

*На правах рукописи*

**ФРАНЦУЗОВА**  
**Галина Александровна**

**СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ  
ПРИНЦИПА ЛОКАЛИЗАЦИИ**

*Специальность: 05.13.01 - Системный анализ, управление  
и обработка информации (промышленность)*

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск - 2004

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете

- Научный консультант - доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
Востриков Анатолий Сергеевич
- Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор  
Абленов Амирза Жакенович;  
- доктор технических наук, профессор  
Мальшенко Александр Максимович;  
- доктор технических наук, профессор  
заслуженный деятель науки РФ,  
Рубан Анатолий Иванович
- Ведущая организация - Институт автоматизации и электрометрии  
СО РАН, г. Новосибирск.

Защита состоится 22 июня 2004 г., в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 19 мая 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.А. Воевода

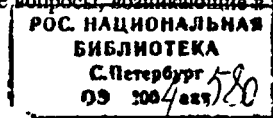
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Развитие современной техники и совершенствование технологии производства обуславливают появление новых специфических классов динамических объектов, а также повышение требований к качеству работы систем автоматического управления. Проектирование и исследование их свойств осуществляется с помощью аппарата современной теории, который активно разрабатывается с 60-х гг. XX в.

Среди основных направлений современной теории управления выделяется проблема синтеза автоматических систем в условиях неполной информации о переменных параметрах объекта и внешних возмущающих воздействиях. Она является сложной в теоретическом плане, но в то же время ее решение представляет большой практический интерес. В ситуации, когда требуется на экстремальном уровне поддерживать некоторый показатель качества работы динамической системы, зависящий от свойств объекта управления и действующих на него возмущений, необходимо создавать специальные автоматические системы, которые принято называть системами экстремального регулирования (в англоязычной литературе - Extremum Seeking Control). Такие системы в процессе работы должны обеспечивать достижение минимума или максимума функции качества при недостаточной априорной информации о характере ее изменений, а также стабилизацию выхода относительно найденной точки экстремума. Подобная задача возникает, в частности, при поддержании скорости полета самолета, соответствующей минимуму расхода горючего на единицу длины пути. Другими примерами систем экстремального регулирования могут служить различные типы топок, реактивные двигатели самолетов, аппараты для выпаривания соков, флотационные машины обогатительных фабрик, радиотехнические устройства, объекты химической промышленности и т.д.

Первые упоминания об экстремальных регуляторах содержатся в работах М.Леблана (1922) и Т.Штейна (1926), однако начало теории экстремального регулирования относится к середине XX в. и связано с именами Ю.С.Хлебцевича (1940) и В.В.Казакевича (1943). Широкую известность экстремальные системы приобретают в 60-х годах, когда появляются работы В.М.Кунцевича, И.С.Моросанова, Ю.И.Островского, А.А.Первозванского, П.И.Чинаева, а также Р.Ф.Blackman, С.С.Draper, Y.T.Li. Значительный вклад в развитие теории таких систем внесли А.А.Красовский, А.А.Растрин, А.П.Юркевич, Д.Дж.Уайлд, О.Л.R.Jacobs, S.M.Langdon, J.Stemby, K.J.Astrom, B.Witternaark и другие ученые.

Неослабевающий интерес к задаче синтеза систем экстремального регулирования подтверждает тот факт, что не решены многие вопросы, возникающие в рамках



данной проблемы. Несмотря на огромные усилия, прилагавшиеся в 1940 - 1970 гг., а также успех практического применения, проектирование автоматических систем поиска экстремума все еще остается без прочного теоретического обоснования и четких методик синтеза. В большинстве случаев разработка алгоритмов экстремального регулирования базируется на предположении, что динамическую часть объекта с достаточной точностью можно представить в классе линейных моделей. Однако технологические процессы чаще всего являются объектами со сложными нелинейными взаимосвязями между регулируемыми параметрами, функционирующими в условиях неопределенности, поэтому проектируемые для них автоматические системы должны обеспечивать автономное управление каждой из совокупности регулируемых величин и инвариантность по отношению к внешним неконтролируемым возмущениям. Поскольку проблему проектирования систем экстремального регулирования тем или иным способом стремятся свести к задаче стабилизации, необходимо использовать адекватные методы синтеза.

В настоящее время существует несколько наиболее развитых методов синтеза систем управления в условиях неопределенности. Среди них можно выделить методы синтеза адаптивных систем, представленные в работах Ю.А.Борцова, С.Д.Землякова, В.М.Кунцевича, А.И.Рубана, А.Л.Фрадкова, В.А.Якубовича и других ученых; систем с переменной структурой и скользящими режимами (С.В.Емельянов, В.И.Уткин); систем с большими коэффициентами усиления (М.В.Мееров); методы синтеза, основанные на применении производных выходных переменных (Л.М.Бойчук, А.С.Востриков, П.Д.Крутько). Наиболее существенное развитие получил принцип локализации и одноименный метод на его основе (А.С.Востриков), на базе которого развиты методики синтеза систем для широкого класса объектов. Он предполагает использование большого коэффициента и вектора скорости изменения переменных состояния или выходных переменных в законе управления. Идея данного принципа заключается в организации в замкнутой системе специального "быстрого" контура, что позволяет формировать желаемые динамические свойства при неполной информации о параметрах объекта и действующих на него внешних возмущениях.

Для организации поиска экстремума обычно используется информация о градиенте, который измеряют с помощью специальных устройств оценки частных производных выходной характеристики. Однако "пропорциональные" регуляторы позволяют решить задачу только для простых динамических объектов, поведение которых с достаточной точностью описывают линейные дифференциальные уравнения. Для объектов с экстремальной характеристикой, функционирующих в условиях не-

определенности, регулярных методик проектирования автоматических систем к настоящему времени не разработано. В связи с этим задача синтеза систем экстремального регулирования, свойства которых инвариантны по отношению к дрейфующему экстремуму, переменным параметрам динамической части объекта и внешним возмущениям, является актуальной и одной из сложных проблем современной теории и практики автоматического регулирования.

*Предметом исследования* являются свойства экстремальных систем с производными в алгоритме управления, эффект локализации возмущений, возможность обеспечения заданного динамического качества и инвариантности процессов к изменению параметров объекта и дрейфу экстремума.

*Целью диссертационного исследования* является разработка на основе принципа локализации *нового* метода синтеза систем экстремального регулирования с требуемым качеством переходных процессов для класса нелинейных нестационарных объектов, функционирующих в условиях действия внешних неконтролируемых возмущений и дрейфа экстремума.

*Задачи исследования*, решаемые для достижения поставленной цели

- Преобразование задачи синтеза систем экстремального регулирования в задачу стабилизации выходных переменных относительно заранее неизвестных значений, соответствующих точке экстремума.
- Разработка на основе принципа локализации непрерывных и разрывных алгоритмов управления, обеспечивающих в замкнутой системе процесс движения к экстремуму с требуемым динамическим качеством.
- Исследование условий разрешимости задачи синтеза и формы представления уравнения желаемой динамики для системы экстремального регулирования в зависимости от собственных свойств объекта.
- Анализ свойств предложенного класса систем экстремального регулирования с использованием аппарата теории сингулярно-возмущенных уравнений.
- Исследование влияния дрейфа и помех измерения на процесс поиска экстремума функции качества в системах экстремального регулирования.

*Методы исследования.* При решении задач диссертационного исследования использовались методы теории автоматического управления, теории дифференциальных уравнений и матричного анализа; метод разделения движений, метод функций Ляпунова и цифрового моделирования. Теоретической основой данного исследования является принцип локализации.

*Научная новизна* диссертационной работы заключается в разработке *нового* метода синтеза систем экстремального регулирования с заданным качеством процесса выхода на экстремум, инвариантных к действию параметрических и сигнальных возмущений. Решить данную проблему удалось благодаря сочетанию принципа локализации с градиентным методом в совокупности со специальным устройством оценки частной производной. При разработке метода синтеза *впервые* были получены следующие результаты.

- Предложен новый тип непрерывных экстремальных регуляторов, который предполагает использование производных выходных переменных (с целью получения текущей косвенной информации о параметрах объекта) и градиента для обеспечения движения к экстремуму с требуемым динамическим качеством.
- Предложено преобразование задачи синтеза нелинейных нестационарных систем экстремального регулирования к задаче расчета эквивалентных линейных систем стабилизации за счет организации двухконтурного управления с подчинением динамики внутреннего контура желаемому уравнению.
- Разработаны методики синтеза двухконтурных статических экстремальных систем, астатических и систем с предварительной стабилизацией динамической части в зависимости от требуемой точности достижения экстремума.
- Теоретически обосновано возникновение в экстремальных системах предложенного типа "разнотемповых" процессов оценки производных выходных переменных, градиента функции качества и движения к экстремуму; получены условия их устойчивости.
- Разработана процедура синтеза систем экстремального регулирования с учетом специальной динамической подсистемы оценки производных в условиях действия помех измерения и дрейфа экстремума.
- Разработана методика синтеза систем экстремального регулирования с организацией скользящих режимов для нелинейных нестационарных объектов.

*Обоснованность и достоверность научных положений*, выводов и рекомендаций подтверждается применением аналитических методов решения, математическими доказательствами и численным моделированием тестовых примеров, использованием результатов диссертационной работы при выполнении НИР.

*На защиту выносятся следующие основные положения.*

- Новый тип непрерывных экстремальных регуляторов с использованием производных выходных переменных динамической части объекта и градиента функции качества.

- Преобразование задачи синтеза нелинейных нестационарных систем экстремального регулирования к задаче расчета эквивалентных линейных систем стабилизации за счет организации двухконтурного управления с подчинением динамики внутреннего контура желаемому уравнению.
- Методики синтеза одноконтурных и двухконтурных систем экстремального регулирования с заданными динамическими свойствами для нелинейных нестационарных одноканальных и многоканальных объектов.
- Результаты исследования свойств экстремальных систем с "разнотемповыми" процессами оценки производных выходных переменных, градиента функции качества и движения к экстремуму.
- Методика синтеза систем экстремального регулирования с организацией скользящих режимов.
- Результаты исследования динамических свойств систем с дрейфующей экстремальной характеристикой при наличии помех измерения.

**Практическая ценность и значимость работы** заключается в предложенных методиках синтеза систем экстремального регулирования с требуемым качеством переходных процессов для класса объектов, функционирующих в условиях ограниченного ресурса управляющих воздействий и неопределенности параметров при действии внешних неконтролируемых возмущений и дрейфе экстремума.

Результаты диссертационной работы использовались в проектно-конструкторской деятельности: ЗАО "СИНЕТИК" при разработке АСУ ТП производства поливинилхлорида для предприятия "Саянскхимпром"; а также в проектно-конструкторской деятельности ПО "СЕВЕР", ООО "Ольдам-Техно" и ОАО БЭМЗ при разработке отдельных узлов и проектировании системы регулирования электромеханическим усилителем руля автомобиля.

Диссертационные исследования связаны с выполнением по заданию Министерства образования РФ следующих НИР: "Автоматическое управление динамическими объектами с переменными характеристиками на основе принципа локализации" (1986-2001 гг.); "Стабилизация динамических характеристик нелинейных систем посредством формирования разнотемповых движений" (1997-1999 гг.); "Анализ и синтез динамических систем в условиях неопределенности" (2002-2003 гг.); а также НИР "Новосибирский объединенный исследовательский университет высоких технологий", выполняемой в рамках Федеральной целевой программы "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки" (1997-2001 гг., гос. контракт № А0050); и согласно Федеральной целевой программе "Ин-

теграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг." (гос. контракт № Б0097/1376).

Теоретические и практические результаты работы использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 550200 "Автоматизация и управление", инженеров по специальности 210100 "Управление в технических системах", а также аспирантов по специальности 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации". Материалы проводимых исследований использованы в дисциплинах "Теория автоматического управления", "Проблемы синтеза систем управления" и "Оптимальные и адаптивные системы" на кафедре автоматике НГТУ. Результаты диссертационной работы представлены в научно-методической литературе по проблемам синтеза систем управления в условиях неполной информации, например, в рекомендованных УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации учебных пособиях для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 550200, 651900 - "Автоматизация и управление" [1,2].

*Апробация работы.* Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 16 международных, а также 14 всесоюзных и республиканских конференциях, в том числе: IASTED International Conference "Automation, Control and Information Technology" (ACIT-2002); 6<sup>th</sup> Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2002); 6<sup>th</sup> International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings (APEIE-2002); Международной научной конференции "Анхтитическая теория автоматического управления и ее приложения" (Саратов, 2000); IV, V и VI международных конференциях "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-1998, АПЭП-2000, АПЭП-2002), а также ряде других конференций и научных семинарах. Результаты работы обсуждались на постоянно действующем при кафедре автоматике НГТУ городском техническом семинаре "Проблемы синтеза систем управления" в период с 1980 по 2004 гг.

*Публикации.* По теме диссертационных исследований опубликовано 59 работ, в том числе 4 учебных пособия. В списке публикаций данного автореферата приведены 37 работ, отражающих основное содержание диссертации.

*Структура и объем работы.* Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы составляет 343 страницы, в том числе 309 страниц основного текста, 130 рисунков, приложение на 10 страницах, содержащее документы по внедрению и



апробации результатов диссертации. Список использованной литературы включает 293 наименования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены основные результаты, выносимые на за- шиту, отмечена новизна работы и ее практическая значимость, представлена общая характеристика работы, описана структура изложения материала диссертации.

**Первая** глава посвящена обсуждению задачи поиска экстремума методами ав- томатического управления. Рассмотрены основные способы организации систем экстремального регулирования, которые в настоящее время находят применение в различных практических приложениях. Представлены наиболее известные подходы к синтезу, такие как пропорциональный градиенту закон управления, динамический компенсатор, шаговые экстремальные системы, поиск по чувствительности, раз- личные модификации подхода к проектированию систем экстремального регулиро- вания, основанные на методе усреднения с добавлением поисковых колебаний, и некоторые другие. Поскольку подобные регуляторы ориентированы в основном на использование линейных моделей объекта, в реальной ситуации они не позволяют обеспечить движение к экстремуму с заданными динамическими показателями. В условиях действия внешних возмущений, а также при наличии нелинейных харак- теристик или нестационарных параметров динамической части объекта необходимо использование более эффективных методов синтеза. К ним, в первую очередь, от- несены метод скользящих режимов и метод локализации, особенности применения которых обсуждаются в данной главе. Отдельное внимание уделено вопросу оценки градиента выходной характеристики системы, информация о величине или знаке которого используется для организации движения к экстремуму.

Сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования, на- правленные на разработку метода синтеза систем экстремального регулирования с заданными свойствами в условиях действия внешних возмущений для класса объ- ектов, модель которых (рис. 1) состоит из динамической части (ДЧ) и статической экстремальной характеристики (ЭХ).

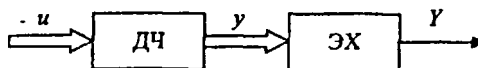


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления

Поведение динамической части объекта описывают уравнения

$$\begin{cases} \dot{x} = f_0(t, x) + B_0(t, x)u, & x(0) \in \Omega_x, \\ y = g(t, x), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x \in \Omega_x \subset R^n$  - вектор состояния;  $x(0) \in \Omega_x$  - начальное состояние объекта;  $\Omega_x$  - рабочая область пространства состояний;  $u \in \Omega_u \subset R^m$  - вектор управляющих воздействий;  $m \leq n$ ;  $\Omega_u = \{u: |u_i| \leq u_{im}, i = \overline{1, m}\}$  - совокупность допустимых значений, обусловленная ограниченным ресурсом управления объекта;  $y \in R^m$  - доступный измерению вектор выходных переменных.

Вектор-функция  $f_0(t, x)$  удовлетворяет условию существования и единственности решения дифференциального уравнения;  $B_0(t, x)$  - матрица нестационарных коэффициентов, для которой справедливо условие

$$\text{rank}\{B_0(t, x)\} = m \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}, \quad (2)$$

вектор-функция  $g(t, x)$  допускает многократное дифференцирование. Зависимость элементов функций  $f_0(t, x)$ ,  $B_0(t, x)$  и  $g(t, x)$  от времени отражает влияние на объект параметрических и сигнальных возмущений, причем скорость изменения этих функций на порядок меньше скорости процессов в объекте.

Описание (1) известно неточно, кроме предельных значений:

$$\begin{cases} f_{0i, \min} \leq f_{0i}(t, x) \leq f_{0i, \max}, & i = \overline{1, n}, \\ 0 < B_{0j, \min} \leq B_{0j}(t, x) \leq B_{0j, \max}, & j = \overline{1, m}, \\ g_{j, \min} \leq g_j(t, x) \leq g_{j, \max} & \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}. \end{cases} \quad (3)$$

Модель экстремальной характеристики имеет вид

$$Y = Y(t, y), \quad (4)$$

где  $Y \in R^1$  - измеряемая выходная переменная объекта, отражающая показатель качества его работы. Функция  $Y(t, y)$  дифференцируемая по всем аргументам и унимодальная, ее зависимость от  $t$  отражает дрейф экстремума.

Целью функционирования системы экстремального регулирования является организация движения с помощью управляющего воздействия к заранее неизвестной точке экстремума  $\{y_0; Y_0\}$  в соответствии с условием  $\text{extr}_y Y(t, y) = Y_0$  и стабилизация в ней системы при наличии дрейфа и изменении параметров объекта.

Во второй главе рассмотрена задача синтеза систем экстремального регулирования для одноканальных объектов, модель динамической части которых представляет собой частный случай (1), когда  $m = 1$  и ограничен ресурс управления,  $|u| \leq u_m$ . Функция качества имеет вид (4). Предполагается, что кроме (2) функции модели (1) удовлетворяют условию

$$b(t, x) = \frac{\partial g}{\partial x^T} B_0(t, x) \neq 0 \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\} \quad (5)$$

Показано, что с учетом взаимосвязи между выходными переменными условие  $\text{extr}_y Y(t, y) = Y_0$  эквивалентно следующему:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_0. \quad (6)$$

т.е. задача синтеза системы экстремального регулирования сведена к задаче стабилизации относительно соответствующего точке экстремума значения  $y_0$ , где

$$G(y_0) = \left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{y=y_0} = 0. \quad (7)$$

Данное обстоятельство позволило применить для формирования алгоритма управления метод локализации (А.С.Востриков, 1974).

Поскольку условие (5) соответствует *относительному первому порядку* объекта, модель динамической части (1) представлена в виде уравнения

$$\dot{y} = f(t, x) + b(t, x)u, \quad (8)$$

где  $f(t, x) = \frac{\partial g(t, x)}{\partial x^T} f_0(t, x) + \frac{\partial g(t, x)}{\partial t}$ . Диапазон изменения  $f(t, x)$  и  $b(t, x)$  определяют ограничения (3),  $f_{\min} \leq f(t, x) \leq f_{\max}$ ,  $0 < b_{\min} \leq b(t, x) \leq b_{\max}$ .

Предложено учесть специфику синтеза систем экстремального регулирования и формулировать требования к качеству процесса выхода на экстремум в виде следующего линейного желаемого дифференциального уравнения

$$\dot{y} = F(G) = -\alpha G(y), \quad \alpha > 0, \quad (9)$$

а затем проверить полученные условия разрешимости задачи синтеза, основанные на анализе возможностей объекта и требований к системе. Одно из них:

$$|b|_{\min}^{-1} [ |F|_{\max} + |f|_{\max} ] \leq u_m, \quad (10)$$

названное *ресурсным ограничением*, гарантирует решение поставленной задачи синтеза при изменении  $f_0(t, x)$ ,  $B_0(t, x)$  и  $g(t, x)$  в диапазоне (3).

В данной главе предложено формировать *алгоритм управления на основе метода локализации* следующего вида:

$$\mathbf{u} = \mathbf{k}[F(\mathbf{G}) - \dot{\mathbf{y}}], \quad (11)$$

где  $\mathbf{k}$  - коэффициент усиления. Описание системы экстремального регулирования с законом управления (11), (9) принимает форму

$$\dot{\mathbf{y}} = \frac{f(t, \mathbf{x})}{1 + b(t, \mathbf{x})\mathbf{k}} - \frac{b(t, \mathbf{x})\mathbf{k}}{1 + b(t, \mathbf{x})\mathbf{k}} \alpha \mathbf{G}. \quad (12)$$

Отсюда при  $\mathbf{k} \rightarrow \infty$  и условии  $b(t, \mathbf{x}) \neq 0$  следует  $\dot{\mathbf{y}} \rightarrow -\alpha \mathbf{G}$ , т.е. модель системы (12) приближается к желаемому уравнению (9). Из последнего получено описание равновесного режима в виде  $\mathbf{G}(\mathbf{y}_0) = 0$ , что соответствует условию (6).

Таким образом, применение регулятора с законом управления (11) обеспечивает в экстремальной системе процессы с заданным динамическим качеством в условиях действия возмущений и нестационарных параметров объекта. Причем состояние равновесия системы (12) и есть искомое положение экстремума функции качества  $Y(t, \mathbf{y})$ . Следовательно, предложенный тип регулятора (11) позволяет решить поставленную задачу синтеза.

Практическое использование регулятора (11) предполагает определение численных значений коэффициента  $\mathbf{k}$ , для расчета которых в работе получены соответствующие соотношения на основе величины погрешности обеспечения желаемых динамических свойств в системе (12),  $\Delta = \frac{F(\mathbf{G}) - f(t, \mathbf{y})}{1 + b(t, \mathbf{y})\mathbf{k}} \leq \Delta^*$ .

С целью реализации алгоритма управления (11) в экстремальную систему (рис. 2) предложено добавить подсистему оценки производных, которая включает в себя:

- 1) ДФ - дифференцирующий фильтр (А.С.Востриков, Е.Б.Гаврилов, 1977)

$$\mu_1 \dot{\hat{\mathbf{y}}} = (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}); \quad (13)$$

- 2) УОЧП - устройство оценки частной производной (А.С.Востриков и др., 1981)

$$\begin{cases} \mu_2 \dot{\hat{Y}} = (Y - \hat{Y})|\dot{\hat{\mathbf{y}}}|, \\ \dot{\hat{G}} = \mu_2^{-1}(Y - \hat{Y})\text{sign}(\dot{\hat{\mathbf{y}}}). \end{cases} \quad (14)$$

Здесь  $\dot{\hat{\mathbf{y}}}$ ,  $\dot{\hat{Y}}$ ,  $\dot{\hat{G}}$  - оценки производных выходных переменных и градиента.

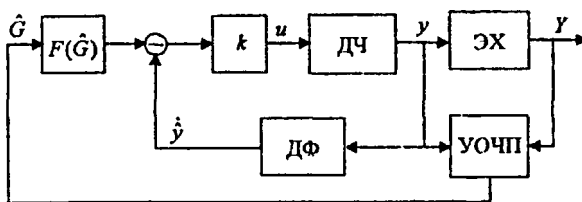


Рис. 2. Блок-схема системы с оценками производных -

Поскольку наличие малых параметров  $\mu_1$  и  $\mu_2$  может приводить к возникновению в системе "разнотемповых" процессов, исследование ее свойств осуществлено с применением результатов теории сингулярно-возмущенных уравнений. Путем предложенной замены переменных,  $V = \mu_1^{-1}(y - \hat{y})$ , описание системы (8), (11), (13), (14) представлено в обычном для метода разделения движений (Е.И.Герашенко, С.М. Герашенко, 1975) виде

$$\begin{cases} \dot{y} = f + bk(-\alpha\hat{G} - V), \\ \mu_1 \dot{V} = f + bk(-\alpha\hat{G} - V) - V, \\ \mu_2 \dot{\hat{G}} = [Gf + Gbk(-\alpha\hat{G} - V) - \hat{G}V] \text{sign}(V). \end{cases} \quad (15)$$

Система (15) имеет особенности по начальным условиям:  $V(0) = \mu_1^{-1}[y(0) - \hat{y}(0)]$ ,  $\hat{G}(0) = \mu_2^{-1}[Y(0) - \hat{Y}(0)] \text{sign}(V)$ , которые приводят к начальному выбросу функций, что требует специального обоснования применения метода разделения движений. С использованием соответствующих теорем (А.С.Востриков, 1990) показано, что в зависимости от соотношения параметров  $\mu_1$  и  $\mu_2$  процессы в системе (15) могут иметь два ( $\mu_1 \approx \mu_2$ ) или три ( $\mu_1 \ll \mu_2$ ) масштабы времени: медленные, быстрые и сверхбыстрые. Их устойчивость и общие свойства экстремальных систем определяют доказанные в работе утверждения.

При  $\mu_1 \ll \mu_2$  в соответствии с утверждением 1, если выполняются условия:

$$1) \mu_1^{-1}(1 + b_{\min}k) \geq D \frac{|f|_{\max} - b_{\min}k\alpha\mu_2^{-1}|(Y - \hat{Y}) \text{sign}[\mu_1^{-1}(y - \hat{y})]|}{\mu_2(1 + b_{\min}k)} \geq D^2\alpha, \quad (16)$$

$$2) b(t, x) = \frac{\partial g}{\partial x^T} B_0(t, x) > 0 \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\},$$

$$3) V_0 = \frac{f - bk\alpha\hat{G}}{1 + bk} \neq 0,$$

то процессы в экстремальной системе будут асимптотически устойчивыми и при  $k \rightarrow \infty$  соответствуют желаемому дифференциальному уравнению (9).  $\blackstar$

Таким образом, выполнение условий утверждения 1 позволило исследовать по-разному процессы оценки градиента, производной выходной переменной динамической части системы и движения к экстремуму, которое соответствует уравнению (12). Из основного неравенства (16) получены условия возникновения "разнотемповых" движений для различных соотношений начальных состояний объекта  $\{y(0); Y(0)\}$  и дифференцирующих устройств  $\{\hat{y}(0), \hat{Y}(0)\}$ , причем коэффициент  $D$  характеризует степень "разделения" движений.

Показано, что применение предложенного типа регулятора (11) совместно с дифференцирующими устройствами позволяет придать процессу выхода на экстремум требуемое динамическое качество без незатухающих колебаний около положения экстремума, что выгодно отличает систему экстремального регулирования, основанную на принципе локализации, от других видов экстремальных систем.

Далее в главе предложены алгоритмы расчета параметров дифференцирующих устройств с учетом начальных состояний, возможности "разделения" движений и обеспечения заданного динамического качества в экстремальной системе, которые завершают методику синтеза для объектов относительного первого порядка.

В третьей главе исследованы свойства одноканальных систем экстремального регулирования предложенного типа в условиях действия помех измерения и дрейфа - экстремума, когда для формирования алгоритма управления (11) использованы наблюдаемые выходные переменные

$$\bar{y} = y + h_1(t), \quad \bar{Y} = Y + h_2(t), \quad (17)$$

где  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$  - помехи измерения с ограниченным частотным спектром и диапазоном изменения:  $h_{1\min} \leq |h_1(t)| \leq h_{1\max} \quad \forall t \in [0, \infty); i = \overline{1, 2}$ .

В случае точного дифференцирования динамика системы экстремального регулирования (при  $h_2(t) = 0$ ) соответствует уравнению

$$\dot{y} = \frac{f(t, x)}{1 + b(t, x)k} + \frac{b(t, x)k}{1 + b(t, x)k} F(\bar{G}) - \frac{b(t, x)k}{1 + b(t, x)k} \dot{h}_1, \quad (18)$$

которое в пределе при  $k \rightarrow \infty$  асимптотически приближается к соотношению:  $\dot{y} = F(\bar{G}) - \dot{h}_1$ . Последнее означает, что помеха измерения  $h_1(t)$  искажает желаемый процесс выхода на экстремум, причем для его обеспечения требуется больший по сравнению с идеальной ситуацией (10) ресурс управления объекта,

$$u_{a \max} = |b|_{\min}^{-1} \left[ \alpha |\hat{G}|_{\max} + |f|_{\max} + |\dot{h}_1|_{\max} \right] \leq u_m.$$

С целью уменьшения влияния помехи  $h_1(t)$  рекомендовано использовать дифференцирующий фильтр большего порядка,

$$\begin{cases} \mu_1 \dot{\hat{y}}_1 = \hat{y}_2, \\ \mu_1 \dot{\hat{y}}_2 = -\hat{y}_1 - 2d\hat{y}_2 + \bar{y}, \end{cases} \quad (19)$$

что придает ему фильтрующие свойства. Исследование свойств экстремальной системы с помехами измерения и устройствами (19), (14) осуществлено методом разделения движений с использованием приема "расщепления" дифференцирующего фильтра. Это дает следующее описание системы:

$$\begin{cases} \dot{y} = f + bk(-\alpha \hat{G} - V_1), & y(0) \in \Omega, \\ \mu_1 \dot{\hat{y}}_1 = \hat{y}_2, \\ \mu_1 \dot{\hat{y}}_2 = -\hat{y}_1 - 2d\hat{y}_2 + y + h_1, \\ \mu_1 \dot{V}_1 = V_2, \\ \mu_1 \dot{V}_2 = f + bk(-\alpha \hat{G} - V_1) - V_1 - 2dV_2 + \dot{h}_1, \\ \mu_2 \dot{\hat{G}} = [Gf + Gbk(-\alpha \hat{G} - V_1) - \hat{G}V_1 + \dot{h}_2] \text{sign}(V_1). \end{cases} \quad (20)$$

Показано, что желаемое качество процессов можно обеспечить для наблюдаемой переменной  $\bar{y}$ , а действие  $h_2(t)$  локализовано в устройстве оценки частной производной, т.е. она не влияет на движение к экстремуму.

При исследовании работоспособности системы в условиях дрейфа предложено аппроксимировать функцию качества  $Y(t, y)$ , разложив ее в ряд Тейлора в малой окрестности точки экстремума:

$$Y(t, y) = Y(t, y_0) + \left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{y=y_0} [y - y_0(t)] + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} \right|_{y=y_0} [y - y_0(t)]^2 + R(t, y),$$

и ограничиться первыми членами ряда разложения с учетом того факта, что

$$\left. \frac{\partial Y}{\partial y} \right|_{y=y_0} = 0. \text{ Аппроксимированная экстремальная характеристика имеет вид}$$

$$Y(t, y) = Y_0(t) + q(t)[y - y_0(t)]^2, \quad (21)$$

а модель системы с точным дифференцированием (рис. 3) следующая:

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, x) + b(t, x)k[-\alpha\bar{G} - \dot{\bar{y}}], & y(0) \in \Omega, \\ \dot{\bar{y}} = y - y_0(t), & \bar{Y} = Y_0(t) + q(t)\bar{y}^2, \end{cases} \quad (22)$$

где  $y_0(t)$  отражает горизонтальный, а  $Y_0(t)$  - вертикальный дрейф.

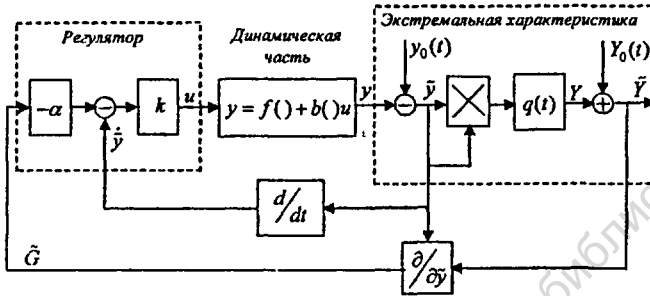


Рис 3 Структурная схема системы с аппроксимированной характеристикой

Согласно утверждению 2 при выполнении условия  $|\dot{y}_0| \leq |\dot{y}_{0\max}| \ll |\dot{y}|$  управляющее воздействие  $u = k[-\alpha\bar{G} - \dot{\bar{y}}]$  обеспечивает движение к экстремуму с требуемым динамическим качеством и инвариантность системы (22) по отношению к **горизонтальному дрейфу экстремума  $y_0(t)$**  с любой наперед заданной точностью.  $\blackstar$

Показано, что погрешность реализации заданной динамики  $\delta = \frac{2}{1+|b|k} + \frac{\gamma}{1+|b|k}$  зависит от численного значения  $k$  и скорости горизонтального дрейфа экстремума. Поскольку система экстремального регулирования в силу собственной инерционности может обрабатывать только медленный дрейф, для ее **работоспособности** достаточно обеспечить выполнение условия:  $\gamma = \frac{|\dot{y}_0|}{\alpha|\bar{G}|} \leq \gamma^*$ , где  $\gamma^*$  - предельная относительная скорость дрейфа.

Показано, что вертикальный дрейф экстремума  $Y_0(t)$  в системе с точным дифференцированием не влияет на процесс движения к экстремуму, которому можно придать желаемые динамические свойства в соответствии с уравнением (9).

Получена модель системы с дрейфующим экстремумом и дифференцирующими устройствами (13), (14), которая при отсутствии помех измерения принимает форму



$$\begin{cases} \dot{y} = f + bk[-\alpha\hat{G} - V] + \dot{y}_0, \\ \mu_1 \dot{V} = f + bk[-\alpha\hat{G} - V] + \dot{y}_0 - V, \\ \mu_2 \dot{\hat{G}} = [\tilde{G}f + \tilde{G}bk[-\alpha\hat{G} - V] + \tilde{G}\dot{y}_0 + \dot{Y}_0 - \hat{G}V] \text{sign} V. \end{cases} \quad (23)$$

Это позволяет, выделив "разнотемповые" составляющие движения, исследовать влияние различных видов дрейфа. Показано, что горизонтальный дрейф  $y_0(t)$  локализован и обрабатывается в контуре сверхбыстрых движений (рис. 4),

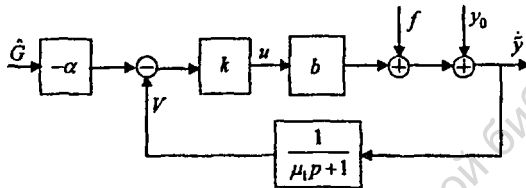


Рис. 4. Схема контура сверхбыстрых движений

а вертикальный дрейф обрабатывается в темпе с быстрыми процессами (рис.5).

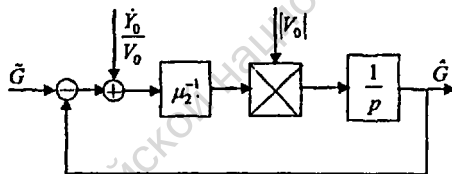


Рис. 5. Схема контура быстрых движений

Утверждение 3. Если выполняются условия  $\gamma = \frac{|\dot{y}_0|}{\alpha|\hat{G}|} \leq \gamma^*$  и  $\theta = \frac{\dot{y}_0}{\alpha|\hat{G}|} \leq \theta^*$ , то

сверхбыстрая и быстрая составляющие процесса системы экстремального регулирования инвариантны к дрейфу, а медленная фаза соответствует желаемому движению к экстремуму с требуемой точностью. †

Таким образом, регулятор с алгоритмом управления (11) позволяет решить задачу синтеза экстремальных систем в условиях действия медленного дрейфа экстремума и наличия помех измерения.

Показано, что при соизмеримых параметрах дифференцирующих устройств ( $\mu_1 \approx \mu_2$ ), удовлетворяющих условиям "разделимости" движений, удастся обеспечить выход на экстремум в условиях дрейфа. Такой выбор подсистемы дифферен-

цирования упрощает практическую реализацию регулятора (11), но искажает процесс движения к экстремуму. Разработанная процедура синтеза экстремальных систем с учетом дрейфа экстремума и помех измерения завершает главу.

В четвертой главе рассмотрена задача синтеза экстремальных систем для одноканальных объектов (1), (4), когда  $m = 1$  и выполняется условие

$$b_r(t, x) = \frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial x^T} B_0(t, x) \neq 0 \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}, \quad (24)$$

что соответствует относительно  $r$ -му порядку и представлению (1) в форме

$$y^{(r)} = f_r(t, x) + b_r(t, x)u, \quad (25)$$

где  $f_r(t, x) = \frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial x^T} f_0(t, x) + \frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial t}$ ,  $1 \leq r \leq n$ :

Особенностью предлагаемого в данной главе подхода к синтезу систем экстремального регулирования является организация *двухконтурного управления*, где внутренний контур включает в себя динамическую часть объекта, а внешний — статическую экстремальную характеристику (рис. 6)..

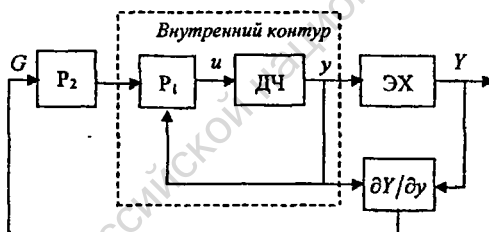


Рис. 6. Обобщенная схема двухконтурной системы:

$P_1$  и  $P_2$  - регуляторы внутреннего и внешнего контура соответственно

Алгоритм управления для внутренней подсистемы предложено формировать на основе принципа локализации в виде

$$u = k [F(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, v) - y^{(r)}], \quad (26)$$

где  $F(\cdot)$  конструируется в классе линейных дифференциальных уравнений

$$y^{(r)} = F(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, v) = -c_1 y - c_2 \dot{y} - \dots - c_r y^{(r-1)} + v, \quad (27)$$

$v \in R^1$  - управляющее воздействие для внешнего контура;  $c_i > 0$  - неизвестные коэффициенты, которые нужно определить в процессе синтеза;  $i = \overline{1, r}$ .

Показано, что соответствующий выбор коэффициента  $k$  позволяет с требуемой точностью обеспечить в локальной системе (рис. 6) динамические свойства согласно уравнению (27), которое при дальнейшем анализе и синтезе рассматривалось в качестве модели внутреннего контура. В этом случае с учетом закона управления  $v = v(G)$  описание двухконтурной системы принимает вид

$$y^{(r)} = -c_1 y - c_2 \dot{y} - \dots - c_r y^{(r-1)} + v(G(y)). \quad (28)$$

Использование аппроксимированной экстремальной характеристики (21) и градиента  $G = \partial Y / \partial y = 2q(y - y_0)$  позволило вместо исходной двухконтурной системы (рис. 6) получить эквивалентную систему, изображенную на рис. 7.

Предложено задавать во внешнем контуре линейный закон управления  $v(G)$  и перейти от синтеза нелинейной системы экстремального регулирования к расчету линейной системы стабилизации относительно предписанного значения  $y_0$  с использованием

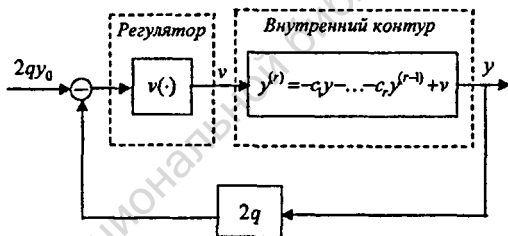


Рис. 7. Эквивалентная схема двухконтурной системы

адекватных методов. В работе предложены три варианта формирования  $v(G)$ . При синтезе статических систем использован алгоритм управления вида

$$v = -\alpha G, \quad \alpha > 0. \quad (29)$$

При этом описание системы (28) принимает форму

$$y^{(r)} = -(c_1 + 2\alpha q)y - c_2 \dot{y} - \dots - c_r y^{(r-1)} + 2\alpha q y_0, \quad (30)$$

Показано, что состояние равновесия эквивалентной статической двухконтурной системы (30) с заданной точностью соответствует точке экстремума. Расчетные соотношения для параметров регуляторов ( $c_i$  и  $\alpha$ ) получены с использованием модального подхода и учетом требований к статике ( $\delta \leq \delta^*$ ):

$$\begin{cases} c_1 + 2\alpha q = c_1^*, & c_i = c_i^*, \\ \frac{c_1}{c_1 + 2\alpha q} \leq \delta^*, \end{cases}$$

где  $c_i^*$  - коэффициенты желаемого характеристического уравнения,  $i = \overline{2, r}$ .

В случае астатической экстремальной системы во внешнем контуре предложено формировать следующий закон управления:

$$v = -\alpha \int_0^t G(\tau) d\tau, \quad (31)$$

а поведенческая система (рис. 7) описывает дифференциальное уравнение

$$y^{(r+1)} = -2\alpha q y + c_1 \dot{y} - c_2 \ddot{y} - \dots - c_r y^{(r)} + 2\alpha q y_0. \quad (32)$$

Выбор  $c_i$  и  $\alpha$  по расчетным соотношениям, полученным на основе модального подхода, позволяет обеспечить требуемое динамическое качество и нулевую статическую ошибку выхода на экстремум.

Предложен синтез двухконтурных систем с предварительной стабилизацией динамической части, который предполагает использование во внешнем контуре регулятора (31) и конструирование желаемого дифференциального уравнения (27) таким образом, чтобы искусственно ускорить процессы во внутренней подсистеме по сравнению с внешним кольцом схемы поиска экстремума, т.е. в виде

$$\mu^r y^{(r)} + \mu^{r-1} c_r y^{(r-1)} + \dots + \mu c_2 \dot{y} + y = v, \quad (33)$$

где параметр  $\mu$  характеризует быстродействие внутреннего контура.

В соответствии с утверждением 4, если выполняются условия  $(c_1 \sqrt{c_1} / 2\alpha q) \geq D$  и  $b_i(t, x) \neq 0 \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}$ , то регулятор (26), (31) с требуемой погрешностью  $\Delta^*$  обеспечивает инвариантность процессов системы по отношению к параметрическим и сигнальным возмущениям объекта, а также движение к экстремуму в соответствии с линейным уравнением первого порядка

$$\dot{y} = -\alpha c_1^{-1} G = -\alpha c_1^{-1} 2q (y - y_0). \quad (34)$$

Это свойство является особенностью двухконтурных систем с предварительной стабилизацией динамической части независимо от относительного порядка объекта, поскольку все внешние неконтролируемые возмущения локализованы в "быстром" внутреннем контуре управления, где их действие подавляется регулятором (26).

При практической реализации двухконтурных систем любого из предложенных типов рекомендовано использовать дифференцирующий фильтр  $r$ -го порядка-

$$\begin{cases} \mu_i \dot{\hat{y}}_i = \hat{y}_{i-1}, & i = \overline{1, (r-1)}, \\ \mu_1 \dot{\hat{y}}_r = -\hat{y}_1 - d_2 \hat{y}_2 - \dots - d_r \hat{y}_r + y \end{cases} \quad (35)$$

и устройство оценки частной производной (14), что приводит к возникновению "разнотемповых" составляющих движения. Получено их математическое описание

в виде линейных и квазилинейных моделей и условие, которое гарантирует существование "разнотемповых" процессов в двухконтурных системах

$$\begin{aligned} & \mu_1^{-1} \sqrt{1 + b_{r, \min} k} \geq \\ & \geq D_2 \frac{|f_{r, \max}| + b_{r, \min} k |F_{\max}| - b_{r, \min} k \alpha \mu_2^{-1} |Y - \dot{Y}| \operatorname{sign}[\mu_1^{-1}(y - \hat{y})]}{\mu_2(1 + b_{r, \min} k)} \geq D_1 D_2 \sqrt{c_1}, \end{aligned} \quad (36)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - коэффициенты, характеризующие степень разделения.

Показано, что с учетом (36) динамические свойства двухконтурных систем определяет подсистема медленных движений, которая соответствует эквивалентной системе с точным дифференцированием (рис. 7). Предложены процедуры расчета двухконтурных систем с предварительной стабилизацией динамической части, статического и астатического регуляторов внешнего контура в зависимости от требуемой точности достижения экстремума. Исследованы свойства двухконтурных систем при наличии помех измерения и дрейфа экстремума.

В пятой главе полученные результаты распространены на общий случай многоканальных объектов (1) - (4) с аппроксимацией экстремальной характеристики квадратичной формой

$$Y(t, y) = Y_0(t) + [y - y_0(t)]^T Q(t) [y - y_0(t)], \quad (37)$$

в предположении, что выполняется условие

$$\operatorname{rank} \{b_1(t, x)\} = \operatorname{rank} \{C(t, x) B_0(t, x)\} \leq m \quad \forall \{x \in \Omega, t \in [0, \infty)\}, \quad (38)$$

где  $\operatorname{rank} \{C(t, x)\} = \operatorname{rank} \left\{ \frac{\partial g(t, x)}{\partial x^T} \right\} = m \quad \forall \{x \in \Omega, t \in [0, \infty)\}$ ;  $y_0(t)$  - отражает дрейф экстремума по осям  $y$ ;  $Y_0(t)$  - дрейф вдоль оси  $Y$ ;  $Q(t) = \left( \partial^2 Y / \partial y^2 \right) \Big|_{y=y_0}$ .

В соответствии с относительным порядком динамической части и условием (38) выделены основные типы многоканальных объектов. Если (38) принимает вид  $\operatorname{rank} \{b_1(t, x)\} = m \quad \forall \{x \in \Omega, t \in [0, \infty)\}$ , то объект (1) имеет каналы *относительного первого порядка* с моделью вида

$$\dot{y} = f_1(t, x) + b_1(t, x)u, \quad (39)$$

где  $f_1(t, x) = C(t, x)f_0(t, x) + \frac{\partial g(t, x)}{\partial t}$ . В этом случае предложено синтезировать одноконтурную по каждому каналу экстремальную систему аналогично методике главы 2, т.е. задавать уравнение желаемой динамики

$$\dot{y} = F_1(G) = -AG(y), \quad (40)$$

и формировать закон управления вида

$$u = K[F_1(G) - \dot{y}], \quad (41)$$

где  $A = \text{diag}\{\alpha_i\}$ ;  $K = k_0 \text{diag}\{k_i\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $k_0 \in R^1$ .

Динамические свойства многоканальной системы соответствуют уравнению

$$\dot{y} = f_1(t, x) + b_1(t, x)K[F_1(G) - \dot{y}], \quad (42)$$

которое после преобразований с учетом  $\det[I + b_1(t, x)K] \neq 0 \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}$

и  $k_0 \rightarrow \infty$  приближается к желаемому уравнению (40). Так как  $\det A = \prod_{i=1}^m \alpha_i \neq 0$ , в

равновесном режиме  $G(y_0) = 0$ , что соответствует точке экстремума. При реализации системы (42) рекомендовано выбирать однотипные для каждого канала дифференцирующие устройства. Предложено формировать диагональную матрицу  $A$ , что позволяет одновременно решить задачу "автономизации" системы (42), поскольку ее динамическая часть "распадается" на  $m$  независимых каналов управления.

Если  $\text{rank}\{b_r(t, x)\} = \text{rank}\left\{\frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial x^T} B_0(t, x)\right\} = m \quad \forall \{x \in \Omega_x, t \in [0, \infty)\}$ , то

объект (1) имеет *однотипные* каналы  $r$ -го порядка

$$y^{(r)} = f_r(t, x) + b_r(t, x)u. \quad (43)$$

где  $f_r(t, x) = \frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial x^T} f_0(t, x) + \frac{\partial f_{r-1}(t, x)}{\partial t}$ ,  $1 \leq r \leq n$ .

В случае, когда  $\text{rank}\{b_r(t, x)\} < m$ , каналы объекта (1) *разнотипные*, их описывают дифференциальные уравнения различного порядка  $r_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Адекватным способом синтеза экстремальных систем для подобных объектов является организация двухконтурного управления. Поскольку в случае объектов с разнотипными каналами процедура будет отличаться только формированием желаемого дифференциального уравнения, рассмотрим методику на примере объекта (43).

Для локальной внутренней системы в работе предложено задавать аналогичный (26) алгоритм управления, основанный на методе локализации

$$u = K[\tilde{F}(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, V) - y^{(r)}], \quad (44)$$

где  $K = k_0 \text{diag}\{k_i\}$ ;  $i = \overline{1, m}$ ;  $k_0 \in R^1$ ;  $V \in R^m$ . С целью автономизации системы рекомендовано формировать сепаратные желаемые уравнения каналов вида

$$y^{(r)} = \bar{F}(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, V) = -C_1 y - C_2 \dot{y} - \dots - C_r y^{(r-1)} + V(G), \quad (45)$$

где  $C_j = \text{diag}\{c_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, r}$ ;  $c_{ij} > 0$  - неизвестные коэффициенты.

Модель внутреннего контура (рис. 8), как и в случае одноканальных систем, при соответствующем выборе  $k_0$  с достаточной точностью соответствует (45).

Показано, что при использовании различных регуляторов  $V(G)$  во внешнем контуре, получаются различные типы многоканальных систем экстремального регулирования. Организация пропорционального закона управления  $V = -AG$  позволила получить статическую систему, уравнение которой имеет вид

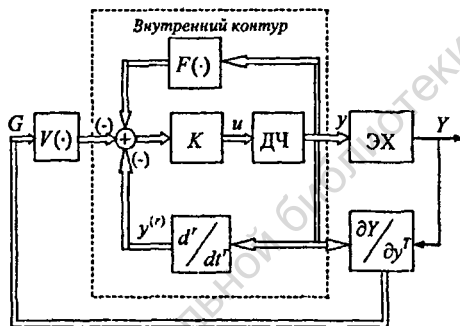


Рис. 8 Схема двухконтурной многоканальной системы

$$y^{(r)} = -(C_1 + 2AQ)y - C_2 \dot{y} - \dots - C_r y^{(r-1)} + 2AQy_0. \quad (46)$$

Наиболее простая процедура расчета неизвестных коэффициентов матриц  $C_i$  и  $A$  получена для случая диагональной матрицы  $Q = \text{diag}\{q_i\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , так как при этом (46) "распадается" на  $m$  независимых подсистем, соответствующих отдельным каналам динамической части:

$$y_i^{(r)} = -(c_{i1} + 2\alpha_i q_i) y_i - c_{i2} \dot{y}_i - \dots - c_{ir} y_i^{(r-1)} + 2\alpha_i q_i y_{i0}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Для каждого из них предложено применить процедуру, разработанную относительно одноканальных систем на основе модального подхода к синтезу.

При синтезе астатической многоканальной экстремальной системы рекомендовано формировать во внешнем контуре закон управления

$$V = -2A \int_0^t G(\tau) d\tau, \quad A = \text{diag}\{\alpha_i\}. \quad (47)$$

В этой ситуации ее описание с учетом (45) принимает вид

$$y^{(r+1)} = -2AQy + C_1 \dot{y} - C_2 \ddot{y} - \dots - C_r y^{(r)} + 2AQy_0. \quad (48)$$

При  $Q = \text{diag}\{q_i\}$  модель (48) состоит из  $m$  отдельных подсистем, что позволило осуществлять независимый расчет сепаратных каналов по методике главы 4.

В случае синтеза многоканальных экстремальных систем с предварительной стабилизацией динамической части получена модель

$$\begin{cases} \dot{y}^{(r)} = F(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}) + V, \\ \dot{V} = -AG, \end{cases}$$

для которой сформированы автономные желаемые уравнения каналов вида (33) и записаны в канонической форме:

$$\begin{cases} \mu \dot{y}_j = y_{j+1}, & j = \overline{1, (r-1)}, \\ \mu \dot{y}_r = -y_{r1} - c_{r2}y_{r2} - \dots - c_{rr}y_{rr} + v_r, & i = \overline{1, m}, \\ \dot{v}_i = -2\alpha_i q_i (y_{i1} - y_0). \end{cases} \quad (50)$$

Показано, что при выборе  $\mu$  на основе полученного условия возникновения "разнотемповых" процессов внешнего и внутреннего контура динамические свойства (50) определяет подсистема медленных движений, которая состоит из совокупности аналогичных (34) уравнений первого порядка.

При использовании в сепаратных каналах дифференцирующих устройств модель двухконтурных систем принимает вид

$$\begin{cases} y^{(r)} = f_r(t, x) + b_r(t, x)K [F(\cdot) + V(\hat{G}) - \hat{y}^{(r)}], \\ \mu_1^0 \dot{Z} = DZ + Ly, \\ \hat{y} = HZ, \\ \mu_2^0 \dot{\hat{G}} = (G\dot{y} - \hat{G}\dot{\hat{y}}) \text{sign}(\dot{\hat{y}}). \end{cases} \quad (51)$$

Здесь  $\mu_1^0 \in R^1$  и  $\mu_2^0 \in R^1$  - нормированные Малые параметры;  $Z \in R^{r \times m}$  - "объединенный" вектор состояния фильтров;  $\hat{y} \in R^m$ ,  $\hat{G} \in R^m$  - оценки выхода и градиента;  $D = \text{diag}\{D_i\}$  - блочная матрица, каждая составляющая которой представляет собой гурвицеву матрицу соответствующего фильтра,  $\det D_i \neq 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Матрицы  $D$ ,  $L$  и  $H$  удовлетворяют условию:  $-HD^{-1}L = I$ .

Показано, что для всех рассмотренных типов многоканальных систем (51) в них возникает  $m$  независимых контуров сверхбыстрых и быстрых процессов, соответствующих сепаратным каналам. Медленные движения обладают заданным динамическим качеством и определяют процесс поиска экстремума. Поскольку свойства



многоканальных систем экстремального регулирования при наличии помех измерения и дрейфа экстремума аналогичны свойствам одноканальных систем, рекомендовано использовать для расчета регулятора методики, полученные в главе 3.

В шестой главе разработана процедура синтеза одноканальных систем экстремального регулирования на основе метода скользящих режимов для класса объектов (1)-(4), когда  $m=1$ . Предложено предварительное преобразование объекта путем добавления к нему новой выходной переменной, в качестве которой использован градиент функции качества (рис. 9),

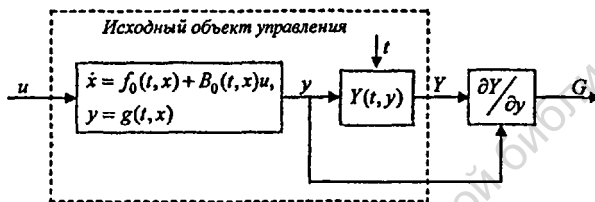


Рис. 9 Схема преобразованного экстремального объекта

В предположении, что объект имеет  $r$ -й порядок, его модель представлена в виде

$$G^{(r)} = \varphi_r(t, x) + \beta_r(t, x)u \quad (52)$$

и записана в пространстве канонических переменных:

$$\begin{cases} \dot{g}_i = g_{i+1}, & i = \overline{1, (r-1)}, \\ \dot{g}_r = \varphi_r(t, x) + \beta_r(t, x)u, \\ G = g_1, \end{cases} \quad (53)$$

где  $g \in R^n$  - вектор состояния;  $g_j = G^{(j-1)}$  - отдельная его компонента,  $j = \overline{1, r}$ .

Предложенное преобразование позволило свести проблему синтеза экстремальной системы к задаче стабилизации выходной переменной, когда требуется обеспечить  $\lim_{t \rightarrow \infty} G(t) = 0$ . При наличии в системе релейного исполнительного механизма адекватным методом синтеза является метод скользящих режимов (В.И.Уткин, 1974), в соответствии с которым сформирован разрывный закон управления

$$u = u_m \operatorname{sign} S(g) = \begin{cases} +u_m, & S(g) > 0, \\ -u_m, & S(g) < 0 \end{cases} \quad (54)$$

и уравнение поверхности переключений вида

$$S(g) = F(g_1, \dots, g_{r-1}) - g_r = -c_1 g_1 - \dots - c_{r-1} g_{r-1} - g_r = 0. \quad (55)$$

В переменных состояния (55) принимает форму

$$\begin{cases} \dot{g}_i = g_{i+1}, & i = \overline{1, (r-2)}, \\ \dot{g}_{r-1} = -c_1 g_1 - \dots - c_{r-1} g_{r-1}, \\ G = g_1. \end{cases} \quad (56)$$

Показано, что при выполнении условий возникновения скользящего режима поведение системы (53), (54) соответствует описанию (56), а в статическом режиме дает  $G = g_1 = 0$  и определяет точку экстремума. Эквивалентное управление имеет вид

$$u_s = \beta_r^{-1}(t, x) [-c_1 g_2 - \dots - c_{r-1} g_r - \varphi_r(t, x)]. \quad (57)$$

В реальной ситуации для преобразования объекта (1), (4) предложено измерять градиент с помощью специальной подсистемы, состоящей из дифференцирующего фильтра (13) и устройства оценки частной производной (14). В результате модель преобразованного объекта принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = f_0(t, x) + B_0(t, x)u, \\ y = g(t, x), & Y = Y(t, y), \\ \mu_1 \dot{\hat{y}} = y - \hat{y}, \\ \mu_2 \dot{\hat{Y}} = (Y - \hat{Y})|\dot{\hat{y}}|, \\ \hat{G} = \mu_2^{-1}(Y - \hat{Y})\text{sign}(\dot{\hat{y}}). \end{cases} \quad (58)$$

Получены соотношения для выбора параметров дифференцирующих устройств  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , которые гарантируют возникновение устойчивых быстрых процессов в подсистеме оценки производных, что позволяет вместо преобразованного объекта (58) рассматривать при синтезе его идеальную модель (52) или (53).

Реализация регулятора (54) предполагает измерение переменных состояния преобразованного объекта (58), поэтому в систему предложено добавить дополнительный дифференцирующий фильтр (ДДФ), модель которого имеет вид

$$\begin{cases} \mu_3 \dot{\hat{g}}_i = \hat{g}_{i+1}, & i = \overline{1, (r-1)}, \\ \mu_3 \dot{\hat{g}}_{r-1} = \hat{G} - \hat{g}_1 - d_2 \hat{g}_2 - \dots - d_{r-1} \hat{g}_{r-1}. \end{cases} \quad (59)$$

На основе метода разделения движений исследованы свойства системы с дифференцирующими устройствами (рис. 10) и разработаны рекомендации по выбору параметров последних с учетом условий устойчивости "разнотемповых" процессов

в виде:  $\mu_3 = D^{-1} \frac{1}{r \sqrt{c_1}}$ ,  $\mu_2 = D^{-1} \mu_3$ ,  $\mu_1 = D^{-1} \mu_2$

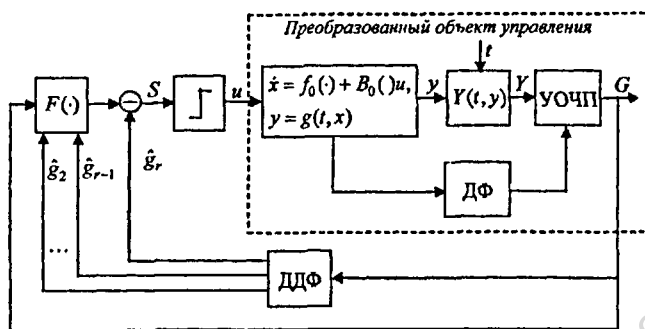


Рис 10 Схема экстремальной системы со скользящими режимами

Показано, что использование оценки градиента в качестве выходной переменной и организация алгоритма управления (54) позволяют обеспечить стабилизацию системы в точке экстремума при наличии помех измерения. В условиях дрейфа экстремума на этапе переходного процесса возникает погрешность оценки градиента  $\Delta_G(y_0, Y_0)$ , которая меньше аналогичной погрешности  $\Delta_h$ , обусловленной наличием помех измерения. Несмотря на то, что эти погрешности приводят к увеличению эквивалентного управления  $u$ , по сравнению с идеальной ситуацией (57), система с разрывным алгоритмом управления выполняет свою функцию слежения за медленно дрейфующим экстремумом. В заключение главы представлена методика синтеза систем экстремального регулирования со скользящими режимами.

В седьмой главе показана работоспособность предложенного метода синтеза систем экстремального регулирования на примере синтеза регулятора для модели термозмиссионного преобразователя, схема которого изображена на рис. 11.

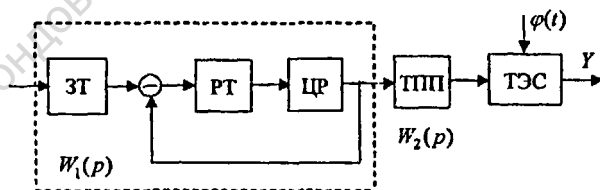


Рис. 11. Блок-схема термозмиссионного преобразователя:  
 ЗТ - датчик температуры; РТ - регулятор температуры;  
 ЦР - цезиевый резервуар;  
 ТПП - тракт подачи паров цезия в межэлектродное пространство,  
 ТЭС - термозмиссионная система;  $\varphi(t)$  - возмущение

Зависимость выходной электрической мощности термоэмиссионного преобразователя (ТЭП) от температуры цезиевого резервуара имеет выраженный экстремальный характер (рис. 12), где  $V$  - напряжение на нагрузке;  $Q$  - тепловая мощность.

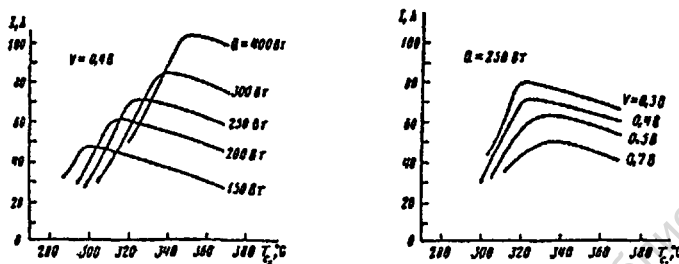


Рис. 12. Зависимость тока ТЭП от температуры цезиевого резервуара

Инерционную часть цезиевого канала обычно представляют в виде двух последовательно соединенных звеньев  $W_i(p) = k_i / (T_i p + 1)^{-1}$ ,  $i = 1, 2$  (Л.М.Галкин, В.И.Карманов, С.М.Стрюков, 1984). Решение задачи синтеза затрудняет неполная информация о параметрах, которые определяют работу ТЭП, что связано с неточностью его математической модели, наличием технологических разбросов и случайных возмущений. Так численные значения  $T_i$  могут меняться от нескольких минут до десятков минут. Для расчета регулятора модель динамической части преобразователя приведена к виду

$$\ddot{y} = -a_1(t)\dot{y} - a_2(t)y + b(t)u + M(t),$$

где  $M(t)$  - отражает влияние возмущений;  $1,1 \leq a_1(t) \leq 2 [1/\text{мин}]$ ;  $0,1 \leq a_2(t) \leq 1 [1/\text{мин}]$ ;  $0,1 \leq b(t) \leq 1 [^\circ\text{C}/\text{мВ} \cdot \text{мин}^2]$ .

Аппроксимированная экстремальная характеристика ТЭП при  $Q = 250 \text{ Вт}$ :  $Y = Y_0 - q(t)(y - y_0)^2$ , где  $0,1 \leq q(t) \leq 0,16 [A/^\circ\text{C}]$ ;  $Y_0 \approx 50 [A]$ ;  $y_0 \approx 330 [^\circ\text{C}]$ .

Необходимо обеспечить монотонный процесс выхода на экстремум,  $t_n \approx 4 \text{ мин.}$ , а ошибка достижения экстремума не должна превышать 5%. С учетом этих требований рассчитана двухконтурная статическая экстремальная система, в которой алгоритм управления внутреннего контура имеет вид

$$u = k[-c_1 y - c_2 \dot{y} + v(G) - \ddot{y}],$$

а закон управления для внешнего контура  $v(G) = \alpha G = 2\alpha q(y - y_0)$ , где  $k \approx 200$ ;  $c_1 = 2,3 [1/\text{мин}]$ ;  $c_2 = 3,1 [1/\text{мин}]$ ;  $\alpha = 0,5$ .

Использованы дифференцирующий фильтр второго порядка (19) и устройство оценки частной производной (14) со следующими параметрами:  $\mu_1 = 0,01 [\text{мин}]$ ;  $\mu_2 = 0,08 [\text{мин}]$ ;  $d = 0,5$ . Изменение переменных  $y$  (температуры) и  $Y$  (тока) из различных начальных состояний иллюстрирует рис. 13.

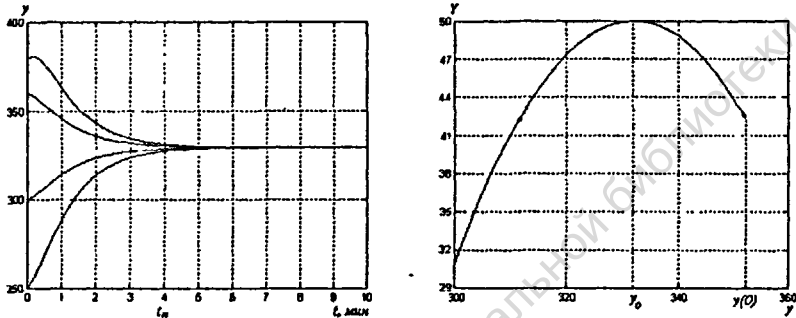


Рис. 13. Иллюстрация расчетного движения к экстремуму из различных начальных состояний

Влияние предельных значений параметров ТЭП показано на рис 14. Здесь кривая 1 соответствует случаю, когда  $a_1(t) = a_{1\max}$ ;  $a_2(t) = a_{2\max}$ ;  $b(t) = b_{\max}$ , а кривая 2 - случаю, когда  $a_1(t) = a_{1\min}$ ;  $a_2(t) = a_{2\min}$ ;  $b(t) = b_{\min}$ .

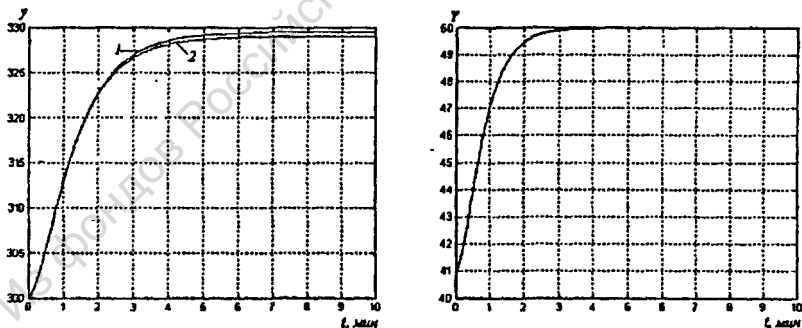


Рис. 14. Иллюстрация оптимизации режима работы ТЭП при изменении его параметров

Произвольное изменение параметров динамической части ТЭП в указанном диапазоне не влияет на процесс движения к экстремуму. Система обеспечивает требуемое динамическое качество без незатухающих колебаний около положения экс-

тремума и обладает свойством инвариантности по отношению к внешним возмущениям и нестационарным параметрам объекта.

На примере синтеза систем экстремального регулирования для модели химического реактора с непрерывным перемешиванием показаны особенности различных типов предложенных систем. Описание реактора в безразмерных переменных:

$$\dot{y} = 1 - y + ae^{-\gamma/y} - u, \quad Y = q(y - y_0)^2,$$

где параметры  $a$  и  $\gamma$  изменяются от процесса к процессу; за номинальные значения приняты:  $a = 100$  и  $\gamma = 10$ ;  $y(0) = 2$ ;  $q = 0,5$ ;  $y^0 = 1,3$ .

Система экстремального регулирования должна обеспечивать определение минимума функции качества за время  $t_n \leq 2$ .

- При синтезе одноконтурной системы задан закон управления вида  $u = k[-\alpha G - \dot{y}]$ , где  $k = 20$ ;  $\alpha = 2$ .
- В случае двухконтурной статической системы организован алгоритм управления  $u = k[-c_1 y - \alpha G - \dot{y}]$  с параметрами:  $k = 20$ ;  $\alpha = 1,5$ ;  $c_1 = 0,5$ .
- Для двухконтурной астатической системы сформирован регулятор

$$u = k[-c_1 y - \alpha \int_0^t G(\tau) d\tau - \dot{y}], \text{ где } k = 20; \alpha = 0,2; c_1 = 4,2.$$

В указанных системах использованы дифференцирующий фильтр первого порядка (13) и устройство оценки частной производной (14) с параметрами:  $\mu_2 = 0,006$ ;  $\mu_1 = 0,0008$ . На рис. 15 показаны процессы движения к экстремуму: кривая 1 соответствует одноконтурной системе; 2 — двухконтурной статической и 3 — двухконтурной астатической системе экстремального регулирования.

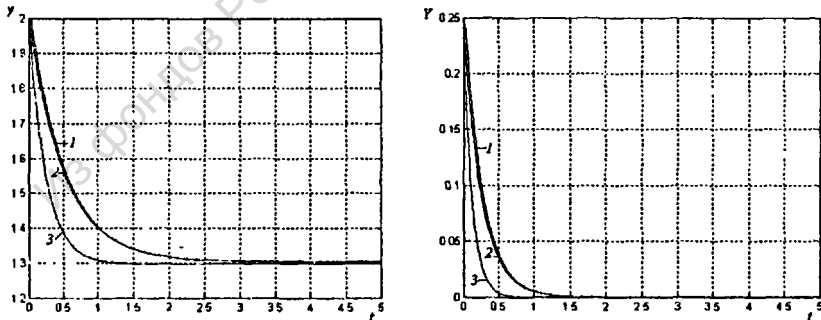


Рис. 15. Иллюстрация движения к экстремуму для систем различного типа

Соответствующие управляющие воздействия показаны на рис. 16.

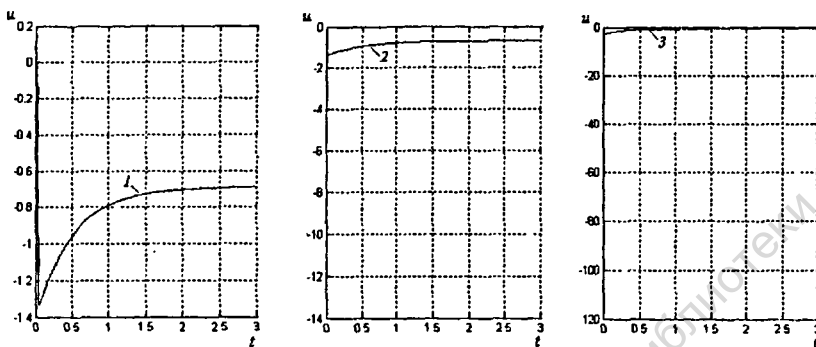


Рис. 16. Изменение управления в системах различного типа

Все три типа регуляторов обеспечивают выход на экстремум за заданное время при изменяющихся параметрах динамической части объекта. Особенностью систем, синтезированных на основе принципа локализации, является начальный выброс управляющего воздействия (рис. 16). Максимальное значение управления следующее: для одноконтурной системы  $|\mu|_{\max} = 1,35$ ; для двухконтурной статической  $|\mu|_{\max} = 14$ ; для двухконтурной астатической системы  $|\mu|_{\max} = 120$ . Таким образом, при реализации одноконтурных систем требуется наименьший ресурс управления объекта, однако этот класс систем обладает и наименьшим запасом устойчивости.

В **приложении** представлены акты о внедрении результатов диссертационной работы в проектно-конструкторской деятельности ЗАО "СИНЕТИК", ПО "СЕВЕР", ООО "Ольдам-Техно", ОАО БЭМЗ, а также в учебном процессе ННГУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод синтеза нелинейных нестационарных систем экстремального регулирования с требуемым качеством переходных процессов, который основан на принципе локализации возмущений и предполагает формирование "разнотемповых" процессов оценки производных выходных переменных, градиента и движения к экстремуму. В процессе диссертационных исследований были получены следующие *основные результаты*.

1. Предложен новый тип экстремальных регуляторов, отличающийся повышенной динамической точностью за счет организации двух видов обратной связи: по производным выходных переменных с целью парирования влияния параметрических и сигнальных возмущений и по градиенту функции качества для обеспе-

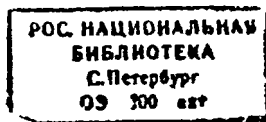
чения движения к экстремуму. Исследованы условия разрешимости задачи синтеза систем с предложенными регуляторами, которые зависят от ограничений и свойств объекта управления, а также требований к процессу выхода на экстремум, представленных в форме желаемого дифференциального уравнения.

2. Предложено преобразование задачи синтеза нелинейных нестационарных систем экстремального регулирования к задаче расчета "эквивалентных" линейных систем стабилизации за счет организации двухконтурного управления и формирования требуемых динамических свойств во внутреннем контуре при помощи регулятора с алгоритмом управления, основанным на методе локализации.
3. Разработаны методики синтеза одноканальных систем экстремального регулирования с требуемым динамическим качеством для класса нелинейных нестационарных объектов, подверженных влиянию внешних неконтролируемых возмущений. Предложены методики синтеза двухконтурных статических, астатических экстремальных систем и систем с предварительной стабилизацией динамической части в зависимости от требуемой точности достижения экстремума.
4. Исследованы условия возникновения "разнотемповых" процессов оценки производных выходных переменных, градиента функции качества и поиска экстремума, которые зависят от соотношения начальных состояний объекта и дифференцирующих устройств. Сформулированы и доказаны условия устойчивости движения к экстремуму в системе с "разнотемповыми" процессами.
5. Разработаны методики синтеза многоканальных экстремальных систем, в основе которых лежит организация двухконтурного управления по каждому каналу с использованием статического или астатического регулятора во внешнем контуре и вектора скорости изменения выходных переменных в алгоритме управления внутреннего контура, что позволяет обеспечить в системе требуемые свойства и решить задачу "автономизации" каналов.
6. Разработаны алгоритм и методика синтеза экстремальных систем со специальной динамической подсистемой оценки производных в условиях действия помех измерения и дрейфа функции качества с использованием аппарата теории сингулярно-возмущенных уравнений.
7. Предложена и разработана методика синтеза одноканальных нелинейных нестационарных систем экстремального регулирования с организацией скользящих режимов, которая включает в себя предварительное преобразование объекта путем добавления к нему оценки градиента в качестве новой выходной переменной и формирование поверхности переключений в соответствии с требованиями к качеству процесса выхода на экстремум.



**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

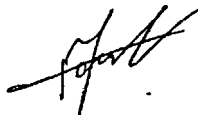
1. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. - М.: Высш. школа, 2004. - 365 с.
2. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НПУ, 2003. - 362 с.
3. Востриков А.С., Французова Г.А. Экстремальные и оптимальные системы автоматического управления. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. - 64 с.
4. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. - 122с.
5. Востриков А.С., Французова П.А. Проблема стабилизации многоканальных нелинейных нестационарных объектов // Авиакосмическое приборостроение. - 2004. - №4. - С. 18-22.
6. Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Система с производной вектора состояния в управлении //Автоматика и телемеханика. -1982. - № 3. - С. 22 - 25.
7. Французова Г.А. Синтез двухконтурной астатической системы экстремального регулирования на основе принципа локализации // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2004. - Т. VII, № 1 (17). - С. 145 - 150.
8. Французова Г.А. Скользящие режимы в одноканальных системах экстремального регулирования // Автометрия. - 2003. - Т. 39, № 4. - С. 47 - 56.
9. Французова Г.А. Синтез двухконтурных автоматических систем поиска экстремума с вектором скорости в обратной связи // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2003. - Т. VI, № 2. - С. 137 -144.
10. Французова Г.А. Условия разделимости движений для автоматических систем поиска экстремума с вектором скорости в управлении // Научный вестник НГТУ. 2003. - №1(14). - С. 3-16.
11. Французова Г.А. Влияние параметров дифференцирующих устройств на процессы в автоматических системах поиска экстремума с вектором скорости в управлении // Научный вестник НГТУ. - 2003. - № 2 (15). - С. 3 - 12.
12. Французова Г.А. Об условиях разрешимости задачи синтеза автоматической системы экстремального управления // Научный вестник НГТУ. - 2001. - №2. - С. 3 - 9.
13. Французова Г.А. Применение метода скользящих режимов для синтеза автоматических систем поиска экстремума // Тр. межд. науч.-техн. конф. "Информационные системы и технологии (ИСТ2003)" -Новосибирск, 2003. - Т. 1. - С. 185 -189.



14. Французова Г.А. Применение принципа локализации в задаче синтеза экстремальных систем // Проблемы синтеза и проектирования систем автоматического управления / Матер. науч.-практ. семинара. - Новосибирск, 2001. - С. 76 - 80.
15. Французова Г.А. Принцип локализации в задаче синтеза экстремальных систем // Матер. III Сибир. конгресса по прикладной и индустриальной математике (ИНИРИМ-98). - Новосибирск, 1998. - Ч. 3. - С. 27.
16. Французова Г.А. Влияние помех в экстремальной системе с производной динамической части объекта в управлении // Матер. межд. науч.-техн. конф. "Научные основы высоких технологий". - Новосибирск, 1997. - Т. 1. - С. 28 - 32.
17. Французова Г.А. Метод локализации в задаче синтеза экстремальных систем // Матер. III межд. науч.-техн. конф. "Микропроцессорные системы автоматики". - Новосибирск, 1996. - С. А39 - А41.
18. Французова Г.А. Анализ собственных свойств многоканальных систем управления // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками / Новосиб. электротехн. ин-т. - Новосибирск, 1989. - С. 63 - 66.
19. Французова Г.А. Выделение "вырожденных" движений в многоканальных системах общего вида // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками / Новосиб. электротехн. ин-т. - Новосибирск, 1988. - С. 93 - 96.
20. Французова Г.А. О "вырожденных" движениях в задаче стабилизации многосвязных систем // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками / Новосиб. электротехн. ин-т. - Новосибирск, 1986. - С. 68 - 71.
21. Французова Г.А., Заржецкая Н.В. Синтез градиентных экстремальных систем на основе принципа локализации // Сб. науч. трудов НГТУ. - Новосибирск, 1995. - Т. 2. - С. 57 - 60.
22. Французова Г.А., Заржецкая Н.В. Синтез экстремальных систем на основе принципа локализации // Информатика и процессы управления. - Красноярск, 1995. - С. 22 - 24.
23. Французова Г.А., Заржецкая Н.В. Синтез систем экстремального управления на основе принципа локализации // Электронная техника. Серия 7. Технология, организация производства и оборудования. - 1992. - Вып. 3 (172). - С. 11 - 13.
24. Французова Г.А., Заржецкая Н.В. Формирование желаемого движения в экстремальной системе на основе принципа локализации // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками / Новосиб. электротехн. ин-т. - Новосибирск, 1992. - С. 63 - 71.

25. Французова Г.А., Заржецкая Н.В. Исследование нестационарной экстремальной системы, основанной на принципе локализации // Матер. 5-го Ленинград, симпозиоз. "Адаптивные и экспертные системы в управлении". - Л., 1991. - С. 31 - 32.
26. Французова Г.А., Колесник А.В. Синтез экстремальных систем управления на основе принципа локализации // Матер. IV сибирского конгресса по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ - 2000). - Новосибирск, 2000. - Ч. IV. - С. 83.
27. Французова Г.А., Колесник А.В. Об одном подходе к дискретизации экстремальной системы, основанной на принципе локализации // Тр. межд. науч. конф. "Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения". - Саратов, 2000 - С. 118 - 122.
28. Колесник А.В , Французова Г.А. Разделение движений в одноканальной системе, основанной на принципе локализации // Тр. межд. науч.-техн. конф. "Информационные системы и технологии (ИСТ2000)". - Новосибирск, 2000. - Т. 2. - С. 115-119.
29. Колесник А.В , Французова Г.А. Цифровая реализация экстремального регулятора, основанного на принципе локализации // Тр. V межд. конф "Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2000)". - Новосибирск, 2000. - Т. 3.-С. 172-177.
30. Французова Г.А, Колесник А.В, Лукина В.М. Исследование экстремальных систем управления, основанных на принципе локализации // Тр. IV межд. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-98)". - Новосибирск, 1998. - Т. 2. - С. 123 - 127.
31. Французова Г.А., Нефедов М.С. Применение скользящего режима в системе автоматического поиска экстремума. // Матер. VI межд. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2002)". - Новосибирск, 2002. - Т. 6.-С. 87-91.
32. Таран А.В., Французова Г.А. Составление математической модели электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля // Тр. V межд. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2000)". - Новосибирск, 2000. - Т. 3. - С. 200 - 203.
33. Frantsuzova G.A. Localization Principle in the Synthesis Problem of Extremal Control System. // Proc. of the IASTED intern, conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-2002)". - 2002. - P. 322 - 326.

34. Frantsuzova GA. Synthesis Problem of the Extremal Automatic Control System. // Proc. of the 6<sup>th</sup> Russian-Korean Intern. Symposium on Science and Technology (KORUS-2002). - 2002. - Vol. 1. - 2462 - 165.
35. Frantsuzova GA., Nefedov M.S. Applying the Sliding Mode in Automatic Search Extrem System. // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings (APEIE-2002). - 2002. - Vol.1. - P. 247 - 251.
36. Frantsuzova GA., Zarzhetzkaya N.V. Lokalization principle in the extremal control problem // Abstr. of papers intern, conf. "Systems Science XI". - Wroclaw, 1992. - P.136.
37. Taran A.V., Frantsuzova G.A., Kharitonov SA. Control System of Electric Power Steering. // Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-2002)". - 2002. - P. 121 - 124.



Подписано к печати 26.04.2004 г. Формат бумаги 60x84 1/16

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ. л. 2,2

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20







04-14486

Из фондов Российской национальной библиотеки