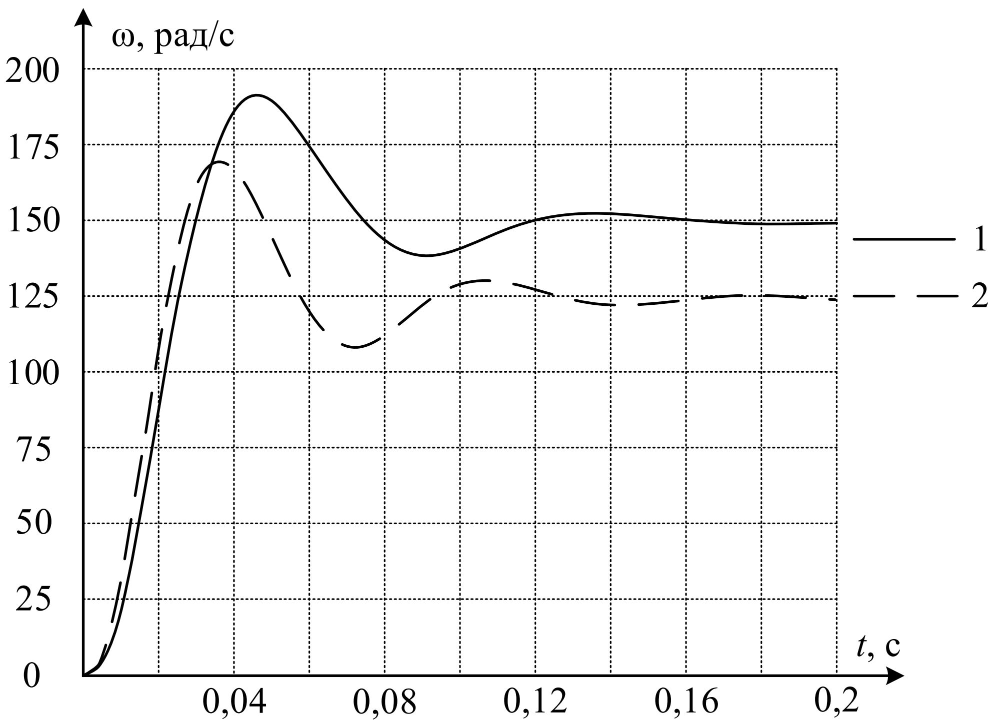


Рисунок 17 – Сравнение переходных процессов по скорости с учетом реакции якоря и без нее

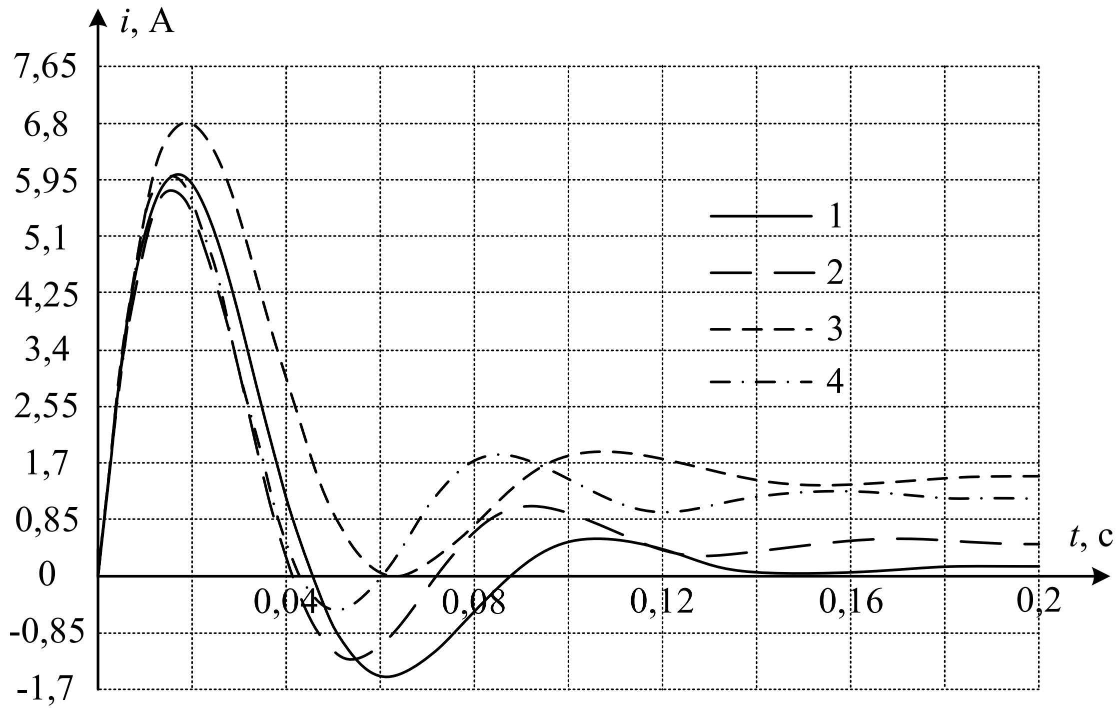


Рисунок 18 – Переходные процессы по току

Как видно из рис. 17, при моделировании динамики учет реакции якоря влияет на величину перерегулирования, увеличивая ее с 28% до 36%, время переходного процесса при этом уменьшается с 0,1 с до 0,086 с, установившаяся ошибка возрастает до 25,15%. Из рис. 18 можно сделать вывод о том, что при учете реакции якоря незначительно меняется колебательность и появляется значительная установившаяся ошибка.

Сопротивление якоря при температурах обмотки якоря 20°С, 40°С и 75°С

$$r_{20} = 17,26 \text{ Ом},$$

$$r_{40} = 20,3 \text{ Ом},$$

$$r_{75} = 22,836 \text{ Ом}.$$

Следует обратить внимание, что ЭДС при различных значениях сопротивления также будет различной, отсюда следует, что возникает дрейф коэффициента передачи двигателя

$$E_{20,40,75} = U - I_a r_{20,40,75},$$
$$E_{20} = 220 - 1,2 \cdot r_{20} = 199,24 \text{ В},$$
$$E_{40} = 220 - 1,2 \cdot r_{40} = 195,64 \text{ В},$$
$$E_{75} = 220 - 1,2 \cdot r_{75} = 192,597 \text{ В}.$$

Частота вращения ротора при холостом ходе

$$n_0 = 1600 \text{ мин}^{-1},$$
$$\omega_0 = 2\pi n_0 = 167,552 \text{ рад/с}.$$

Тогда результирующий магнитный поток

$$C_e\Phi_{20} = \frac{E_{20}}{\omega_0} = 1,189 \text{ Вб},$$
$$C_e\Phi_{40} = \frac{E_{40}}{\omega_0} = 1,168 \text{ Вб},$$
$$C_e\Phi_{75} = \frac{E_{75}}{\omega_0} = 1,149 \text{ Вб}.$$

С ростом сопротивления электрическая постоянная времени двигателя уменьшается, а механическая – растет

$$T_{\text{Э}20} = \frac{L_1}{r_{20}} = 17,225 \text{ мс},\ T_{\text{Э}40} = \frac{L_1}{r_{40}} = 14,68 \text{ мс},\ T_{\text{Э}75} = \frac{L_1}{r_{75}} = 13,05 \text{ мс},$$
$$T_{\text{М}20} = \frac{J_1 \cdot r_{20}}{C_e\Phi_{20}^2} = 11,965 \text{ мс},\ T_{\text{М}40} = \frac{J_1 \cdot r_{40}}{C_e\Phi_{40}^2} = 14,562 \text{ мс},\ T_{\text{М}75} = \frac{J_1 \cdot r_{75}}{C_e\Phi_{75}^2} = 16,903 \text{ мс}.$$

Так как

$$\frac{T_{\text{М}75}}{T_{\text{М}20}} = 1,413,\ \frac{T_{\text{Э}20}}{T_{\text{Э}75}} = 1,32,$$

можно сделать вывод о том, что изменение электрической постоянной двигателя пропорционально изменению сопротивления, а механическая постоянная увеличивается.

На рис. 19 и 20 приведены графики динамики работы двигателя при различных собственных сопротивлениях обмотки якоря.

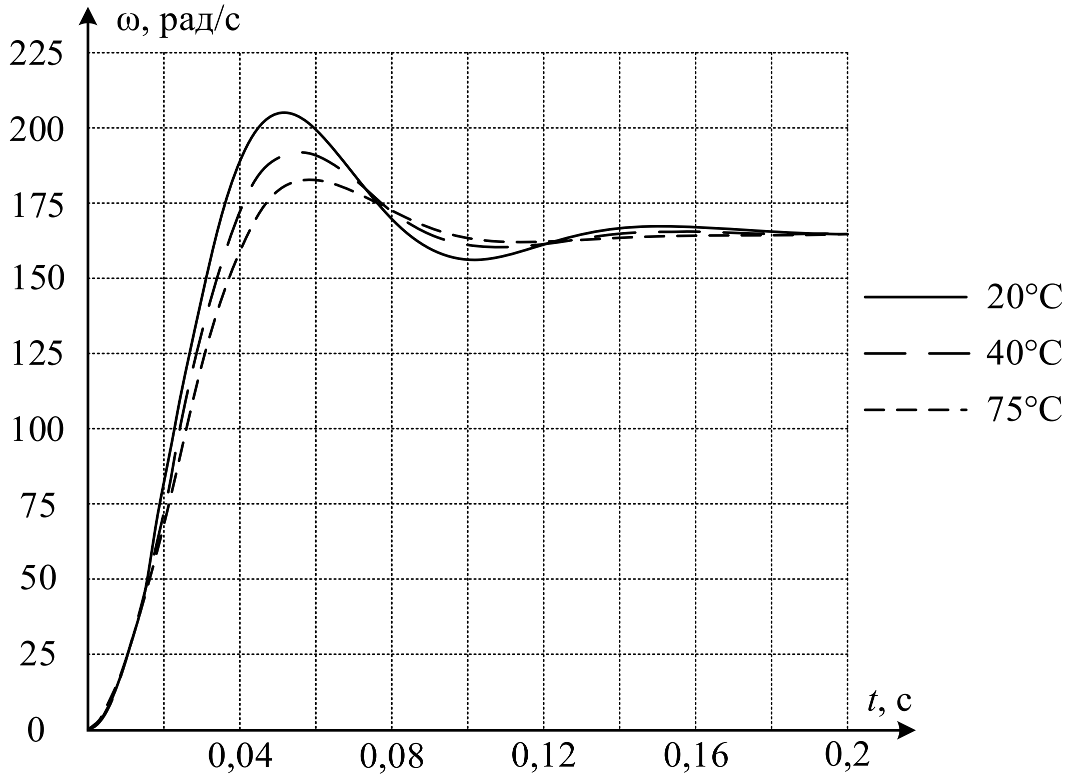


Рисунок 19 – Переходные процессы по скорости при прямом пуске и различных температурах обмотки

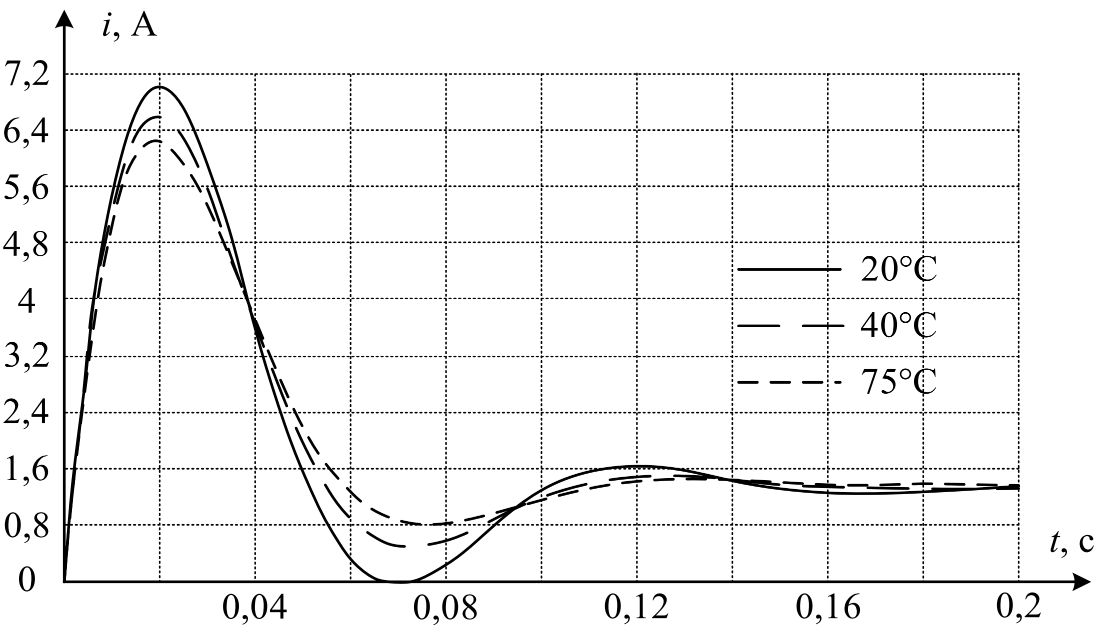


Рисунок 20 – Переходные процессы по току при прямом пуске и различных температурах обмотки

Как видно из моделирования (рис. 19), показатели качества переходного процесса по скорости при уменьшении активного сопротивления ухудшаются – перерегулирования возрастает с 10,9% до 24,6%, время переходного процесса – с 0,08 с до 0,1 с. Исходя из рис. 20 можно сделать вывод о том, что уменьшение температуры обмотки влияет на показатели качества переходного процесса по току – на увеличение колебательности и времени переходного процесса.

Исходя из проведенного моделирования динамики работы двигателя можно сделать вывод о том, что на дрейф величины коэффициента передачи двигателя могут оказывать существенное влияние реакция якоря и изменение температуры обмотки. При этом следует отметить, реакция якоря дает рост установившейся ошибки до 25% и рост перерегулирования до 36%; падение температуры обмотки может вызывать увеличение перерегулирования до 24,6%, увеличение времени переходного процесса до 0,1 с.

2.3 Примеры синтеза нестационарных САУ

Одним из примеров использования обобщенного метода Галеркина при решении задачи параметрического синтеза с учетом нестационарности является нахождение коэффициента передачи и постоянных времени регулятора турбоагрегата, представляющего собой газовую турбину с электрогенератором, соединенных общим валопроводом для преобразования энергии от сжигания газа в электроэнергию [109-110]. Сопловый аппарат турбины преобразует потенциальную энергию газов в кинетическую и служит для изменения скорости вращения. Для контроля частоты вращения используется центробежный гидравлический регулятор скорости, конструкция которого включает выходной шток сервопоршня, связанного с сопловым аппаратом, и тахометр, основанный на взаимосвязи центробежной силы и скорости. Центробежный тахометр связан с рабочим валопроводом генератора. Стабилизация напряжения осуществляется за счет регулятора напряжения. При смене напряжения на зажимах генератора происходит изменение сопротивления угольного столба регулятора. Система с контролем напряжения и скорости вращения турбогенератора определяется уравнениями [101]:

– уравнение турбины как объекта регулирования скорости вращения

$$\left(T_{\text{М}}\left(t\right)p+1\right)\upsilon=\sigma-2u_{\Gamma},$$

где $T_{\text{М}}(t)$=2 с – постоянная времени турбоагрегата, нестационарность которой может быть обусловлена изменением частоты вращения; υ – скорость вращения; σ – относительное изменение угла поворота соплового аппарата; u_{Γ} – напряжение на зажимах генератора.

– уравнение генератора как объекта регулирования напряжения

$$\left(T_{\text{В1}}\left(t\right)p+1\right)u_{\Gamma}=\rho-\left(1-\gamma\right)\left(T_{\text{В2}}\left(t\right)p+1\right)\upsilon,$$

где $T_{\text{В1}}(t)$=0,5 с – постоянная времени цепи обмотки возбуждения генератора и $T_{\text{В2}}(t)$ =0,01 с – электромагнитная постоянная времени, обусловленная взаимоиндукцией цепей якоря и возбуждения генератора, которые изменяются при различных значениях сопротивления и индуктивности цепи возбуждения и цепи якоря; ρ – относительное изменение сопротивления угольного столба регулятора напряжения; $(1-\gamma)$=0,8 – коэффициент, зависящий от режима работы и параметров генератора;

– уравнение регулятора скорости вращения

$$\sigma\left(T_{\upsilon1}p+1\right)\left(T_{\upsilon2}p+1\right)=k_{\upsilon}\left(T_{\upsilon3}p+1\right)\Delta\upsilon,$$

где k_{υ} и $T_{\upsilon1}$, $T_{\upsilon2}$, $T_{\upsilon3}$ – коэффициент передачи и постоянные времени регулятора скорости вращения соответственно; $\Delta\upsilon=\upsilon_0-\upsilon$ – относительное изменение скорости вращения, здесь υ_0 – заданное значение скорости вращения;

– уравнение регулятора напряжения

$$\rho\left(T_e p+1\right)=k_e\Delta u_{\Gamma},$$

где k_e и T_e – коэффициент передачи и постоянная времени регулятора напряжения соответственно; $\Delta u_{\Gamma}=u_{\Gamma0}-u_{\Gamma}$ – относительное изменение напряжения на зажимах генератора, здесь $u_{\Gamma0}$ – заданное значение напряжения на зажимах генератора.

Структурная схема рассматриваемой системы показана на рис. 21.

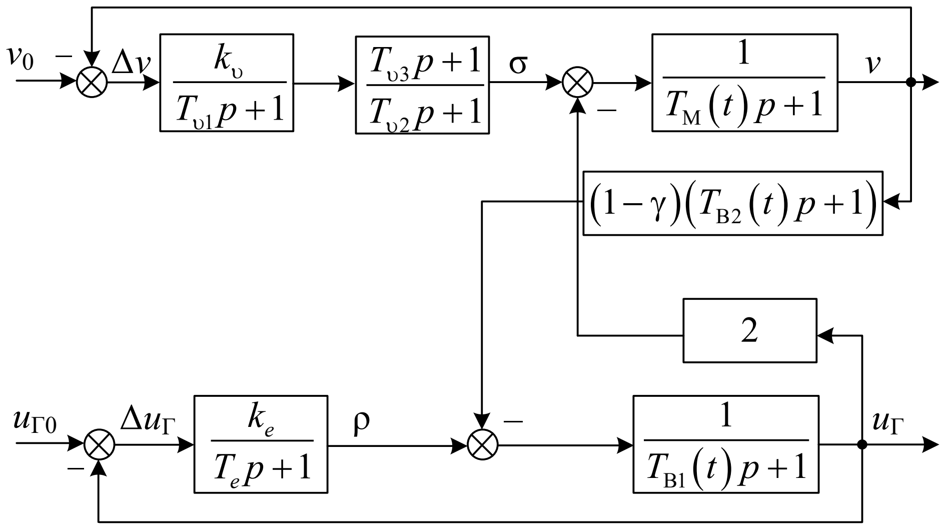


Рисунок 21 – Структурная схема математической модели турбоагрегата

Динамика рассматриваемой МСАУ описывается уравнениями вида

$$\begin{cases} (1-\gamma)\left[T_{В2}(t)T_e p^2 + \left(T_{В2}(t) + T_e\right)p + 1\right]\upsilon(t) + \\ +\left[T_{В1}(t)T_e p^2 + \left(T_{В1}(t) + T_e\right)p + \left(k_e + 1\right)\right]u_Г(t) = k_e u_{Г0}(t); \\ \left[T_М(t)T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}p^3 + \left(T_М(t)\left(T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2}\right) + T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}\right)p^2 + \left(T_М(t) + T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2} + k_\upsilon T_{\upsilon 3}\right)p + k_\upsilon\right] + \upsilon(t) + \\ +2\left[T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}p^2 + \left(T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2}\right)p + 1\right]u_Г(t) = k_\upsilon\left(T_{\upsilon 3}p + 1\right)\upsilon_0(t); \end{cases}$$

структура полученных уравнений движения САУ соответствует общему виду и может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} Q_{11}\left(c_k(t), p\right)\upsilon(t) + Q_{12}\left(c_k(t), p\right)u_Г(t) = S_{11}\left(c_k(t), p\right)u_{Г0}(t), \\ Q_{21}\left(c_k(t), p\right)\upsilon(t) + Q_{22}\left(c_k(t), p\right)u_Г(t) = S_{21}\left(c_k(t), p\right)\upsilon_0(t), \end{cases}$$

где

$$Q_{11}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{2} a_{11i}\left(c_k(t)\right)p^i;\ Q_{12}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{2} a_{12i}\left(c_k(t)\right)p^i;$$

$$S_{11}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{0} e_{11i}\left(c_k(t)\right)p^i;\ Q_{21}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{3} a_{21i}\left(c_k(t)\right)p^i;$$

$$Q_{22}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{2} a_{22i}\left(c_k(t)\right)p^i;\ S_{21}\left(c_k(t), p\right) = \sum_{i=0}^{1} a_{21i}\left(c_k(t)\right)p^i;$$

здесь

$$a_{110} = (1-\gamma);\ a_{111} = (1-\gamma)\left(T_{\text{В}2}(t) + T_e\right);\ a_{112} = (1-\gamma)T_{\text{В}2}(t)T_e;$$
$$a_{120} = (k_e + 1);\ a_{121} = \left(T_{\text{В}1}(t) + T_e\right);\ a_{122} = T_{\text{В}1}(t)T_e;$$
$$e_{110} = k_e;$$
$$a_{210} = k_\upsilon;\ a_{211} = T_\text{М}(t) + T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2} + k_\upsilon T_{\upsilon 3};$$
$$a_{212} = T_\text{М}(t)\left(T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2}\right) + T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};\ a_{213} = T_\text{М}(t)T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};$$
$$a_{220} = 2;\ a_{221} = 2\left(T_{\upsilon 1} + T_{\upsilon 2}\right);\ a_{222} = 2T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};$$
$$a_{210} = k_\upsilon;\ e_{211} = k_\upsilon T_{\upsilon 3}.$$

Таким образом, решение задачи параметрического синтеза рассматриваемой системы заключается в нахождении значений варьируемых параметров k_e, T_e, k_υ, $T_{\upsilon 1}$, $T_{\upsilon 2}$, $T_{\upsilon 3}$, обеспечивающих в САУ требуемые показатели качества по скорости вращения и напряжению на зажимах генератора при подаче на вход двух внешних скачкообразных входных воздействий. Величина перерегулирования по обеим регулируемым величинам должна быть не более 22%, время регулирования не должно превышать 40 мс, т.е. желаемое программное движение описывается выражением

$$y(t) = 1 + 1{,}1\sin\left(117{,}45t - 2\right)\cdot e^{-56{,}6t}$$

и имеет вид, представленный на рис. 22.

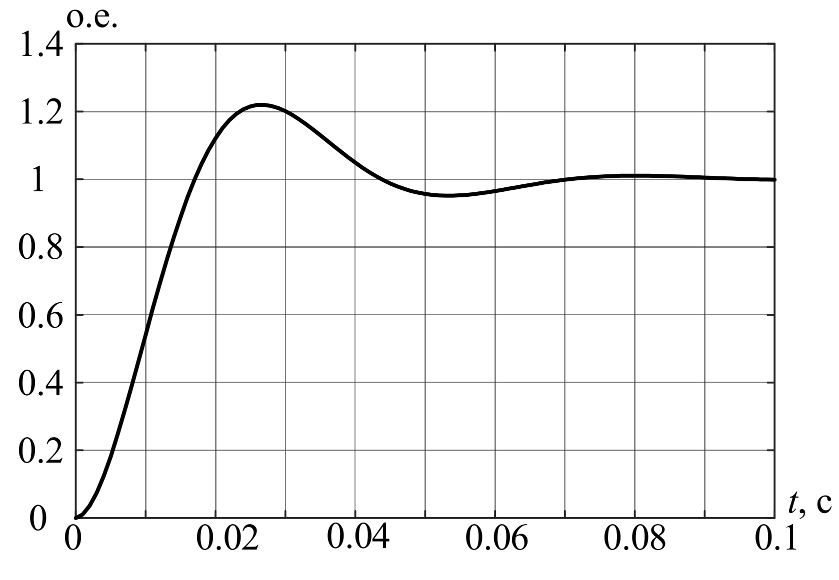
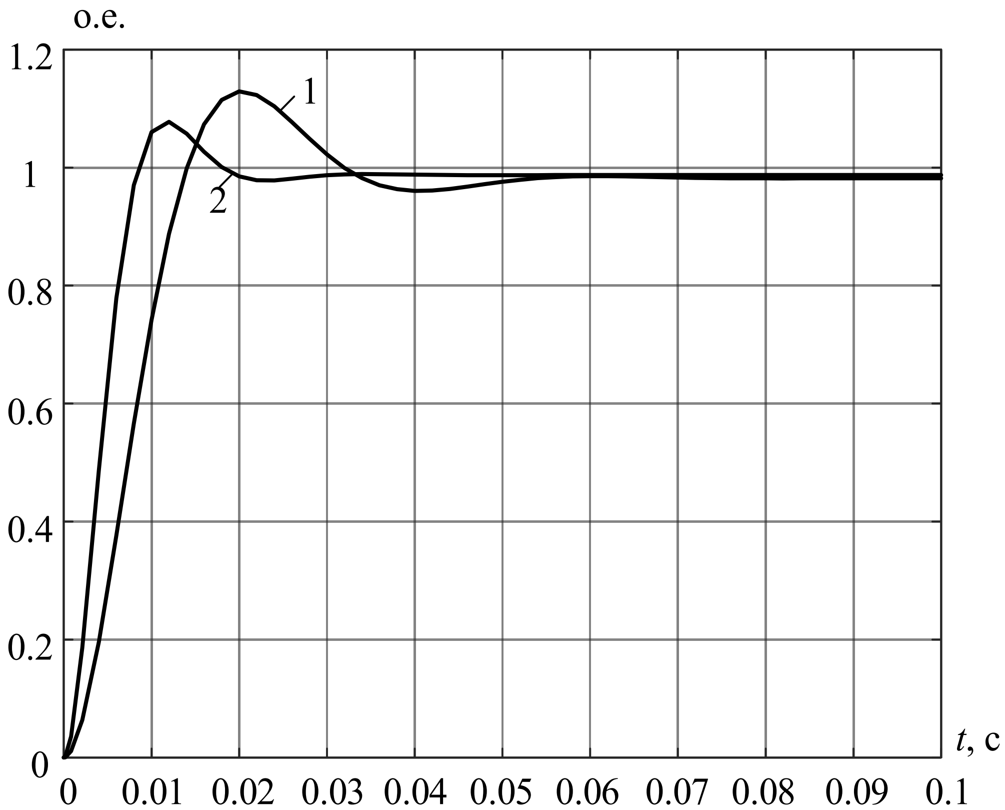


Рисунок 22 – Желаемое программное движение

В результате решения задачи синтеза при стационарных параметрах рассматриваемой МСАУ турбоагрегатом обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора [101]: k_e=140, T_e=0,0025 с, k_υ=70,56, $T_{\upsilon 1}$=0,51 с, $T_{\upsilon 2}$=0,0054 с, $T_{\upsilon 3}$=2,53 с, которые обеспечивают в системе процессы, показанные на рис. 23, из которого следует, что показатели качества управления удовлетворяют заданным.



1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

Рисунок 23 – Переходные процессы в системе управления турбоагрегатом при стационарных параметрах

Полученные в примерах результаты полностью совпадают с приведенными в работах [109-110], где заданные показатели качества работы МСАУ обеспечиваются либо введением корректирующих связей определенного вида, либо применением принципа автономности. Решение задачи параметрического синтеза многосвязных систем управления [109-110] обобщенным методом

Галеркина позволило обеспечить в синтезируемых САУ заданные показатели качества работы по всем регулируемым переменным без усложнения структуры системы.

Параметры неизменяемой части системы, как было сказано выше, могут быть подвержены дрейфу, процесс снижения махового момента может происходить из-за ограниченности в росте диаметра машины и высоких электромагнитных нагрузок.

Величины махового момента, сопротивления якоря и сопротивления цепи возбуждения в большинстве случаев являются неизмененными, так как масса объекта, плотность, диаметр сплошного цилиндра и длина в процессе эксплуатации не отклоняются от начальных значений. Основной причиной изменения параметров объекта является дрейф величины оборотов ротора в связи с действием центробежной силы от собственной массы и массы закреплённых деталей. В промышленности частота вращения ротора может изменяться в течение времени до 20% от номинальной величины (в аварийной ситуации в связи со сбросом нагрузки с вала) без выхода установки из строя. Данный показатель дрейфа обеспечивается закладываемым запасом прочности при производстве, в соответствии с ГОСТ все установки проверяются на прочность при разгонной частоте вращения, превышающей номинальные показатели скорости в 1,2 раза [111].

В связи с возможным дрейфом параметров неизменяемой части системы ($T_{\text{М}}(t)$, $T_{\text{В2}}(t)$, $T_{\text{В1}}(t)$) требуется провести исследование объекта при дрейфе постоянных времени. В табл. 1 приведены результаты исследования, где σ – перерегулирование, $t_{\text{ПП}}$ – время переходного процесса, $e_{\text{уст}}$ – установившаяся ошибка.

Таблица 1 – Показатели качества управления непрерывной системы при дрейфе параметров

Параметры объекта		σ, %		$t_{\text{ПП}}$, мс		$e_{\text{уст}}$	
		v	u	v	u	v	u
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$=const, $T_{\text{В1}}(t)$=const		14,2	9	29	15	0,0181	0,0127
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$=const	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%	15	10,6	29	15	0,0181	0,0127
	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%	14,9	13	29	14	0,0181	0,0127
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{В1}}(t)$=const	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%	15	9,1	29	15	0,0181	0,0127
	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%	15	9,1	29	15	0,0181	0,0127
$T_{\text{В1}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$=const	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%	16,9	9	28	15	0,0172	0,0127
	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%	19,2	8,9	26	15	0,0164	0,0127
$T_{\text{М}}(t)$=const	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%	15	10,6	29	15	0,0181	0,0127
	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%	15	13,2	29	14	0,0181	0,0127
	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%	15	10,7	29	15	0,0181	0,0127
	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%	15	13,2	29	14	0,0181	0,0127
$T_{\text{В1}}(t)$=const	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%	16,8	9	28	15	0,0172	0,0127
	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%	19,2	9	26	15	0,0164	0,0127
	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%	16,9	9	28	15	0,0172	0,0127
	$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%	19,2	8,9	26	15	0,0164	0,0127
$T_{\text{В2}}(t)$=const	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%	16,7	10,1	28	15	0,0172	0,0127
	$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%	19,4	12,9	26	14	0,0165	0,0127
	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20% $T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%	16,8	13,1	28	14	0,0172	0,0127
	$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%	19,3	10,4	26	15	0,0165	0,0127
$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%		16,7	10,6	28	15	0,0171	0,0127
$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%		19	13,3	26	14	0,0164	0,0127

Семейство характеристик, полученное при дрейфе параметров САУ, представлено на рис. 24 и 26. Как показало моделирование, на качество переходного процесса оказывает влияние дрейф $T_{\text{М}}(t)$. Дрейф остальных параметров неизменяемой части системы существенного влияния не оказывает, поэтому характеристики при их дрейфе накладываются друг на друга (рис. 25 и 27).

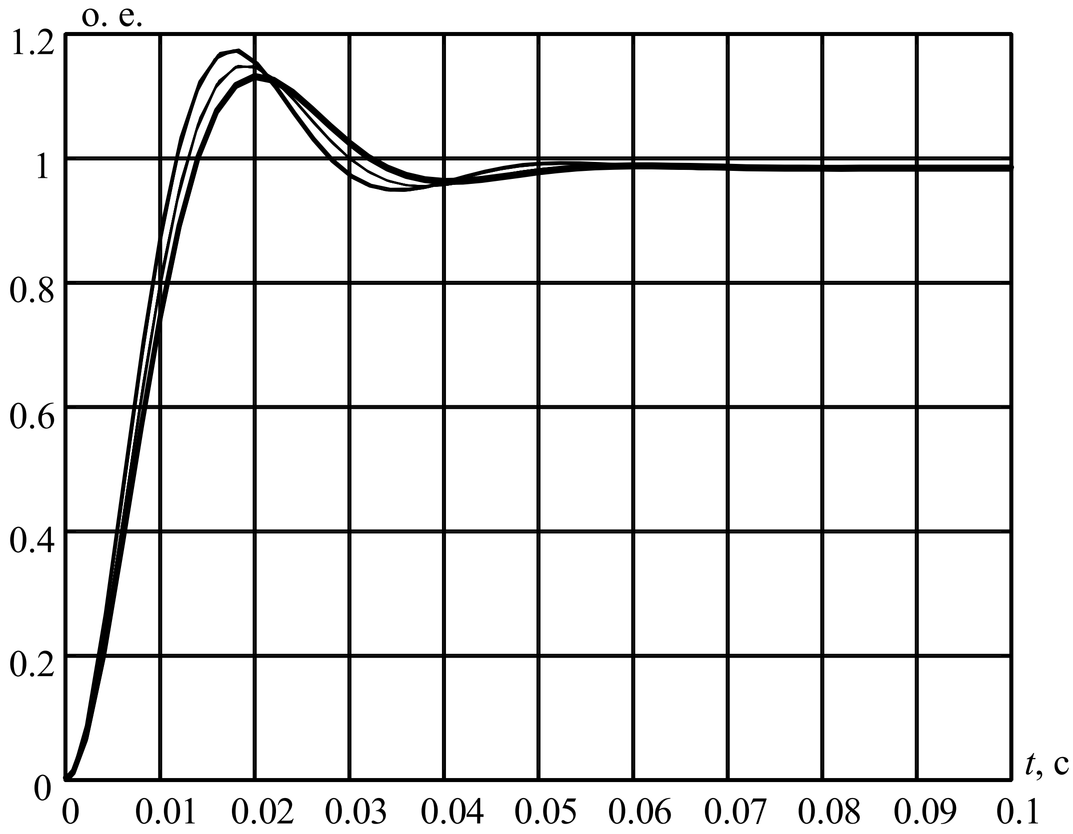


Рисунок 24 – Семейство временных характеристик по скорости

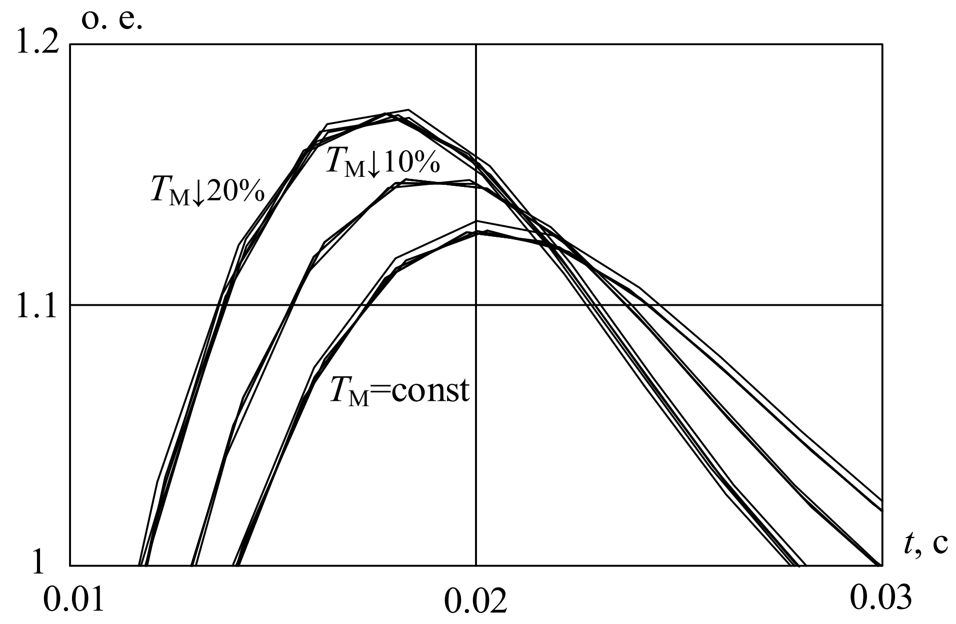


Рисунок 25 – Семейство временных характеристик по скорости (в увеличенном масштабе)

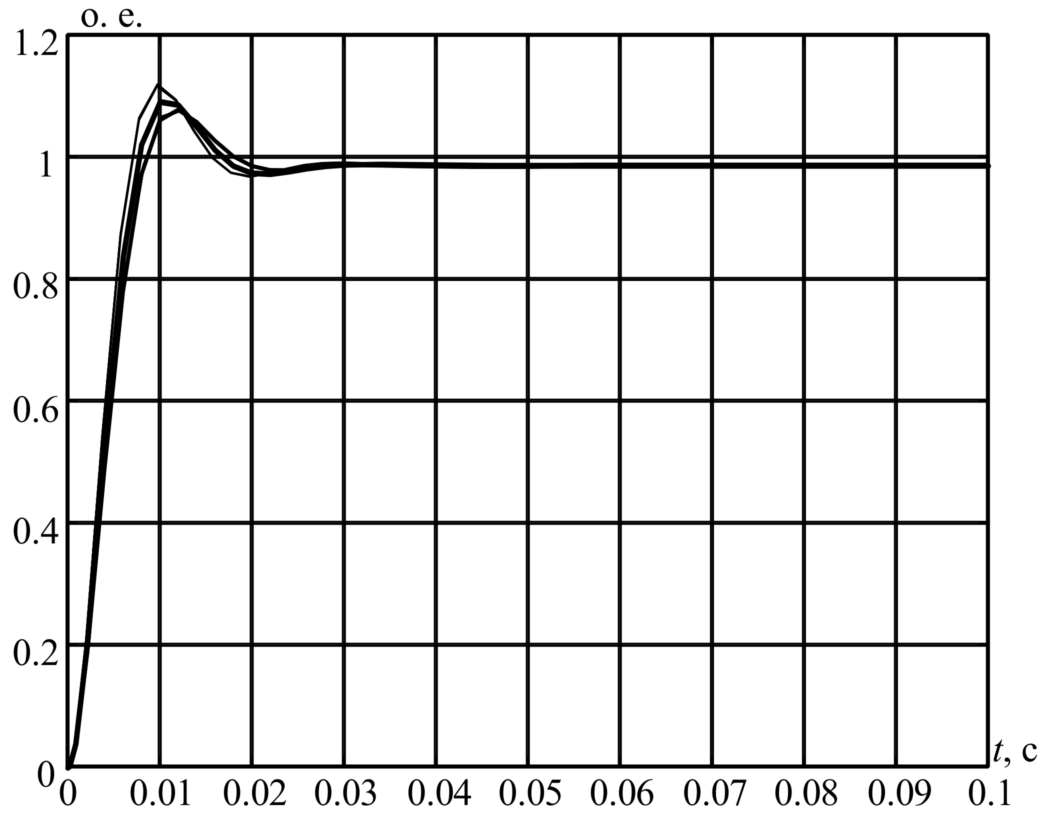


Рисунок 26 – Семейство временных характеристик по напряжению

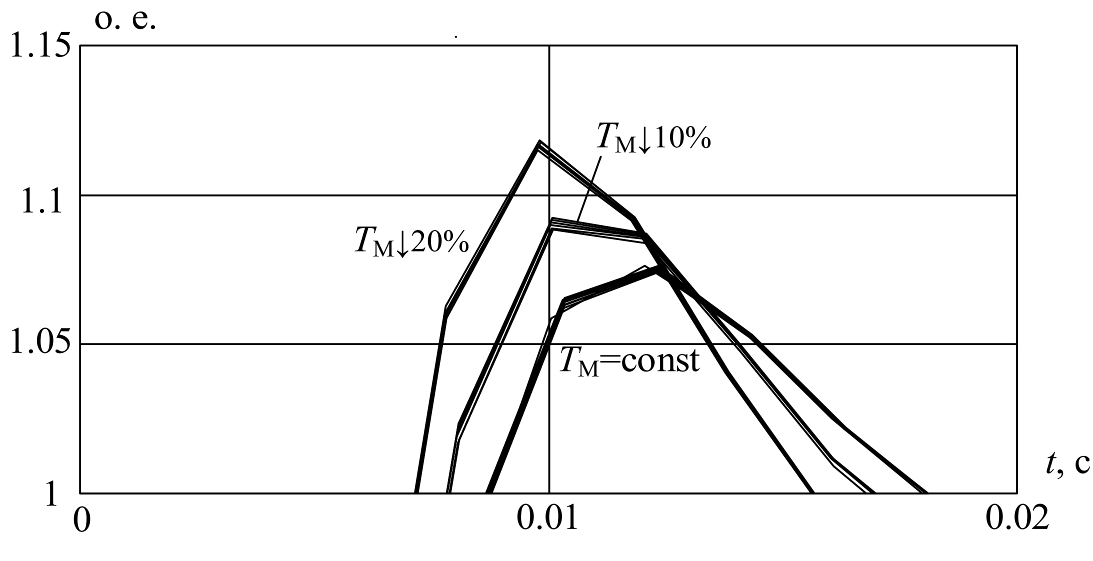
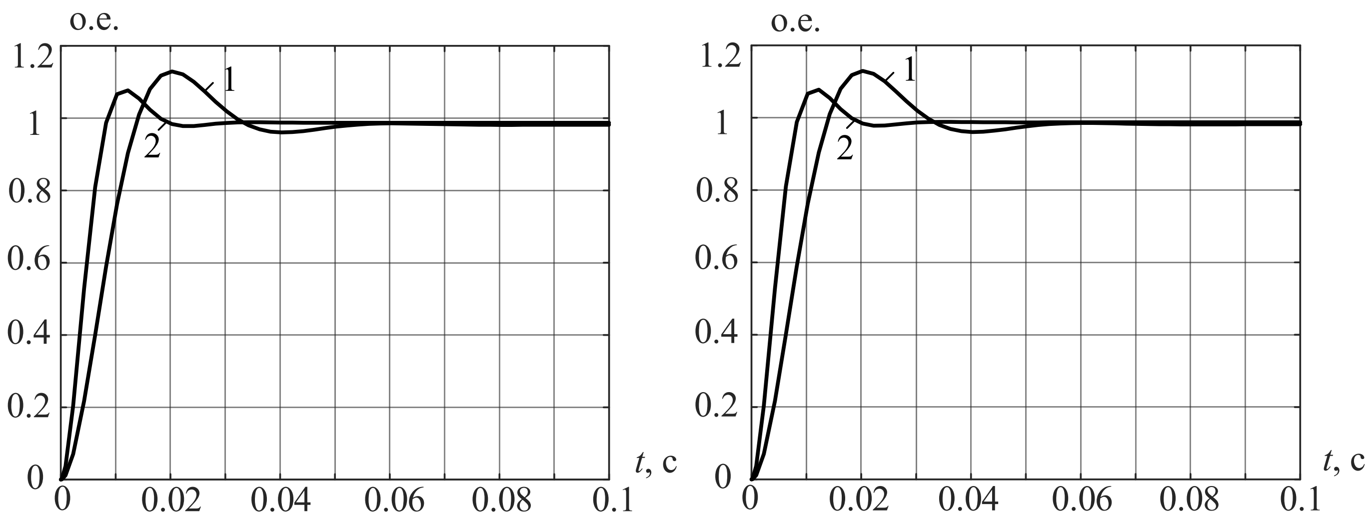


Рисунок 27 – Семейство временных характеристик по напряжению (в увеличенном масштабе)



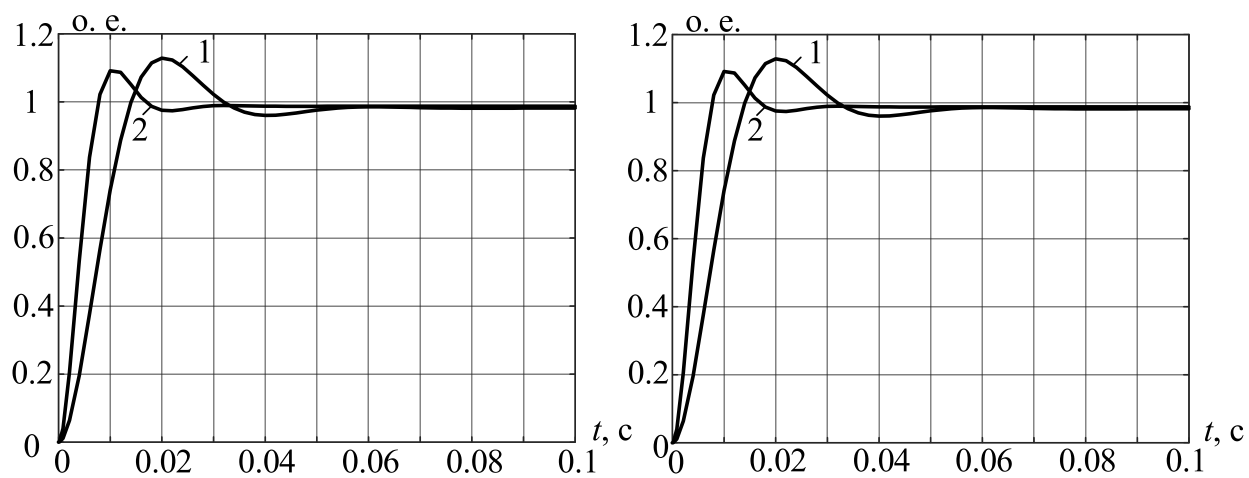
а) б)

1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{М}(t)$=const, $T_{В1}(t)$=const, $T_{В2}(t)$↓10%; б) $T_{М}(t)$=const, $T_{В1}(t)$=const, $T_{В2}(t)$↓20%

Рисунок 28 – Переходные процессы в системе

Как показывает рис. 28, при фиксированных значениях постоянных времени $T_{М}(t)$ и $T_{В1}(t)$ можно увидеть, что параметр $T_{В2}(t)$ не оказывает влияния на динамику системы. Необходимо провести исследование влияния постоянной времени цепи обмотки возбуждения генератора $T_{В1}(t)$ и постоянной времени турбоагрегата $T_{М}(t)$ на качество переходного процесса.



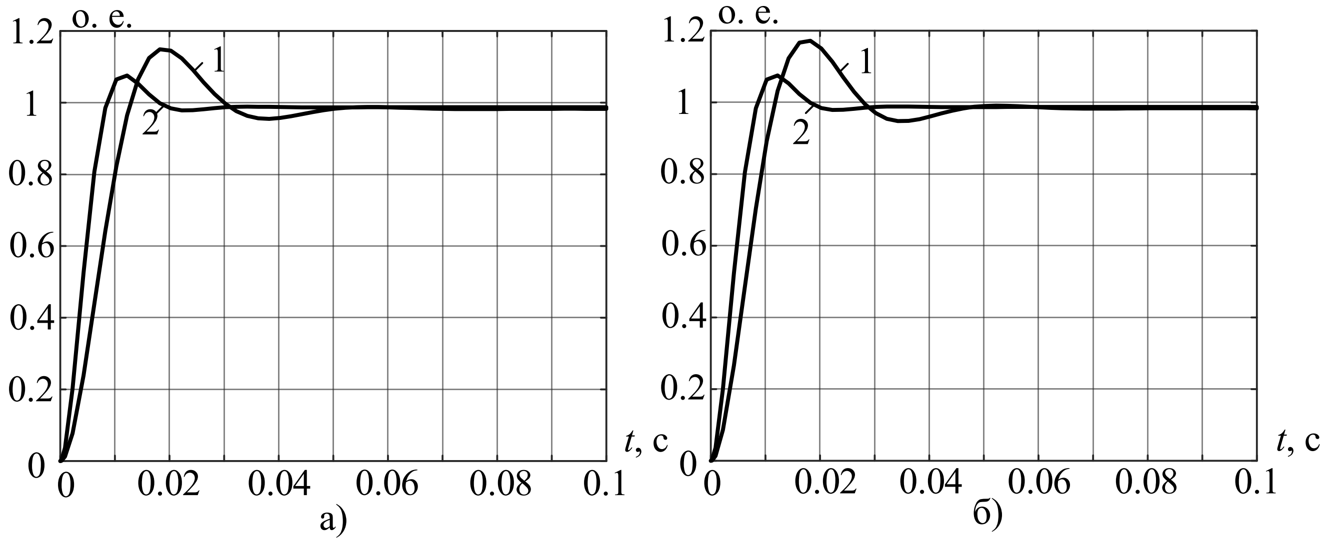
а) б)

1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{М}(t)$=const, $T_{В1}(t)$↓10%, $T_{В2}(t)$=const; б) $T_{М}(t)$=const, $T_{В1}(t)$↓20%, $T_{В2}(t)$=const

Рисунок 29 – Переходные процессы в системе

Как видно из рис. 29, при постоянных параметрах $T_{\text{М}}(t)$, $T_{\text{В2}}(t)$ и нестационарной постоянной времени $T_{\text{В1}}(t)$, показатели которой снижены на 10% и 20%, переходные процессы отличаются незначительно, величина перерегулирования по скорости идентична (отличие менее чем в 0,1%), разница в перерегулировании по напряжению менее 3,9 %, время переходного процесса и установившиеся ошибка совпадают. Изменение постоянной времени цепи обмотки возбуждения генератора также незначительно влияет на качество переходного процесса.



1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{\text{М}}(t)\downarrow 10\%$, $T_{\text{В1}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$=const; б) $T_{\text{М}}(t)\downarrow 10\%$, $T_{\text{В1}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$=const

Рисунок 30 – Переходные процессы в системе

Как видно из рис. 30, при уменьшении постоянной времени турбоагрегата на 10% наблюдается ухудшение показателей качества системы по сравнению со стационарными параметрами. Величина перерегулирования по скорости возрастает на 2,7%, появляется установившаяся ошибка. При росте отклонения $T_{\text{М}}(t)$ на 20% наблюдается рост перерегулирования по скорости (19,2%) и увеличение установившейся ошибки.

Из моделирования переходных процессов объекта видно, что при дрейфе параметров наиболее сильное влияние на качество оказывает изменение параметра постоянной времени турбоагрегата $T_{\text{М}}(t)$, электромагнитная постоянная времени

$T_{В2}(t)$ не изменяет динамику системы, дрейф показателя цепи обмотки возбуждения генератора $T_{В1}(t)$ незначительно влияет на характер переходного процесса.

При дрейфе параметров непрерывной системы показатели качества не выходят за пределы требуемых значений. Пересчет регулятора не требуется.

Таким образом, обобщенный метод Галеркина позволяет решать задачи синтеза параметров непрерывных нелинейных САУ с точки зрения единой алгоритмической позиции. Поиск параметров регулятора при учете влияния неизменяемой части системы сводится к задаче нелинейного программирования с целевой функцией. Нестационарность может проявляться в отклонении коэффициентов передачи и постоянных времени машины. Моделирование дрейфа параметров может осуществляться путем многократного изменения параметров объекта и фиксирования показателей качества полученной системы. При исследовании нелинейных систем изменения параметров могут незначительно сказываться на динамике переходного процесса, показатели качества могут оставаться в пределах требуемых значений. При этом следует понимать, что дрейф параметров установки может не только приводить к ухудшению показателей качества, но и к выходу машины из строя.

2.4 Выводы по главе 2

1. В главе представлена общая схема решения задачи синтеза непрерывных нестационарных систем с помощью обобщенного метода Галеркина, заключающаяся в поиске параметров регулятора с учетом влияния нестационарных параметров неизменяемой части системы на динамику при технических ограничениях на варьируемые параметры.

2. При реализации системы управления в виде электронной схемы возможно применение метода многократного синтеза и перехода от одной структуры

регулятора к другой при помощи электронного коммутатора с учётом возникающих при переключении флуктуационных процессов.

3. Рассмотрена математическая модель двигателя постоянного тока с управлением скоростью вращения за счет изменения напряжения в якорной цепи, выявлена нестационарность величины магнитного потока и зависящего от него коэффициента передачи двигателя в связи с действием реакции якоря. При наличии в системе дрейфа необходимо подбирать такие параметры регулятора, которые будут обеспечивать требуемые показатели качества работы синтезируемой системы.

4. Применен метод синтеза непрерывных нестационарных систем автоматического управления на примере нахождения коэффициентов передачи и постоянных времени регулятора турбоагрегата. Выявлено незначительное влияние дрейфа параметров (постоянной времени турбоагрегата $T_{\text{М}}(t)$ и электромагнитной постоянной времени $T_{\text{В2}}(t)$) на показатели качества переходного процесса. Дрейф показателя цепи обмотки возбуждения генератора $T_{\text{В1}}(t)$ незначительно влияет на характер переходного процесса, показатели качества не выходят за пределы требуемых значений, пересчет регулятора в данной задаче не требуется.

Основные результаты, представленные в данной главе диссертационной работы, опубликованы в [113-129].

3 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИМПУЛЬСНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ САУ

Система автоматического управления, содержащая амплитудно-импульсный модулятор и нелинейный элемент, в общем виде описывается следующим дифференциальным уравнением [44]:

$$
\begin{gathered}
Q\big(c_k(t),D\big)x(t)+Q^*\big(c_k(t),D\big)x^*(t)+\\
+R\big(c_k(t),D\big)y(t)+R^*\big(c_k(t),D\big)y^*(t)=\\
=S\big(c_k(t),D\big)f(t)+S^*\big(c_k(t),D\big)f^*(t),\\
y(t)=F\big[x(t),\dot{x}(t)\big],\ y^*(t)=F^*\big[x^*(t),\dot{x}^*(t)\big],
\end{gathered}
\tag{18}
$$

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; $y(t)=F\big[x(t),\,\dot{x}(t)\big],\ y(t)=F\big[x^*(t),\,\dot{x}^*(t)\big]$ – нелинейные функции;

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

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

Очевидно, что при описании динамики импульсных САУ с одним нелинейным элементом в частных случаях часть слагаемых уравнения (18) может отсутствовать. Также необходимо отметить, что запись уравнения движения относительно координаты входа нелинейного звена, которая впервые была предложена И.А. Орурком, дает несомненные преимущества при реализации метода синтеза систем на основе обобщенного метода Галеркина. Это связано с упрощением процедуры определения соотношений вида «вход-выход» интегралов Галеркина.

В уравнении (18) применяется универсальная координата времени. Это дает возможность использовать дискретно-непрерывные модели систем, определяющих их описание на каждом из интервалов дискретности, и позволяет без перехода к разностным уравнениям, которые требуют получения аналитических решений нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, решать задачу синтеза обобщенным методом Галеркина с единых математических позиций для САУ широкого класса.

Подставим желаемое программное движение (16) в уравнение движения системы (18) и образуем невязку

$$\begin{aligned}\psi\left(c_k(t),t\right) = {} & Q\left(c_k(t),D\right)x^0(t) + Q^*\left(c_k(t),D\right)x^{0*}(t) + \\ & + R\left(c_k(t),D\right)F\left[x^0(t),D\left\{x^0(t)\right\}\right] + \\ & + R^*\left(c_k(t),D\right)F\left[x^{0*}(t),D\left\{x^0(t)\right\}\right] - \\ & - S\left(c_k(t),D\right)f(t) - S^*\left(c_k(t),D\right)f^*(t).\end{aligned} \qquad (19)$$

Если предположить, что система с синтезированными параметрами заведомо устойчива, то значения искомых параметров определяются из условия ортогональности невязки (19) координатным функциям (11)-(14), что приводит к следующей системе алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty Q\left(c_k(t),D\right)x^0(t)\varphi_q(t)\,dt + \int_0^\infty Q^*\left(c_k(t),D\right)x^{0*}(t)\varphi_q(t)\,dt + \\ & + \int_0^\infty R\left(c_k(t),D\right)F\left[x^0(t),D\left\{x^0(t)\right\}\right]\varphi_q(t)\,dt + \\ & + \int_0^\infty R^*\left(c_k(t),D\right)F\left[x^{0*}(t),D\left\{x^0(t)\right\}\right]\varphi_q(t)\,dt - \\ & - \int_0^\infty S\left(c_k(t),D\right)f(t)\varphi_q(t)\,dt - \int_0^\infty S^*\left(c_k(t),D\right)f^*(t)\varphi_q(t)\,dt, \\ & k,q = 1,2,\ldots,m. \end{aligned} \qquad (20)$$

При решении системы из m алгебраических уравнений (20) определяются значения варьируемых параметров оператора управления. 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 (19) 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 (20) и имеющей вид (13), оптимум которой определяется при ограничениях, отмеченных выше, путем использования известных методов поиска экстремума функционала [86-93].

Динамические свойства МСАУ, содержащие в общем случае h импульсных элементов и r нелинейных звеньев, описываются векторно-матричным уравнением вида

$$\mathbf{Qx} + \mathbf{Q}^*\mathbf{x}^* + \mathbf{Ry} + \mathbf{R}^*\mathbf{y}^* = \mathbf{Sf} + \mathbf{S}^*\mathbf{f}^*, \qquad (21)$$

где $x = \|\, x_1(t), x_2(t), \ldots, x_h(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на h входах импульсных элементов; $x^* = \|\, x_1^*(t), x_2^*(t), \ldots, x_h^*(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на h выходах импульсных элементов; $y = \|\, y_1(t), y_2(t), \ldots, y_{r1}(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на r выходах нелинейных элементов в случае непрерывных сигналов на их входах; $y^* = \|\, y_1^*(t), y_2^*(t), \ldots, y_r^*(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на r выходах нелинейных элементов в случае импульсных сигналов на их входах; $f = \|\, f_1(t), f_2(t), \ldots, f_l(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец процессов на l входах систем управления; $f^* = \|\, f_1^*(t), f_2^*(t), \ldots, f_l^*(t) \,\|^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец импульсных процессов на l входах системы управления [103]; $\mathbf{Q}^*$ – квадратная матрица порядка s вида

$$\mathbf{Q}^* = \begin{Vmatrix} Q_{11}^* & Q_{12}^* & Q_{13}^* & \cdots & Q_{1h}^* \\ Q_{21}^* & Q_{22}^* & Q_{23}^* & \cdots & Q_{2h}^* \\ Q_{31}^* & Q_{32}^* & Q_{33}^* & \cdots & Q_{3h}^* \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Q_{h1}^* & Q_{h2}^* & Q_{h3}^* & \cdots & Q_{hh}^* \end{Vmatrix};$$

$\mathbf{R}^*$ – квадратная матрица порядка r_2 вида

$$\mathbf{R}^* = \begin{Vmatrix} R_{11}^* & R_{12}^* & R_{13}^* & \dots & R_{1r_1}^* \\ R_{21}^* & R_{22}^* & R_{23}^* & \dots & R_{2r_1}^* \\ R_{31}^* & R_{32}^* & R_{33}^* & \dots & R_{3r_1}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{r_1 1}^* & R_{r_1 2}^* & R_{r_1 3}^* & \dots & R_{r_1 r_1}^* \end{Vmatrix};$$

$\mathbf{S}^*$ – квадратная матрица порядка g вида

$$\mathbf{S}^* = \begin{Vmatrix} S_{11}^* & S_{12}^* & S_{13}^* & \dots & S_{1g}^* \\ S_{21}^* & S_{22}^* & S_{23}^* & \dots & S_{2g}^* \\ S_{31}^* & S_{32}^* & S_{33}^* & \dots & S_{3g}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{g1}^* & S_{g2}^* & S_{g3}^* & \dots & S_{gg}^* \end{Vmatrix}.$$

3.1 Экспериментальное исследование системы управления турбоагрегатом

Рассмотрим решение задачи параметрического синтеза обобщенным методом Галеркина импульсной системы управления турбоагрегатом. В качестве математической модели амплитудно-импульсного модулятора рассматривается идеальный амплитудно-импульсный модулятор (АИМ) с периодом прерывания 0,01 с и экстраполятором нулевого порядка. Структурная схема синтезируемой МСАУ представлена на рис. 31, описание элементов структурной схемы приведено в п.2.3.

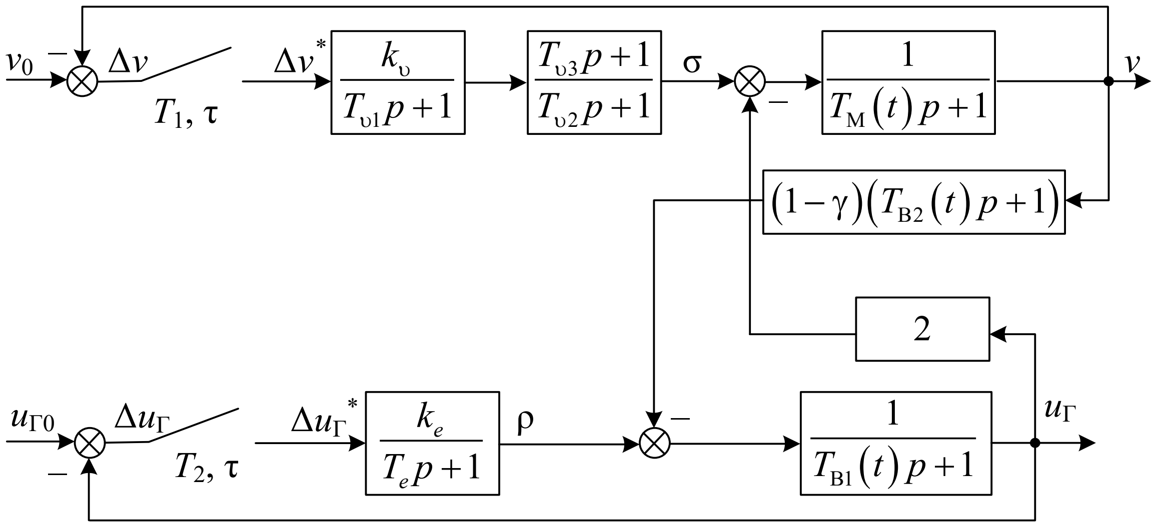


Рисунок 31 – Структурная схема математической модели линейной импульсной МСАУ турбоагрегата

Динамические свойства данной МСАУ описываются уравнениями вида

$$\begin{cases} (1-\gamma)\left[T_{В2}(t)T_e p^2 + \left(T_{В2}(t)+T_e\right)p+1\right]\upsilon(t) + \\ +\left[T_{В1}(t)T_e p^2 + \left(T_{В1}(t)+T_e\right)p+1\right]u_Г(t) + k_e u_Г^*(t) = k_e u_{Г0}^*(t); \\ \left[T_М(t)T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}p^3 + \left(T_М(t)\left(T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2}\right)+T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}\right)p^2 + \left(T_М(t)+T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2}\right)p+1\right]\upsilon(t) + \\ +k_\upsilon\left(T_{\upsilon 3}p+1\right)\upsilon^*(t) + 2\left[T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2}p^2 + \left(T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2}\right)p+1\right]u_Г(t) = k_\upsilon\left(T_{\upsilon 3}p+1\right)\upsilon_0^*(t); \end{cases}$$

которые представляют собой частный случай описания динамических свойств импульсных МСАУ. Для решения задачи синтеза представим полученную систему уравнений в виде (21)

$$\begin{cases} Q_{11}\left(c_k(t),D\right)\upsilon(t) + Q_{12}\left(c_k(t),D\right)u_Г(t) + Q_{12}^*\left(c_k(t),D\right)u_Г^*(t) = S_{12}^*\left(c_k(t),D\right)u_{Г0}^*(t), \\ Q_{21}\left(c_k(t),D\right)\upsilon(t) + Q_{22}\left(c_k(t),D\right)u_Г(t) + Q_{21}^*\left(c_k(t),D\right)\upsilon^*(t) = S_{21}^*\left(c_k(t),D\right)\upsilon_0^*(t), \end{cases}$$

где

$$Q_{11}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{2}a_{11i}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;\ Q_{12}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{2}a_{12i}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;$$

$$Q_{12}^{*}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{0}a_{12i}^{*}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;\ S_{12}^{*}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{0}e_{12i}^{*}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;$$

$$Q_{21}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{3}a_{21i}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;\ Q_{22}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{2}a_{22i}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;$$

$$Q_{21}^{*}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{1}a_{21i}^{*}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;\ S_{21}^{*}\left(c_k\left(t\right),D\right)=\sum_{i=0}^{1}e_{21i}^{*}\left(c_k\left(t\right)\right)D^i;$$

здесь

$$a_{110}=\left(1-\gamma\right);\ a_{111}=\left(1-\gamma\right)\left(T_{\text{В}2}\left(t\right)+T_e\right);\ a_{112}=\left(1-\gamma\right)T_{\text{В}2}\left(t\right)T_e;$$

$$a_{120}=\left(k_e+1\right);\ a_{121}=\left(T_{\text{В}1}\left(t\right)+T_e\right);\ a_{122}=T_{\text{В}1}\left(t\right)T_e;$$

$$a_{120}^{*}=e_{120}^{*}=k_e;\ a_{210}=0;\ a_{211}=T_{\text{М}}\left(t\right)+T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2};$$

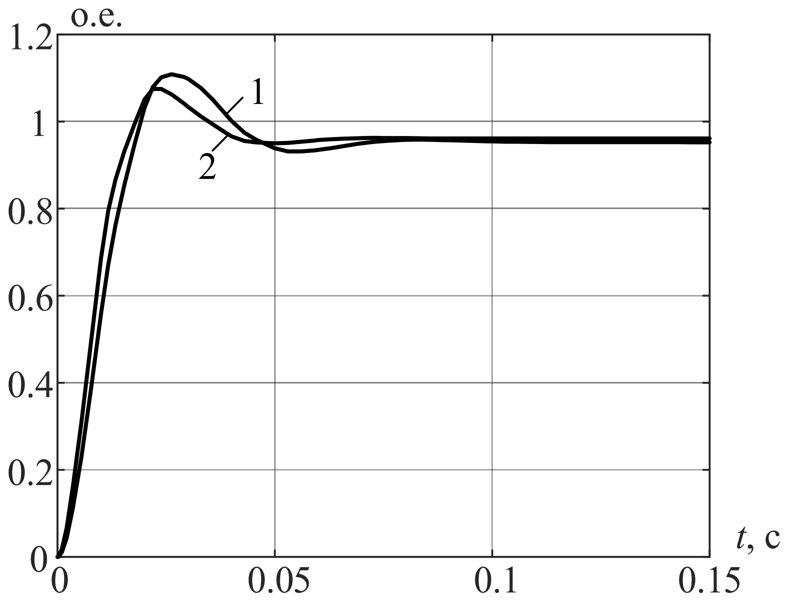
$$a_{212}=T_{\text{М}}\left(t\right)\left(T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2}\right)+T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};\ a_{213}=T_{\text{М}}\left(t\right)T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};$$

$$a_{220}=2;\ a_{221}=2\left(T_{\upsilon 1}+T_{\upsilon 2}\right);\ a_{222}=2T_{\upsilon 1}T_{\upsilon 2};$$

$$a_{210}^{*}=e_{210}^{*}=k_{\upsilon};\ a_{211}^{*}=e_{211}^{*}=k_{\upsilon}T_{\upsilon 3}.$$

Переходные процессы для импульсных систем по обеим регулируемым величинам должны иметь перерегулирование не более 22%, время переходного процесса не должно превышать 40 мс, а установившаяся ошибка должна быть не выше 5%.

В ходе решения задачи синтеза рассматриваемой импульсной многосвязной САУ турбоагрегатом обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения варьируемых параметров: k_e=44,4, T_e=0,0021 с, k_{υ}=9,34, $T_{\upsilon 1}$=0,421 с, $T_{\upsilon 2}$=0,0034 с, $T_{\upsilon 3}$=7,53 с, которые обеспечивают в системе переходные процессы, показанные на рис. 32.



1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

Рисунок 32 – Переходные процессы при стационарных параметрах объекта управления

Наличие в переходных процессах запаздывания на величину периода прерывания соответствует физике функционирования импульсных систем. Как видно из рис. 32, статическая ошибка не превышает 5%, поэтому можно считать, что показатели качества регулирования линейной импульсной многосвязной САУ с синтезированными параметрами удовлетворяют заданным. Также следует отметить, что наличие в МСАУ импульсных элементов приводит к существенному уменьшению коэффициентов передачи по каналам напряжения и частоты, что значительно сокращает мощность сигналов управления.

В связи с возможной нестационарностью параметров неизменяемой части импульсной системы требуется провести исследование объекта при дрейфе постоянных времени (табл. 2). Семейства характеристик при дрейфе параметров приведены на рис. 33 и 34.

Таблица 2 – Показатели качества управления для системы с импульсным элементом

<table>
<tr><td colspan="2">Параметры объекта</td><td colspan="2">σ, %</td><td colspan="2">$t_{\text{ПП}}$, мс</td><td colspan="2">$e_{\text{уст}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>v</td><td>u</td><td>v</td><td>u</td><td>v</td><td>u</td></tr>
<tr><td colspan="2">$T_{\text{М}}(t)$=const,
$T_{\text{В2}}(t)$=const, $T_{\text{В1}}(t)$=const</td><td>16,4</td><td>11,8</td><td>40</td><td>35</td><td>0,0475</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$T_{\text{М}}(t)$=const,
$T_{\text{В2}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%</td><td>16,2</td><td>16,5</td><td>40</td><td>32</td><td>0,0475</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%</td><td>16,2</td><td>20,6</td><td>40</td><td>30</td><td>0,0475</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$T_{\text{М}}(t)$=const,
$T_{\text{В1}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%</td><td>16,3</td><td>11,9</td><td>40</td><td>33</td><td>0,0475</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%</td><td>16,3</td><td>12</td><td>40</td><td>33</td><td>0,0475</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$T_{\text{В1}}(t)$=const,
$T_{\text{В2}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%</td><td>20,6</td><td>11,7</td><td>38</td><td>33</td><td>0,0452</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,7</td><td>11,5</td><td>53</td><td>33</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td rowspan="4">$T_{\text{М}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%</td><td>16,3</td><td>16,6</td><td>40</td><td>32</td><td>0,0476</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%</td><td>16,2</td><td>20,7</td><td>40</td><td>30</td><td>0,0476</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%</td><td>16,3</td><td>16,6</td><td>40</td><td>32</td><td>0,0476</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%</td><td>16,2</td><td>20,6</td><td>40</td><td>30</td><td>0,0476</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td rowspan="4">$T_{\text{В1}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%</td><td>21,6</td><td>11,7</td><td>38</td><td>33</td><td>0,0452</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,8</td><td>11,7</td><td>53</td><td>34</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%</td><td>21,7</td><td>11,9</td><td>38</td><td>33</td><td>0,0452</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,8</td><td>11,6</td><td>53</td><td>34</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td rowspan="4">$T_{\text{В2}}(t)$=const</td><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%</td><td>21,6</td><td>16,3</td><td>38</td><td>32</td><td>0,0453</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,6</td><td>20,1</td><td>53</td><td>30</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%</td><td>21,5</td><td>20,2</td><td>38</td><td>30</td><td>0,0453</td><td>0,0388</td></tr>
<tr><td>$T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,7</td><td>16,1</td><td>53</td><td>32</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td colspan="2">$T_{\text{М}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$10%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$10%</td><td>21,5</td><td>16,2</td><td>38</td><td>32</td><td>0,0453</td><td>0,0389</td></tr>
<tr><td colspan="2">$T_{\text{М}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В1}}(t)\downarrow$20%, $T_{\text{В2}}(t)\downarrow$20%</td><td>27,5</td><td>20,3</td><td>53</td><td>30</td><td>0,0431</td><td>0,0389</td></tr>
</table>

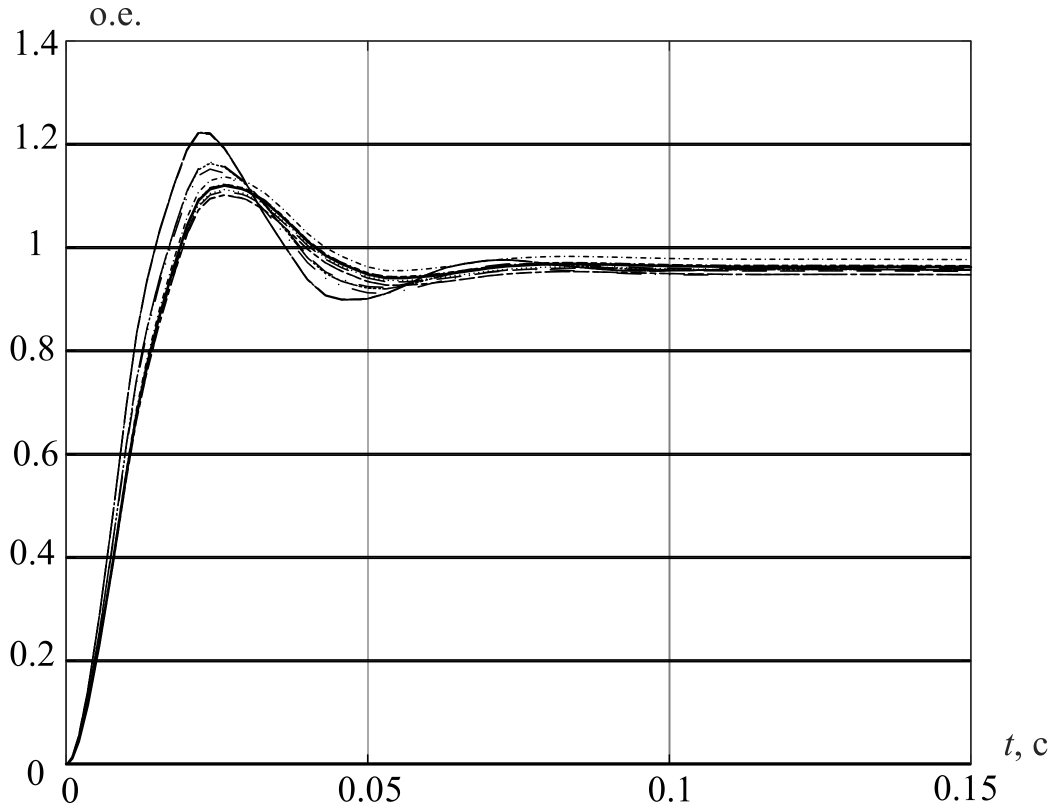


Рисунок 33 – Семейство временных характеристик по скорости

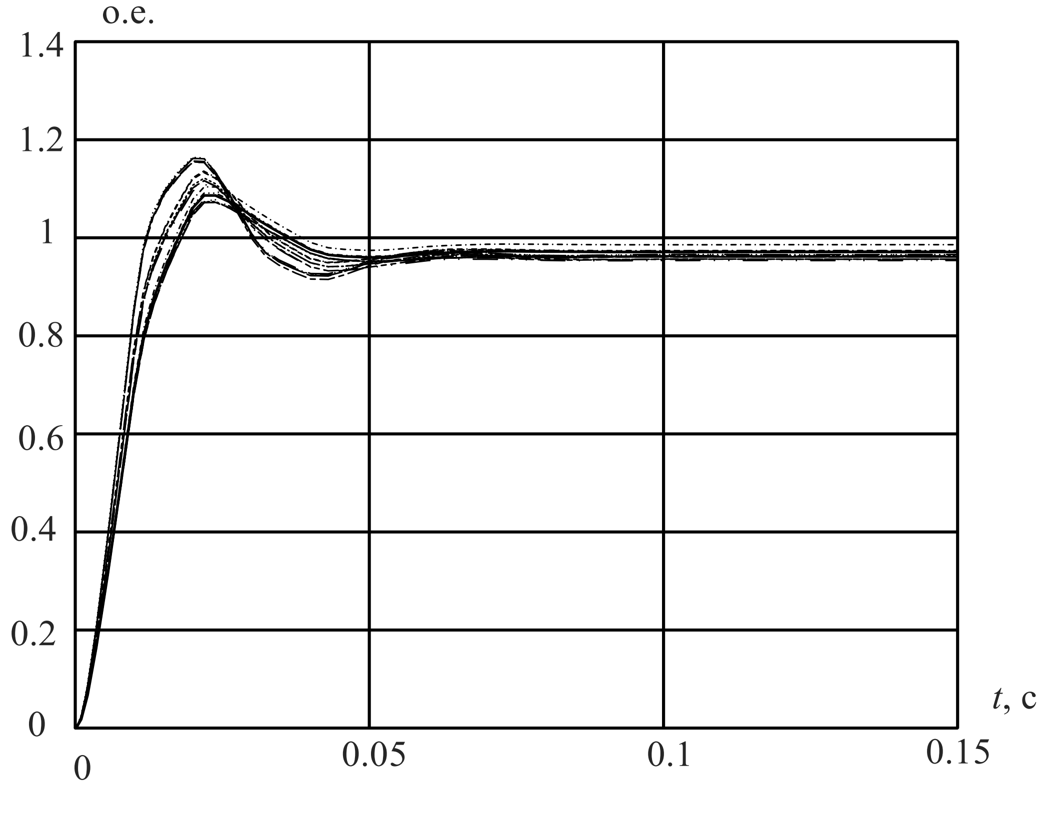
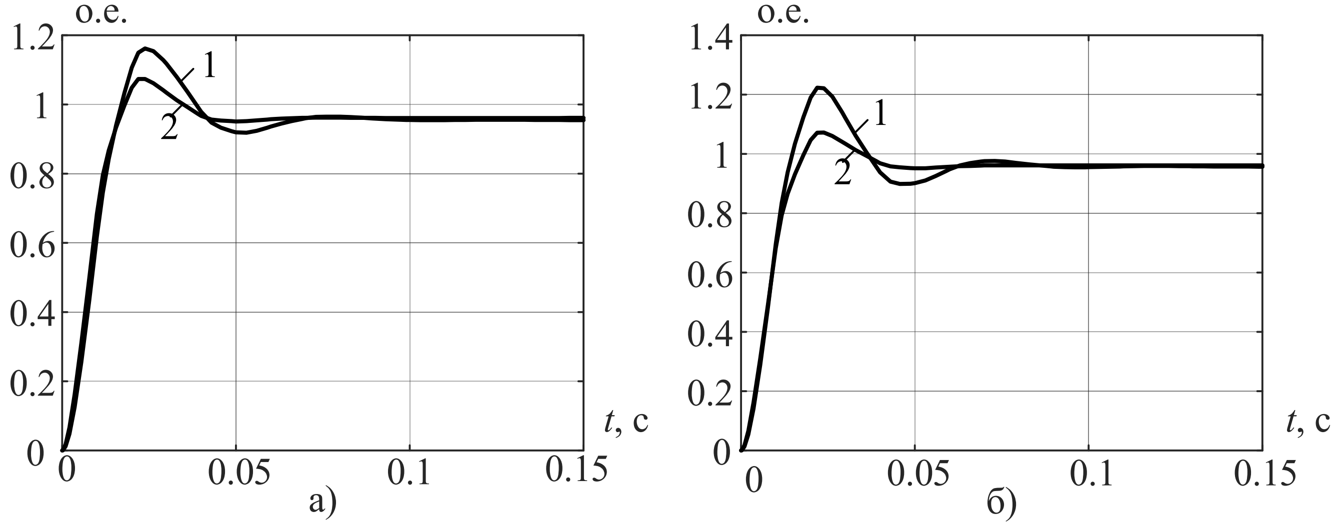


Рисунок 34 – Семейство временных характеристик по напряжению

Значительно на динамику переходного процесса влияет только постоянная времени турбоагрегата $T_М(t)$, в связи с этим требуется выполнить моделирование системы и осуществить перерасчет регулятора для объекта, показатели качества которого выходят за пределы требуемых значений.

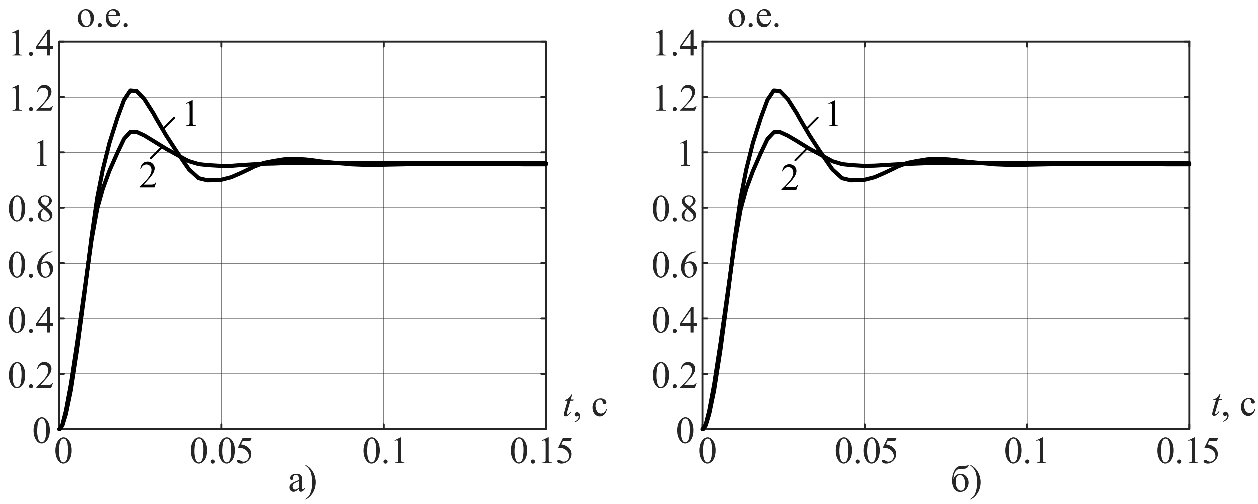


1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_М(t)\downarrow 10\%$, $T_{В1}(t)$=const, $T_{В2}(t)$=const; б) $T_М(t)\downarrow 20\%$, $T_{В1}(t)$=const, $T_{В2}(t)$=const

Рисунок 32 – Переходные процессы

Из моделирования объекта при неизменных значениях постоянной времени цепи обмотки возбуждения генератора $T_{В1}(t)$ и электромагнитной постоянной времени $T_{В2}(t)$ (рис. 32) видно, что при дрейфе постоянной времени турбоагрегата более чем на 20% наблюдается выход показателей качества за требуемые пределы, величина перерегулирования превышает желаемую на 5,7%, время переходного процесса по скорости превышает 53 мс.

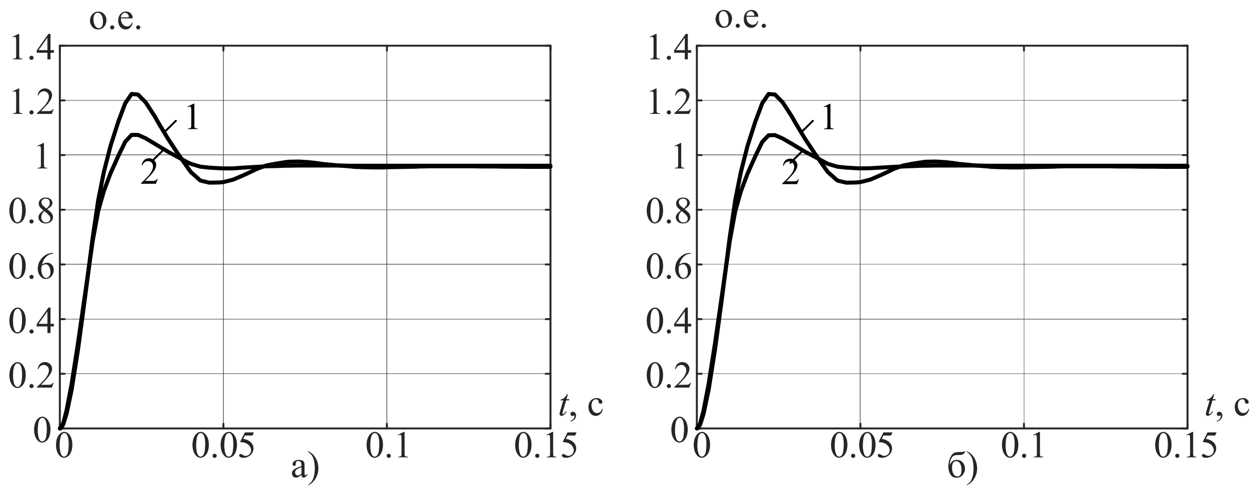


1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{\text{М}}(t)$↓20%, $T_{\text{В1}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$↓20%; б) $T_{\text{М}}(t)$↓20%, $T_{\text{В1}}(t)$=const, $T_{\text{В2}}(t)$↓10%

Рисунок 35 – Переходные процессы

Из рис. 35 следует, что увеличение отклонения электромагнитной постоянной времени приводит к незначительному ухудшению величины перерегулирования по напряжению (0,1%), при этом значительное влияние на систему оказывает дрейф параметра постоянной времени турбоагрегата $T_{\text{М}}(t)$ на 20%.

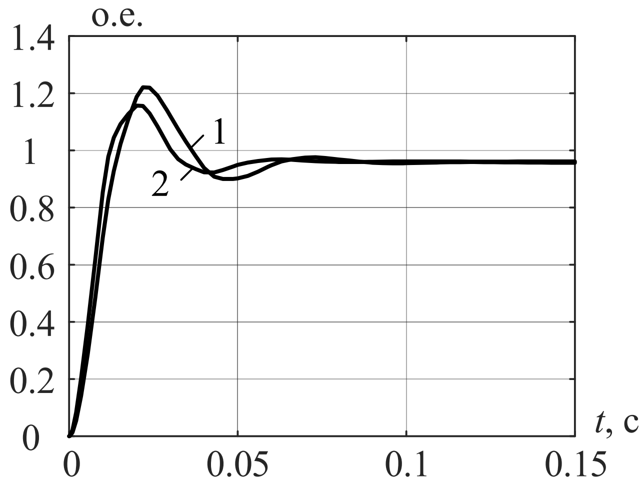


1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{\text{М}}(t)$↓20%, $T_{\text{В1}}(t)$↓20%, $T_{\text{В2}}(t)$=const; б) $T_{\text{М}}(t)$↓20%, $T_{\text{В1}}(t)$↓10%, $T_{\text{В2}}(t)$=const

Рисунок 36 – Переходные процессы

Качество переходного процесса изменяется еще сильнее при росте отклонения постоянной времени цепи обмотки возбуждения генератора $T_{В1}(t)$ на ↓20% (рис. 36). По сравнению со значением $T_{В1}(t)$↓10% происходит увеличение перерегулирования по напряжению на 4% и незначительное уменьшение времени переходного процесса по напряжению на 2 мс.



1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

Рисунок 37 – Переходные процессы при $T_{М}(t)$↓20%, $T_{В1}(t)$↓20%, $T_{В2}(t)$↓20%

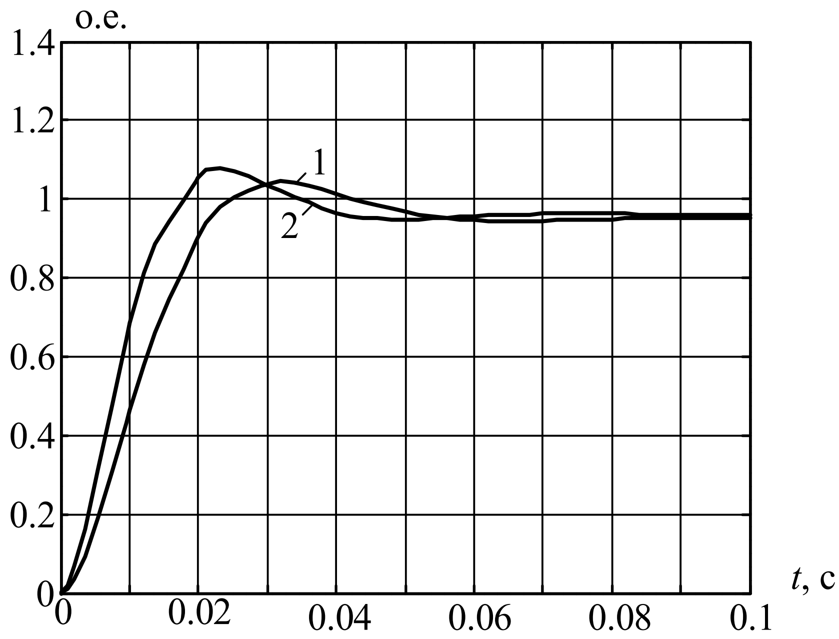
При дрейфе всех постоянных времени на 20% (рис. 37) можно наблюдать наибольшее отклонение показателей качества системы, величина перерегулирования по скорости и напряжению 27,5% и 20,3% соответственно, время переходного процесса 53 мс и 30 мс соответственно.

Как показало моделирование, при дрейфе параметров импульсной системы показатели качества выходят за пределы требуемых значений при значительном изменении $T_{М}(t)$ (более чем на 20%), влияние $T_{В1}(t)$ и $T_{В2}(t)$ незначительно. Требуется пересчет регулятора.

Как видно из результатов моделирования, качество переходного процесса существенно падает в случае дрейфа параметра $T_{М}(t)$ на 20%. Первоначально рассчитанные для стационарного состояния параметры регулятора не позволяют добиться требуемого качества и необходим пересчет регулятора.

В ходе повторного решения задачи синтеза рассматриваемой импульсной многосвязной САУ были получены следующие значения варьируемых параметров:

k_e=44,4, T_e=0,0021 с, k_υ=9,34, $T_{\upsilon 1}$=0,6315 с, $T_{\upsilon 2}$=0,0034 с, $T_{\upsilon 3}$=7,53 с; результат моделирования приведен на рис. 38.



1 – переходный процесс по скорости, 2 – переходный процесс по напряжению

Рисунок 38 – Переходные процессы при стационарных параметрах объекта управления и пересчитанных параметрах регулятора

Переходный процесс по скорости при линейном дрейфе параметра $T_М(t)$ в процессе функционирования САУ приведен на рис. 39.

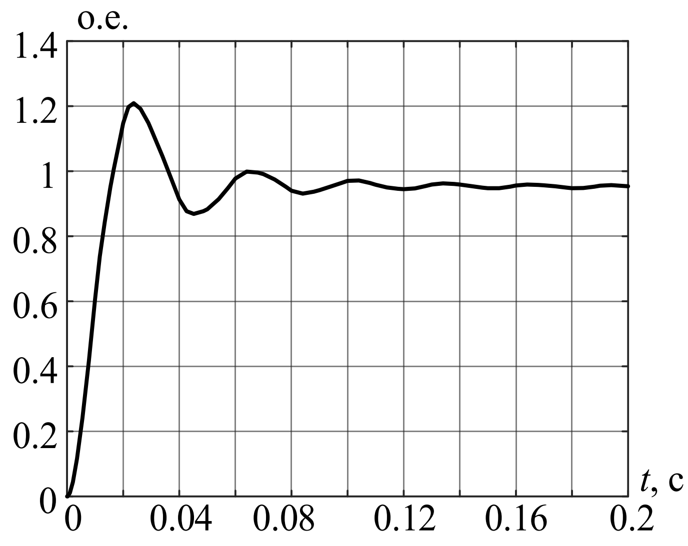


Рисунок 39 – Переходный процесс по скорости при линейном дрейфе параметра $T_М(t)$

Поскольку для разных величин $T_М(t)$ необходимо использовать различные параметры регулятора, предлагается применять метод электронной коммутации с переключением по величине $T_М(t)$. Математическая модель системы с переключателем, срабатывающим по значению величины $T_М(t)$, в среде имитационного моделирования *Matlab*/*Simulink* представлена на рис. 40.

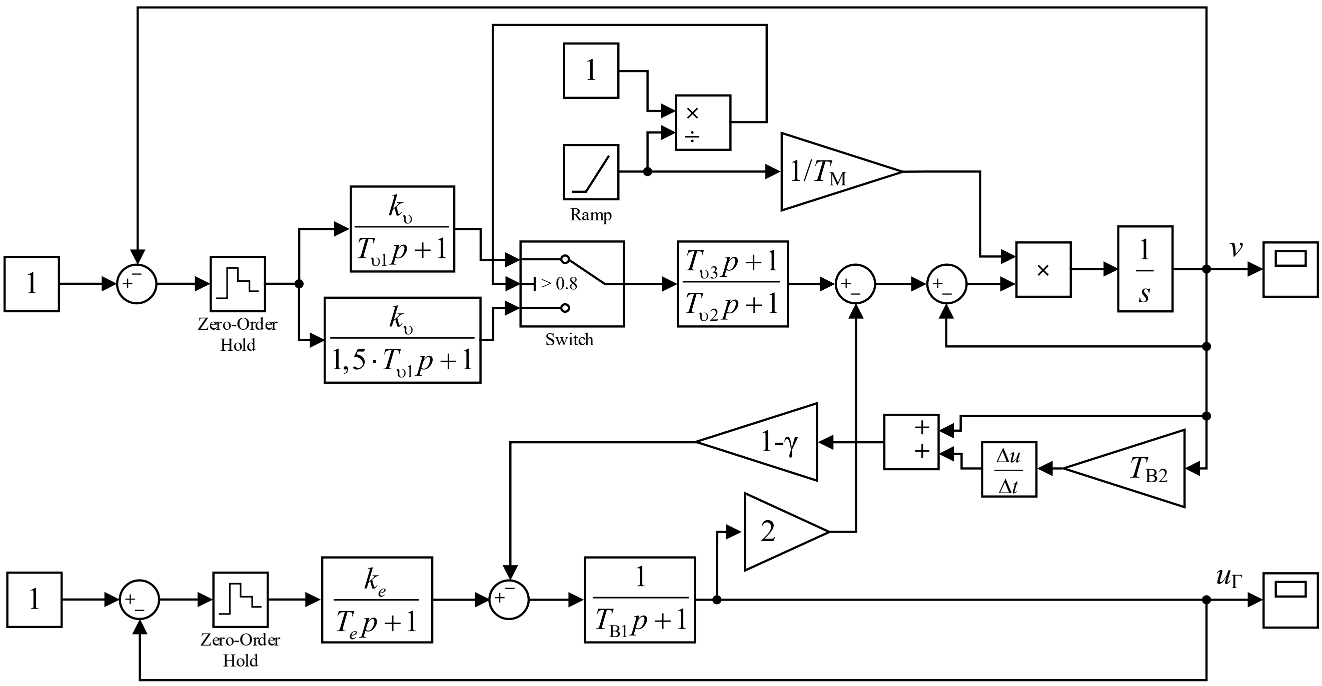


Рисунок 40 – Структурная схема системы управления в среде *Matlab*/*Simulink*

Результат моделирования работы коммутатора, осуществляющего переключения между параметрами регулятора, представлен на рис. 41.

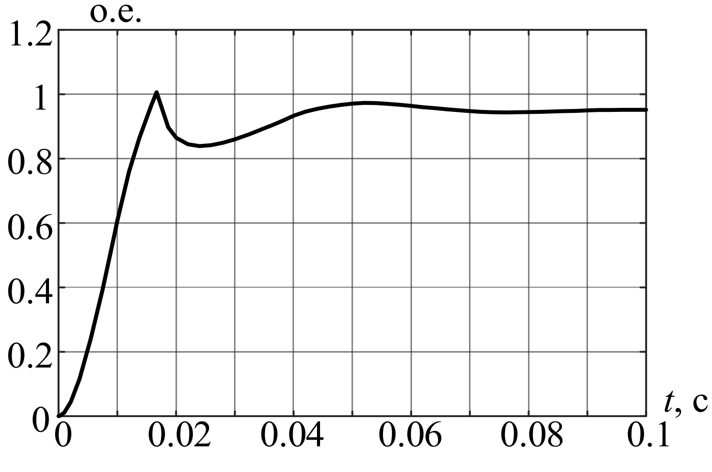


Рисунок 41 – Результат работы коммутирующего устройства – переходный процесс по скорости

Как видно из рис. 41, при использовании метода коммутации между параметрами регулятора показатели качества удовлетворяют требованиям – время переходного процесса $t_{\text{ПП}}$=36 мс, перерегулирование σ=5,6 %, установившаяся ошибка $e_{\text{уст}}$=0,0485.

Параметрический синтез импульсных нестационарных САУ осуществляется путем введения дискретного элемента в САУ, запаздывание на графиках переходных процессов на величину периода прерывания соответствует физике функционирования импульсных систем. В случае ухода показателей качества за заданные значения в процессе работы требуется выполнить перерасчет регулятора с помощью обобщенного метода Галеркина. Для поддержания заданных показателей качества при различных значениях параметров объекта оптимальным решением является применение метода электронной коммутации с переключением по изменяемой величине. Блок-схема разработанного алгоритма приведена в приложении Б.

3.2 Выводы по главе 3

1. Применен метод синтеза импульсных нестационарных систем автоматического управления на примере системы управления турбоагрегатом с импульсным элементом. Выявлено влияние наличия импульсных элементов в МСАУ на коэффициенты передачи по каналам напряжения и частоты. Наличие импульсных элементов значительно сокращает мощность сигналов управления.

2. При дрейфе параметров импульсной системы показатели качества выходят за пределы требуемых значений при сильном изменении (≈20%) постоянной времени турбоагрегата $T_{\text{М}}(t)$, влияния постоянной времени цепи обмотки возбуждения генератора $T_{\text{В1}}(t)$ и электромагнитной постоянной времени $T_{\text{В2}}(t)$ незначительны.

3. Пересчет параметров регулятора с применением обобщенного метода Галеркина при значительном ухудшении показателей качества вследствие дрейфа постоянной времени турбоагрегата $T_{\text{М}}(t)$ обеспечивает требуемые значения времени переходного процесса, величины перерегулирования и установившейся ошибки. Для поддержания показателей качества возможно использование электронной коммутации с законом переключения по значению изменяемой величины.

Основные результаты, представленные в данной главе диссертационной работы, опубликованы в [130-133].

4 РЕШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

В качестве прикладных технических задач рассматриваются параметрический синтез автономной электроэнергетической установки (ЭЭУ) со сверхпроводниковыми электротехническими устройствами и синтез системы автоматического управления торможением колес (САУ ТК) транспортного средства (ТС).

4.1 Параметрический синтез автономной электроэнергетической установки со сверхпроводниковыми электротехническими устройствами

Автономная ЭЭУ выполняет обеспечение электропитанием объектов промышленности и частной собственности без подключения к централизованной электросети. Генераторное оборудование осуществляет преобразование энергии в электрический ток. Многосвязная система автоматического управления выполняет стабилизацию частоты переменного тока.

Автономный многофункциональный электроэнергетический комплекс является экологически безопасным оборудованием децентрализованной энергетики, реализация данного комплекса возможна как на генераторном оборудовании традиционного исполнения с обмотками полюсов из меди, так и на более сложном и энергоэффективном устройстве, работающем на основе эффекта высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Функциональная схема экологической комбинированной солнечно-ветроэнергетической установки со сверхпроводниковым оборудованием приведена на рис. 42 [18,134].

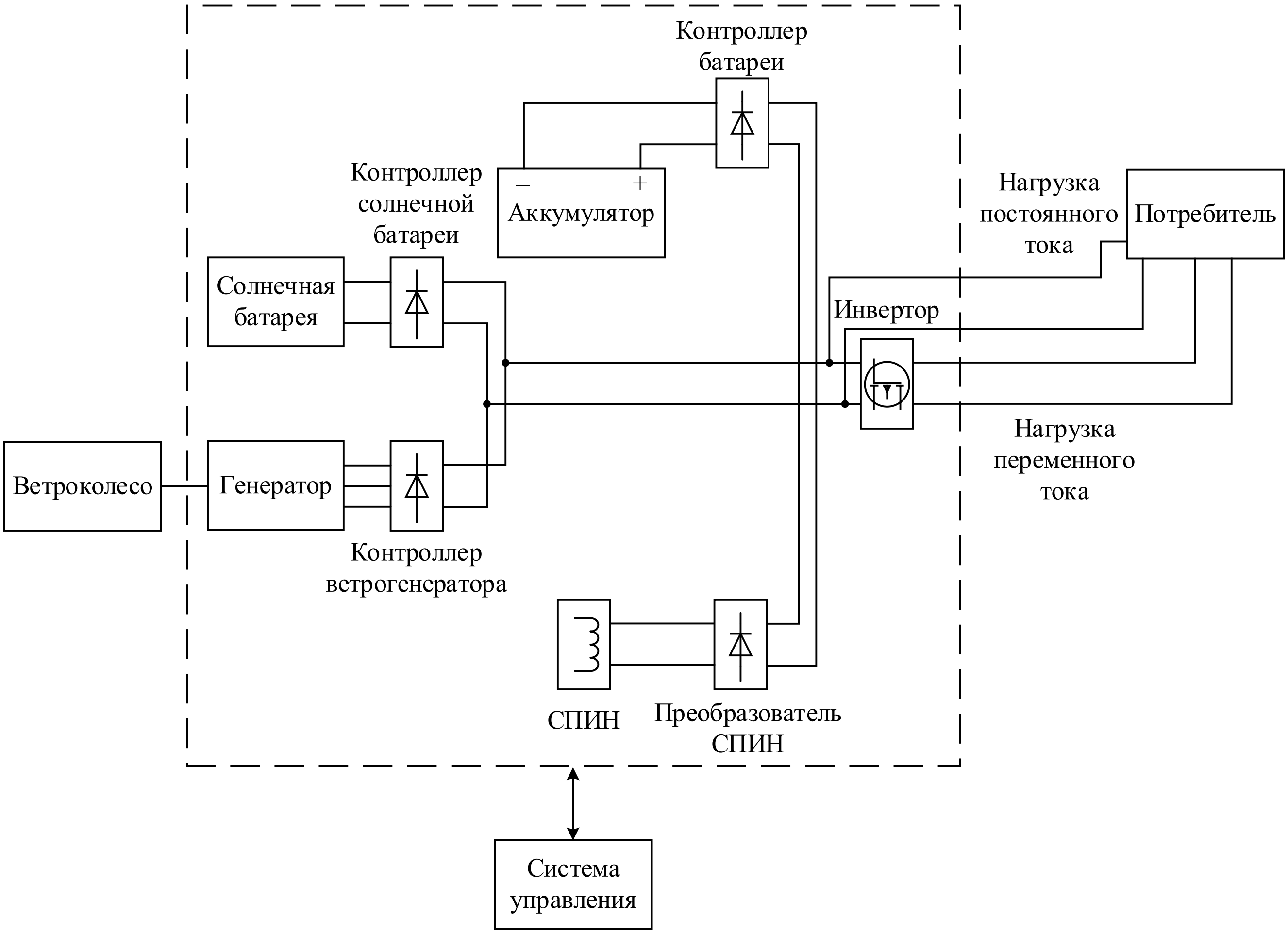
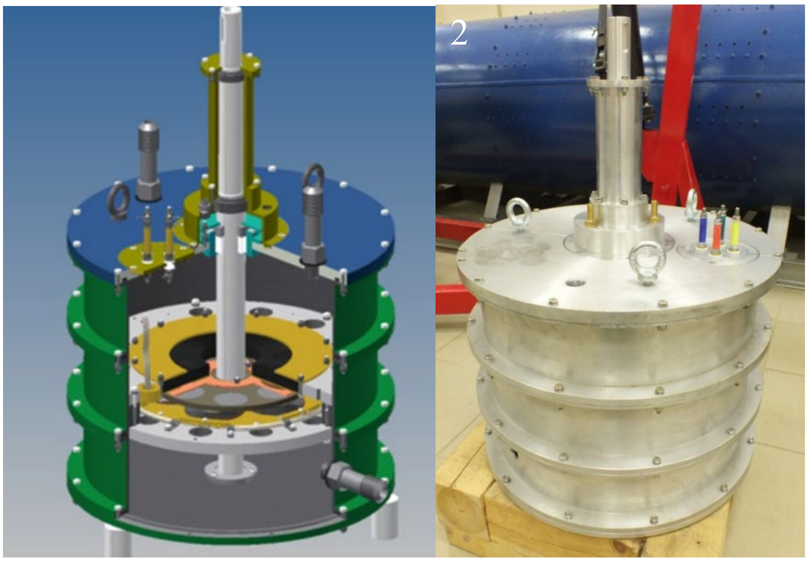


Рисунок 42 – Функциональная схема комбинированной сверхпроводниковой электроэнергетической установки

Проект комбинированной солнечно-ветроэнергетической установки (СВУ) был разработан на базе ГУАП в рамках выполнения государственных контрактов Министерства образования и науки Российской Федерации (ныне – Министерство науки и высшего образования РФ). Комплекс отмечен дипломом I степени (с вручением золотой медали) на Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» в 2010 г. в Санкт-Петербурге. Разработанные и спроектированные элементы СВУ: сверхпроводниковый синхронный ветрогенератор (рис. 43) и сверхпроводниковые силовые регуляторы тока отмечены дипломом I степени (с вручением золотой медали) в номинации «Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии» и дипломом II степени (с вручением серебряной медали) в номинации «Высокотемпературная сверхпроводниковая ветроэнергетическая установка» на выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» в 2009 г. в Санкт-Петербурге и Петербургской технической ярмарке в 2013 г. соответственно.



1 – макетный образец, 2 – в сборе

Рисунок 43 – Сверхпроводниковый синхронный ветрогенератор мощностью 5 кВт

В качестве особенностей работы комбинированной сверхпроводниковой электроэнергетической установки на основе генераторного оборудования, работающего на базе эффекта ВТСП, выделяют невозможность штатного перехода в резистивное состояние из-за предполагаемого выхода генератора из строя в связи с резким ростом сопротивления обмотки. Для снижения вероятности перехода в аварийный режим обеспечивается контроль охлаждения электрической машины с помощью мониторинга системой автоматического управления (САУ) уровня хладагента.

Интеллектуальная система электроэнергетической установки состоит из трех контуров управления. Первый контур отвечает за регулирование пуска генератора и контроль показателей качества выхода на номинальные скорости работы. Второй контур обеспечивает переключение источников энергии: ВТСП ветрогенератор, аккумуляторная батарея, солнечная батарея – при изменении погодных и технических условий. Третий контур выполняет функции реализации удаленного управления работой, контроля и помощи оператору в случае аварийной ситуации.

Преобразование механической энергии ветроколеса в электрическую выполняет синхронный генератор со сверхпроводящей обмоткой статора, что обеспечивает минимальные электрические потери мощности. Полученную электрическую энергию с переменной величиной и частотой напряжения преобразователь частоты переводит в энергию переменного тока с постоянной величиной и частотой напряжения. Алгоритм управления регуляторами электромеханического преобразователя разрабатывается и синтезируется с использованием обобщенного метода Галеркина.

Из структурной схемы математической модели электроэнергетической установки (рис. 44) следует, что система автоматического управления исследуемой модели состоит из автоматического регулятора частоты и регулятора напряжения синхронного генератора, приводимого за счет управляемого двигателя соизмеримой мощности, имитирующего работу ветроколеса, без коррекции частоты оборотов.

Описание динамических звеньев МСАУ производится следующим образом [103].

Уравнение, описывающее динамические свойства приводного двигателя, имеет вид

$$\left(R + T_{\text{М}}(t)\,p\right)v(t) = \sigma(t) + g_v(t) - 2u_{\Gamma}(t)$$

либо в виде передаточной функции

$$W_{\text{М}}(p) = \frac{1}{T_{\text{М}}(t)\,p + 1},$$

где $T_{\text{М}}(t)$=1 с – постоянная времени приводного двигателя; $\sigma_v(t)$ – сигнал на выходе регулятора скорости; $g_v(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале изменения частоты, действующее на приводной двигатель; $u_{\Gamma}(t)$ – напряжение на выходе ЭЭУ; $v(t)$ – скорость вращения приводного двигателя (частота напряжения на выходе ЭЭУ).

Уравнение регулятора скорости вращения приводного двигателя

$$\left(T_{v3}p+1\right)\left(T_{v4}p+1\right)\left(T_{v5}p+1\right)\sigma\left(t\right)=k_v\left(T_{v1}p+1\right)\left(T_{v2}p+1\right)\Delta v\left(t\right),$$

где T_{v1}, T_{v2}, T_{v3}, T_{v4}, T_{v5}, k_v – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора скорости вращения приводного двигателя соответственно; $\Delta v(t)=v_0(t)-v(t)$ – относительное изменение скорости вращения приводного двигателя, $v_0(t)$ – заданное значение скорости (частоты напряжения на выходе установки).

Таким образом, передаточная функция регулятора скорости вращения имеет вид

$$W_{\text{РС}}\left(p\right)=\frac{k_v\left(T_{v1}p+1\right)\left(T_{v2}p+1\right)}{\left(T_{v3}p+1\right)\left(T_{v4}p+1\right)\left(T_{v5}p+1\right)}.$$

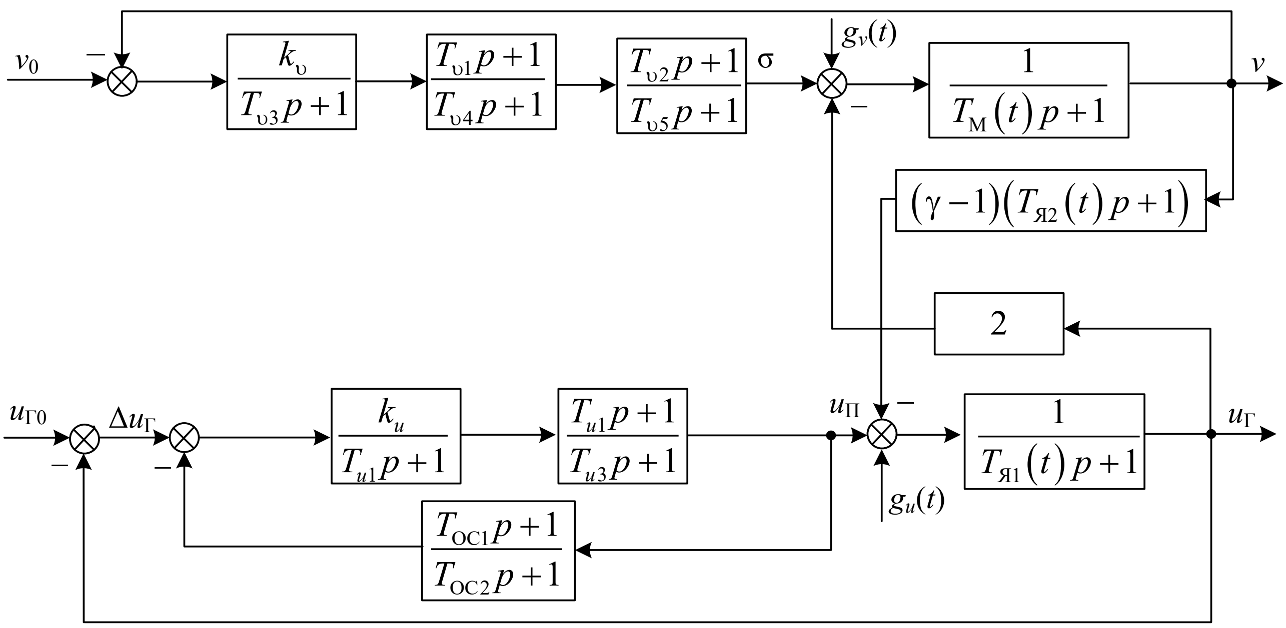


Рисунок 44 – Структурная схема математической модели ЭЭУ

Уравнение, описывающее динамические свойства синхронного генератора:

$$\left(T_{\text{Я1}}\left(t\right)p+1\right)u_{\text{Г}}\left(t\right)=u_{\text{П}}\left(t\right)+\left(1-\gamma\right)\left(T_{\text{Я2}}\left(t\right)p+1\right)v\left(t\right)+g_u\left(t\right),$$

где $T_{\text{Я1}}(t)$=0,5 с; $T_{\text{Я2}}(t)$=0,01 с – постоянные времени синхронного генератора, обусловленные реакцией якоря на постоянные магниты; $(1–\gamma)$=0,8 – коэффициент, характеризующий режим работы синхронного генератора; $g_u(t)$ – внешнее возмущающее воздействие в канале регулирования напряжения, действующее на синхронный генератор.

Передаточная функция регулятора напряжения

$$W_{\text{РН}}(p)=\frac{k_u\left(T_{u1}p+1\right)}{\left(T_{u2}p+1\right)\left(T_{u3}p+1\right)},$$

где T_{u1}, T_{u2}, T_{u3}, k_u – постоянные времени и коэффициент передачи регулятора напряжения ЭЭУ.

Канал регулирования напряжения ЭЭУ дополнен гибкой отрицательной обратной связью (ГОС) по напряжению, имеющей передаточную функцию вида

$$W_{\text{ГОС}}(p)=\frac{T_{\text{ОС}1}p}{T_{\text{ОС}2}p+1},$$

где $T_{\text{ОС}1}$, $T_{\text{ОС}2}$ – постоянные времени звена коррекции в цепи гибкой обратной связи.

Из уравнений, определяющих динамику отдельных звеньев исследуемой автономной электроэнергетической установки выведена следующая система дифференциальных уравнений

$$\left[\begin{array}{l}\Big[\left(k_v+1\right)+\Big[k_v\left(T_{v1}+T_{v2}\right)+T_{v3}+T_{v4}+T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\Big]p+\\ +\Big[k_vT_{v1}T_{v2}+T_{v3}T_{v4}+T_{v5}T_{\text{М}}(t)+\left(T_{v3}+T_{v4}\right)\left(T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\right)\Big]p^2+\\ +\Big[T_{v3}T_{v4}\left(T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\right)+T_{v5}T_{\text{М}}(t)\left(T_{v3}+T_{v4}\right)\Big]p^3+T_{v3}T_{v4}T_{v5}T_{\text{М}}(t)\,p^4\Big]v(t)+\\ +2\Big[1+\left(T_{v3}+T_{v4}+T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\right)p+\Big[T_{v3}T_{v4}+T_{v5}T_{\text{М}}(t)+\left(T_{v3}+T_{v4}\right)\left(T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\right)\Big]p^2+\\ +\Big[T_{v3}T_{v4}\left(T_{v5}+T_{\text{М}}(t)\right)+T_{v5}T_{\text{М}}(t)\left(T_{v3}+T_{v4}\right)\Big]p^3+T_{v3}T_{v4}T_{v5}T_{\text{М}}(t)\,p^4\Big]u_{\Gamma}(t)=\\ =k_v\Big[1+\left(T_{v1}+T_{v2}\right)p+T_{v1}T_{v2}p^2\Big]v_0(t);\end{array}\right.$$

$$
\begin{cases}
\Big[(1-\gamma)+(1-\gamma)\big(T_{\text{ОС}2}+T_{u2}+T_{u3}+k_u T_{\text{ОС}1}+T_{\text{Я}2}(t)+T_{\text{Я}1}(t)\big)p+ \\
+(1-\gamma)\Big[T_{u2}\big(T_{u3}+T_{\text{Я}2}(t)+T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{ОС}2}\big)+T_{u3}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{Я}2}(t)+T_{\text{ОС}2}\big)+ \\
+k_u\big(T_{u1}T_{\text{ОС}1}+T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{ОС}1}+T_{\text{Я}2}(t)T_{\text{ОС}1}\big)+T_{\text{Я}2}(t)\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{ОС}2}\big)+T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{ОС}2}\Big]p^2+ \\
+(1-\gamma)\Big[T_{u2}T_{u3}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{Я}2}(t)+T_{\text{ОС}2}\big)+T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{Я}2}(t)\big(T_{u2}+T_{u3}+T_{\text{ОС}2}+k_u T_{\text{ОС}1}\big)+ \\
+T_{u2}T_{\text{ОС}2}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{Я}2}(t)\big)+T_{u3}T_{\text{ОС}2}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{Я}2}(t)\big)+T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{\text{Я}2}(t)\big)\Big]p^3+ \\
+(1-\gamma)\Big[T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{Я}2}(t)\big(T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u+T_{u3}T_{\text{ОС}2}+T_{u2}T_{\text{ОС}2}\big)+ \\
+T_{u2}T_{u3}\big(T_{\text{Я}2}(t)T_{\text{ОС}2}+T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{ОС}2}+T_{\text{Я}1}(t)T_{\text{Я}2}(t)\big)\Big]p^4+ \\
+(1-\gamma)T_{\text{ОС}2}T_{u2}T_{u3}T_{\text{Я}2}(t)T_{\text{Я}1}(t)p^5\Big]v(t)+ \\
+\Big[(k_u+1)+\big(T_{\text{ОС}2}+T_{u2}+T_{u3}+k_u\big(T_{\text{ОС}1}+T_{\text{ОС}2}+T_{u1}\big)+T_{\text{Я}1}(t)\big)p+ \\
+\Big(T_{\text{ОС}2}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{u3}+T_{u2}\big)+T_{u2}\big(T_{\text{Я}1}(t)+T_{u3}\big)+T_{\text{Я}1}(t)T_{u3}\Big)p^2+ \\
+\Big(T_{\text{Я}1}(t)\big(T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u+T_{u3}T_{\text{ОС}2}+T_{u2}T_{\text{ОС}2}+T_{u3}T_{u2}\big)+T_{u3}T_{u2}T_{\text{ОС}2}\Big)p^3+ \\
+\Big(T_{u2}T_{u3}T_{\text{ОС}2}T_{\text{Я}1}(t)\Big)p^4\Big]u_{\Gamma}(t)= \\
=k_u\Big[1+\big(T_{\text{ОС}2}+T_{u1}\big)p+\big(T_{\text{ОС}2}T_{u1}\big)p^2\Big]u_{\Gamma 0}(t).
\end{cases}
$$

Для решения задачи синтеза параметров звеньев коррекции обобщенным методом Галеркина представим полученную систему уравнений в общем виде

$$
\begin{cases}
Q_{11}\big(c_k(t),D\big)v(t)+Q_{12}\big(c_k(t),D\big)u_{\Gamma}(t)=S_{11}\big(c_k(t),D\big)v_0(t), \\
Q_{21}\big(c_k(t),D\big)v(t)+Q_{22}\big(c_k(t),D\big)u_{\Gamma}(t)=S_{22}\big(c_k(t),D\big)u_{\Gamma 0}(t),
\end{cases}
$$

где

$$Q_{11}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{4}a_{11i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ Q_{12}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{4}a_{12i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$S_{11}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{2}e_{11i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ Q_{21}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{5}a_{21i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$Q_{22}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{5}a_{22i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ S_{22}\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{3}e_{22i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

здесь

$$a_{110}=k_v+1;$$

$$a_{111}=k_v\big(T_{v1}+T_{v2}\big)+T_{v3}+T_{v4}+T_{v5}+T_{\text{М}};$$

$$a_{112}=k_vT_{v1}T_{v2}+T_{v3}T_{v4}+T_{v5}T_{\text{М}}+\big(T_{v3}+T_{v4}\big)\big(T_{v5}+T_{\text{М}}\big);$$

$$a_{113} = T_{v3}T_{v4}\left(T_{v5} + T_{\text{М}}\right) + T_{v5}T_{\text{М}}\left(t\right)\left(T_{v3} + T_{v4}\right);$$

$$a_{114} = T_{v3}T_{v4}T_{v5}T_{\text{М}}\left(t\right);$$

$$a_{120} = 2;$$

$$a_{121} = 2\left(T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_{\text{М}}\left(t\right)\right);$$

$$a_{122} = 2\left[T_{v3}T_{v4} + T_{v5}T_{\text{М}}\left(t\right) + \left(T_{v3} + T_{v4}\right)\left(T_{v5} + T_{\text{М}}\left(t\right)\right)\right];$$

$$a_{123} = 2\left[T_{v3}T_{v4}\left(T_{v5} + T_{\text{М}}\left(t\right)\right) + T_{v5}T_{\text{М}}\left(t\right)\left(T_{v3} + T_{v4}\right)\right];$$

$$a_{124} = 2T_{v3}T_{v4}T_{v5}T_{\text{М}}\left(t\right);$$

$$e_{110} = k_v;$$

$$e_{111} = k_v\left(T_{v1} + T_{v2}\right);$$

$$e_{112} = k_vT_{v1}T_{v2};$$

$$a_{210} = \left(1 - \gamma\right);$$

$$a_{211} = \left(1 - \gamma\right)\left(T_{\text{ОС}2} + T_{u2} + T_{u3} + k_uT_{\text{ОС}1} + T_{\text{Я}2}\left(t\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right)\right);$$

$$a_{212} = \left(1 - \gamma\right)\left[T_{u2}\left(T_{u3} + T_{\text{Я}2}\left(t\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{ОС}2}\right) + T_{u3}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right) + T_{\text{ОС}2}\right) +\right.$$

$$\left.+k_u\left(T_{u1}T_{\text{ОС}1} + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{ОС}1} + T_{\text{Я}2}\left(t\right)T_{\text{ОС}1}\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right)\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{ОС}2}\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{ОС}2}\right];$$

$$a_{213} = \left(1 - \gamma\right)\left[T_{u2}T_{u3}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right) + T_{\text{ОС}2}\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{Я}2}\left(t\right)\left(T_{u2} + T_{u3} + T_{\text{ОС}2} + k_uT_{\text{ОС}1}\right) +\right.$$

$$\left.+T_{u2}T_{\text{ОС}2}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right)\right) + T_{u3}T_{\text{ОС}2}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right)\right) + T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{\text{Я}2}\left(t\right)\right)\right];$$

$$a_{214} = \left(1 - \gamma\right)\left[T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{Я}2}\left(t\right)\left(T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u + T_{u3}T_{\text{ОС}2} + T_{u2}T_{\text{ОС}2}\right) +\right.$$

$$\left.+T_{u2}T_{u3}\left(T_{\text{Я}2}\left(t\right)T_{\text{ОС}2} + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{ОС}2} + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{\text{Я}2}\left(t\right)\right)\right];$$

$$a_{215} = \left(1 - \gamma\right)T_{\text{ОС}2}T_{u2}T_{u3}T_{\text{Я}2}\left(t\right)T_{\text{Я}1}\left(t\right);$$

$$a_{220} = k_u + 1;$$

$$a_{221} = T_{\text{ОС}2} + T_{u2} + T_{u3} + k_u\left(T_{\text{ОС}1} + T_{\text{ОС}2} + T_{u1}\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right);$$

$$a_{222} = T_{\text{ОС}2}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{u3} + T_{u2}\right) + T_{u2}\left(T_{\text{Я}1}\left(t\right) + T_{u3}\right) + T_{\text{Я}1}\left(t\right)T_{u3};$$

$$a_{223} = T_{\text{Я}1}\left(t\right)\left(T_{u1}T_{\text{ОС}1}k_u + T_{u3}T_{\text{ОС}2} + T_{u2}T_{\text{ОС}2} + T_{u3}T_{u2}\right) + T_{u3}T_{u2}T_{\text{ОС}2};$$

$$a_{224} = T_{u2}T_{u3}T_{\text{ОС}2}T_{\text{Я}1}\left(t\right);$$

$$e_{220} = k_u;$$

$$e_{221} = k_u\left(T_{\text{ОС}2} + T_{u1}\right);$$

$$e_{222} = k_uT_{\text{ОС}2}T_{u1}.$$

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, $T_{\text{ОС}1}$, $T_{\text{ОС}2}$, обеспечивающих в синтезируемой системе следующие показатели качества переходных процессов по напряжению и частоте: время переходного процесса как по напряжению, так и по частоте не должно превышать 0,5 с; перерегулирование по напряжению не должно превышать 5%, а величина перерегулирования в процессе изменения частоты (скорости вращения приводного двигателя) не должна превышать 10%.

Исходя из требуемых показателей качества переходных процессов и на основании подхода, изложенного выше, определим параметры желаемых программных движений:

– коэффициент затухания процессов $\alpha = \dfrac{3 \div 4}{t_{\text{пп}}} = 6 \div 8;$

– собственная частота колебаний скорости приводного двигателя и начальный фазовый сдвиг

$$\beta = \alpha\mu = (6 \div 8) \cdot 1{,}6 = 9{,}6 \div 12{,}8 \ \text{рад}/\text{с},$$

где μ=1,6 – колебательность процесса, которой соответствует перерегулирование 10%;

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\mu}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{1{,}6}\right) = 0{,}558 \text{ рад},$$

$$H^* = \sqrt{1 + \frac{1}{\mu^2}} = \sqrt{1 + \frac{1}{1{,}6^2}} = 1{,}179 \ \text{рад}/\text{с}.$$

В результате желаемые программные движения в МСАУ ЭЭУ будут иметь вид

$$v^0(t) = \left[v_{\text{у}} - H^* \cos(\beta t - \varphi_0) e^{-\alpha t}\right] 1(t) = \left[1 - 1{,}179 \cos(9{,}8t - 0{,}558) e^{-7t}\right] 1(t);$$

$$u_{\Gamma}^0(t) = u_{\Gamma\text{у}}\left(1 - e^{-\alpha t}\right) 1(t) = \left(1 - e^{-7t}\right) 1(t).$$

При решении задачи параметрического синтеза ЭЭУ были получены значения искомых параметров [18]: k_v=340, $T_{\upsilon 1}$=2,53 с, $T_{\upsilon 2}$=0,15 с, $T_{\upsilon 3}$=1,751 с, $T_{\upsilon 4}$=0,0054 с, $T_{\upsilon 5}$=3 с, k_u=170, T_{u1}=0,01 с, T_{u2}=0,001 с, T_{u3}=0,005 с, $T_{\text{ОС}1}$=0,037 с, $T_{\text{ОС}2}$=0,31 с.

Моделирование процессов в математической модели ЭЭУ проводилось как в нормальных режимах, так и в анормальных.

Результаты моделирования динамических процессов изменения напряжения и частоты в МСАУ ЭЭУ при двух одновременно действующих на входах единичных скачкообразных ступенчатых воздействиях показаны на рис. 45.

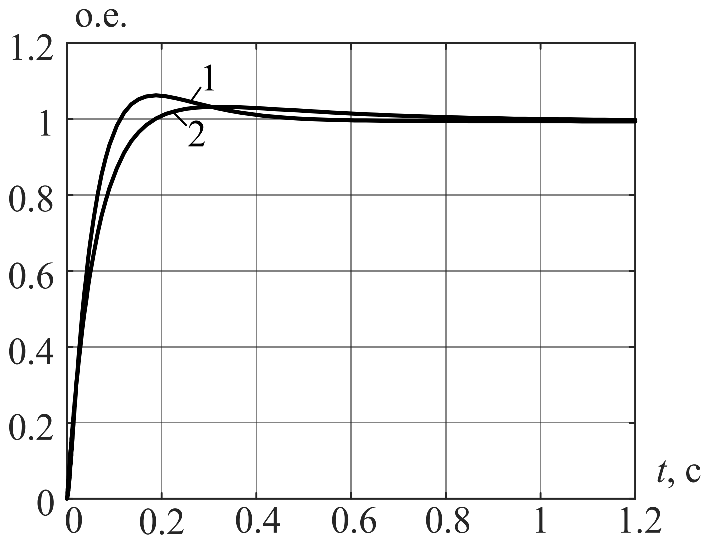


Рисунок 45 – Процессы изменения частоты (1) и напряжения (2) ЭЭУ в нормальном режиме работы

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

Для исследования системы при критических (предаварийных) условиях работы требуется выполнить моделирование при дрейфе параметров объекта $T_{\text{М}}(t)$, $T_{\text{Я1}}(t)$, $T_{\text{Я2}}(t)$. Отклонение данных показателей качества возможно в связи с изменением напряжения управления и реакцией якоря. Требуется выполнить рассмотрение реакции системы при увеличении и уменьшении постоянных времени объекта (табл. 3 и 4). Семейства временных характеристик при «отрицательном» дрейфе (в сторону уменьшения) постоянных времени приведены на рис. 46 и 47.

Таблица 3 – Исследование показателей качества управления при «отрицательном» дрейфе параметров

Параметры объекта		σ, %		$t_{ПП}$, с		$e_{уст}$	
		v	u	v	u	v	u
$T_М(t)$=const, $T_{Я2}(t)$=const	$T_{Я1}(t)\downarrow$10%	6,942	2,863	0,272	0,129	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\downarrow$20%	6,841	1,959	0,276	0,120	0,006	0,0045
$T_М(t)$=const, $T_{Я1}(t)$=const	$T_{Я2}(t)\downarrow$10%	7,042	3,666	0,267	0,139	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\downarrow$20%	7,243	3,666	0,265	0,139	0,006	0,0045
$T_{Я1}(t)$=const, $T_{Я2}(t)$=const	$T_М(t)\downarrow$10%	6,036	3,767	0,232	0,139	0,006	0,0045
	$T_М(t)\downarrow$20%	5,131	3,867	0,182	0,139	0,006	0,0045
$T_М(t)$=const	$T_{Я1}(t)\downarrow$10%, $T_{Я2}(t)\downarrow$10%	7,042	2,863	0,270	0,129	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\downarrow$20%, $T_{Я2}(t)\downarrow$20%	7,243	1,959	0,273	0,120	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\downarrow$20%, $T_{Я1}(t)\downarrow$10%	7,243	2,863	0,269	0,130	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\downarrow$10%, $T_{Я1}(t)\downarrow$20%	7,042	1,959	0,274	0,120	0,006	0,0045
$T_{Я1}(t)$=const	$T_М(t)\downarrow$10%, $T_{В2}(t)\downarrow$10%	6,137	3,767	0,231	0,139	0,006	0,0045
	$T_М(t)\downarrow$20%, $T_{Я2}(t)\downarrow$20%	5,533	3,867	0,188	0,140	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\downarrow$20%, $T_М(t)\downarrow$10%	6,439	3,767	0,231	0,139	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\downarrow$10%, $T_М(t)\downarrow$20%	5,332	3,867	0,186	0,139	0,006	0,0045
$T_{Я2}(t)$=const	$T_М(t)\downarrow$10%, $T_{Я1}(t)\downarrow$10%	6,036	2,963	0,235	0,130	0,006	0,0045
	$T_М(t)\downarrow$20%, $T_{Я1}(t)\downarrow$20%	5,131	2,160	0,185	0,121	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\downarrow$20%, $T_М(t)\downarrow$10%	6,036	2,059	0,239	0,120	0,0060	0,0045
	$T_{Я1}(t)\downarrow$10%, $T_М(t)\downarrow$20%	5,131	3,064	0,182	0,130	0,0060	0,0045

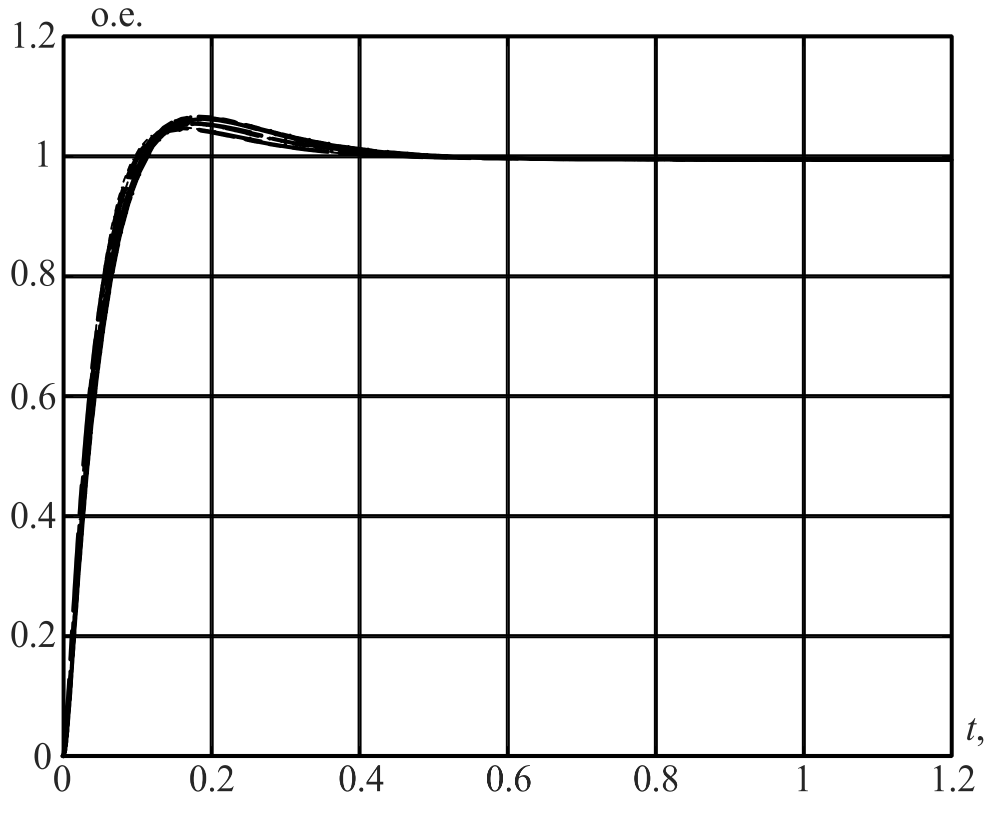


Рисунок 46 – Семейство временных характеристик по скорости (при «отрицательном» дрейфе параметров)

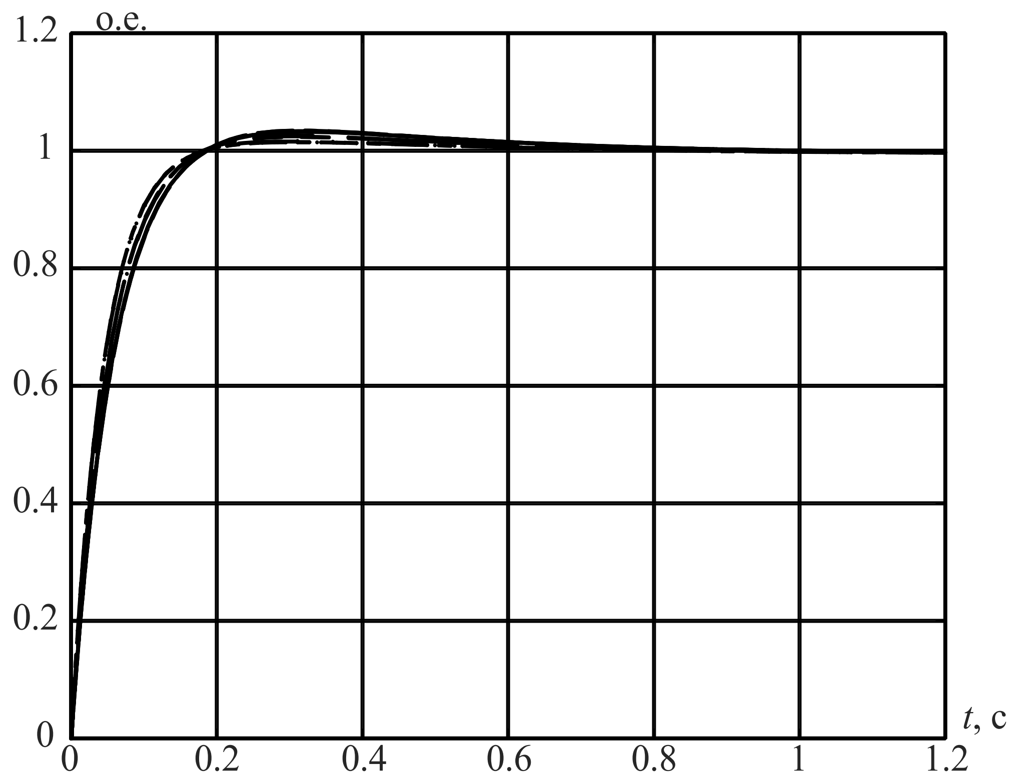
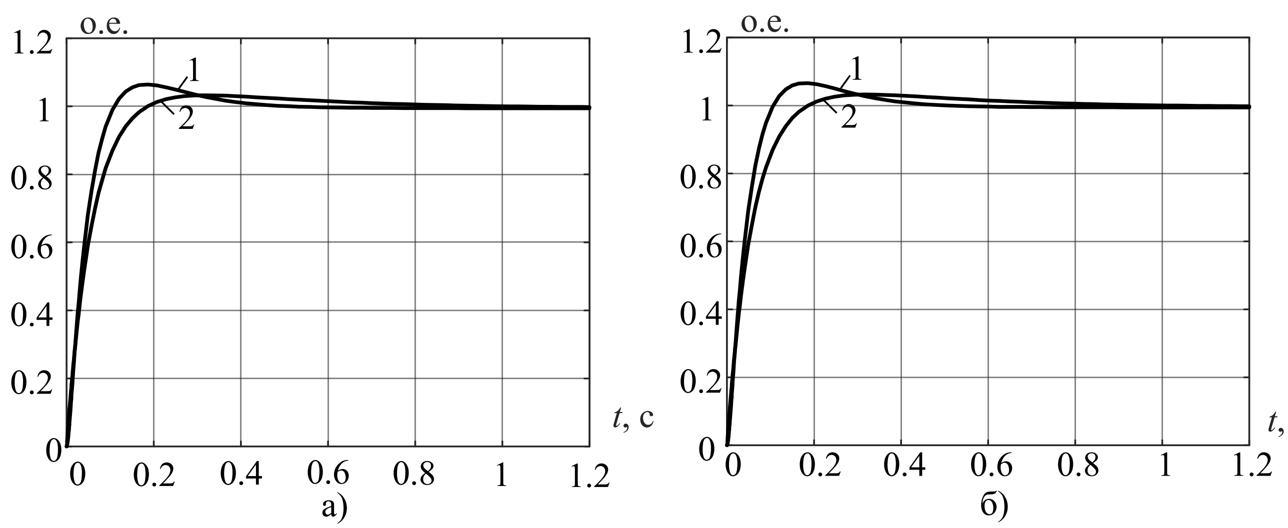


Рисунок 47 – Семейство временных характеристик по напряжению (при «отрицательном» дрейфе параметров)

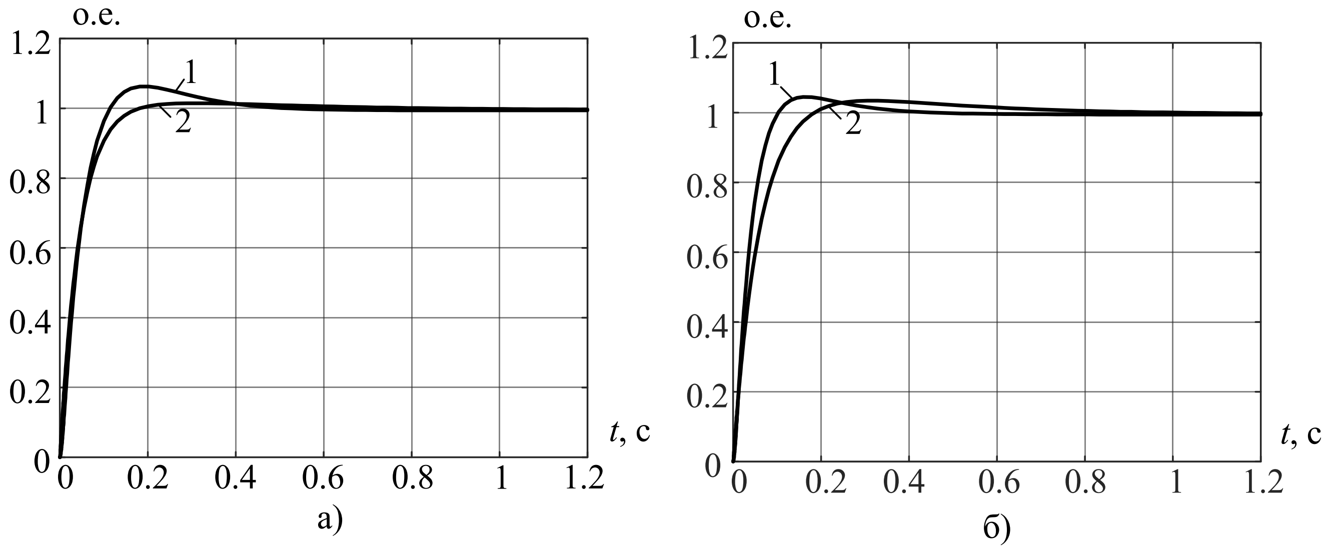


1 – переходный процесс по частоте, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{М}(t)$=const, $T_{Я1}(t)$=const, $T_{Я2}(t)\downarrow 10\%$; б) $T_{М}(t)$=const, $T_{Я1}(t)$=const, $T_{Я2}(t)\downarrow 20\%$

Рисунок 48 – Переходные процессы

При постоянных параметрах $T_{М}(t)$, $T_{Я1}(t)$ и дрейфе постоянной времени синхронного генератора $T_{Я2}(t)$ наблюдается (рис. 48) наименьшее отклонение показателей качества процесса от номинальных. С изменением величины отклонения $T_{Я2}(t)$ качество процесса по напряжению не изменяется.



1 – переходный процесс по частоте, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{М}(t)$=const, $T_{В2}(t)$=const, $T_{В1}(t)$↓20%; б) $T_{В2}(t)$=const, $T_{В1}(t)$= const, $T_{М}(t)$↓20%

Рисунок 49 – Переходные процессы

Наилучшие показатели величин перерегулирования и времени переходного процесса по частоте достигаются при дрейфе постоянной времени приводного двигателя $T_{М}(t)$↓20% (рис. 49). Наилучшие показатели качества по напряжению получаются при инертных значениях постоянных времени приводного двигателя $T_{М}(t)$ и синхронного генератора $T_{В2}(t)$.

Наибольшее отклонение от номинальных показателей качества при дрейфе нескольких постоянных времени происходит в случае неизменной постоянной времени $T_{Я1}(t)$ и изменяющихся постоянных времени приводного двигателя $T_{М}(t)$ и синхронного генератора $T_{Я2}(t)$.

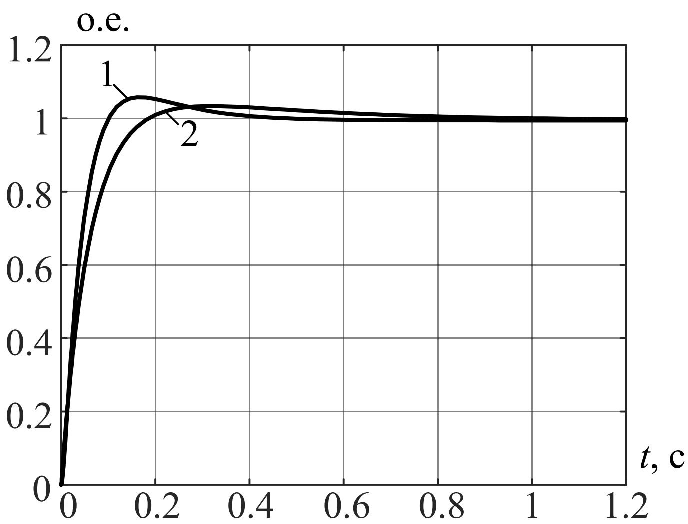


Рисунок 50 – Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2) при $T_{\text{М}}(t)\downarrow 10\%$, $T_{\text{Я1}}(t)$=const, $T_{\text{Я2}}(t)\downarrow 20\%$

Из моделирования переходных процессов видно (рис. 50), что при уменьшении постоянных времени объекта автономной электроэнергетической установки следует, что даже в случае наибольшего отклонения показателей от номинальных величины перерегулирования и времени переходного процесса соответствуют требуемым показателям качества.

При уменьшении в течении времени параметров непрерывной системы показатели качества не выходят за пределы требуемых значений (рис. 46 и 47). Пересчет регулятора не требуется.

Результаты исследования системы при «положительном» дрейфе постоянных времени приведены в табл. 4. Семейства временных характеристик приведены на рис. 51 и 52.

Таблица 4 – Исследование показателей качества управления при «положительном» дрейфе параметров

Параметры объекта		σ, %		$t_{\text{ПП}}$, с		$e_{\text{уст}}$	
		v	u	v	u	v	u
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{Я2}}(t)$=const	$T_{\text{Я1}}(t)\uparrow 10\%$	6,841	4,470	0,265	0,148	0,006	0,0045
	$T_{\text{Я1}}(t)\uparrow 20\%$	6,942	5,274	0,262	0,410	0,006	0,0045
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{Я1}}(t)$=const	$T_{\text{Я2}}(t)\uparrow 10\%$	6,740	3,666	0,269	0,138	0,006	0,0045
	$T_{\text{Я2}}(t)\uparrow 20\%$	6,539	3,666	0,270	0,138	0,006	0,0045

Продолжение таблицы 4

Параметры объекта		σ, %		$t_{ПП}$, с		$e_{уст}$	
		v	*u*	*v*	*u*	*v*	*u*
$T_{В1}(t)$=const, $T_{Я2}(t)$=const	$T_{М}(t)\uparrow$10%	7,746	3,566	0,300	0,138	0,006	0,0045
	$T_{М}(t)\uparrow$20%	8,551	3,466	0,327	0,138	0,006	0,0045
$T_{М}(t)$=const	$T_{Я1}(t)\uparrow$10%, $T_{Я2}(t)\uparrow$10%	6,740	4,470	0,266	0,148	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\uparrow$20%, $T_{Я2}(t)\uparrow$20%	6,539	5,274	0,264	0,409	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\uparrow$20%, $T_{Я1}(t)\uparrow$10%	6,539	4,470	0,267	0,148	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\uparrow$10%, $T_{Я1}(t)\uparrow$20%	6,740	5,274	0,263	0,409	0,006	0,0045
$T_{Я1}(t)$=const	$T_{М}(t)\uparrow$10%, $T_{Я2}(t)\uparrow$10%	7,545	3,566	0,301	0,138	0,006	0,0045
	$T_{М}(t)\uparrow$20%, $T_{Я2}(t)\uparrow$20%	8,149	3,466	0,330	0,137	0,006	0,0045
	$T_{Я2}(t)\uparrow$20%, $T_{М}(t)\uparrow$10%	7,344	3,566	0,303	0,138	0,006	0,0045
	$T_{В2}(t)\uparrow$10%, $T_{М}(t)\uparrow$20%	8,350	3,466	0,329	0,138	0,006	0,0045
$T_{В2}(t)$=const	$T_{М}(t)\uparrow$10%, $T_{Я1}(t)\uparrow$10%	7,746	4,370	0,297	0,147	0,006	0,0045
	$T_{М}(t)\uparrow$20%, $T_{Я1}(t)\uparrow$20%	8,551	5,073	0,321	0,387	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\uparrow$20% $T_{М}(t)\uparrow$10%	7,746	5,173	0,294	0,400	0,006	0,0045
	$T_{Я1}(t)\uparrow$10%, $T_{М}(t)\uparrow$20%	8,451	4,370	0,325	0,146	0,006	0,0045

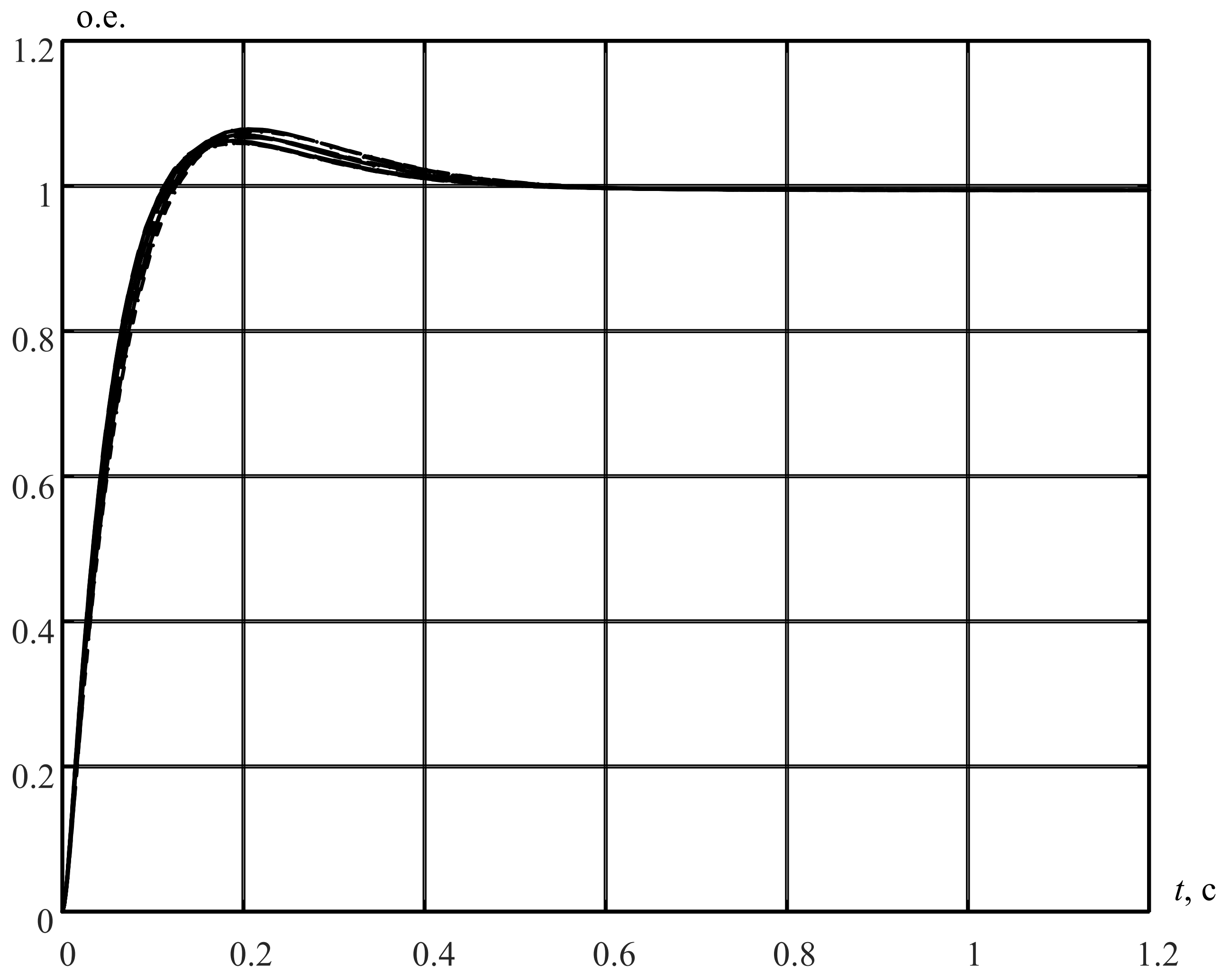


Рисунок 51 – Семейство временных характеристик по скорости (при «положительном» дрейфе параметров)

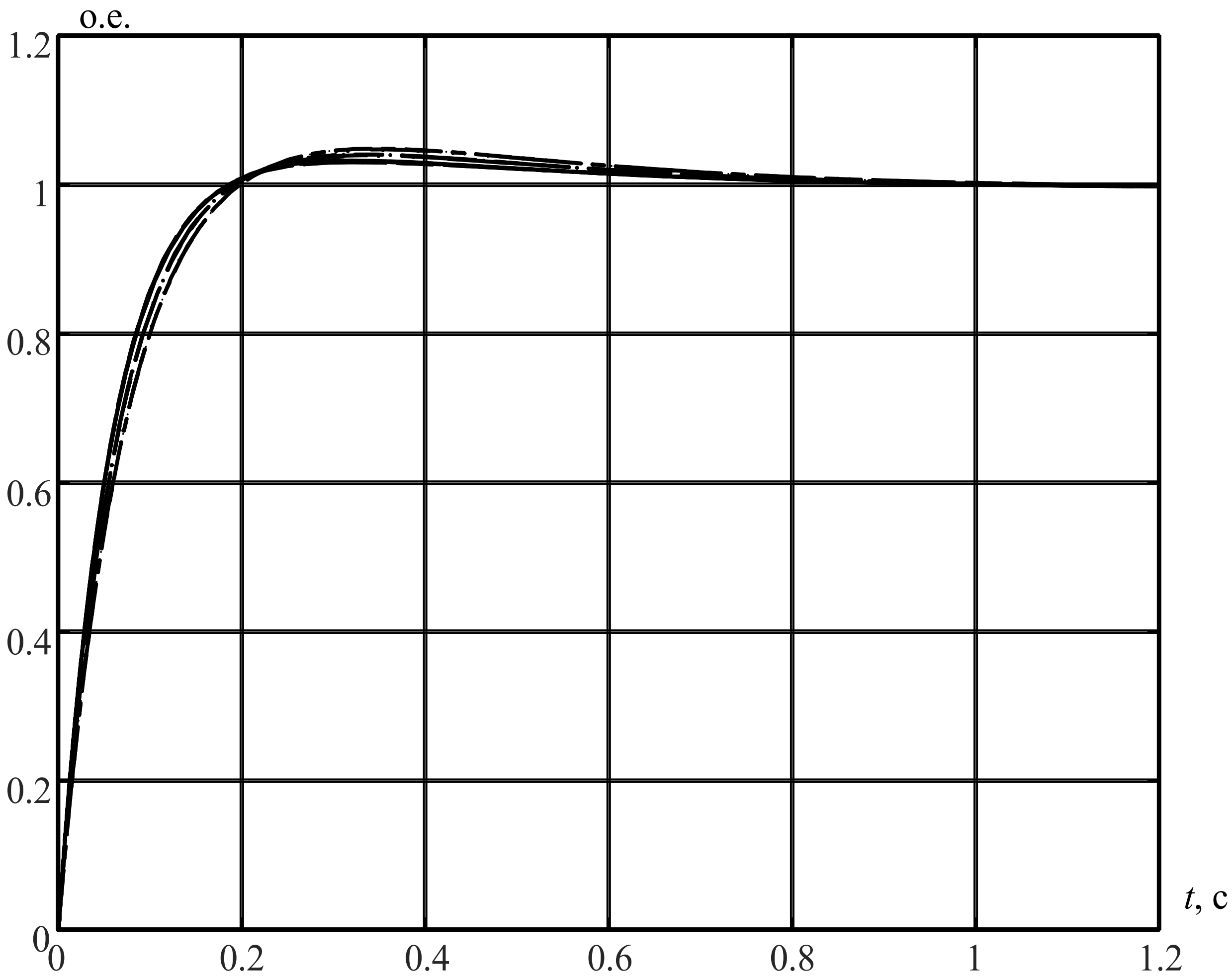
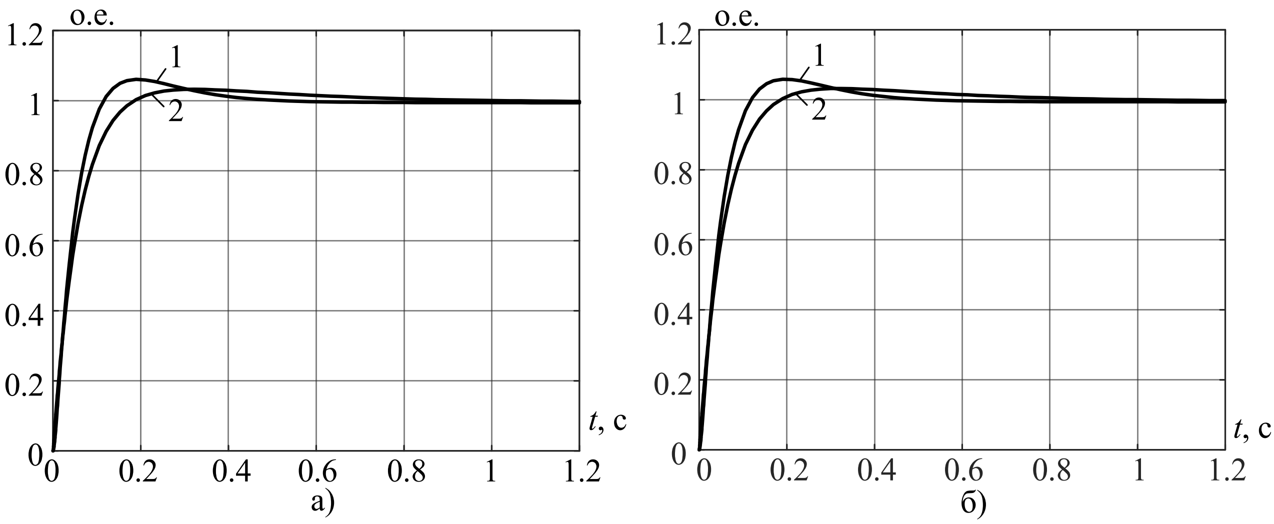


Рисунок 52 – Семейство временных характеристик по напряжению (при «положительном» дрейфе параметров)



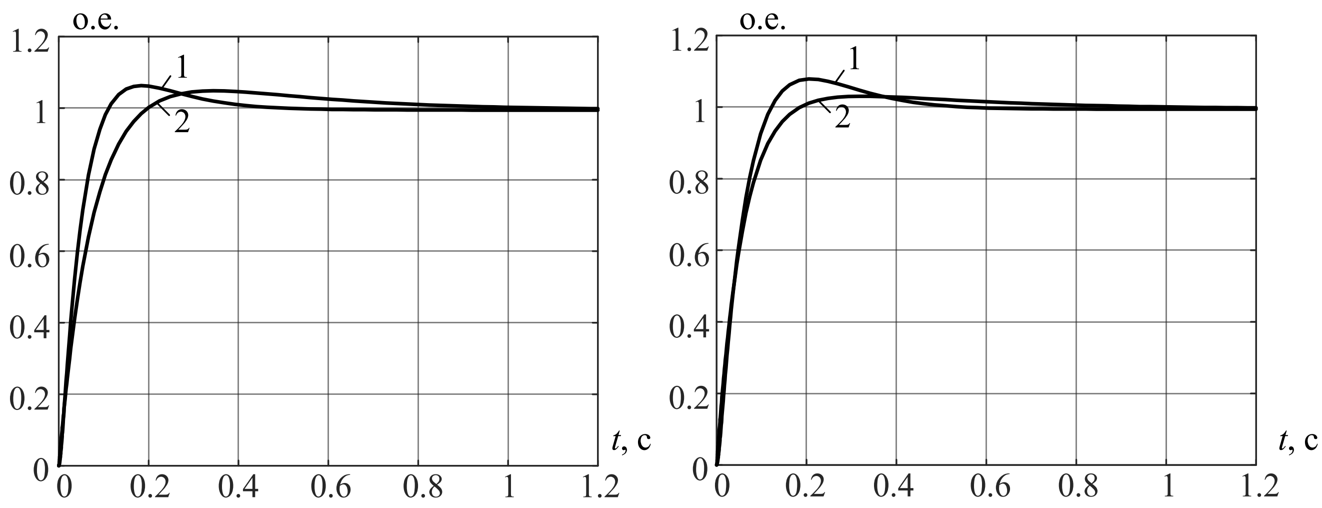
1 – переходный процесс по частоте, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{Я1}}(t)$=const, $T_{\text{Я2}}(t)\uparrow$10%; б) $T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{Я1}}(t)$=const, $T_{\text{Я2}}(t)\uparrow$20%

Рисунок 53 – Переходные процессы

При дрейфе постоянной времени синхронного генератора $T_{В2}(t)$ показатели качества по частоте изменяются незначительно (рис. 53). Величины перерегулирования и времени переходного процесса по напряжению остаются постоянными.

На рис. 54 видно, что при дрейфе постоянной времени синхронного генератора $T_{Я1}(t)$ можно наблюдать наибольшее отклонение от номинальных показателей качества величин перерегулирования и времени переходного процесса по напряжению. При фиксированных значениях постоянных времени синхронного генератора $T_{Я1}(t)$, $T_{Я2}(t)$ и ↑20% отклонении постоянной времени приводного двигателя $T_{М}(t)$ происходит наибольшее ухудшение показателей качества по частоте (рис. 54, б).



а) б)

1 – переходный процесс по частоте, 2 – переходный процесс по напряжению

а) $T_{М}(t)$=const, $T_{Я2}(t)$=const, $T_{Я1}(t)$↑20%; б) $T_{Я2}(t)$=const, $T_{Я1}(t)$= const, $T_{М}(t)$↑20%

Рисунок 54 – Переходные процессы

Дрейф постоянной времени синхронного генератора $T_{Я2}(t)$ не оказывает значительного влияния на качество переходного процесса системы. Величины перерегулирования и времени переходного процесса по частоте и напряжению минимально отклоняются от исходных значений.

В связи с малым влиянием постоянной времени синхронного генератора $T_{В2}(t)$ на качество переходного процесса системы требуется определить соотношение отклонений параметров постоянных времени объекта $T_{Я1}(t)$ и $T_{М}(t)$, при которых достигается наибольшая величина перерегулирования и наибольшая продолжительность времени переходного процесса.

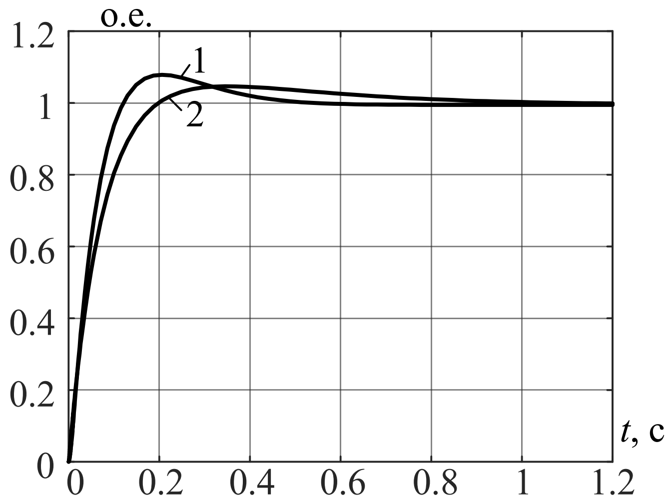


Рисунок 55 – Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2) при $T_{М}(t)$↑20%, $T_{Я1}(t)$↑20%, $T_{Я2}(t)$=const

При инертной постоянной времени синхронного генератора $T_{Я2}(t)$ и ↑20% отклонении параметров $T_{Я1}(t)$, $T_{М}(t)$ (рис. 55) наблюдается наихудший режим работы по двум регулируемым величинам. Величины перерегулирования по частоте и напряжению равны 8,56% и 5,07% соответственно. Время переходного процесса увеличивается с 0,27 с по частоте и 0,138 с по напряжению до 0,321 с по частоте и 0,387 с по напряжению. Величина установившейся ошибки не меняется.

Показатели качества при увеличении постоянных времени объекта остаются в пределах требуемых значений, при этом в отличии от случая уменьшения постоянных $T_{Я1}(t)$, $T_{Я2}(t)$ и $T_{М}(t)$ наблюдается ощутимый рост величин перерегулирования и времени переходного процесса по напряжению и частоте. Для увеличения точности системы требуется выполнить перерасчёт регулятора для режима работы, при котором показатели имеют наибольшее отклонение.

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $T_{\text{М}}(t)$↑20%, $T_{\text{Я1}}(t)$↑20%, $T_{\text{Я2}}(t)$=const) рассматриваемой автономной электроэнергетической установки обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения варьируемых параметров: k_{v}=544, $T_{\upsilon1}$=2,53 с, $T_{\upsilon2}$=0,15 с, $T_{\upsilon3}$=1,751 с, $T_{\upsilon4}$=0,0054 с, $T_{\upsilon5}$=3 с, k_{u}=170, T_{u1}=0,1 с, T_{u2}=0,001 с, T_{u3}=0,005 с, $T_{\text{ОС1}}$=0,0259 с, $T_{\text{ОС2}}$=0,31 с.

Переходные процессы по скорости и напряжению при дрейфе параметров $T_{\text{М}}(t)$, $T_{\text{В1}}(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведен на рис. 56.

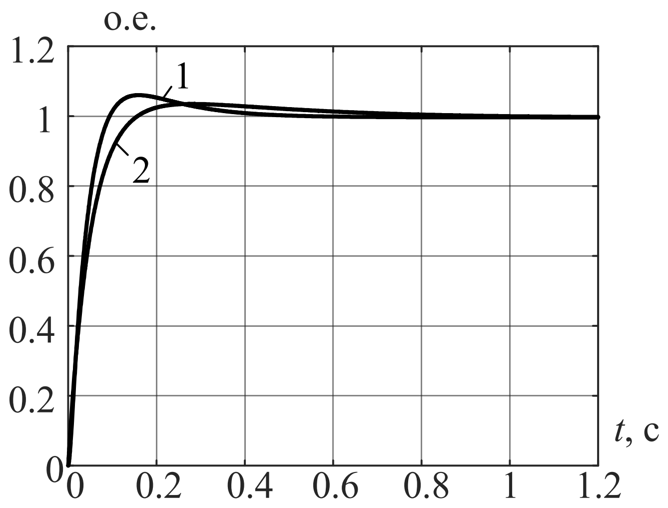


Рисунок 56 – Переходные процессы по частоте (1) и напряжению (2) при $T_{\text{М}}(t)$↑20%, $T_{\text{Я1}}(t)$↑20%, $T_{\text{Я2}}(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %		$t_{\text{ПП}}$, с		$e_{\text{уст}}$	
		v	u	v	u	v	u
$T_{\text{Я2}}(t)$=const	$T_{\text{Я1}}(t)$↑20% $T_{\text{М}}(t)$↑20%	6,747	3,967	0,231	0,117	0,007	0,0045

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что величины перерегулирования и времени переходного процесса по частоте улучшились, перерегулирование и время переходного процесса по напряжению также уменьшились. Минимально увеличилась установившаяся ошибка по частоте (на 0,001).

Так как повышение частоты оборотов генератора на старте может приводить к возможному износу, необходимо скорректировать требуемые показатели качества: переходный процесс по напряжению и частоте оборотов должен иметь экспоненциальный характер, время переходного процесса как по напряжению, так и по частоте не должно превышать 0,2 с.

Для достижения поставленных показателей качества требуется выполнить изменение в звене регулятора. Пересчитанные значения варьируемых параметров: k_v=68000, $T_{\upsilon 1}$=2,53 с, $T_{\upsilon 2}$=0,15 с, $T_{\upsilon 3}$=1,751 с, $T_{\upsilon 4}$=0,0054 с, T_{υ}=3 с, k_u=200, T_{u1}=0,01 с, T_{u2}=0,000001 с, T_{u3}=0,005 с, $T_{\text{ОС}1}$=0,037 с, $T_{\text{ОС}2}$=0,62 с.

Переходные процессы по скорости и напряжению с измененными коэффициентами регуляторов приведены на рис. 57.

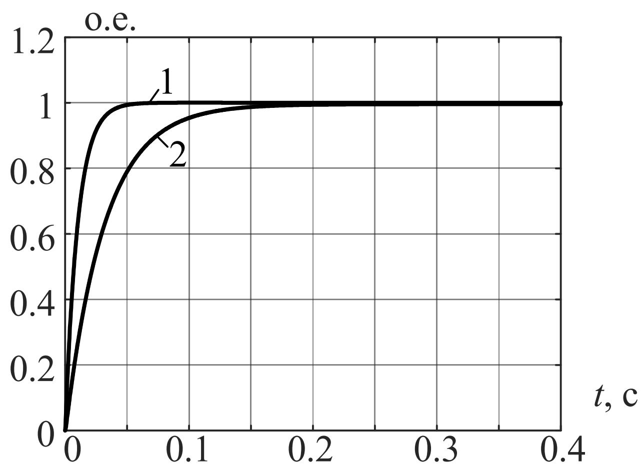


Рисунок 57 – Переходные процессы при корректировке параметров регуляторов под новые технические требования по частоте (1) и напряжению (2)

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта	σ, %		$t_{\text{ПП}}$, с		$e_{\text{уст}}$	
	v	u	v	u	v	u
$T_{\text{М}}(t)$=const, $T_{\text{Я2}}(t)$=const, $T_{\text{Я1}}(t)$=const	0	0	0,03	0,095	0	0,0041

Полученные показатели качества полностью соответствуют заявленным требованиям. При переходных процессах данного вида уменьшается вероятность выхода генератора из строя, обеспеченное время переходного процесса гарантирует быстрый выход на номинальные режимы работы.

4.2 Синтез параметров экстремальной системы автоматического управления торможением колес транспортного средства

В качестве второй прикладной задачи рассматриваются системы торможения и, в частности, системы автоматического управления торможением колес транспортного средства.

Современные САУ ТК ТС выполняют функции антиблокировочных систем. Они состоят из электронного блока управления – регулятора торможения, системы дистанционного управления давлением жидкости или газа в силовых цилиндрах тормозов, и, непосредственно, из объекта управления – фрикционных дисковых тормозов [18, 44].

Во время торможения колес возникают ситуации, когда под действием тормозного момента колесо за сотые доли секунды блокируются и в таком состоянии скользит по тормозной поверхности. При этом может произойти существенное истирание пневматика колеса и даже его разрушение. САУ ТК ТС должна обеспечивать не только противоблокировочное торможение, но и автоматическое определение момента начала торможения.

При качении колеса происходят различные деформации шины, которые сопровождаются необратимыми потерями. Они определяют сопротивления качения колеса, которые обусловлены внутренним трением в шине, проскальзыванием элементов шины по опорной поверхности, присасыванием шины к опорной поверхности, аэродинамическим сопротивлением. При рассмотрении качения колеса большое практическое значение имеет коэффициент продольной реакции колеса или коэффициент сцепления колеса μ.

Интенсивность торможения зависит от сил и моментов сопротивления, которые создаются в процессе торможения колеса. В этой связи важен момент сцепления $M_{сц}$, который зависит от радиуса качения колеса. $M_{сц}$ представляет собой существенно нелинейную функцию из-за его зависимости от коэффициента сцепления μ. Коэффициент сцепления μ нелинейно зависит от проскальзывания S эластичной шины колеса, а также от скорости транспортного средства, состояния опорной поверхности, давления воздуха в шине, усадки пневматика, рисунка протектора шины, эластичных свойств шины и многих других факторов [112, 135]. В связи с этим систему автоматического управления торможением колес следует считать многорежимной.

Коэффициент сцепления обычно оценивают по семейству характеристик сцепления μ(S), представленных на рис. 58.

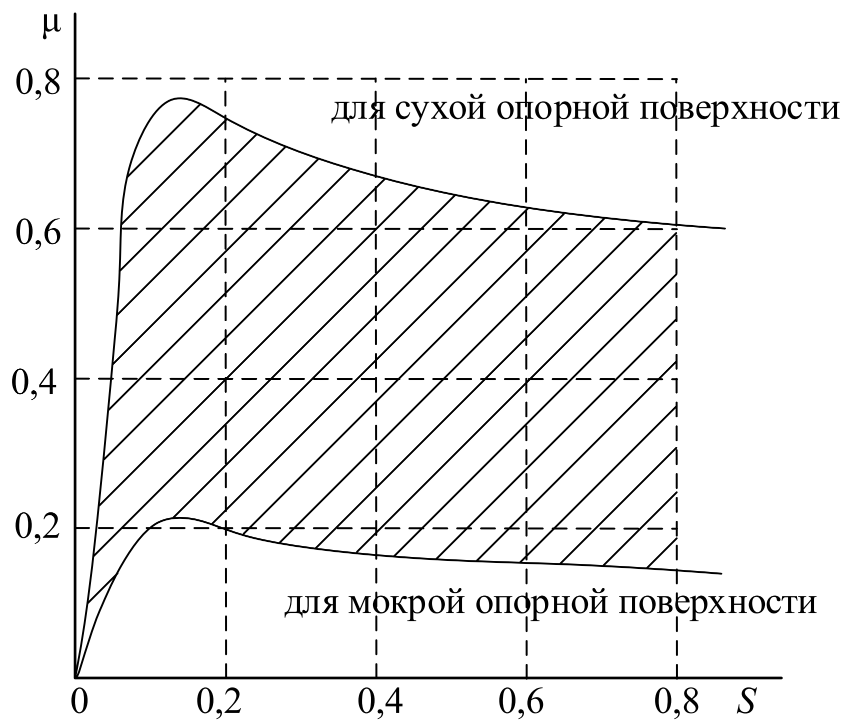


Рисунок 58 – Экстремальная характеристика μ=μ(S)

Проскальзывание (или скольжение) колеса определяется выражением

$$S = \frac{\omega_C - \omega_K}{\omega_C},$$

где ω_C – угловая скорость «свободного» (т.е. не тормозящего) колеса, ω_K – угловая скорость тормозного колеса.

Необходимо заметить, что на рис. 58 показан в основном качественный вид зависимостей $\mu(S)$, который отражает экстремальный характер этих кривых, т.е. для каждого состояния опорной поверхности, скорости объекта, давления в шине, рисунка протектора, жесткости пневматика и т.д. имеется своя зависимость $\mu(S)$. По этой причине всегда сложно оценить динамику торможения конкретного колеса. Даже для одного и того же ТС в зависимости от степени изношенности протектора шины можно получить совершенно различные зависимости $\mu(S)$ и, соответственно, динамику торможения.

Для решения задачи оптимального управления торможением колес ТС целесообразно на экстремальной зависимости $\mu(S)$ отыскивать максимум μ, т.е. при торможении реализовывать максимальное значение коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью.

С целью определения величины скольжения S тормозного колеса или абсолютного проскальзывания

$$\Delta\omega = \omega_C - \omega_K$$

необходимо измерять скорость движения объекта или так называемую скорость «свободного» (не тормозящего) колеса. Проблема может быть решена с помощью установки датчика угловой скорости колеса, использования датчика скорости навигационной системы, измерения скорости с помощью доплеровской РЛС и др.

Для достижения наилучшего качества переходного процесса синтез параметров регулятора экстремальной системы САУ ТК решается в три этапа.

На первом этапе решения задачи синтеза параметров САУ рассматриваемая математическая модель принимается достаточно простой и базирующейся на основах физических процессов функционирования систем торможения.

На втором этапе происходит уточнение рассчитанных коэффициентов при помощи решения задачи оптимизации с использованием полной математической модели процесса торможения, в которой помимо основ физических процессов учитывается динамика САУ ТК. На базе данных, полученных на первом этапе синтеза, производится уточнение параметров регулятора с помощью создания аналоговых моделей системы, натуральных макетов регулятора, воссоздающих процесс торможения в реальном масштабе времени.

На третьем, заключительном, этапе определения параметров регулятора производится оценка корректности его работы на моделях, максимально приближенных к реальным. Число испытаний определяется качеством и корректностью синтеза регулятора на начальных этапах проектирования.

В случае торможения на сухой поверхности САУ ТК обеспечивает нахождение рабочей точки на левом склоне характеристики $\mu=\mu(S)$ вблизи ее экстремума (рис. 58), что обеспечивает экспоненциальное уменьшение скорости тормозящегося колеса. При торможении на мокрой поверхности коэффициент сцепления имеет малое значение и САУ ТК обеспечивает нахождение рабочей точки в экстремуме характеристики $\mu=\mu(S)$ и совершение автоколебаний. При этом амплитуда колебаний относительно проскальзывания охватывает значение, которому соответствует максимальный показатель коэффициента сцепления при данном режиме работы.

Синтез параметров регулятора САУ ТК возможен лишь при рассмотрении режима торможения объекта при постоянной угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=const. В данном режиме торможения возможна аппроксимация характеристики $\mu=\mu(S)$ зависимостью коэффициента сцепления μ от разности угловых скоростей свободно катящегося и тормозящегося колес $\Delta\omega=\omega_C-\omega_K$, поскольку при ω_C=const экстремумы указанных характеристик совпадают. Следовательно, реализация в САУ с синтезированными параметрами желаемого программного движения $\Delta\omega^0(t)$ будет означать, что такой же характер будет носить изменение во времени величины относительного проскальзывания S. Кроме того, рассмотрение режима торможения с постоянной скоростью приводит к упрощению модели САУ ТК, поскольку в данном случае в ней будет отсутствовать звено, моделирующее уменьшение сигнала ω_C в процессе торможения.

В качестве математической модели синтезируемой экстремальной системы управления рассматривается экспериментально полученная упрощенная модель САУ ТК, структурная схема которой показана на рис. 59 [44].

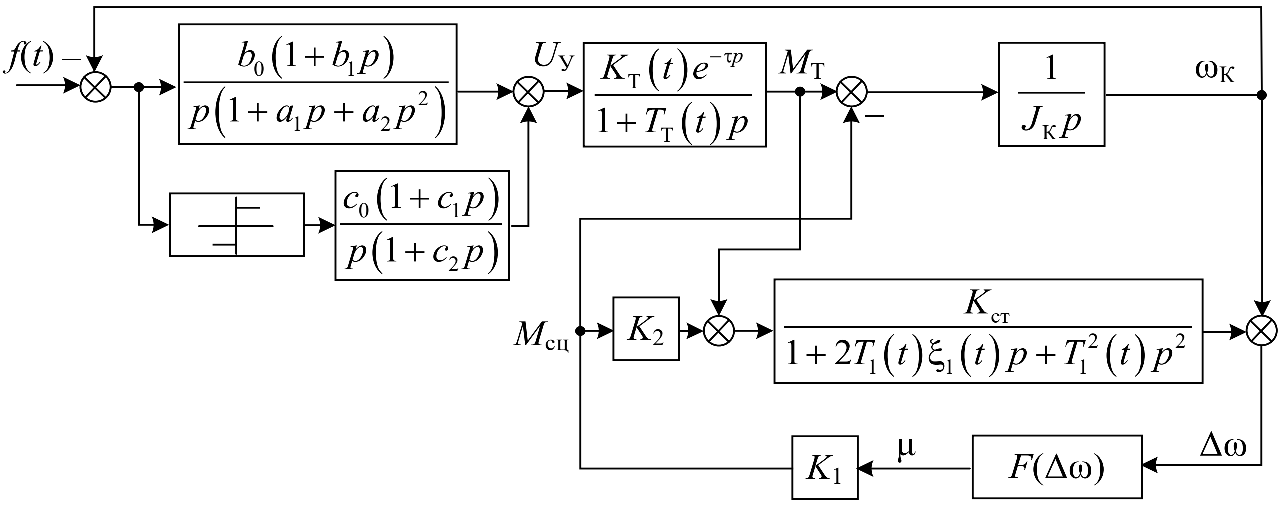


Рисунок 59 – Структурная схема упрощенной модели САУ ТК

Передаточные функции звеньев неизменяемой части системы:

$W_1(p)=\dfrac{K_Т(t)e^{-\tau p}}{1+T_Т(t)p}$ – передаточная функция исполнительной части, где $K_Т$=3582 Н·м·В$^{-1}$ – коэффициент передачи исполнительной части САУ ТК; τ=0,01 с – запаздывание, обусловленное движением жидкости в гидравлической системе передачи давления; $T_{Т}$=0,06 с – постоянная времени тормоза; $W_2(p)=\dfrac{1}{J_К p}$ – передаточная функция объекта управления, где $J_К$=26,5 Н·м·с^2 – приведенный момент инерции тормозящегося колеса в плоскости перпендикулярной направлению качения; $W_{ст}(p)=\dfrac{K_{ст}(t)p}{1+2T_1(t)\xi_1(t)p+T_1^2(t)p^2}$ – передаточная функция стойки, где $K_{ст}$=0,485814·10^{-6} (Н·м)$^{-1}$ – коэффициент передачи модели стойки;

T_1=0,0176 с – постоянная времени стойки; ξ_1=0,04544 – показатель колебательности стойки.

На рис. 59 обозначены: $K_1=P_K R_K$, здесь P_K – нагрузка, приведенная к тормозящемуся колесу; R_K – радиус тормозящегося колеса; $F=\mu(\Delta\omega)$ – характеристика сцепления; $f(t)=\Delta\omega_Э\cdot 1(t)$ – внешнее воздействие, амплитуда которого соответствует $\Delta\omega_Э$; $U_У$ – сигнал управления, поступающий с выхода регулятора в исполнительную часть системы; $M_Т$ – тормозной момент, создаваемый на колесо тормозным приводом; $M_{сц}$ – момент сцепления тормозящегося колеса с опорной поверхностью.

Работа САУ ТК рассматривается при трех значениях $\omega_С$, соответствующих максимальной скорости 96,3 рад/с, двум третям (64,2 рад/с) и одной трети (32,1 рад/с) от максимальной соответственно.

В качестве синтезируемого регулятора рассматривается оператор управления с варьируемыми параметрами b_0, b_1, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2. В рассматриваемой математической модели используется характеристика $\mu=\mu(\Delta\omega)$, аппроксимированная степенной функцией вида

$$\mu = \mu_э - k_1\left(\Delta\omega - \Delta\omega_э\right)^2. \qquad (22)$$

Значения коэффициентов аппроксимации k_1 и параметров аппроксимирующей степенной функции для различных режимов торможения приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Значения коэффициентов аппроксимации характеристики сцепления

Параметры	Сухая опорная поверхность			Мокрая опорная поверхность		
$\omega_С$	96,3	64,2	32,1	96,3	64,2	32,1
$\mu_Э$	0,66	0,64	0,63	0,22	0,285	0,325
$\Delta\omega_Э$	7,223	5,393	2,889	17,72	11,47	5,85
k_1	0,01265	0,022	0,0755	0,000702	0,00216	0,00949

В соответствии со структурной схемой математической модели САУ ТК минимальной реализации, приведенной на рис. 59, уравнение движения, записанное относительно входных координат нелинейностей

$$\begin{cases} U_{\varepsilon}(t)\Big(1+W_1(p)W_2(p)W_{\text{Р}1}\big(c_k(t),p\big)\Big)+ \\ +F_2\big[U_{\varepsilon}(t)\big]W_1(p)W_2(p)W_{\text{Р}2}\big(c_k(t),p\big)-K_1W_2(p)F_1\big[\Delta\omega(t)\big]=f(t), \\ U_{\varepsilon}(t)\Big(1+W_1(p)W_3(p)W_{\text{Р}1}\big(c_k(t),p\big)\Big)+ \\ +F_2\big[U_{\varepsilon}(t)\big]W_1(p)W_3(p)W_{\text{Р}2}\big(c_k(t),p\big)+ \\ +\Delta\omega(t)+K_1K_2W_3(p)F_1\big[\Delta\omega(t)\big]=f(t), \end{cases} \tag{23}$$

где $W_{\text{Р}1}(c_k(t),p)$, $W_{\text{Р}2}(c_k(t),p)$ – передаточные функции оператора управления; $F_2[U_{\varepsilon}(t)]$ – нелинейное звено, стоящее в операторе управления; $U_{\varepsilon}(t)$ – сигнал на входе оператора управления.

С учетом выражений, определяющих полиномы числителей и знаменателей передаточных функций $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$, $W_{\text{Р}1}(c_k(t),p)$, $W_{\text{Р}2}(c_k(t),p)$, приводим уравнение (23) к виду

$$\begin{cases} Q_1\big(c_k(t),D\big)U_{\varepsilon}(t)+Q_2\big(c_k(t),D\big)U_{\varepsilon}(t-\tau)+R_1\big(c_k(t),D\big)F_2\big[U_{\varepsilon}(t-\tau)\big]- \\ -R_2\big(c_k(t),D\big)F_1\big[\Delta\omega(t)\big]=S_1\big(c_k(t),D\big)f(t), \\ Q_3\big(c_k(t),D\big)U_{\varepsilon}(t)+Q_4\big(c_k(t),D\big)U_{\varepsilon}(t-\tau)+Q_5\big(c_k(t),D\big)\Delta\omega(t)+ \\ +R_3\big(c_k(t),D\big)F_2\big[U_{\varepsilon}(t-\tau)\big]+R_4\big(c_k(t),D\big)F_1\big[\Delta\omega(t)\big]=S_2\big(c_k(t),D\big)f(t), \end{cases}$$

где

$$Q_1\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{7}a_{1i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ Q_2\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{1}a_{2i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$Q_3\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{8}a_{3i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ Q_4\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{2}a_{4i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$Q_5\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{8}a_{5i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ R_1\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{4}b_{1i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$R_2\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{6}b_{2i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ R_3\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{5}b_{3i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$R_4\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{7}b_{4i}\big(c_k(t)\big)D^i;\ S_1\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{7}e_{1i}\big(c_k(t)\big)D^i;$$

$$S_2\big(c_k(t),D\big)=\sum_{i=0}^{8}e_{2i}\big(c_k(t)\big)D^i,$$

здесь

$$a_{10}=a_{11}=a_{12}=e_{10}=e_{11}=e_{12}=0;\ a_{13}=e_{13}=J_{\text{К}};$$
$$a_{14}=e_{14}=J_{\text{К}}\left(a_1+c_2+T_1(t)\right);\ a_{15}=e_{15}=J_{\text{К}}\left(a_1c_2+c_2T_{\text{Т}}(t)+a_1T_1(t)+a_2\right);$$
$$a_{16}=e_{16}=J_{\text{К}}\left(a_1c_2T_{\text{Т}}(t)+a_2c_2+a_2T_1(t)\right);$$
$$a_{17}=e_{17}=J_{\text{К}}a_2c_2T_{\text{Т}}(t);\ a_{20}=b_0;\ a_{21}=b_0b_1;$$
$$a_{30}=a_{31}=a_{50}=a_{51}=e_{20}=e_{21}=0;\ a_{32}=a_{52}=e_{22}=J_{\text{К}};$$
$$a_{33}=a_{53}=e_{23}=J_{\text{К}}\left(a_1+2T_1(t)\xi_1(t)\right);$$
$$a_{34}=a_{54}=e_{24}=J_{\text{К}}\left(a_2+c_2+2a_1T_1(t)\xi_1(t)+T_1^2(t)\right);$$
$$a_{35}=a_{55}=e_{25}=J_{\text{К}}\left(a_1c_2+2T_1(t)\xi_1(t)(a_1+c_2)+a_1T_1^2(t)\right);$$
$$a_{36}=a_{56}=e_{26}=J_{\text{К}}\left(a_2c_2+2a_1c_1T_1(t)\xi_1(t)+T_1^2(t)(a_2+c_2)\right);$$
$$a_{37}=a_{57}=e_{27}=J_{\text{К}}\left(a_1c_2+2a_1c_2T_1(t)\xi_1(t)\right);$$
$$a_{38}=a_{58}=e_{28}=J_{\text{К}}a_2c_2T_1^2(t);\ a_{40}=0;\ a_{41}=b_0K_{\text{Т}}(t)K_{\text{ст}}(t);$$
$$a_{42}=b_0b_1K_{\text{Т}}(t)K_{\text{ст}}(t);\ b_{10}=0;\ b_{11}=c_0;\ b_{12}=c_0(a_1c_1);$$
$$b_{13}=c_0(a_1c_1+c_2);\ b_{14}=c_0c_1a_2;\ b_{20}=b_{21}=0;\ b_{22}=K_1(t);$$
$$b_{23}=K_1(t)\left(a_1+c_2+T_{\text{Т}}(t)\right);\ b_{24}=K_1(t)\left(a_1+a_1c_2+a_1T_{\text{Т}}(t)+c_2\right);$$
$$b_{25}=K_1(t)(a_1+a_2);\ b_{26}=K_1(t)a_2c_2T_{\text{Т}}(t);\ b_{30}=b_{31}=0;\ b_{32}=K_{\text{ст}}(t)c_0;$$
$$b_{33}=K_{\text{ст}}(t)c_0(a_1+c_1);\ b_{34}=K_{\text{ст}}(t)c_0(a_1c_1+a_2);\ b_{35}=K_{\text{ст}}(t)c_0c_1a_2;$$
$$b_{40}=b_{41}=b_{42}=b_{43}=0;\ b_{44}=K_1(t)K_2K_{\text{ст}}(t)J_{\text{К}};$$
$$b_{45}=K_1(t)K_2K_{\text{ст}}(t)J_{\text{К}}(a_1+c_2);\ b_{46}=K_1(t)K_2K_{\text{ст}}(t)J_{\text{К}}(a_1c_2+a_2);$$
$$b_{47}=K_1(t)K_2K_{\text{ст}}(t)J_{\text{К}}a_2c_2.$$

Для решения задачи параметрического синтеза САУ ТК обобщенным методом Галеркина необходимо задать желаемое программное движение. В соответствии с физикой работы система управления торможением колес (при фиксированном значении скорости свободно катящегося колеса и мокрой опорной поверхности) должна выводить рабочую точку в экстремум характеристики $\mu(\Delta\omega)$, где она совершает автоколебания заданной амплитуды и частоты, охватывающие экстремальное значение $\Delta\omega_{\text{Э}}$.

Поэтому при решении задачи синтеза регулятора САУ ТК для мокрой опорной поверхности в качестве желаемого программного движения $\Delta\omega^0(t)$ был принят процесс вида

$$\Delta\omega^0(t)=\left[\Delta\omega_y^0\left(1-e^{-\alpha t}\right)+\Delta\omega^*\cos(\beta t-\varphi_0)\right]1(t), \qquad (24)$$

где $\Delta\omega_У^0=\Delta\omega_Э$ – значение желаемого программного движения, соответствующее нахождению рабочей точки в экстремуме параболической характеристики объекта управления; α – коэффициент затухания экспоненциальной составляющей, обеспечивающей выход рабочей точки в экстремум нелинейной экстремальной характеристики за заданное время; $\Delta\omega^*$ – амплитуда автоколебаний рабочей точки в районе экстремума; β – частота автоколебаний.

В случае торможения на сухой опорной поверхности движение рабочей точки к экстремуму характеристики μ(Δω) носит экспоненциальный характер, поскольку при торможении на сухой опорной поверхности момент сцепления всегда превышает максимально реализуемую системой величину тормозного момента. Таким образом, при решении задачи синтеза для сухой опорной поверхности был принят следующий вид желаемого программного движения

$$\Delta\omega^0(t)=\Delta\omega_y^0 e^{-\alpha t}1(t). \qquad (25)$$

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам данного класса, время выхода САУ ТК в экстремум характеристики μ=μ(*S*) (подача максимально возможного давления в конкретном режиме работы системы) не должно превышать 1,5÷2 с. Минимально возможное время выхода в экстремум μ(*S*) определяется техническими характеристиками исполнительной части САУ ТК и соответствует ≈0,3 с. Однако, быстрая подача давления не всегда целесообразна, поскольку это может приводить к возникновению юзовой ситуации и автоматическому сбросу давления, что в целом может лишь увеличить время торможения объекта. Амплитуда колебаний в районе экстремума характеристики μ(Δω) (на мокрой опорной поверхности) не должна превышать 10÷20% от значения $\Delta\omega_Э$, соответствующего $\mu_Э$, поскольку большая амплитуда колебаний будет вызывать больший износ пневматика при нахождении рабочей точки на правом склоне характеристики сцепления.

Рассматриваемая САУ является многорежимной, поэтому решение задачи синтеза необходимо провести для трех значений ω_C=const, каждому из которых соответствует своя зависимость $\mu=\mu(\Delta\omega)$ для мокрой и сухой опорных поверхностей.

При решении задачи синтеза использовались рекуррентные аналитические соотношения для B_q, приведенные в [44] и полученные для параболической нелинейной характеристики в случае процесса вида (24), (25). Синтез параметров регулятора осуществлялся для всех перечисленных выше режимов работы.

В результате решения задачи синтеза были определены значения параметров регулятора (табл. 8), обеспечивающие требуемое качество работы САУ ТК во всех режимах торможения [44]. Однако для обеспечения требуемых показателей качества работы системы управления при торможении на сухом покрытии потребовалось упрощение структуры регулятора, связанное с исключением из его состава нелинейного звена с релейной характеристикой.

Таблица 8 – Значения параметров регулятора САУ ТК

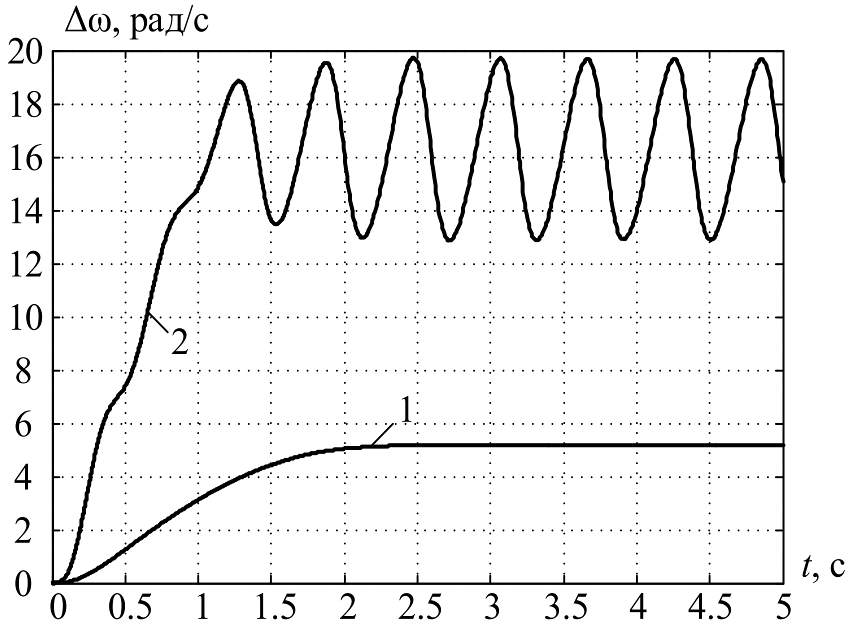
Параметры	Мокрая опорная поверхность			Сухая опорная поверхность		
ω_C	96,3	64,2	32,1	96,3	64,2	32,1
b_0	0,57	0,75	1,4	8	10	40
b_1	0,061	0,031	0	0,08	0,07	0,07
a_1	0,023	0,02	0,02	0,3	0,3	0,7
a_2	0,004	0,004	0,004	0,03	0,03	0,1
c_0	0,5	0,7	0,7	0,02	0,03	2,7
c_1	0,036	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
c_2	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024

Показатели качества для угловых скоростей свободно катящегося колеса ω_C=32,1 рад/с, ω_C=64,2 рад/с, ω_C=96,3 рад/с приведены в табл. 9, где σ – перерегулирование, A – амплитуда колебаний, $t_{\text{ПП}}$ – время переходного процесса, T – период колебаний, $e_{\text{уст}}$ – установившаяся ошибка. Следует обратить внимание на то, что установившаяся ошибка не может быть определена при автоколебаниях, поэтому для мокрой опорной поверхности в графе ошибки указан прочерк.

Графики переходных процессов для сухой и мокрой поверхностей при скорости ω_C=96,3 рад/с приведены на рис. 60, при скорости ω_C=64,2 рад/с на рис. 61, при скорости ω_C=32,1 рад/с приведены на рис. 62.

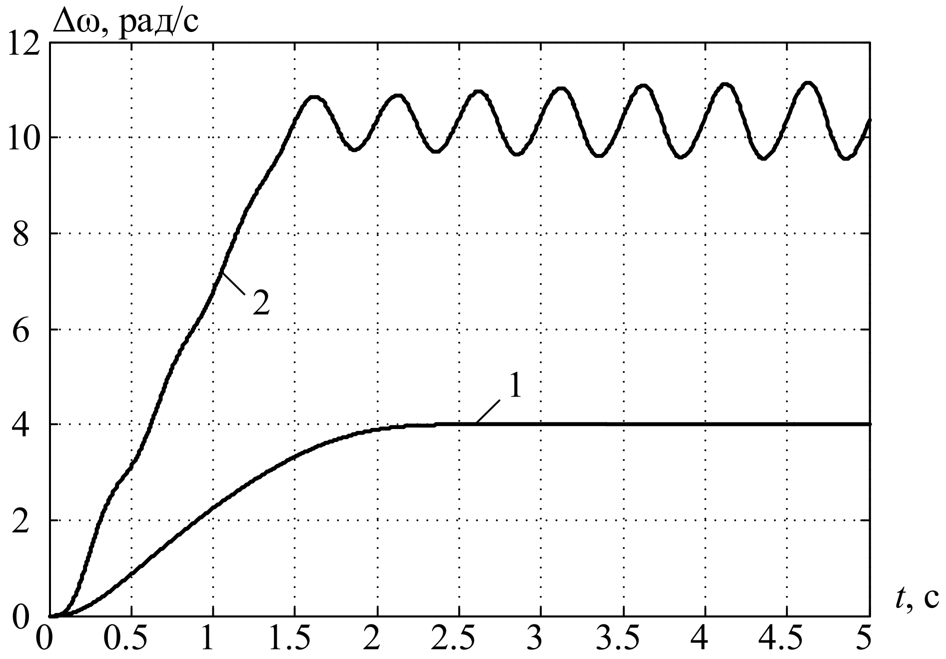
Таблица 9 – Показатели качества системы для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса

Параметры объекта	σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
Угловая скорость ω_C=96,3 рад/с						
$T_T(t)$=const, T_1=const(t), $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi(t)_1$=const	0	3,395	1,856	0,592	0	-
Угловая скорость ω_C=64,2 рад/с						
$T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	0	0,837	1,870	0,503	0	-
Угловая скорость ω_C=32,1 рад/с						
$T_T(t)$=const(t), $T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	0	0,1455	1,968	0,461	0	-



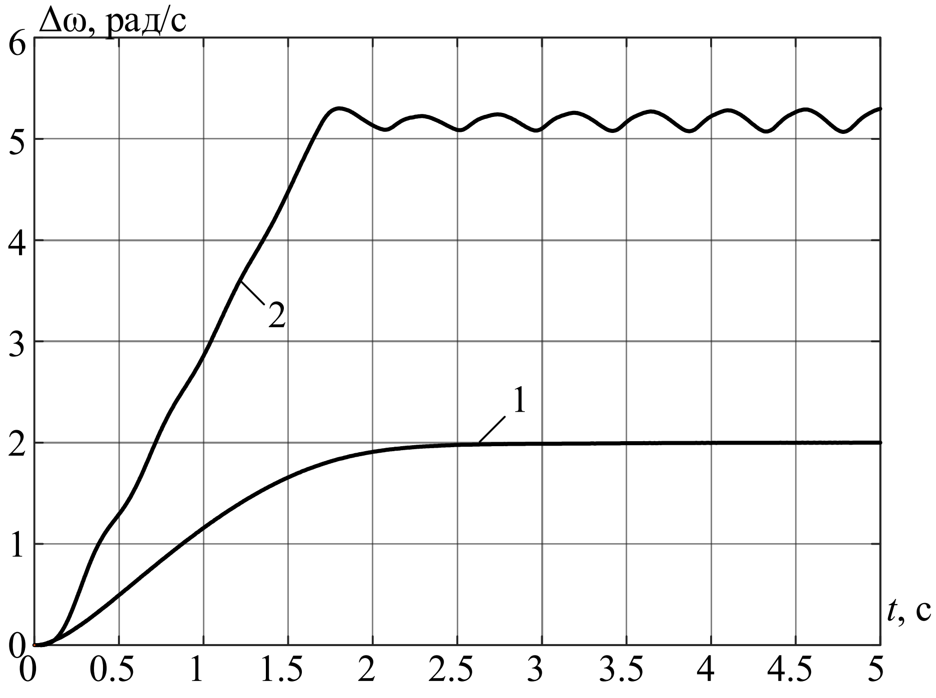
1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 60 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 61 – Переходные процессы системы при ω_C=64,2 рад/с



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 62 – Переходные процессы системы при ω_C=32,1 рад/с

Параметры неизменяемой части системы могут быть подвержены дрейфу в связи с зависимостью показателей от переменных во времени величин. Постоянная времени тормоза $T_{\text{Т}}(t)$ определяется разностью времени срабатывания (промежуток времени до создания тормозного усилия) и времени холостого хода (промежуток времени до замыкания колодками тормозного обода). Постоянная времени стойки $T_1(t)$ и коэффициент передачи модели стойки $K_{\text{ст}}(t)$ зависят от геометрических параметров колеса. Коэффициент передачи исполнительной части САУ ТК $K_{\text{Т}}(t)$ определяется конструктивными особенностями механизма. Показатель колебательности стойки $\xi_1(t)$ отклоняется от номинальных значений при внесении конструктивных изменений в систему.

В связи с возможным износом материалов тормозной системы (увеличение времени до полной остановки), параметры неизменяемой части могут быть подвержены дрейфу, поэтому требуется провести исследование объекта при изменении постоянных времени и коэффициентов передачи на мокрой и сухой поверхностях для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса.

Результаты влияния дрейфа параметров для $\omega_{\text{С}}$=96,3 рад/с приведены в табл. 10.

Таблица 10 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса $\omega_{\text{С}}$=96,3 рад/с

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{\text{ПП}}$, с	T, с	$e_{\text{уст}}$	
		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_{\text{Т}}(t)$=const, $K_{\text{Т}}(t)$=const, $K_{\text{ст}}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)\downarrow$10%	0	3,39	1,856	0,592	0	-
	$T_1(t)\downarrow$20%	0	3,39	1,856	0,590	0	-
$T_1(t)$=const, $K_{\text{Т}}(t)$=const, $K_{\text{ст}}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_{\text{Т}}(t)\downarrow$10%	0	3,655	1,871	0,577	0	-
	$T_{\text{Т}}(t)\downarrow$20%	0	4,000	1,886	0,563	0	-
$T_{\text{Т}}(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{\text{ст}}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{\text{Т}}(t)\downarrow$10%	0	1,535	2,098	0,577	0	-
	$K_{\text{Т}}(t)\downarrow$20%	0	0,74	2,397	0,562	0	-

Продолжение таблицы 10

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)\downarrow$10%	0	3,39	1,846	0,596	0	-
	$K_{ст}(t)\downarrow$20%	0	3,385	1,836	0,594	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)\downarrow$10%	0	3,395	1,856	0,592	0	-
	$\xi_1(t)\downarrow$20%	0	3,395	1,856	0,597	0	-

Как видно из результатов моделирования, дрейф постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходного процесса.

Изменение $T_Т(t)$ на $\downarrow$20% (рис. 63) приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики более чем на 20% от значения $\Delta\omega_Э$ для мокрой поверхности, необходим перерасчёт регулятора

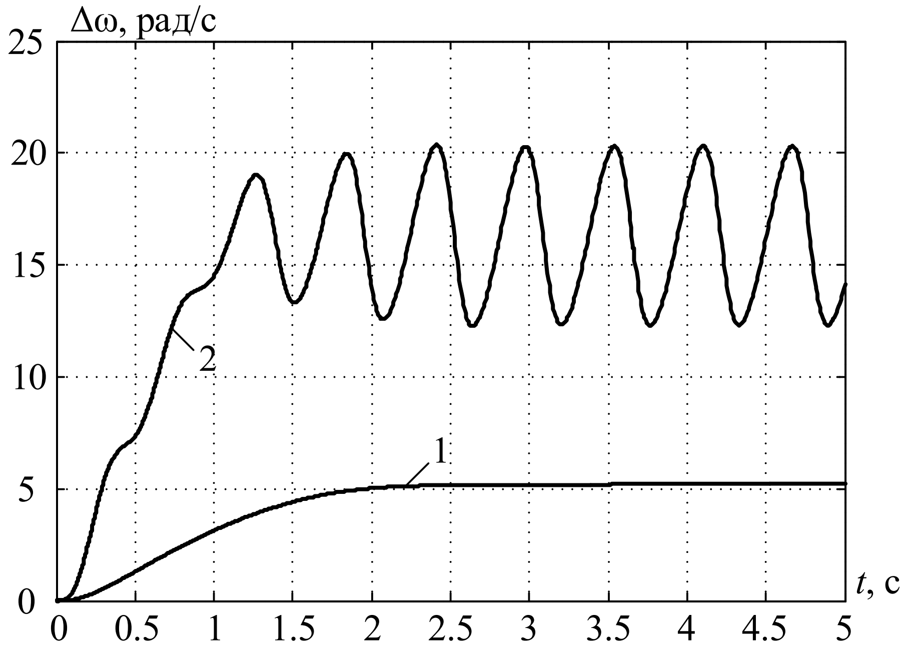
$$A_{\text{предельное}} = 20\% \cdot \Delta\omega_Э = 0,2 \cdot 17,72 = 3,544 \text{ рад/с}.$$

Наиболее негативное влияние на время переходного процесса для сухой поверхности оказывает дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_Т(t)$ «вниз». Показатели качества при $\downarrow$20% дрейфе параметра (рис. 64) значительно отклоняются от желаемых показателей, необходим перерасчёт регулятора.

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $K_Т(t)\downarrow$20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=8, b_1=0.08, a_1=0.3, a_2=0.03, c_0=0.65, c_1=0.04, c_2=0.024.

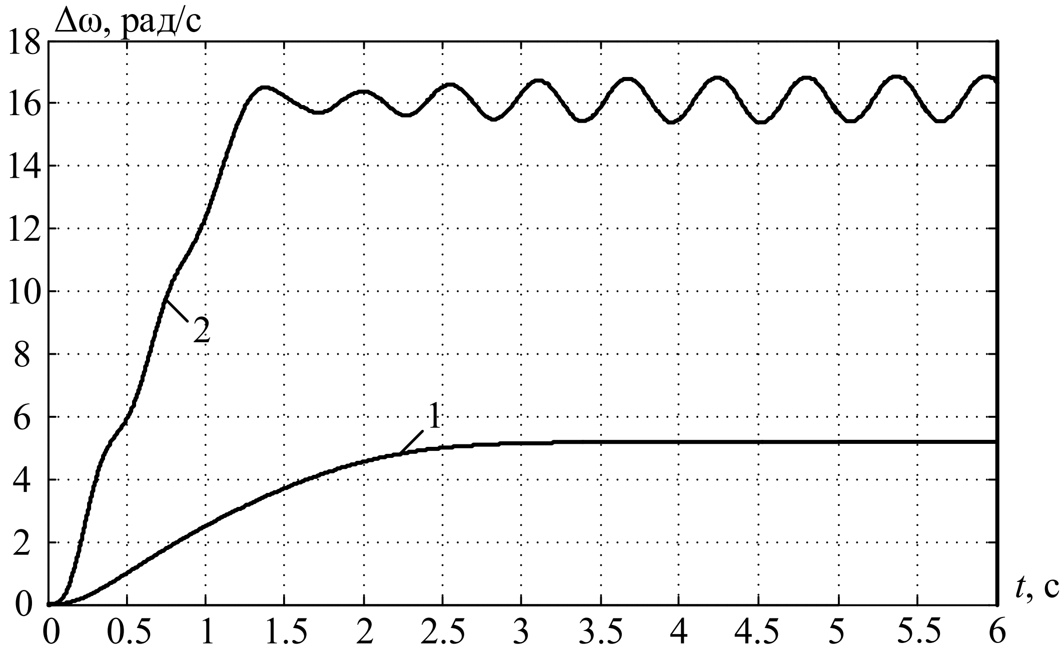
Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $K_Т(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 65.

Полученные показатели качества процессов приведены в табл. 11.



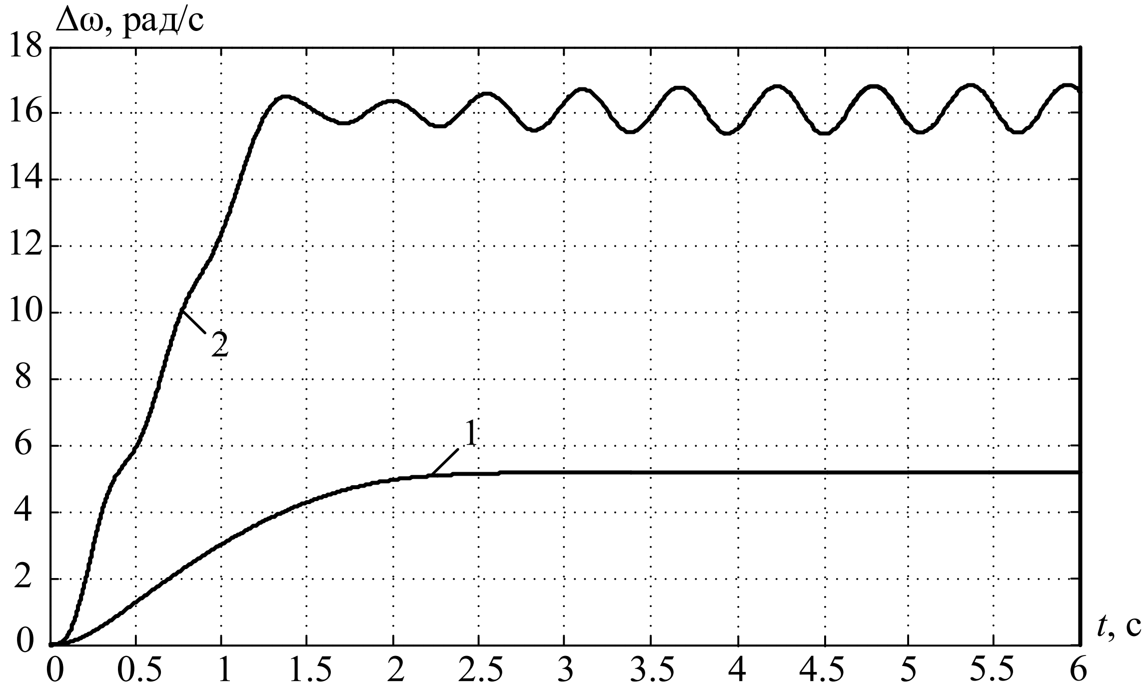
1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 63 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $T_T(t)\downarrow 20\%$, $K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 64 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $K_T(t)\downarrow 20\%$, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 65 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $K_T(t)$↓20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

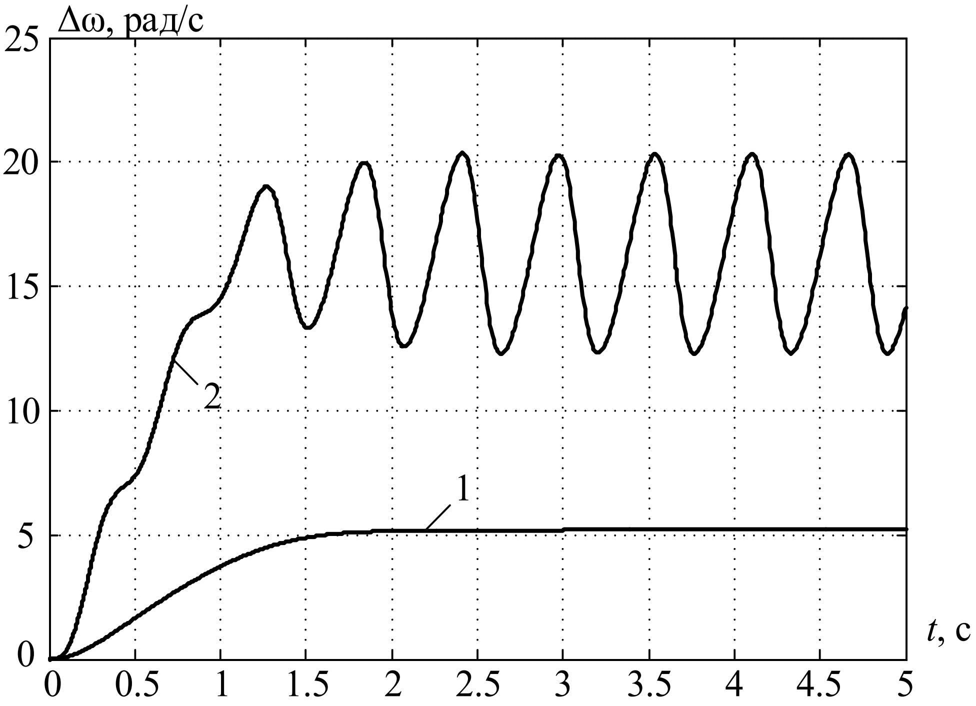
Таблица 11 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_T(t)$↓20%	0	0,74	1,971	0,568	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что время переходного процесса для сухой поверхности составляет менее 2 с, период автоколебаний для мокрой поверхности незначительно увеличился, показатели качества соответствуют требуемым значениям.

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $T_T(t)$↓20%, $K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=0.57, b_1=0.061, a_1=0.023, a_2=0.004, c_0=0.5, c_1=3.98, c_2=0.024.

Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $T_T(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 66.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 66 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $T_T(t)\downarrow$20%, $K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 12.

Таблица 12 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_T(t)\downarrow$20%	0	3,075	1,886	0,234	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что время переходного процесса при торможении на сухой поверхности составляет менее 2 с, амплитуда автоколебаний не превышает требуемого предельного значения 3,544 рад/с*,* показатели качества соответствуют требуемым значениям.

Исследование влияния дрейфа при изменении параметров «вниз» для ω_C=64,2 рад/с приведено в таблице 13.

Таблица 13 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=64,2 рад/с

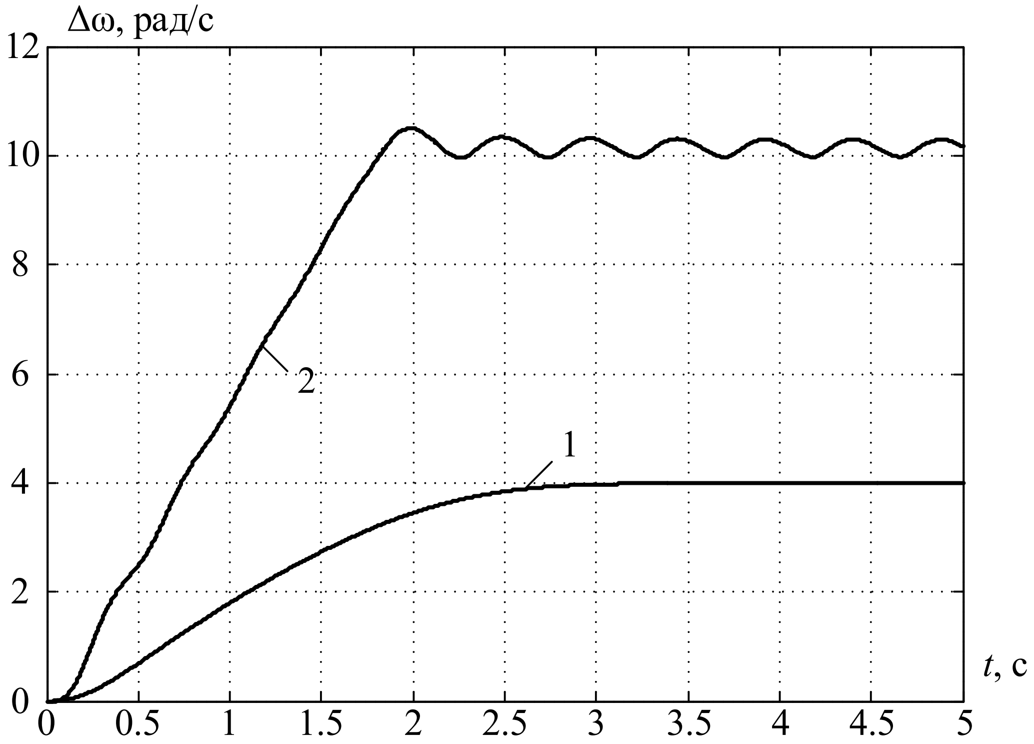
Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)\downarrow$10%	0	0.837	1,870	0,509	0	-
	$T_1(t)\downarrow$20%	0	0,8365	1,870	0,505	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_Т(t)\downarrow$10%	0	1,066	1,884	0,507	0	-
	$T_Т(t)\downarrow$20%	0	1,362	1,898	0,506	0	-
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)\downarrow$10%	0	0,188	2,115	0,484	0	-
	$K_Т(t)\downarrow$20%	0	0,152	2,419	0,483	0	-
$T_Т(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $T_Т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)\downarrow$10%	0	0,8305	1,858	0,504	0	-
	$K_{ст}(t)\downarrow$20%	0	0,829	1,846	0,507	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)\downarrow$10%	0	0,837	1,870	0,509	0	-
	$\xi_1(t)\downarrow$20%	0	0,8375	1,870	0,502	0	-

Как видно из результатов моделирования, дрейф постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходного процесса.

Изменение постоянной времени тормоза $T_Т(t)$ приводит к увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности. При этом показатели качества по амплитуде не выходят за пределы требуемых значений

$$A_{\text{предельное}} = 20\% \cdot \Delta\omega_{Э} = 0,2 \cdot 11,47 = 2,294 \text{ рад/с.}$$

Наибольшее негативное влияние оказывает дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_Т(t)$ «вниз» (рис. 67). Показатели качества при ↓20% дрейфе параметра значительно отклоняются от желаемых показателей, необходим перерасчёт регулятора.

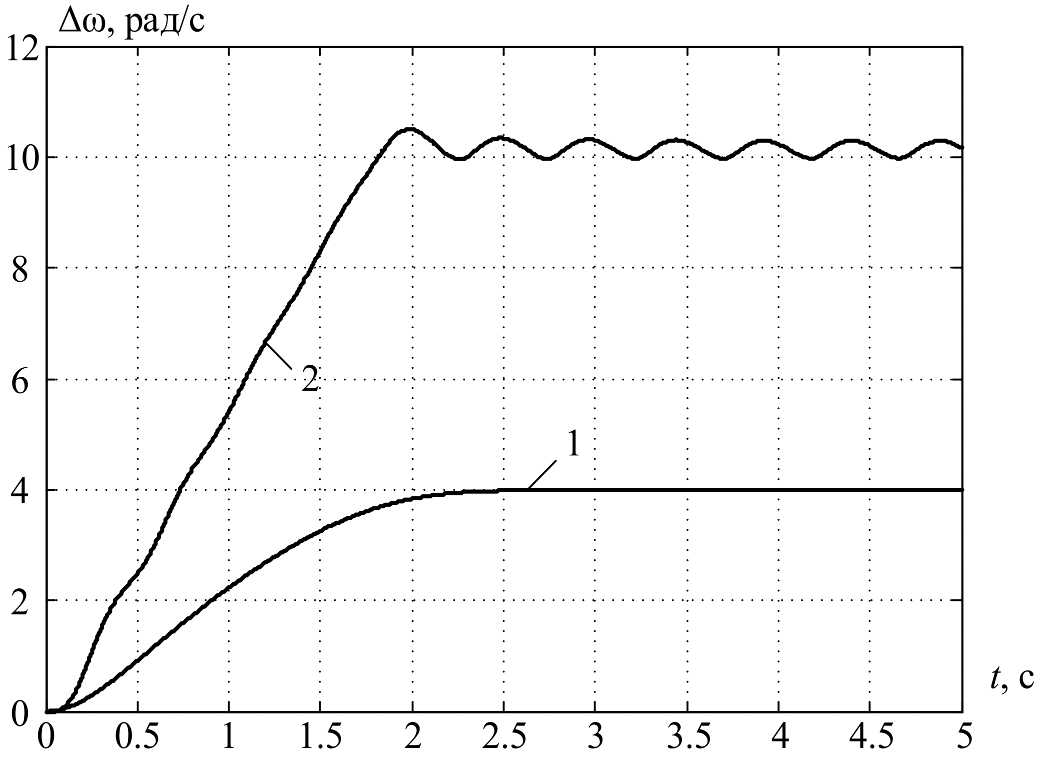


1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 67 – Переходные процессы системы при ω_C=64,2 рад/с при $K_Т(t)$↓20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $K_Т$↓20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=10, b_1=0.07, a_1=0.3, a_2=0.03, c_0=0.9, c_1=0.04, c_2=0.024.

Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $K_Т(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 68.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 68 – Переходные процессы системы при ω_C=64,2 рад/с при $K_Т(t)\downarrow$20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 14.

Таблица 14 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)\downarrow$20%	0	0,152	1,954	0,477	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что время переходного процесса при сухой поверхности составляет менее 2 с, период автоколебаний для мокрой поверхности незначительно уменьшился, показатели качества соответствуют требуемым значениям.

Результаты влияния дрейфа параметров для ω_C=32,1 рад/с приведены в табл. 15.

Таблица 15 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=32,1 рад/с

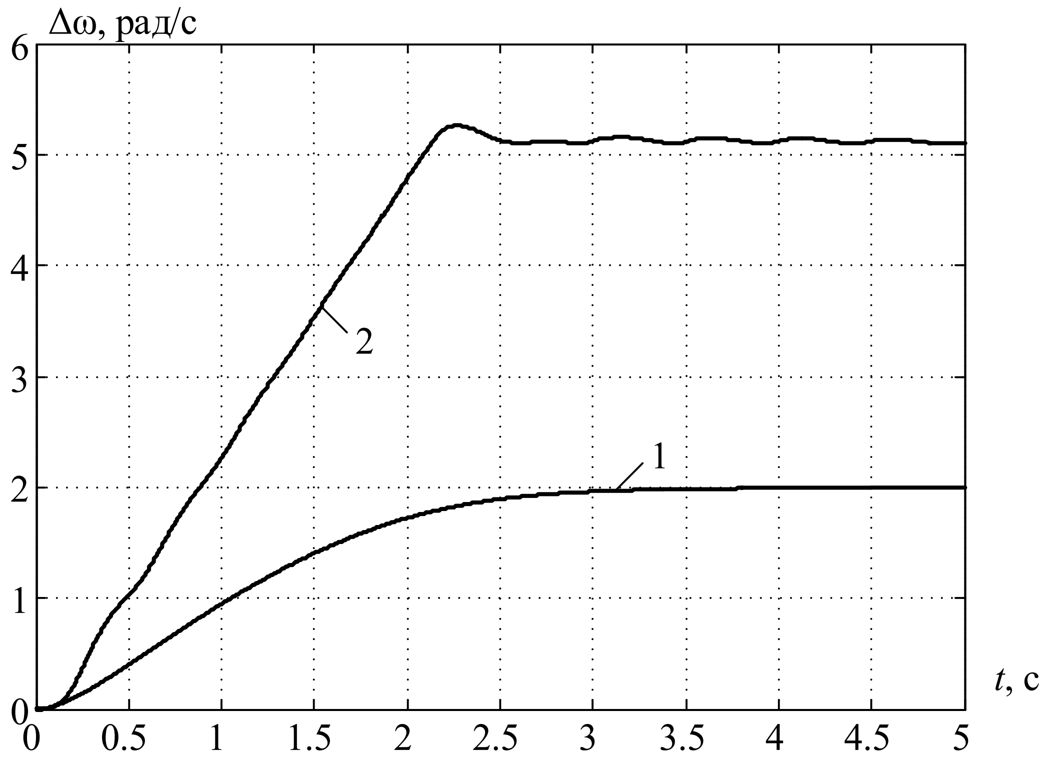
Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)\downarrow$10%	0	0,1445	1,971	0,459	0	-
	$T_1(t)\downarrow$20%	0	0,1445	1,969	0,461	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_Т(t)\downarrow$10%	0	0,2485	1,986	0,532	0	-
	$T_Т(t)\downarrow$20%	0	0,7985	2,000	0,514	0	-
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)\downarrow$10%	0	0,065	2,218	0,542	0	-
	$K_Т(t)\downarrow$20%	0	0,0195	2,528	0,875	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $T_Т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)\downarrow$10%	0	0,146	1,945	0,464	0	-
	$K_{ст}(t)\downarrow$20%	0	0,1465	1,922	0,463	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)\downarrow$10%	0	0,144	1,971	0,463	0	-
	$\xi_1(t)\downarrow$20%	0	0,145	1,970	0,462	0	-

Как видно из результатов моделирования, дрейф постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходного процесса.

Изменение $T_1(t)$ приводит к увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности. При этом показатели качества по амплитуде не выходят за пределы требуемых значений

$$A_{\text{предельное}} = 20\% \cdot \Delta\omega_{Э} = 0,2 \cdot 5,85 = 1,17 \text{ рад/с.}$$

Наибольшее негативное влияние оказывает дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ «вниз» (рис. 69). Показатели качества при ↓20% дрейфе параметра значительно отклоняются от желаемых показателей, необходим перерасчёт регулятора.

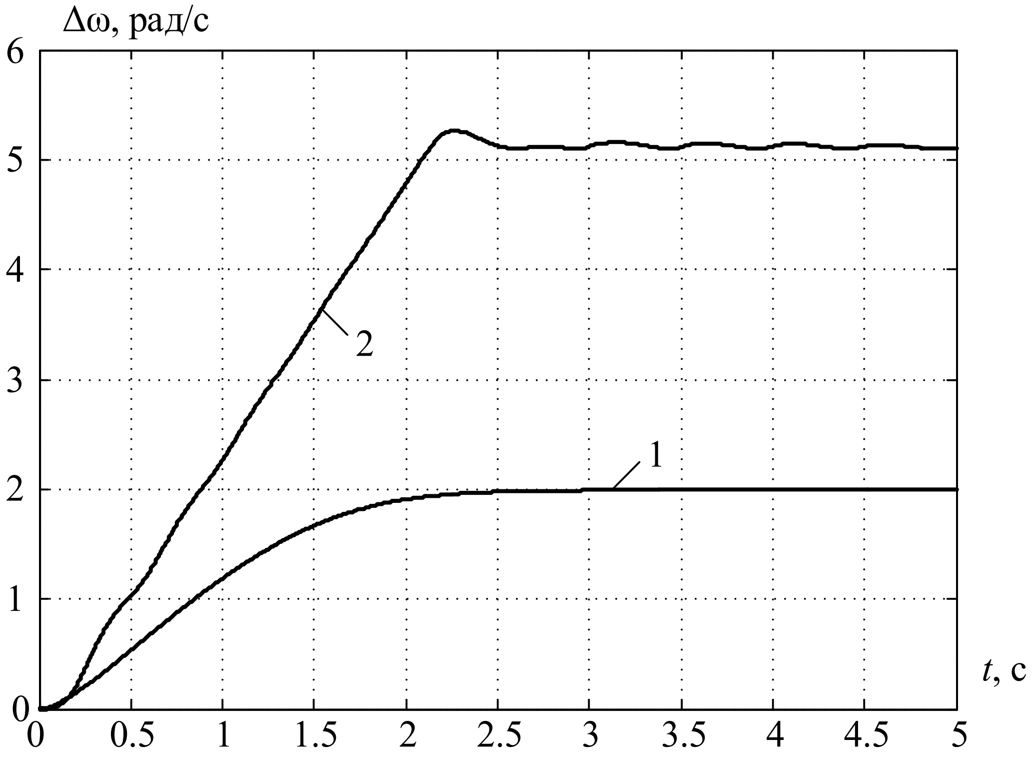


1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 69 – Переходные процессы системы при ω_C=32,1 рад/с при $K_T(t)$↓20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $K_T(t)$↓20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=40, b_1=0.07, a_1=0.7, a_2=0.1, c_0=4.8, c_1=0.04, c_2=0.024.

Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $K_T(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 70.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 70 – Переходные процессы системы при $\omega_С$=32,1 рад/с при $K_Т(t)\downarrow$20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 16.

Таблица 16 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)\downarrow$20%	0	0,0195	1,972	0,872	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что время переходного процесса при сухой поверхности составляет менее 2 с, период автоколебаний для мокрой поверхности незначительно увеличился, показатели качества соответствуют требуемым значениям.

Результаты влияния увеличения значений параметров для ω_C=96,3 рад/с приведены в табл. 17.

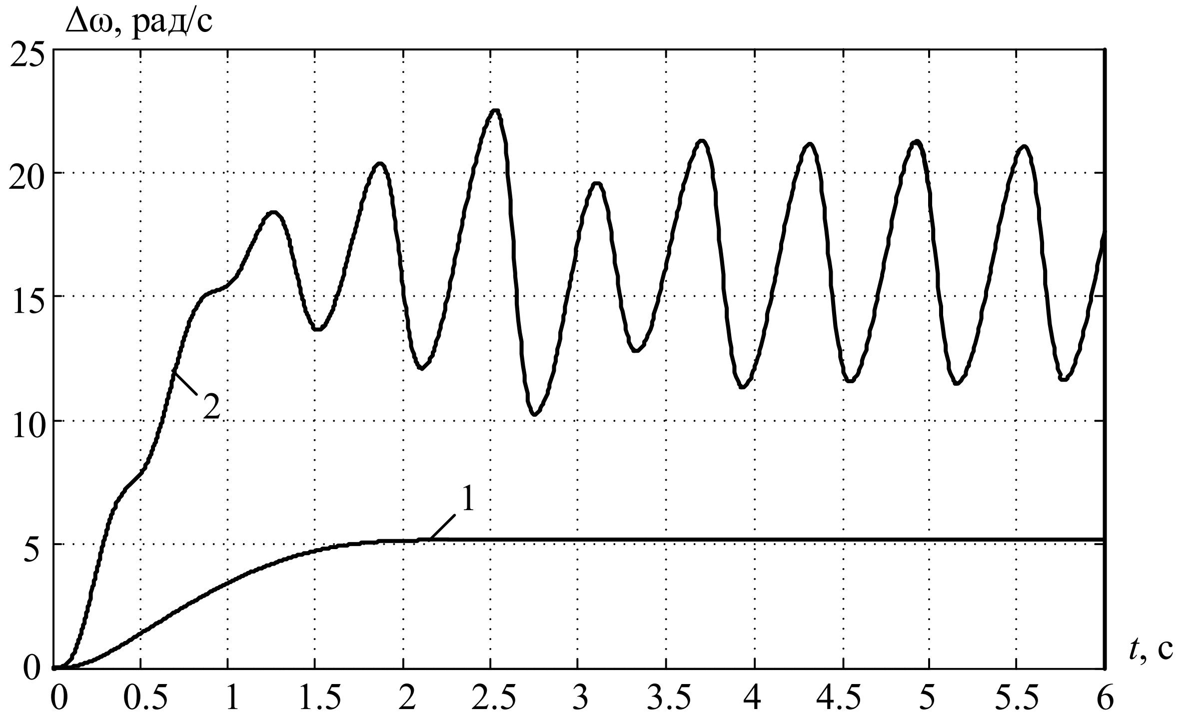
Таблица 17 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=96,3 рад/с

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)$↑10%	0	3,395	1,856	0,597	0	-
	$T_1(t)$↑20%	0	3,405	1,856	0,592	0	-
$T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_T(t)$↑10%	0	3,205	1,840	0,614	0	-
	$T_T(t)$↑20%	0	3,09	1,825	0,632	0	-
$T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_T(t)$↑10%	0	4,755	1,653	0,610	0	-
	$K_T(t)$↑20%	0	4,835	1,479	0,618	0	-
$T_T(t)$=const, $K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)$↑10%	0	3,395	1,865	0,594	0	-
	$K_{ст}(t)$↑20%	0	3,405	1,875	0,599	0	-
$T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)$↑10%	0	3,395	1,856	0,601	0	-
	$\xi_1(t)$↑20%	0	3,395	1,856	0,601	0	-

Из результатов моделирования видно, что, как и при дрейфе параметров «вниз» изменение постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки ξ_1 не оказывают влияния на качество переходного процесса. Время переходного процесса при дрейфе параметров остается в пределах требуемых значений.

Изменение коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ «вверх» (рис. 71) приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики более чем на 20% от значения $\Delta\omega_Э$ для мокрой поверхности, необходим перерасчёт регулятора

$$A_{предельное} = 20\% \cdot \Delta\omega_Э = 0,2 \cdot 17,72 = 3,544 \text{ рад/с}.$$

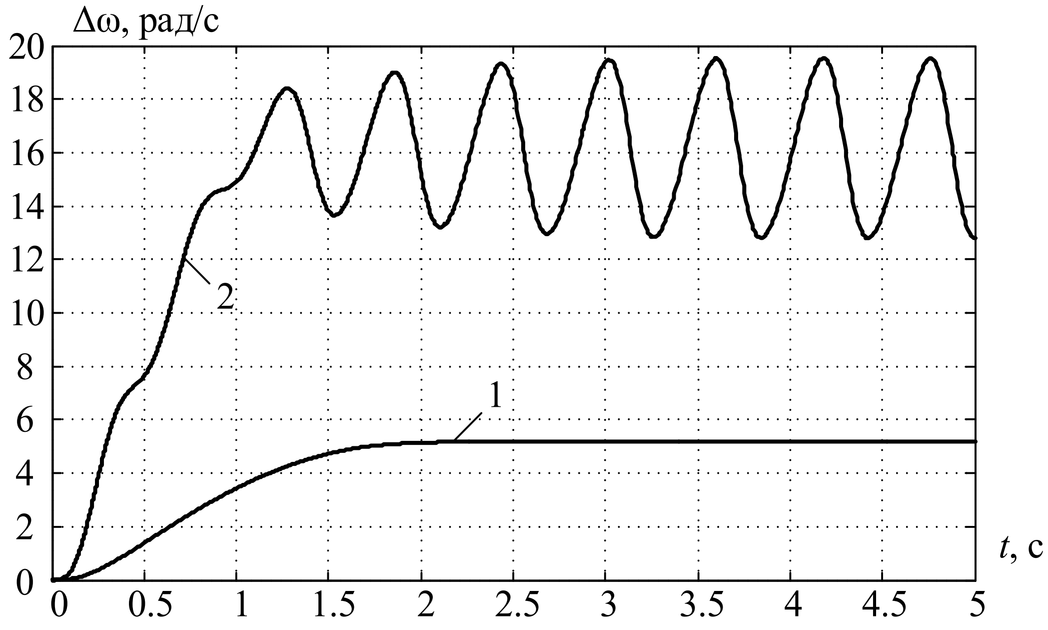


1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 71 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $K_T(t)$↑20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $K_T(t)$↑20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=0.57, b_1=0.061, a_1=0.023, a_2=0.004, c_0=0.33, c_1=0.036, c_2=0.024.

Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $K_T(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 72.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 72 – Переходные процессы системы при ω_C=96,3 рад/с при $K_Т(t)$↑20%, $T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 18.

Таблица 18 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)$↑20%	0	3,46	1,479	0,578	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что амплитуда колебаний уменьшилась до требуемых значений, время переходного процесса не изменилось, период автоколебаний для мокрой поверхности незначительно уменьшился, показатели качества соответствуют требуемым значениям.

Исследование системы при изменении параметров «вверх» приведено в табл. 19.

Таблица 19 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=64,2 рад/с

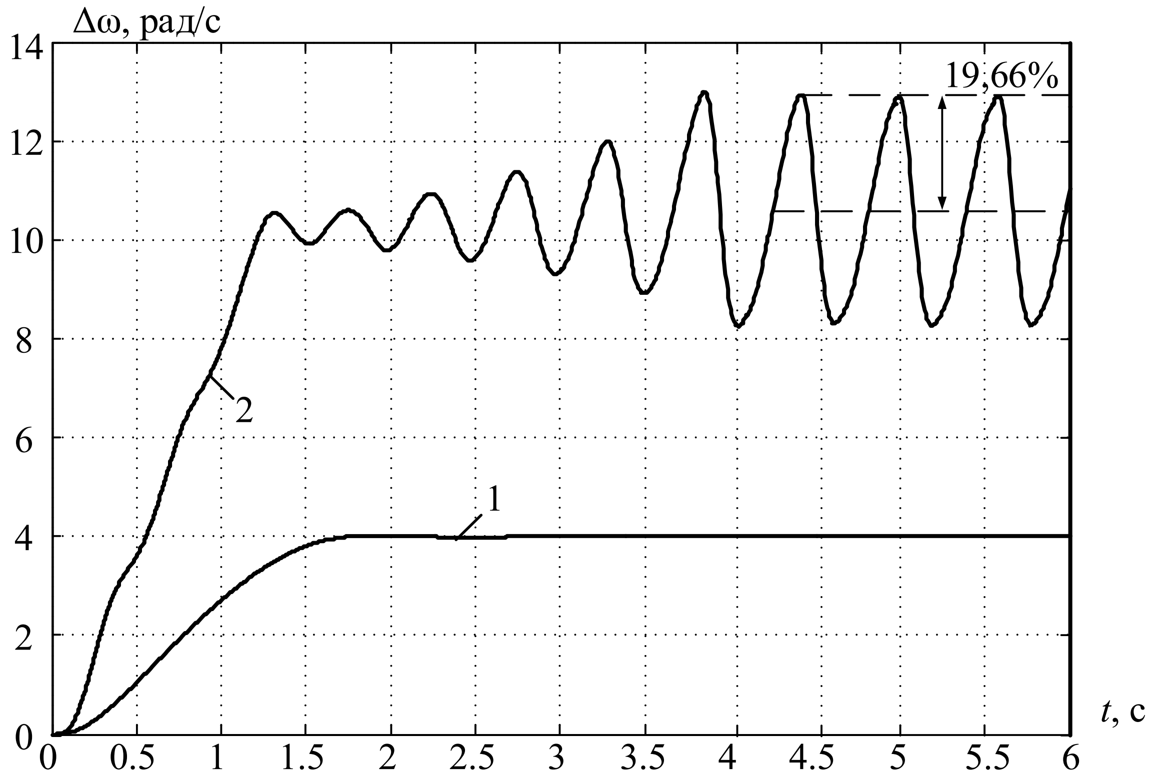
Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)$↑10%	0	0,839	1,870	0,51	0	-
	$T_1(t)$↑20%	0	0,8395	1,870	0,508	0	-
$T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_T(t)$↑10%	0	0,666	1,856	0,512	0	-
	$T_T(t)$↑20%	0	0,539	1,842	0,512	0	-
$T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_T(t)$↑10%	0	1,732	1,668	0,543	0	-
	$K_T(t)$↑20%	0	2,255	1,499	0,563	0	-
$T_T(t)$=const, $K_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)$↑10%	0	0,840	1,882	0,506	0	-
	$K_{ст}(t)$↑20%	0	0,8465	1,894	0,503	0	-
$T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)$↑10%	0	0,838	1,870	0,505	0	-
	$\xi_1(t)$↑20%	0	0,838	1,870	0,506	0	-

Из результатов моделирования видно, что, как и при дрейфе параметров «вниз» изменение постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходных процессов.

Дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ «вверх» (рис.73) приводит к увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой опорной поверхности. При этом показатели качества по амплитуде не выходят за пределы требуемых значений

$$A_{\text{предельное}} = 20\% \cdot \Delta\omega_Э = 0{,}2 \cdot 11{,}47 = 2{,}294 \text{ рад/с.}$$

Также увеличение коэффициента передачи исполнительной части $K_T(t)$ влечет за собой уменьшение времени переходного процесса. При этом показатель времени остается в пределах требуемых значений, пересчет регулятора не требуется.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 73 – Переходные процессы системы при ω_C=64,2 рад/с при $K_T(t)\uparrow$20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const

Результаты влияния увеличения значений параметров для ω_C=32,1 рад/с приведены в табл. 20.

Таблица 20 – Показатели качества управления для системы на мокрой и сухой поверхностях при угловой скорости свободно катящегося колеса ω_C=32,1 рад/с

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T(t)$=const, $K_T(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_1(t)\uparrow$10%	0	0,146	1,969	0,460	0	-
	$T_1(t)\uparrow$20%	0	0,1455	1,970	0,459	0	-

Продолжение таблицы 20

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
Тип поверхности		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$T_Т(t)$↑10%	0	0,113	1,955	0,464	0	-
	$T_Т(t)$↑20%	0	0,0925	1,941	0,470	0	-
$T_Т(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_Т(t)$↑10%	0	0,8285	1,766	0,548	0	-
	$K_Т(t)$↑20%	0	0,904	1,598	0,559	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $T_Т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)$↑10%	0	0,1455	1,994	0,462	0	-
	$K_{ст}(t)$↑20%	0	0,1455	2,019	0,461	0	-
$T_1(t)$=const, $K_Т(t)$=const, $K_{ст}(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$\xi_1(t)$↑10%	0	0,146	1,967	0,459	0	-
	$\xi_1(t)$↑20%	0	0,1465	1,969	0,459	0	-

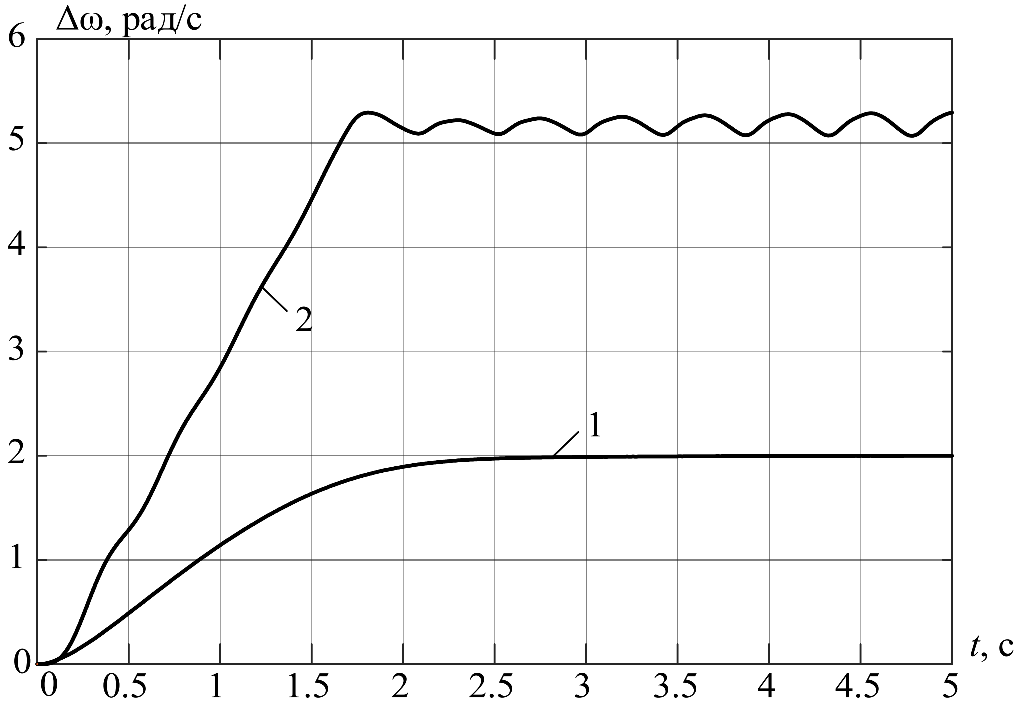
Из результатов моделирования видно, что, как и при дрейфе параметров «вниз», изменение постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходных процессов.

Дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_Т(t)$ «вверх» (рис. 74) приводит к увеличению амплитуды колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности. При этом показатели качества по амплитуде не выходят за пределы требуемых значений

$$A_{\text{предельное}} = 20\% \cdot \Delta\omega_{Э} = 0,2 \cdot 5,85 = 1,17 \text{ рад/с}.$$

Увеличение коэффициента передачи исполнительной части $K_Т(t)$ влечет за собой уменьшение времени переходного процесса. При этом показатель времени остается в пределах требуемых значений, пересчет регулятора не требуется.

Изменение значения коэффициент передачи стойки $K_{ст}(t)$ более чем на 20% приводит к повышению времени переходного процесса. Необходим пересчет регулятора.

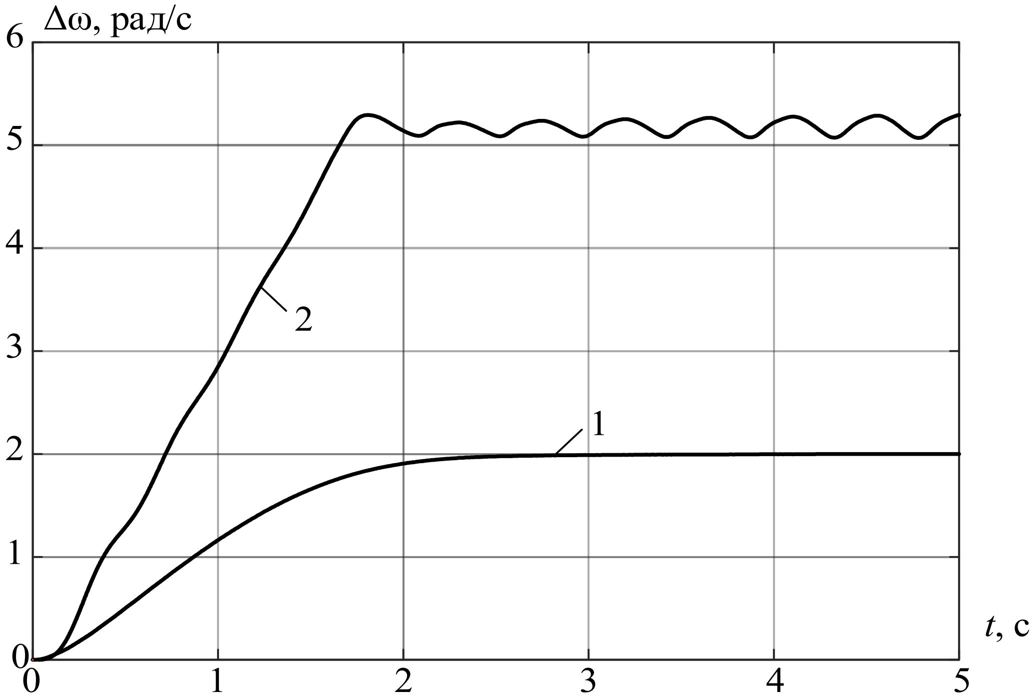


1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 74 – Переходные процессы системы при ω_C=32,1 рад/с при $K_{ст}(t)\uparrow$20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const

В ходе повторного решения задачи синтеза (для случая $K_{ст}(t)\uparrow$20%, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_T(t)$=const, $\xi_1(t)$=const) рассматриваемой системы автоматического управления торможением колес транспортного средства обобщенным методом Галеркина были получены следующие значения параметров регулятора: b_0=40, b_1=0.07, a_1=0.7, a_2=0.1, c_0=2.86, c_1=0.04, c_2=0.024.

Переходные процессы для мокрой и сухой поверхностей при дрейфе параметра $K_{ст}(t)$ и перерасчитанных показателях регуляторов приведены на рис. 75.



1 – переходный процесс для сухой поверхности, 2 – переходный процесс для мокрой поверхности

Рисунок 75 – Переходные процессы системы при ω_C=32,1 рад/с при $K_{ст}(t)\uparrow 20\%$, $T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const и пересчитанных параметрах регулятора

Полученные показатели качества процесса приведены в табл. 21.

Таблица 21 – Показатели качества после пересчета регулятора

Параметры объекта		σ, %	A, рад/с	$t_{ПП}$, с	T, с	$e_{уст}$	
		Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая	Сухая	Мокрая
$T_T(t)$=const, $T_1(t)$=const, $K_т(t)$=const, $\xi_1(t)$=const	$K_{ст}(t)\uparrow 20\%$	0	0,1455	1,978	0,457	0	-

В сравнении с показателями качества, полученными при первичном расчете, видно, что время переходного процесса при сухой поверхности составляет менее 2 с, период автоколебаний для мокрой поверхности уменьшился, показатели качества соответствуют требуемым значениям.

В результате синтеза параметров экстремальной системы автоматического управления торможением колес транспортного средства и моделирования процессов при дрейфе показателей было выявлено, что изменение постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ не оказывают влияния на качество переходных процессов. Дрейф постоянной времени тормоза $T_Т(t)$ и коэффициента передачи исполнительной части $K_Т(t)$ влечет за собой ухудшение показателей качества (времени переходного процесса, амплитуды автоколебаний).

Исследование дрейфа параметров в сторону уменьшения показали, что при угловой скорости свободно катящегося колеса $\omega_С$=96,3 рад/с дрейф параметра $T_Т(t)$ влияет на критическое увеличение амплитуды колебаний на мокрой опорной поверхности (до 22,57%), дрейф параметра $K_Т(t)$ влияет на увеличение времени переходного процесса на сухой опорной поверхности до 2,4 с; при угловой скорости свободно катящегося колеса $\omega_С$=64,2 рад/с дрейф параметра $K_Т(t)$ влияет на увеличение времени переходного процесса на сухой опорной поверхности до 2,42 с; при угловой скорости свободно катящегося колеса $\omega_С$=32,1 рад/с дрейф параметра $T_Т(t)$ на ↓20% и дрейф параметра $K_Т(t)$ увеличивают время переходного процесса до 2,53 с на сухой опорной поверхности.

Исследование дрейфа параметров в сторону увеличения показали, что при угловой скорости свободно катящегося колеса $\omega_С$=32,1 рад/с дрейф параметра $K_{ст}(t)$ влияет на увеличение времени переходного процесса до 2,02 с на сухой опорной поверхности.

Следовательно, требуется выполнить перерасчет регулятора обобщенным методом Галеркина.

Таким образом, были рассмотрены переходные процессы системы автоматического управления торможением колес транспортного средства. Для сухой поверхности характеристика представляет собой экспоненциальное уменьшение скорости тормозящегося колеса, для мокрой опорной поверхности график имеет вид автоколебаний, амплитуда колебаний относительно проскальзывания охватывает значение, которому соответствует максимальный показатель коэффициента сцепления при данном режиме работы.

4.3 Выводы по главе 4

1. Исследована система управления автономной электроэнергетической установкой (ЭЭУ) со сверхпроводниковыми электротехническими устройствами. Установлена необходимость контроля уровня хладагента с помощью мониторинга системой автоматического управления (САУ) для недопущения резкого роста сопротивления обмотки при переходе в резистивное состояние.

2. Получена система дифференциальных уравнений электроэнергетической установки, рассчитано желаемое программное движение. Выполнено моделирование процессов ЭЭУ в нормальных и анормальных режимах работы.

3. В связи с возможным изменением напряжения управления и реакцией якоря постоянные времени автономной электроэнергетической установки могут быть подвержены дрейфу. В результате экспериментальных исследований было установлено, что наибольшее отклонение от номинальных показателей качества при уменьшении нескольких постоянных времени происходит в случае неизменной постоянной времени $T_{Я1}(t)$ и изменяющихся постоянных времени приводного двигателя $T_{М}(t)$ и синхронного генератора $T_{Я2}(t)$, при этом параметры качества остаются в пределах требуемых значений (время переходного процесса менее 0,5 с; перерегулирование не более 10%), пересчет регулятора не требуется.

Наибольшее отклонение от желаемых показателей качества при увеличении нескольких постоянных времени происходит при инертном значении постоянной времени синхронного генератора $T_{Я2}(t)$ и 20% отклонении параметров $T_{Я1}(t)$, $T_{М}(t)$. Значительный рост величины перерегулирования и времени переходного процесса приводит к необходимости перерасчёта регулятора для повышения точности работы системы.

4. Выполнен пересчет параметров регулятора с помощью обобщенного метода Галеркина, распространенного на новый класс систем, для системы с измененными требованиями к желаемому переходному процессу (экспоненциальный вид характеристики; время переходного процесса не более 0,2 с). Требования к качеству изменены с целью недопущения износа.

5. Исследована система автоматического управления торможением колес транспортного средства. В связи со сложностью оценки динамики торможения колес синтез параметров регулятора экстремальной системы САУ ТК решается в три этапа: на первом этапе математическая модель принимается достаточно простой и основывающейся на основах физических процессов функционирования систем торможения; на втором этапе происходит уточнение рассчитанных коэффициентов при помощи решения задачи оптимизации с использованием полной математической модели процесса торможения; на третьем этапе производится оценка корректности работы регулятора на моделях, максимально приближенных к реальным.

6. Определены значения параметров регулятора, обеспечивающие требуемое качество работы САУ ТК во всех режимах торможения.

7. В связи с тем, что система торможения колес является многорежимной, требуется решение задачи синтеза для трех значений угловых скоростей свободно катящегося колеса (ω_C=32,1 рад/с, ω_C=64,2 рад/с, ω_C=96,3 рад/с), каждому из которых соответствует своя зависимость $\mu=\mu(\Delta\omega)$ для мокрой и сухой опорных поверхностей.

8. Выполнено исследование объекта при дрейфе, вызванном износом материалов тормозной системы, постоянных времени и коэффициентов передачи на мокрой и сухой поверхностях для различных угловых скоростей свободно катящегося колеса. Выявлено незначительное влияние изменения постоянной времени стойки $T_1(t)$ и показателя колебательности стойки $\xi_1(t)$ на качество переходного процесса.

При изменении параметров в сторону уменьшения для мокрой поверхности и скорости свободно катящегося колеса ω_C=96,3 рад/с наиболее негативное влияние на амплитуду колебаний в районе экстремума характеристики оказывает дрейф постоянной времени тормоза $T_{\text{Т}}(t)$ на 20%, наибольшее негативное влияние на время переходного процесса для сухой поверхности и скорости ω_C=96,3 рад/с оказывает дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_{\text{Т}}(t)$. При скоростях свободно катящегося колеса ω_C=64,2 рад/с и ω_C=32,1 рад/с наиболее негативное влияние оказывает дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_{\text{Т}}(t)$.

При дрейфе параметров в сторону увеличения и скоростях свободно катящегося колеса ω_C=96,3 рад/с и ω_C=64,2 рад/с изменение постоянной времени тормоза $K_{\text{Т}}(t)$ на 20% наиболее сильно увеличивает амплитуду колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности. При скорости ω_C=32,1 рад/с изменение значения коэффициента передачи стойки $K_{\text{ст}}(t)$ более чем на 20% наиболее негативно влияет на время переходного процесса. Следует заметить, что сильное влияние дрейфа определенного параметра не всегда является основанием к пересчету регулятора, так как даже при самом значительном изменении показателей качества значения могут все еще находиться в пределах требуемых значений.

9. Пересчет регулятора для САУ ТК необходим при дрейфе параметра $K_{\text{Т}}(t)$ на 20% «вниз» для всех трех значений угловых скоростей свободно катящегося колеса (ω_C=32,1 рад/с, ω_C=64,2 рад/с, ω_C=96,3 рад/с). Также при уменьшении постоянной времени тормоза $T_{\text{Т}}(t)$ на 20% при скорости ω_C=96,3 рад/с требуется изменение параметров регулятора.

При дрейфе параметров «вверх» пересчет регулятора необходимо выполняется при $K_{\text{Т}}(t)\uparrow 20\%$ для угловых скоростей свободно катящегося колеса ω_C=64,2 рад/с, ω_C=96,3 рад/с. При уменьшении коэффициента передачи стойки $K_{\text{ст}}(t)$ более чем на 20% и скорости ω_C=32,1 рад/с также требуется изменение параметров регулятора. При этом увеличение коэффициента передачи исполнительной части $K_{\text{Т}}(t)$ при скорости ω_C=32,1 рад/с значительно увеличивает амплитуду колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности, но показатели качества не выходят за пределы требуемых значений, пересчет регулятора не требуется.

Сильное влияние параметра $K_{Т}(t)$ на качество переходного процесса определяется зависимостью значений данного показателя от конструктивных особенностей механизма. Дрейф коэффициента передачи исполнительной части $K_{Т}(t)$ означает фактическое изменение исследуемого механизма. При увеличении значения данного показателя увеличивается амплитуда колебаний в районе экстремума характеристики для мокрой поверхности, при уменьшении – возрастает время переходного процесса для сухой поверхности.

10. Показана эффективность использования метода Галеркина при решении задачи синтеза двусвязных систем автоматического управления, изложенный подход обеспечивает достижение заданных показателей качества регулируемых величин. В связи с тем, что обобщенный метод алгебраизирует решение задачи синтеза, сводит процесс расчёта и вычисления к выполнению единообразных операций для систем различных структур и порядков, уменьшается время, затрачиваемое на разработку регулятора, повышается точность определяемых параметров.

Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [135-136].

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.

В дальнейшем данное исследование будет направлено на создание программного обеспечения, позволяющего синтезировать параметры нестационарных систем различной сложности. Результаты, полученные по итогам данной работы, позволят усовершенствовать и унифицировать метод расчёта при помощи обобщённого метода Галеркина.

Список использованной литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2007. – 752 с.

2. Красовский А.А. Основы автоматики и технической кибернетики. – М.; Л., Госэнергоиздат, 1962, – 600 с.

3. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.

4. Кудряшов, В. С. Методы синтеза цифровых систем управления многосвязными технологическими объектами : монография / В. С. Кудряшов, С. В Рязанцев, А. В. Иванов. — Воронеж : ВГУИТ, 2018. – 333 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/106907

5. Артамонов, Д. В. Основы теории линейных систем автоматического управления [Текст]: Учебн. пособие. / Д. В. Артамонов, А. Д. Семёнов - Пенза: Изд-во Пенз. гос. унта, 2003. - 135 с.

6. Гропп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гропп. - М.: Мир, 1979. - 304 с.

7. Заде, Л. Теория линейных систем [Текст] / Л. Заде, Ч. Дезоер. - М.: Наука, 1970. - 704 с.

8. Лубенцова, Е. В. Системы управления с динамическим выбором структуры, нечеткой логикой и нейросетевыми моделями : монография / Е. В. Лубенцова. – Ставрополь : СКФУ, 2014. – 248 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/155232

9. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.

10. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных

систем автоматического управления. / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; Под ред. А. А. Воронова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. 504 с.

11. Статистическая динамика систем с переменной структурой, Казаков И.Е. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1977, 416 с.

12. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. − Томск: Томский государственный университет, 2006. − 288 с.

13. Михайлов Ф.А., Теряев Е.Д., Булеков В.П., Саликов Л.М., Диканова Л.С. Динамика непрерывных линейных систем с детерминированными и случайными параметрами, Изд-во «Наука», 1971 г., 558 с.

14. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

15. Пивоваров Ю.Н., Тарасов В.Н., Селищев Д.Н.. Методы и средства оперативного анализа случайных процессов: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ. 2004. 186 с.

16. Стохастические системы [Текст] : оценки и управление / В. Н. Афанасьев. - Москва : URSS : ЛЕНАНД, cop. 2018. - 147 с.

17. Хрущева, И. В. Основы математической статистики и теории случайных процессов : учебное пособие / И. В. Хрущева, В. И. Щербаков, Д. С. Леванова. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. 336 с.

18. Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб: СПбГУАП, 2017. 151 с.

19. Проектирование авиационных колес и тормозных систем / И. И. Зверев, С. С. Коконин. - Москва : Машиностроение, 1973. - 224 с.

20. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. 367 с.

21. Масальский, Г. Б. Математические основы кибернетики : учебное пособие / Г. Б. Масальский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск : СФУ, 2018. 384 с.

22. Ларин, В. Г. Методика определения областей абсолютной устойчивости / В. Г. Ларин, Е. Н. Чернова // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы V Международной научно-практической конференции, Саратов, 01-30 апреля 2014 года / Под редакцией В.А. Трушкина. – Саратов: ООО "Буква" (Саратов), 2014. – С. 189-191.

23. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами: Инженерные методы анализа и синтеза / Б.Н. Петров, Н.И, Соколов, А.В. Липатов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

24. Оморов, Т. Т. Метод синтеза автоматических регуляторов для нестационарных линейных многомерных систем / Т. Т. Оморов, Г. А. Кожекова, Т. Жолдошов // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. – 2012. – № 3. – С. 90-93.

25. Жмудь, В. А. Теория автоматического управления. Замкнутые системы : учебное пособие для вузов / В. А. Жмудь. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. 234 с.

26. Радиоавтоматика: Учеб. пособие для студ. вузов спец. «Радиотехника»/В. А. Бесекерский, А. А. Елисеев, А. В. Небылов и др.; Под ред. В. А. Бесекерского.— М.: Высш. шк., 1985. 271 с.

27. Шалыгин, А. С. Устойчивость динамических систем автоматического управления : учебное пособие / А. С. Шалыгин, В. А. Санников. – Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2015. 162 с.

28. Рогалев, А. Н. Вычисление оценок устойчивости технических систем на конечном интервале времени / А. Н. Рогалев // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 2. – С. 71-73.

29. Теория нестационарного управления [Текст] : учебное пособие / С. В. Богословский, В. С. Богословский ; С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения. - СПб. : Изд-во ГУАП, 2005. - 380 с.

30. А. П. Молчанов, М. В. Морозов, Функции Ляпунова для нелинейных нестационарных дискретных систем управления с периодической линейной частью, Автомат. и телемех., 1992, выпуск 10, 37–45.

31. Муратова Т.В. Задача устойчивости нестационарных систем общего вида, Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: естественные науки, 2012, №3 (46), с. 16-19.

32. Дифференциальные уравнения. Устойчивость и оптимальная стабилизация : учебное пособие для вузов / А. Н. Сесекин [и др.] ; ответственный редактор А. Н. Сесекин ; под научной редакцией А. Ф. Шорикова. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. 119 с.

33. Теория показателей Ляпунова и ее приложения к вопросам устойчивости / Былов Б.Ф., Виноград Р.Э., Гробман Д.М., Немыцкий В.В. М.: Наука, 1966. 576 с.

34. Бирюк, Н. Д. Характеристические показатели Ляпунова линейного параметрического контура / Н. Д. Бирюк, А. Ю. Кривцов // Радиолокация, навигация, связь : XXII Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 19–21 апреля 2016 года. Том 1. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2016. – С. 185-194.

35. Барабанов А.Т. Теория линейных нестационарных систем с особой точкой. Устойчивость систем // Автоматика и телемеханика. М.: АН СССР, 1969. №6. С.5-15.

36. Эфендиев, А. Р. Асимптотическое поведение решений систем дифференциальных уравнений : монография / А. Р. Эфендиев. — Махачкала : ДГУ, 2018. 157 с.

37. Бобиков, А. И. Анализ и проектирование нелинейных систем управления : учебное пособие / А. И. Бобиков. — Рязань : РГРТУ, 2013. 220 с.

38. Семичевская Н. П., Алгоритмы робастного нелинейного управления нестационарными динамическими объектами; под ред. Е. Л. Еремина; АмГУ. Благовещенск, 2006., 150 с.

39. А. А. Бобцов, Н. А. Николаев, Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова, Автомат. и телемех., 2005, № 1, с. 118–129.

40. А. М. Цыкунов, Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений, Автомат. и телемех., 2007, № 7, с. 103–115.

41. К. В. Воронов, О. И. Королева, В. О. Никифоров, «Робастное управление нелинейными объектами с функциональными неопределенностями», Автомат. и телемех., 2001, № 2, с. 112–121.

42. Елсуков В. С., Лачин В. И., Законы управления для нелинейных объектов с функциональными неопределеностями, Технические науки., 2019, с. 36-39.

43. Оморов Т. Т., Кожекова Г. А., Жолдошов Т. Метод синтеза автоматических регуляторов для нестационарных линейных многомерных систем; НАН КР., 2012., 4 с.

44. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова; СПбГУАП. СПб., 2003., 358 с.

45. Латыпов Р. Р., Бурмистров Е. Г., Огнев Н. В., Галочкин Д. А., Анализ методов математического моделирования автоматизированных систем управления производственными системами верфи, Научные проблемы водного транспорта., 2010., с. 51-55.

46. Максимова, Н.Н. Математическое моделирование. Учебно-методическое пособие / сост. Н.Н. Максимова. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2019. – 88 с.

47. Плотников, С. А. Математическое моделирование систем управления : учебное пособие / С. А. Плотников, Д. М. Семенов, А. Л. Фрадков. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2021. 193 с.

48. Аюпов, В.В. Математическое моделирование технических систем [Текст]: учебное пособие / В.В. Аюпов. – Пермь: Прокрость, 2017. 242 с.

49. Бабошкин Г.Д., Ушаков П.А. Моделирование системы управления дробного порядка с высокоинерционным объектом управления на примере системы стабилизации антенно-поворотного устройства. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019; (3): с. 41-51.

50. Козлов В.Н. Методы автоматизированного проектирования нелинейных систем управления. Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина. 1984.- 80 с.

51. Зубов Н. И., Математические методы анализа и синтеза линейных нестационарных систем управления; под ред. Е. И. Веремей; СПБГУ. СПБ., 2003., 107 с.

52. Будин В. И. Математические основы автоматики и управления: учеб. пособие / В. И. Будин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 119 с.

53. Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Шашихин В.Н. Управление энергетическими системами. Теория автоматического управления / под ред. В.Н. Козлова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 255 с.

54. Зубер Е. И., Синтез канонических преобразований подобия для нелинейных нестационарных динамических систем управления; СПБГУ, Санкт-Петербург, 2010., 14 с.

55. Зубер Е. И., Спектральная стабилизация нелинейных систем. // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. Математика, механика, астрономия. Сер. 1. СПб., 2000.

56. А. И. Глущенко, К. А. Ласточкин, В. А. Петров, “Адаптивное управление с гарантией экспоненциальной устойчивости. Часть I. Объекты с постоянными параметрами”, Автомат. и телемех., 2022, № 4, 62-99; Autom. Remote Control, 83:4 (2022), с.548–578.

57. А. И. Глущенко, К. А. Ласточкин, «Адаптивное управление с гарантией экспоненциальной устойчивости. Часть II. Объекты с кусочно-постоянными параметрами», Автомат. и телемех., 2023, № 3, 65–105, Autom. Remote Control, 84:3 (2023), с. 285–316

58. Макаров Г.В. Развитие методов и алгоритмов теории подобия для систем управления. – Томск, 2021. – 26 с.

59. Барбашин Е. А., Функция Ляпунова. М.: Наука 1970.

60. Лурье А. Н. Некоторые нелинейные задачи теории автоматического регулирования. М.: Гостехиздат. 1951.

61. А. Л. Фрадков, Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления, Автомат. и телемех., 1979, № 9, с. 90-101.

62. Фрадков А. Л., Томчина О. П., Галицкая В. А., Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №1(83). – с. 30-37.

63. Любимов Е. В., Автоматизированный аналитический синтез нелинейных систем управления сложными динамическими объектами; под ред. А. А. Дыда; МГУ им. Г. И. Невельского. Владивосток, 2007., 197 с.

64. Семенов Д. М., Синхронизация в спайковых нейронных сетях; под ред. Фрадкова А. Л.; СПБГУ, Санкт-Петербург, 2019, с. 67.

65. А.А. Кабанов, Е.А. Шушляпин, Исследование систем адаптивного управления, Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 28 с.

66. Б. Р. Андриевский, А. А. Селиванов, Новые результаты по применению метода пассификации. Обзор, Автомат. и телемех., 2018, № 6, с. 3-48.

67. Фрадков А. Л., Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

68. Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков, Метод скоростного градиента и его приложения, Автомат. и телемех., 2021, № 9, с. 3-72.

69. Е. Л. Еремин, Л. В. Чепак, Алгоритмы адаптации дискретно-непрерывных систем для объектов с запаздыванием по управлению, АмГУ, Благовещенск, 2006 г., 12 с.

70. Герасимов Д.Н., Кошелев К.П., Беляев М.Е., Никифоров В.О. Алгоритм адаптивного управления по выходу линейной системой с улучшенной параметрической сходимостью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. с. 771-779.

71. Е. Л. Миркин, Ж. Ш. Шаршеналиев, Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью для объектов с запаздыванием в управлении, Автомат. и телемех., 2010, № 11, с. 159-171.

72. В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков, Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой, Автомат. и телемех., 1994, № 9, с. 3–22.

73. Бобцов А. А., Никифоров В. О., Применение алгоритмов адаптации высокого порядка в условиях внешних возмущений; СПбГУ ИТМО, СПб., 2005., 5 с.

74. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 548 с.

75. Кузьменко А. А., Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления, ЮФУ, Таганрог, 2018, 12 с.

76. Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, №9. – С. 579-589.

77. Метод построения адаптивной многосвязной САУ сложным динамическим объектом / А. Ш. Назаров // Мавлютовские чтения: матер. Всерос. молодежи, науч. конф. сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 3. С. 223-224.

78. Ким Д. П., Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы : учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 441 с.

79. Тычинин А. В., Методы обратных задач динамики в задачах синтеза систем управления распределенным объектом, СамГТУ, Самара, 2005 г., 5 с.

80. А. П. Крищенко, Метод Обратной задачи динамики в теории управления. МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 2014 г., 7 с.

81. А. Р. Гайдук, Синтез нелинейных селективно-инвариантных систем управления на основе квазилинейных моделей, Автомат. и телемех., 2023, № 2, с. 81-102.

82. Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф. Метод синтеза нелинейных систем с аппроксимирующими законами управления. Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2015;(6): с. 7-14.

83. Кунцевич В.М., Лычак М.М. Синтез систем автоматического управления методом функций Ляпунова. М.: Наука, 1977. 570 с.

84. Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А. Адаптивное управление возмущенными системами. Учебное пособие – Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015, 2015. 126 с.

85. Константинов С. С., Решение задачи синтеза системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора; под ред. А. И. Дивеева; ФИЦ ИУ РАН. Москва, 2022., 180 с.

86. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А. А. Воронова и И. А. Орурка. М.: Наука, 1984. 340 с.

87. Осипов Л. А., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез линейных САУ с запаздыванием во временной области // Информационно-измерительные системы и их использование в управлении летательным аппаратом / ЛИАП. Л., 1988. с. 122-128.

88. Шишлаков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с запаздыванием прямым вариационным методом // Методы и средства обработки и получения данных в информационно-управляющих системах / ЛИАП. Л., 1990. с. 30-37.

89. 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.

90. 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. Vol. [3]. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 9131430.

91. 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.

92. Решетникова, Н. В. О методах синтеза нестационарных систем управления / Н.В. Решетникова, А. Г. Панкратов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года / Под редакцией В.В. Окрепилова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 369-370.

93. Алгоритмы динамического синтеза нелинейных автоматических систем / Под ред. А. А. Воронова и И. А. Орурка. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 334 с.

94. Шишлаков В. Ф., Полякова Т. Г. Параметрический синтез САУ с ШИМ прямым вариационным методом. Информатика и управление / СПбГУАП. СПб., 1998. с. 84-90.

95. Шишлаков В. Ф., Грибков В. Н. Синтез дискретных САУ с запаздыванием методом ортогональных проекций // Методы исследований и проектирования автоматических систем и приборов / ЛИАП. Л., 1990. с. 35-41.

96. Розенфельд А. С., Яхинсон Б. И. Переходные процессы и обобщенные функции. М.: Наука, 1966. 440 с.

97. Батищев Д. И. Поисковые методы оптимального проектирования. М.: Сов. радио, 1975. 216 с.

98. Кудрявцев В. А., Демидович Б. П. Краткий курс высшей математики. М.: Наука, 1978. 575 с.

99. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.

100. Шишлаков В. Ф. Синтез нелинейных САУ с различными видами модуляции: Монография / ГУАП. СПб., 1999. 268 с.

101. Шишлаков В. Ф., Шишлаков Д. В. Параметрический синтез многосвязных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина // Информационно-управляющие системы. 2006. № 3. с. 51-62.

102. Шишлаков В. Ф., Анисимова Е. В., Шишлаков А. В., Шишлаков Д. В. Синтез параметров закона управления для нелинейных САУ при различных видах аппроксимации характеристик // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. с. 701-706.

103. Шишлаков В. Ф., Цветков С. А., Шишлаков Д. В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: Монография / Под. ред. В. Ф. Шишлакова. СПб: СПбГУАП, 2009. 180 с.

104. Шишлаков Д. В., Шишлаков А. В. Синтез многосвязных электромеханческих систем автоматического управления при аналитической аппроксимации характеристик нелинейных элементов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Тр. 6-й Всерос. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. В. Ю. Островлянчика. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. 340 с.

105. Шишлаков В. Ф., Анисимова Е. В. Аппроксимация характеристик нелинейных звеньев систем автоматического управления торможенияем колес транспортных средств // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Тр. 6-й Всерос. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. В. Ю. Островлянчика. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2014. 340 с.

106. Шишлаков В. Ф. Синтез нелинейных импульсных систем управления во временной области // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2003. № 12. с. 25-30.

107. Определение собственного сопротивления обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения / С. С. Тимофеев, И. А. Шишков, Д. С. Швецов, К. С. Никитина // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Материалы XXVI Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 29 мая – 02 2023 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – с. 213-219.

108. Тимофеев С. С. Определение собственного сопротивления обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения. СПб.: ГУАП, 2023. 9 с.

109. Морозовский В. Т. Анализ и синтез корректирующих перекрестных связей многомерных автоматизированных систем // Тр. Военно-воздушной академии им. Н. Е. Жуковского, 1963. 197 с.

110. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970. 288 с.

111. Хуторецкий Г.М., М.И.Токов, Е.В.Толвинская Проектирование турбогенераторов, Л. ЛПИ, 1987.

112. Зверев И. И., Коконин С. С. Проектирование авиационных колес и тормозных систем. М.: Машиностроение, 1972. 224 с.

113. Моделирование и синтез нелинейных систем автоматического управления / Шишлаков В.Ф., Ватаева Е.Ю., Решетникова Н.В., Криволапчук И.Г. и др. // Датчики и системы. – 2019. – №11(241). – с.17-24.

114. Синтез параметров законов управления нелинейных САУ при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишлаков, Д. В. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова // Завалишинские чтения’18: Сб. докл. СПб: СПбГУАП, 2018. с. 114-118.

115. Шишлаков В.Ф., Ватаева Е.Ю., Решетникова Н.В. Синтез параметров САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик // Инновации в науке и практике Сборник статей по материалам VII международной научно-практической конференции. В 5-ти частях. Санкт-Петербург, 2018. с.92-98.

116. 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 – 02 2023 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. с. 196-202.

117. 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 – 02 2023 года. Том Часть 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – с. 183-192.

118. 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.

119. 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. 2018. – P. 2006.

120. 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), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8840123.

121. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления при полиномиальной аппроксимации / В. Ф. Шишлаков, Е. Ю. Ватаева, Н. В. Решетникова, Д. В. Шишлаков // 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.

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

123. 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 – Conference Proceedings, Saint-Petersburg, P. 9470639.

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

125. 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.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

129. Параметрический синтез системы автоматического управления сверхпроводниковой электроэнергетической установкой в условиях нестационарности / В.Ф. Шишлаков, Н. В. Решетникова, А.Г. Панкратов // Завалишинские чтения 24 : Сборник докладов XIX Международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 15–17 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – с. 369-370.

130. Шишлаков В. Ф., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В., Шишлаков Д. В. Синтез нелинейных импульсных систем при полиномиальной аппроксимации // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. с. 834-842.

131. 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.

132. 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.

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

134. Электроэнергетический комплекс со сверхпроводниковым оборудованием : разработка, создание, исследование : монография / М. В. Бураков [и др.] ; ред.: В. Ф. Шишлаков, Ю. А. Антохина ; С.-Петерб. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения. – СПб. : Изд-во ГУАП, 2018. – 255 с.

135. Синтез нестационарных непрерывных нелинейных систем автоматического управления обобщенным методом Галеркина / В. Ф. Шишлаков,

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

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

Приложение А

Акт Внедрения

ГУАП

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»
(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000
Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057
E-mail: info@guap.ru; http://www.guap.ru

ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680
ИНН/КПП 7812003110/783801001

__________ № __________

На № __________ от __________

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ГУАП
доктор экономических наук,
профессор
________ Ю.А. Антохина
«20» 01 2025 г.

Акт
о внедрении научных результатов,
полученных Решетниковой Наталией Викторовной
в диссертационной работе «Параметрический синтез систем автоматического управления в условиях нестационарности»

Комиссия в составе:
председателя, проректора по учебной деятельности, к.т.н., доцента В.А. Матьяша;
членов комиссии:
начальника учебного управления, к.т.н. Н.В. Маркеловой;
заместителя директора института киберфизических систем по учебно-воспитательной работе, к.т.н., доцента А.Д. Жукова;

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Решетниковой Н.В. в диссертационной работе «Параметрический синтез систем автоматического управления в условиях нестационарности», используются в учебном процессе кафедры управления в технических системах ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по направлениям подготовки 27.03.04 Управление в технических системах», 16.03.01 «Техническая физика», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.04.04 «Управление в технических системах».

Председатель комиссии,
проректор по учебной деятельности,
к.т.н., доцент — В.А. Матьяш

Члены комиссии:
Начальник учебного управления,
к.т.н. — Н.В. Маркелова

заместитель директора института
киберфизических систем
по учебно-воспитательной работе
к.т.н., доцент — А.Д. Жуков

Приложение Б

Алгоритм решения задачи синтеза нестационарных САУ