

МАЛЬЦЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ
С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Востриков Анатолий Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты: **Абденов Амирза Жакенович**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра защиты информации, профессор

Гаврилов Алексей Борисович,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное предприятие «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии», лаборатория информационных технологий, начальник лаборатории

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления сложными системами РАН**, г. Самара

Защита состоится «16» апреля 2013 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 Новосибирского государственного технического университета по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Юркевич Валерий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена выполнением исследований по широко распространенному классу систем автоматического управления. Диссертационная работа связана с решением задачи построения эффективных систем стабилизации для нелинейных и нестационарных объектов с параметрическим управлением. Данный класс систем встречается в задачах управления летательными и космическими аппаратами, в системах отопления, вентиляции, в нефте- и газопроводах, в автомобильной и химической промышленности, а также объектах энергетики.

Для большого круга задач традиционные методы управления не обеспечивают должного качества регулирования, так как требуют много априорной информации о математической модели объекта управления и условиях его функционирования. При этом на практике трудно получить точное математическое описание объекта. Кроме того характеристики объекта в процессе его функционирования могут существенно изменяться. Возникшая в середине 20-го века теория адаптивных систем позволила решить многие задачи управления объектами с изменяющейся динамикой. Тем не менее, в работах академика Б.Н. Пертова отмечено, что исполнительные устройства регулятора имеют ограничения на скорость изменения положения органов управления и в ряде случаев, при выходе объекта на существенно нелинейный режим работы, компенсация изменения динамики путем настройки коэффициентов адаптивного регулятора может оказаться недостаточной. Для решения задачи управления необходимым может оказаться не только изменение параметров регулятора, но и целенаправленное изменение конструктивных параметров самого объекта в процессе его функционирования. В такой постановке возникает задача построения систем стабилизации с параметрическим управлением.

Принципы параметрического управления описаны в работах отечественных ученых: Б.Н. Пертова, В.Ю. Рутковского, С.Д. Землякова и др., а позднее в ряде работ зарубежных авторов. В этих работах под параметрическим понимается такое управление, при котором стабилизации выходной величины осуществляется путем изменения (настройки) собственного параметра объекта управляя.

Наличие в рассматриваемом классе систем нелинейных и нестационарных процессов не позволяет применять традиционные методы управления и требует специальных подходов к проектированию параметрических регуляторов. Разработка метода проектирования, синтеза и настройки эффективных систем стабилизации с параметрическим управлением определяет **новизну** работы.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью исследования является разработка методики проектирования регулятора для систем стабилизации с параметрическим управлением на основе существующей концепции принципа локализации.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Изучить особенности систем с параметрическим управлением и особенности методов управления нелинейными и нестационарными системами.
2. Разработать методику проектирования систем стабилизации с параметрическим управлением на основе метода локализации и методику расчета параметров регулятора и характеристик системы.
3. Исследовать качество работы систем с параметрическим управлением при действии возмущений различного вида.
4. Применить метод на примерах моделей реальных процессов.

Объект диссертационного исследования – системы стабилизации с параметрическим управлением для объектов с нелинейными и нестационарными характеристиками.

Предмет диссертационного исследования – теоретические основы и алгоритмы параметрического управления, методика проектирования, структурные схемы систем стабилизации с параметрическим управлением.

Методологической базой исследования являются классические методы теории автоматического регулирования, принцип локализации, метод разделения движений, методы численного моделирования.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. *Характеристика* параметрического управления и критерии принадлежности к классу систем с параметрическим управлением.
2. *Методика синтеза* систем стабилизации с параметрическим управлением, обладающих заданными динамическими свойствами в условиях нестационарных и нелинейных характеристик объекта управления, на основе принципа локализации. Основные расчетные соотношения метода.
3. *Численное исследование* характеристик систем стабилизации с параметрическим управлением при действии возмущений различного вида. Оценка влияния величины и темпа возмущений на процессы в системе. Условия обеспечения желаемой точности.
4. *Структуры систем* параметрического управления для модели процессов в двигателе внутреннего сгорания с прямым впрыском и модели паровой турбины.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика проектирования систем стабилизации на основе метода локализации для класса систем с параметрическим управлением, позволяющая обеспечить заданную точность стабилизации при нелинейных и нестационарных процессах в объекте управления.

2. Получены расчетные соотношения зависимости параметров замкнутой системы от параметров регулятора и предложена процедура настройки параметров системы с параметрическим регулятором.

3. Получена зависимость погрешности стабилизации от амплитуды и частоты действующих в системе возмущений, позволяющая определить условия работоспособности системы стабилизации.

Теоретическая значимость. Исследование позволило расширить область применения метода локализации. Основные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, могут быть использованы при дальнейшем развитии теории управления системами с параметрическим управлением в условиях нелинейных и нестационарных процессов в объекте управления.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании структуры, расчете параметров и настройки систем стабилизации с параметрическим управлением.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих семинарах и конференциях: 9-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» - АПЭП (Новосибирск, 2008); международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2009, 2011, 2012); международной конференции по автоматизации, управлению и информационным технологиям – IASTED International Conference on Automation, Control and Information Technology (Новосибирск, 2010); 3-й международной конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы» (Улан-Удэ, 2010).

Публикации работы. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 5 работ в материалах всероссийских и международных конференций и 1 статья в сборнике научных трудов. Публикации полностью отражают содержание диссертации.

Личный вклад автора. Обзор литературы, вычислительные эксперименты, проектирование систем стабилизации для моделей реальных процессов вы-

полнены автором лично. Методика проектирования и аналитическое обоснование результатов выполнены автором совместно с научным руководителем.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются аналитическим обоснованием основных результатов, численным моделированием систем, публикациями в рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и 3-х приложений. Содержит 110 страниц основного текста, 44 рисунка, 6 таблиц, список литературы составляет 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе дается характеристика системам с параметрическим управлением, рассмотрены реальные процессы и модели систем с переменными и настраиваемыми параметрами, приведена история возникновения систем адаптивного и параметрического управления, описаны основные методы анализа и синтеза систем стабилизации для нелинейных и нестационарных объектов.

В окружающем нас мире встречаются большое число систем с переменными параметрами и систем, параметры которых доступны для изменения. Это могут быть механические системы вроде двигателей или маятников, электрические объекты, такие как автогенераторы и др. Так, механическая перестройка параметров колебательного контура применялась еще перед Первой мировой войной в генераторах электромагнитных колебаний.

Задача проектирования систем параметрического управления заключается в синтезе параметрического регулятора, который путем изменения параметров объекта управления обеспечит стабилизацию выхода при входном воздействии на объект управления постоянном либо изменяющемся медленнее основных процессов в системе. Структурная схема системы с параметрическим управлением показана на рис. 1. По аналогии с адаптивными системами она включает параметрический регулятор (ПР), который выполняет настройку параметров θ объекта управления.

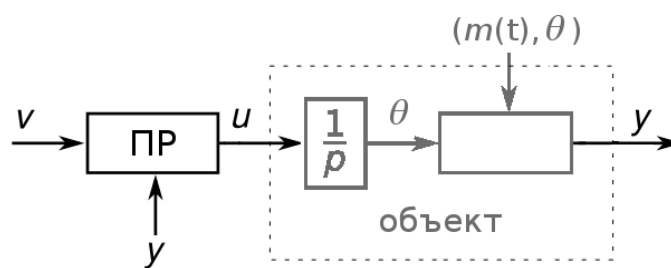


Рисунок 1 – Структурная схема системы с параметрическим управлением

Параметрическое управление находит широкое применение в системах управления летательными аппаратами. Для летательных аппаратов было разработано довольно много методов целенаправленного изменения динамических свойств во время полета. Так, еще с 1932 г. применялось увеличение площади крыла самолета. Существуют летательные аппараты с изменяющейся геометрией крыла, стабилизатора и рулевых поверхностей, при этом в значительной степени изменяется эффективность рулевых органов. Известны методы управления пограничным слоем, применения реактивных щитков, значительно меняющих аэродинамику летательного аппарата. Регулировать значение коэффициента статической устойчивости можно, изменяя координату центра тяжести. Параметрическое управление летательными аппаратами может быть организовано аналогично построению адаптивных систем с эталонной моделью. Также параметрическое управление широко используется в промышленности в системах регулирования давления, в системах отопления и вентиляции. В автомобильной промышленности актуальной является задача стабилизации давления в двигателе внутреннего сгорания. Процессы изменения давления в двигателях описываются нелинейными нестационарными управлениями. В качестве задачи выступает разработка закона управления дроссельными заслонками, регулирующими подачу газов в подводящий патрубок и стабилизация давления в патрубке на заданном уровне. Отмечается, что для управления такими объектами необходимо использовать обратную связь с адаптацией как под изменяющиеся параметры двигателя, так и под переключения между режимами его работы. Усложнение техники требует новых подходов к проектированию систем регулирования и технический прогресс невозможен без постоянного совершенствования методов управления сложными объектами, требующими все возрастающего качества регулирования. Период после Второй Мировой войны можно назвать периодом классической теории управления. В это время появляются первые учебные пособия по проектированию систем регулирования. Усложнением техники в аэрокосмической отрасли и атомной энергетике потребовало новых

подходов к проектированию систем регулирования. В эти годы возникает современная теория управления, основанная на описании систем дифференциальными уравнениями движения в области пространства состояний. В середине прошлого века для систем управления самолетами в нашей стране и за рубежом были предложены качественно новые методы управления с использованием ускорения выходной величины в законе обратной связи.

В 1955 году разработана нелинейная система регулирования Флюгге-Лотца и Тейлора с переключающимся регулятором. В этой системе в алгоритме переключения была использована первая производная выходной величины. В систему входит линейный объект второго порядка, а в законе обратной связи осуществляются всевозможные дискретные комбинации выходной величины и ее производной. В 1959 году была представлена система управления скоростными самолетами фирмы «Dopco». Система основана на применении интегрального критерия ошибки, минимизация которого проводится методами вариационного исчисления. В качестве ошибки рассматривалась разница между значением ускорения самолета на выходе модели и реальной величиной ускорения. Отмечается, что управление не может вызвать мгновенного изменения рассматриваемой ошибки, однако оно способно заставить измениться ускорение по желаемому закону. При этом желаемое значение ускорения формировалось в управляющем вычислительном устройстве. Поспелов рассматривает построение систем автоматического регулирования, которые обеспечивают инвариантность динамических свойств замкнутой системы. Для построения такой системы необходимо, чтобы параметры регулятора доминировали над параметрами объекта управления. При таком условии динамические свойства замкнутой системы будут полностью определяться параметрами устройства управления. С целью обеспечения свойства доминирования, в контур управления включается звено с достаточно большим коэффициентом усиления. Развитием метода большого коэффициента и идей управления по производной и ускорению явился метод синтеза по старшей (высшей) производной. При этом под старшей производной понимается производная, которая явно зависит от управления. Использование старших производных в законе обратной связи рассмотрена в работах Л.М. Бойчука и А.С. Вострикова.

Таким образом, в главе явно выделен класс систем с параметрическим управлением. Анализ литературы показал, что системы и задачи параметрического управления широко встречаются в промышленности, преимущественно в системах тепло- и газообмена, таких как промышленные системы отопления,

вентиляции и системы стабилизации давления. В данных системах основным параметром, меняющимся в ходе работы (возмущение), выступает сопротивление нагрузки. Изменение сопротивления нагрузки связано с включением либо отключением секций отопления и других подобных устройств. В этих системах в качестве управляющего параметра, то есть того параметра, который находится в нашем распоряжении, выступает переменное сопротивление входного канала, которое может регулироваться путем изменения положения задвижки либо клапана. Данные системы, как правило, описываются нелинейными и нестационарными моделями, что накладывает требования на вид регулятора.

Вторая глава посвящена разработке метода синтеза систем стабилизации с параметрическим управлением с учетом следующих их особенностей: управляющий параметр является частью объекта регулирования и не может в любой момент времени меняться произвольным образом, то есть он не является традиционным входным управлением; в модели системы управляющий параметр перемножается на переменную состояния (ток, расход) объекта регулирования; переменная состояния объекта (ток, расход) не меняет свой знак в процессе работы системы.

Синтез регулятора выполнен на основе метода локализации. В главе предложена структура регулятора, получены аналитические соотношения метода для класса линейных нестационарных и нелинейных нестационарных объектов малого порядка, приведена процедура расчета и настройки параметров регулятора. Рассматриваются линейные нестационарные и нелинейные нестационарные объекты малого порядка вида:

$$\dot{x}(t) = f(x, \theta, t), \quad y = g(x, t), \quad \dot{\theta} = k_0 u,$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния; $u \in R^m$ – вектор ограниченных по модулю управлений; $f(x, \theta, t)$ и $g(x, t)$ – нелинейные нестационарные функции; явная зависимость от t указывает на возмущения, действующие на объект управления; θ – управляющий параметр; k_0 – положительный коэффициент.

Цель параметрического регулирования состоит в переводе системы из произвольного начального состояния $x(t_0)$ в ограниченную область заданного состояний $v(t)$ при действии неконтролируемых возмущений и стабилизации выхода системы в заданном состоянии путем изменения (настройки) управляющего параметра θ , входящего в состав объекта регулирования. При этом параметрический регулятор требуется синтезировать так, чтобы в системе выполнялись заданные требования на динамические характеристики и характери-

ки в установившемся режиме. Требования для установившегося режима зачастую задаются относительно выходной переменной соотношением вида:

$$\lim y(t) = v, \text{ при } t \rightarrow \infty \quad (1)$$

Выражение (1) означает, что между входом и выходом системы должно поддерживаться требуемое соотношение с заданной точностью, несмотря на действия возмущений. Требование на движения системы из начального состояния к заданному задается в виде дифференциального уравнения желаемой динамики вида:

$$y^{(n)} = F(y, y^{(1)}, \dots, y^{(n-1)}, v), \quad (2)$$

где n – порядок старшей производной выходной переменной объекта управления.

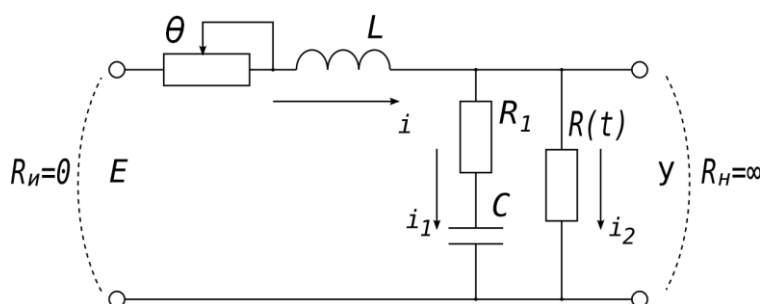


Рисунок 2 – Схема объекта управления

В качестве примеров линейных нестационарных стабилизируемых объектов рассматриваются модели электротехнических систем, а цель управления заключается в стабилизации электрического напряжения на переменной нагрузке. На рис. 2 показана схема одного из рассматриваемых объектов управления. Он представляет собой электрическую цепь с переменной нагрузкой $R(t)$ и управляющим резистором θ . Переменные состояния определяются в виде: $x_1=i$; $x_2=i_2$. В этом случае модель объекта управления принимает следующую форму:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L} [E - x_1 \theta - R(t) x_2], \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{R_n(t) + R} \left[\left(\frac{1}{C} - \frac{R_1}{L} \theta \right) x_1 - \left(\frac{1}{C} + \dot{R}(t) + \frac{R_1}{L} R(t) \right) x_2 + \frac{R}{L} E \right], \\ y = R(t) x_2 \end{cases}$$

В общей форме выражение для старшей производной \dot{y} объекта записывается в виде:

$$\dot{y} = f(x, t) - b(x, t) x_1 \theta. \quad (3)$$

В качестве закона настройки управляющего параметра предлагается использовать известное соотношение метод локализации. Закон управления с относительной старшей производной в законе обратной связи задается в следующем виде:

$$u = -k[F - \dot{y}], \quad (4)$$

где n – относительный порядок объекта; F – желаемая динамика; k – положительный коэффициент усиления регулятора. В этом случае модель замкнутой системы принимает форму:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(x, t) - b(x, t)x_1\theta, \\ \mu\dot{\theta} &= -F + f(x, t) - b(x, t)x_1\theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Система (5) представляет собой систему дифференциальных уравнений с малым параметром при части производных. Анализ процессов в данной системе выполняется методом разделений движений. Рассматривается движение вдоль многообразия

$$-F + f(x, t) - b(x, t)x_1\theta = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает медленные процессы в замкнутой системе. После его подстановки в модель системы (3) получаем $\dot{y} = F$. Таким образом, для случая малого параметра μ получено, что медленные процессы соответствуют желаемым процессам по выходной переменной, т.е. выполняются требования (1) и (2). Далее рассматривается система в быстром времени $\tau = \mu^{-1}t$:

$$\frac{dy}{d\tau} = \mu[f(x, t) - b(x, t)x_1\theta]; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = -F + f(x, t) - b(x, t)x_1\theta.$$

При $\mu \rightarrow 0$ получается описание быстрых процессов в замкнутой системе:

$$y = const, \quad \dot{\theta} = -F + f(x, t) - b(x, t)x_1\theta.$$

Быстрые процессы устойчивы при условии $b(x, t)x_1 > 0$.

Основные соотношения метода получены на примере объекта управления, заданного следующими уравнениями:

$$\dot{x} = f(t, x)\theta + m(t), \quad y = x, \quad \dot{\theta} = u.$$

Здесь $m(t)$ – случайные возмущения, ограниченные по темпу и значению; $f(t, x)$ – нестационарная функция, непрерывная, дифференцируемая и ограниченная по значению в рабочем диапазоне. С учетом параметрического управления, уравнение замкнутой системы принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, x)\theta + m(t), \\ \mu\dot{\theta} = F - \dot{y}. \end{cases}$$

Полагая параметр μ малым ($\mu = k^{-1}$), а значения функции $f(t, x)$ изменяющимся достаточно медленно, запишем уравнение системы в форме:

$$\dot{y} = F + \frac{\mu p}{\mu p + f} [-F + m].$$

Из условия $\mu \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$) и при медленном изменении функции $f(t, x)$ следует для рабочих частот системы выполнение условия $\dot{y} = F$. Таким образом, параметрическое управление с регулятором позволяет сформировать желаемый процесс по старшей производной выхода объекта управления и парировать возмущения, частоты которых не превышающие рабочие частоты объекта управления.

Для реализации закона управления необходимы оценки производных выходной переменной. Для их нахождения применяем малоинерционное дифференцирующее звено, которое будет называть дифференцирующим фильтром. Для объекта второго порядка дифференцирующий фильтр задается уравнением:

$$\mu^2 \hat{y}^{(2)} + 2d_1 \mu \hat{y}^{(1)} + \hat{y} = y.$$

Здесь \hat{y} – оценка выходной переменной объекта; d_1 – положительный коэффициент. В итоге, уравнения замкнутой системы с дифференцирующим фильтром имеют вид:

$$\begin{cases} y^{(2)} = f(t, x) + \frac{b(t, x)k}{p} (F - \hat{y}^{(2)}), \\ \mu^2 \hat{y}^{(2)} + 2d_1 \mu \hat{y}^{(1)} + \hat{y} = x. \end{cases}$$

Перепишем систему в следующем виде:

$$\begin{cases} y^{(2)} = f(t, x) + \frac{b(t, x)k}{p} (F - \hat{y}^{(2)}), \\ \hat{y} = W(\mu p) y, \\ \hat{y}^{(1)} = W(\mu p) y^{(1)}, \\ \hat{y}^{(2)} = W(\mu p) \left(f(t, x) + \frac{b(t, x)k}{p} (F - \hat{y}^{(2)}) \right), \end{cases}$$

где $W(\mu p) = 1/D(\mu p)$, $D(\mu p) = \mu^2 p^2 + 2d_1 \mu p + 1$ - фильтрующий полином, тогда

$$\hat{y}^{(2)} = \frac{W(\mu p)}{1 + p^{-1}bkW(\mu p)} \left(f(t, x) + \frac{bk}{p} F \right) = \frac{1}{p + bkD(\mu p)} (pf + bkF).$$

Полагая $\mu = 0$, при этом $D(\mu p) = 1$, и подставляя $\hat{y}^{(2)}$ в выражение для $y^{(2)}$ получим описание подсистемы медленных движений:

$$y^{(2)} = F + \frac{P}{p + bk}(f - F).$$

Перейдем к быстрому времени $\tau = \mu^{-1}t$, $q = \mu p$:

$$\left\{ \begin{array}{l} y^{(2)} = \mu^2 \left(f(t, x) + \frac{\mu b(t, x)k}{q} [F - W(q)y^{(2)}] \right), \\ \hat{y}(q) = W(q)y(q) \\ \hat{y}^{(1)}(q) = W(q)y^{(1)}(q), \\ \hat{y}^{(2)}(q) = W(q) \left(f(\cdot) + \frac{\mu b(t, x)k}{q} [F - \hat{y}^{(2)}] \right). \end{array} \right.$$

Устремим $\mu \rightarrow 0$ и с учетом $k = \mu^{-1}$ получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{y}(q) = W(q)y(q), \\ \hat{y}^{(1)}(q) = W(q)y^{(1)}, \\ \hat{y}^{(2)}(q) = W(q) \left(f(t, x) + \frac{b(t, x)}{q} [F - \hat{y}^{(2)}] \right). \end{array} \right.$$

Возвращаясь к нормальному времени, получим выражение для подсистемы быстрых движений:

$$y^{(2)} = \frac{1}{D(\mu p)p + bk} [pf + bkF].$$

Выражение для подсистемы медленных движений также показывает, что на рабочих частотах объекта, при достаточно большом коэффициенте усиления регулятора процессы на выходе системы будут соответствовать уравнению желаемой динамики.

Как результат, в главе предложена методика проектирования систем стабилизации на основе метода локализации для класса систем с параметрическим управлением, позволяющая обеспечить заданную точность стабилизации при нелинейных и нестационарных процессах в объекте управления. Показано, что использование метода локализации для настройки управляющего параметра системы позволило получить новые свойства в системах стабилизации с параметрическим управлением. В рассмотренных системах за счет сильной обратной связи по производным удастся локализовать возмущения, действующие на объект управления во внутреннем контуре и подавить их за счет относительно

большого коэффициента передачи регулятора. В тоже время получена особенность параметрического варианта метода локализации, которая заключается в возможности формирования эталонных процессов на выходе объекта только на рабочих частотах, что накладывает ограничения на темп обрабатываемых возмущений. При величине малого параметра порядка единицы в системе не удастся выделить отдельную автономную подсистему. В этом случае на выходные процессы в системе будут влиять собственные параметры объекта управления. Показано, что наличие дополнительного интегратора в контуре быстрых движений обеспечивает фильтрацию высокочастотных возмущений, действующих на выходе системы (помех измерений) и уменьшает влияние подобных возмущений на управление.

В третьей главе исследуются свойства систем стабилизации с параметрическим управлением и влияние возмущений различного вида на качество процессов, даются рекомендации по выбору параметров регулятора. Исследование свойств объектов управления и замкнутых систем выполнялось численными экспериментами. Моделирование всех динамических систем проведено в среде *Scilab* и, в частности, в программе визуального конструирования и моделирования динамических систем *Xcos*. Примеры процессов на выходе электрической цепи при постоянном входном сигнале изображены на рис. 3.

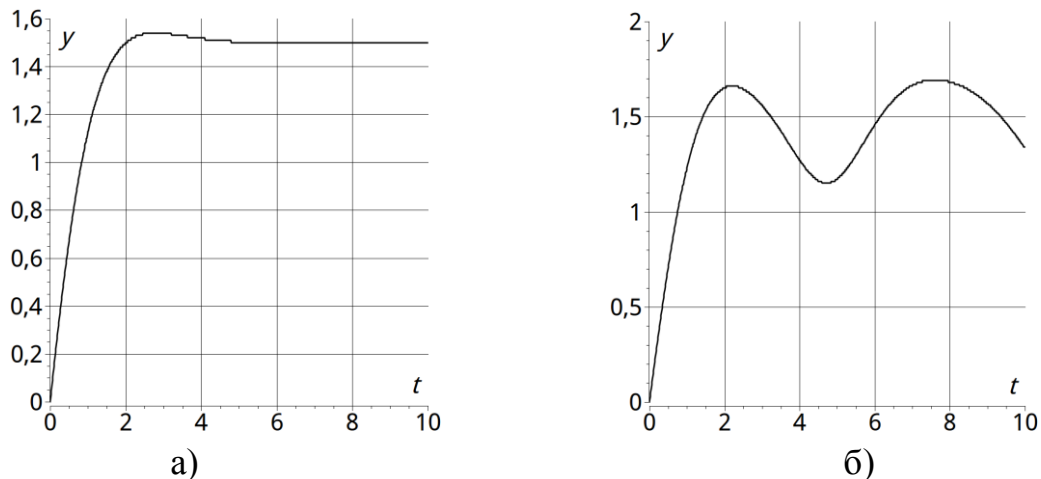


Рисунок 3 – Процессы на выходе объекта управления, а – постоянное сопротивление нагрузки, б – переменное сопротивление нагрузки

Расчет параметров регуляторов выполнялся в соответствии с представленной во второй главе процедуре для обеспечения в закинутых системах следующих показателей качества: время переходного процесса $t_{\text{пт}}=3$, ошибка стабилизации $e_s = 0.01$, перерегулирование $\sigma = 0$. Численные значения параметров регулятора для объектов первого порядка следующие:

$$0.01\dot{\theta} = F - \hat{y}, \quad F = v - y, \quad 0.01\dot{\hat{y}} + \hat{y} = y.$$

Пример выходного процесса в системе стабилизации приведен на рис. 4. Данный процесс полностью удовлетворяют предъявляемым к системам показателям качества.

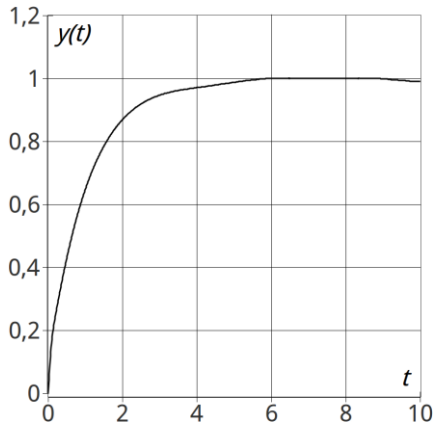


Рисунок 4 – Процессы на выходе замкнутой системы

Исследование влияния малого параметра выполнено для случаев отсутствия и наличия релейного элемента в законе настройки управляющего параметра. На рис. 5(а, б) показаны примеры процессов в замкнутой системе для различных значений малого параметра μ . Получено, что с уменьшением малого параметра увеличивается точность стабилизации, но при этом повышаются требования к необходимой скорости изменения управляющего параметра и необходимому максимальному значению управляющего параметра.

На основе численных исследований предложены рекомендации по выбору малого параметра при действии возмущений различной амплитуды. Полученная зависимость показана на рис. 5(в).

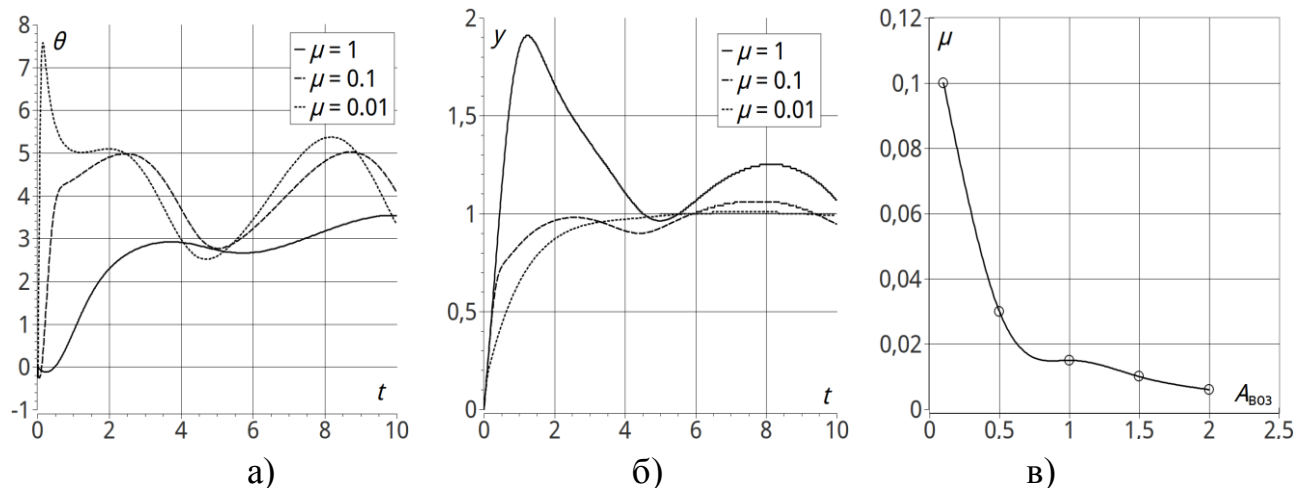


Рисунок 5 – Зависимость процессов в замкнутой системе от величины малого параметра (а,б) и зависимость необходимой величины малого параметра от амплитуды возмущений (в)

В главе показано, что с ростом темпа возмущений ухудшаются показатели качества выхода системы (прежде всего точность стабилизации). При этом для

всех рассмотренных темпов возмущений за счет увеличения коэффициента регулятора (уменьшения малого параметра μ) удавалось достичь желаемых показателей качества. Большие коэффициенты усиления приводят к увеличению затрат энергии на формирование управляющего воздействия и требуют большой допустимый диапазон изменения управляющего параметра. Поэтому даются рекомендации по выбору малого параметра системы (обратной величины от коэффициента регулятора) на два порядка меньше максимального темпа возмущений в системе. Показано, что основным отличием систем с релейным законом настройки управляющего параметра является наличие автоколебаний в контуре быстрых движений. В этом случае рекомендуется проводить отдельную настройку малого параметра и коэффициента усиления регулятора для обеспечения приемлемых параметров автоколебаний во внутреннем контуре. Полученная зависимость погрешности стабилизации от амплитуды и частоты действующих в системе возмущений, позволяет определить условия работоспособности системы стабилизации. При величине малого параметра на два порядка меньше постоянной времени желаемой динамики в системе обеспечивается заданная точность стабилизации при амплитуде возмущений сопоставимой по величине с основными процессами в системе.

В четвертой главе обсуждается применение предлагаемого метода построения систем стабилизации с параметрическим регулятором для моделей реальных нелинейных нестационарных процессов. В качестве таких процессов рассмотрены системы стабилизации давления во впускном коллекторе двигателя с прямым впрыском и система стабилизации скорости вращения паровой турбины. Также разработан регулятор для управления стабилизацией и перемещением двухколесного робота, представляющего собой перевернутый маятник. Синтез систем стабилизации и расчет параметров регулятора выполнялся в соответствии с процедурой, приведенной во второй главе. Схема двигателя с

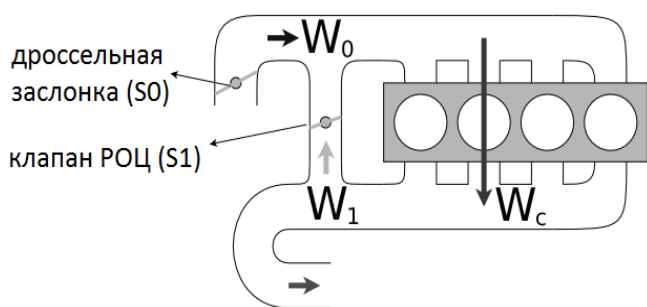


Рисунок 6 – Схема двигателя с прямым впрыском

прямым впрыском показана на рис. 6. Изотермическая модель изменения давления во впускном коллекторе имеет вид:

$$\dot{P} = c_m (W_0 + W_1 - W_c),$$

где P — давление во впускном коллекторе; W_0 — приток воздуха; W_1 — масса возвращаемых отработанных газов через клапан рециркуляции

отработавших газов; W_c — расход сжигаемого газа в цилиндрах; c_m — постоянная сжатия. Поток воздуха через дроссельные заслонки описывается следующими нелинейными уравнениями:

$$W_0 = f_0(P)S_0, \quad W_1 = f_1(P, P_e, T_e)S_1, \quad W_c = k_0 + k_1P,$$

$$f_0(P) = \phi\left(\frac{P}{P_a}\right) \frac{P_a}{\sqrt{T_a}}, \quad f_1(P, P_e, T_e) = \phi\left(\frac{P}{P_e}\right) \frac{P_e}{\sqrt{T_e}}.$$

здесь P_a и T_a — внешнее давление и температура; P_e и T_e — давление и температура отработанных газов; S_0 и S_1 — эффективная площадь сечения дроссельных заслонок (управляющие параметры); k_0 и k_1 — коэффициенты, зависящие от скорости двигателя и температуры во впускном коллекторе. Цель управления заключается в стабилизации давления P на заданном уровне путем изменения эффективной площади сечения дроссельной заслонки. На рис. 7 показаны полученные процессы в системе стабилизации давления.

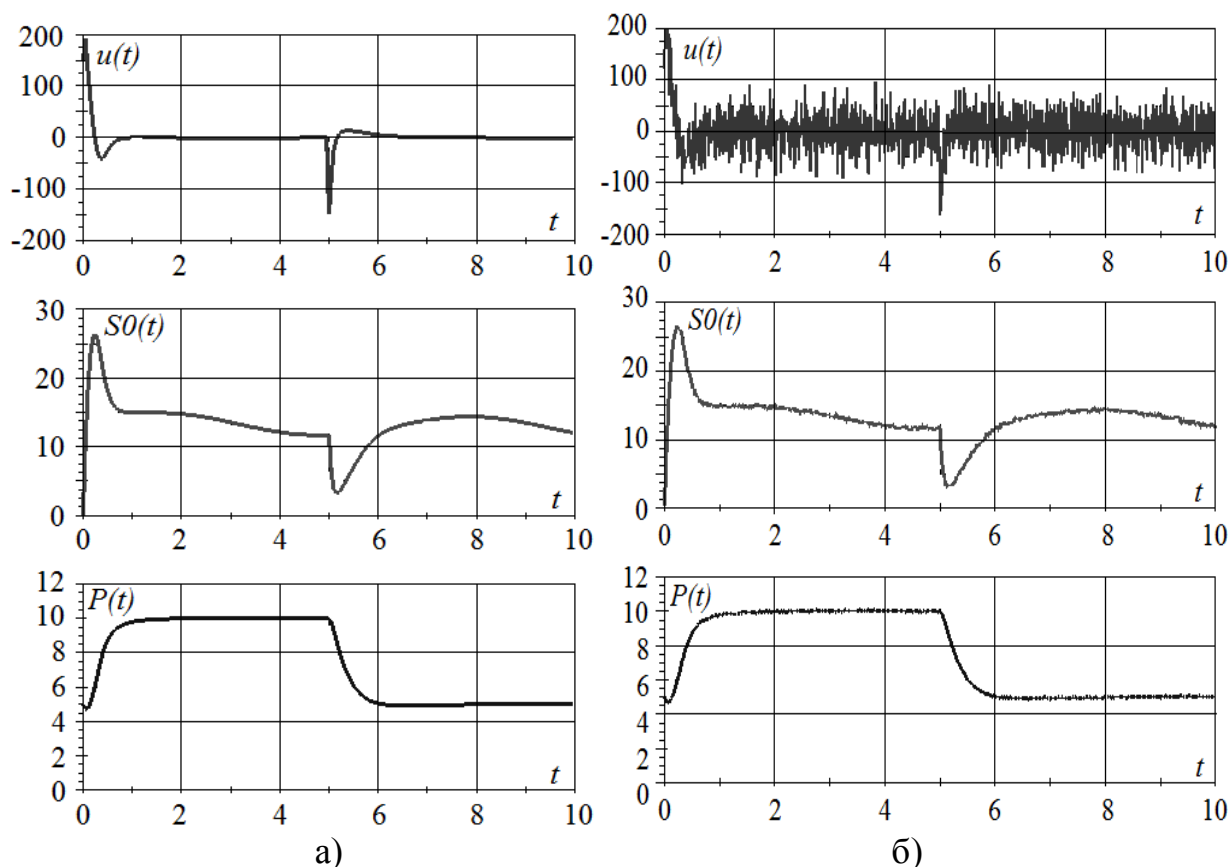


Рисунок 7 – Процессы в системе управления давлением, а - при отсутствии возмущений, б - при наличии возмущений на выходе объекта

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В диссертационной работе исследована проблема стабилизации систем с параметрическим управлением. Разработана методика проектирования и расче-

та регулятора для систем стабилизации с параметрическим управлением на основе существующей концепции принципа локализации. Аналитически и численно исследованы свойства систем стабилизации для линейных нестационарных объектов первого и второго порядка при действии гармонических и случайных возмущений, а также свойства замкнутых систем с нелинейными нестационарными моделями реальных процессов. Получены соотношения метода о влиянии параметров релейного регулятора на процессы во внутреннем контуре и предложена процедура настройки параметров регулятора. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выделены отличительные характеристики систем с параметрическим управлением.

2. Предложен метод параметрического управления на основе принципа локализации и методика проектирования, расчета и настройки регулятора. Получены особенности параметрического варианта метода локализации, заключающиеся в возможности формирования эталонных выходных процессов только на рабочих частотах, что накладывает ограничения на темп отрабатываемых возмущений. Наличие дополнительного интегратора в контуре быстрых движений обеспечивает фильтрацию высокочастотных возмущений, действующих на выходе системы (например, шумов измерений) и уменьшает влияние подобных возмущений на управление.

3. Дано аналитическое обоснование выполнения задачи регулирования и проведено численное исследование, показывающее достижение поставленной цели управления для рассмотренных типов возмущений. Предложены рекомендации по выбору малого параметра системы на два порядка меньше максимального темпа возмущений.

4. Разработаны структуры параметрических управляющих устройств для двигателя внутреннего сгорания с прямым впрыском и модели паровой турбины. Системы малочувствительны к действию рассмотренных возмущений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах и научных изданиях

1. Шпилева О.Я., Мальцев А.С. Об адаптивной стабилизации переключаемой системы // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск: НГТУ, 2008, №3 (33). С. 183 – 188.

2. Востриков А.С., Мальцев А.С. Параметрическая стабилизация давления // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск: НГТУ, 2009, №4(37). С. 3 – 10.

3. Золотухин Ю.Н., Мальцев А.С., Нестеров А.А. Метод частотного управления асинхронным двигателем с векторной структурой потокосцепления // Автометрия, 2009. Т.45. С. 82 – 89.

4. Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Филиппов М.Н., Ян А.П. Коррекция транспортного запаздывания в системе управления мобильным роботом // Автометрия, 2011. Т.47. С. 46 – 57.

Публикации в других изданиях

5. Шпилева О.Я., Мальцев А.С. Об адаптивной стабилизации переключаемого объекта. «Наука. Технологии. Инновации»: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-и частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Ч.1. С. 226 – 227.

6. Шпилева О.Я., Мальцев А.С. Об одном способе адаптивной стабилизации систем с кусочно-непрерывными возмущениями. Материалы международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». НГТУ, 2008. Т.7. С. 174 – 177.

7. Anatoly S. Vostrikov, Alexandr S. Maltsev. Parametric Pressure Control in Direct Injection Gasoline Engine // International Forum On Strategic Technologies (IFOST 2009). PP. 162 – 165. [Параметрическое управление давлением в двигателе с прямым впрыском].

8. Alexander S. Maltsev. Motion control of two-wheeled robot with the top position of the cargo // Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology, 2010. PP. 15 – 17. [Управление движением двухколесного робота с верхним расположением груза].

9. Мальцев А.С. Метод синтеза систем стабилизации с параметрическим управлением // Сборник научных трудов НГТУ. 2010. № 4(62). С. 51 – 56.

10. Мальцев А.С. Управление движением и балансировкой двухколесного транспортного робота. Материалы III Международной конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы». Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета, 2010. С. 201 – 204.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x 4/16 объем 1 пл., тираж экз.
Заказ № подписано в печать 2013 г.