

На правах рукописи

РГБ ОД

17 июл 2000

НАУМОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ  
ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА**

05.13.14. - Системы обработки информации и управления

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск - 2000

Работа выполнена в Красноярском государственном техническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Масальский Г.Б.

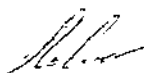
Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Лапко А.В.,  
доктор технических наук,  
профессор Семенкин Е.С.

Ведущая организация: государственное научно-производственное предприятие "Радносвязь" (г.Красноярск)

Защита состоится "12" мая 2000 года в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д 064.54.01 в Красноярском государственном техническом университете по адресу: 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26.  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Красноярского государственного технического университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ловчиков А.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Большинство промышленных технологических процессов отличается значительной инерционностью, действием контролируемых и неконтролируемых возмущающих воздействий, нестационарностью характеристик. Поэтому задача оптимизации указанных процессов и разработки высокоэффективных алгоритмов управления является весьма актуальной.

В реальных условиях сведения о характеристиках управляемого объекта постепенно теряют свою достоверность вследствие различных случайных изменений. Данное обстоятельство, а также дрейфы параметров, характеризующих целевую функцию могут привести к неоптимальному режиму функционирования, а в некоторых случаях и к выходу из состояния устойчивости.

Поисковые адаптивные системы были предложены и теоретически обоснованы практически одновременно с беспойсковыми системами в 50-х годах уходящего столетия. Однако в то время не было достаточно совершенных технических средств для реализации поисковых адаптивных систем управления. К тому же основные усилия были направлены на развитие систем "объект + регулятор". Данные обстоятельства обусловили переключение внимания на беспойсковые адаптивные системы. Поисковые системы в течение длительного времени находились в тени. В настоящее время поисковые адаптивные системы имеют все необходимые технические средства в виде прежде всего микропроцессорной техники. Поэтому теория *поисковых адаптивных систем* становится вновь актуальной. Использование адаптивных методов и систем управления, обеспечивающих самонастройку в процессе управления, наиболее эффективно в условиях неполной априорной информации, когда некоторые наиболее существенные параметры различных стадий технологического процесса неизвестны, либо нестационарны.

Большое число объектов, встречающихся на практике, обладают значительной инерционностью. Оптимизация таких объектов представляет собой более сложную задачу по сравнению с оптимизацией безинерционных и малоинерционных объектов. При этом более эффективны системы экстремального управления (СЭУ) шагового типа.

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих алгоритмы экстремального управления является их быстроедействие, определяемое временными затратами на единицу смещения к цели  $M[\lambda]/(\lambda^i \tau)$ , где  $M[\lambda]$  - математическое ожидание реального смещения центра симплекса к цели за один шаг поиска,  $\lambda^i$  - теоретическое смещение центра симплекса за один шаг поиска,  $\tau$  - относительное время поиска (время управления). Потери на поиск обусловлены эффективностью СЭУ вдали от экстремума и в районе экстремума. Последние характеризуются блужданием системы в области экстремума. Отсутствие алгоритмов, обладающих одновременно эффективным быстроедействием и сходимостью поиска к экстремуму

при экстремальном управлении объектами со значительной инерционностью делает актуальной задачу адаптивного управления и разработки алгоритмов, обладающих одновременно указанными свойствами.

Тема диссертации связана с развитием теории экстремальных систем, разработкой адаптивных алгоритмов последовательного симплексного поиска и управления инерционными объектами, их реализацией на промышленных контроллерах.

**Целью работы** является разработка и исследование эффективных алгоритмов экстремального управления динамическими объектами, анализ их свойств, параметрический и структурный синтез алгоритмов поиска экстремума для динамических объектов, а также их моделирование, разработка программного обеспечения и испытание в промышленных условиях.

Для достижения цели необходимо разработать алгоритмы, ориентированные на применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) на промышленных контроллерах, обеспечивающие эффективное управление динамическим объектом для условий неполной априорной информации об объекте управления.

**Методы исследования.** Исследования, проводимые в работе, основаны на комплексном использовании методов и результатов теории адаптивного управления, статистической теории симплексного поиска и ее приложений в задачах оптимизации и идентификации объектов управления, теории вероятностей и математической статистики. При оценке эффективности разработанных алгоритмов применялось численное моделирование на ЭВМ, методы статистической теории симплексного поиска.

**Научная новизна работы** состоит в следующем.

1. Разработаны адаптивные алгоритмы экстремального управления объектами с известными динамическими свойствами каналов управления на основе последовательного симплексного метода (ПСМ), использующие следующие подходы к решению задачи повышения быстродействия: форсирование переходных процессов по каналам управления, предвычисление установившихся значений выходной переменной объекта, поиск с адаптацией времени управления на каждом шаге поиска, обеспечивающего максимальное быстродействие.

2. Разработан адаптивный алгоритм экстремального управления объектами с неизвестными динамическими свойствами каналов управления на основе последовательного симплексного метода с оценкой времени управления, обеспечивающего максимальное быстродействие поиска.

3. Получена аналитическая зависимость времени управления от оценок составляющих градиента статической характеристики на каждом шаге поиска, обеспечивающего максимальное быстродействие.

4. Выведена аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска при произвольной ориентации симплекса и отсутствии помех.

5. На основе анализа поведения системы экстремального управления с применением аппарата вероятностных целей Маркова с конечной

предысторией получена аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска для алгоритма ПСМ с форсированием переходных процессов по каналам управления, произвольной ориентацией симплекса и размерности пространства управления  $k=2$ . Показано, что применение в симплексном поиске самонастройки по времени поиска повышает его эффективность при оптимизации объектов в обстановке помех.

6. Разработан алгоритм форсирования переходных процессов для объектов со связанными каналами управления.

7. Разработан и исследован алгоритм останова процесса поиска с последовательным анализом текущей ситуации на динамическом объекте. Рассмотрено влияние параметров процедуры последовательного анализа на эффективность поиска. Анализ результатов испытаний алгоритмов ПСМ и симплексного инвариантного метода (СИМ) с последовательным анализом текущей ситуации на динамическом объекте для модели с известной и вычисляемой в процессе поиска оценкой дисперсии помехи и медленным дрейфом экстремума показал, что алгоритм СИМ с последовательным анализом и учетом времени проведения эксперимента повышает эффективность поиска за счет уменьшения количества неудачных шагов.

#### **Основные положения, представляемые к защите.**

1. Метод форсирования переходных процессов для объектов со связанными каналами управления.

2. Аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска при произвольной ориентации симплекса и отсутствии помех.

3. Аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска для алгоритма ПСМ с форсированием переходных процессов по каналам управления, произвольной ориентацией симплекса и размерности пространства управления  $k=2$ .

4. Аналитическая зависимость времени управления от оценок составляющих градиента статической характеристики на каждом шаге поиска, обеспечивающего максимальное быстродействие.

5. Алгоритм останова процесса поиска на динамическом объекте.

6. Адаптивные алгоритмы экстремального управления объектами с известными динамическими свойствами каналов управления на основе ПСМ, использующие следующие подходы к решению задачи повышения быстродействия: форсирование переходных процессов по каналам управления, предвычисление установившихся значений выходной переменной объекта, поиск с адаптацией времени управления на каждом шаге поиска.

7. Адаптивный алгоритм экстремального управления объектами с неизвестными динамическими свойствами каналов управления на основе последовательного симплексного метода с оценкой времени управления, обеспечивающего максимальное быстродействие.

**Практическую ценность** диссертационной работы составляют разработанные на основе подходов к решению задачи повышения быстродействия алгоритмы экстремального управления объектами с известными и неизвестными динамическими характеристиками каналов управления.

Применение данных алгоритмов на практике реализует следующие задачи:

1) разработанные в диссертации алгоритмы и программы управления обеспечивают построение эффективных систем управления динамическими объектами на промышленных контроллерах в условиях изменения характеристик и недостаточной информации о объекте;

2) на базе разработанных алгоритмов создано алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее одно- и двухуровневые системы управления на базе промышленных контроллеров в задачах АСУТП.

**Реализация результатов работы.** Разработанные в диссертации алгоритмы экстремального управления внедрены и нашли успешное применение в промышленном производстве, в системах спутниковой радиосвязи. Разработанные в диссертации методы и алгоритмы экстремального управления включены в состав специального математического обеспечения автоматизированной системы обжига кокса, которая внедряется на Красноярском алюминиевом заводе. Результаты исследований и алгоритмы применены в системе управления наведением антенны станции спутниковой радиосвязи “Легенда МД”.

Подготовлены две лабораторные работы по курсу “Оптимизация и идентификация систем”.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на региональной научно-практической конференции “Проблемы высшего образования на пороге XXI века” (Красноярск, 1997); на научно-практической конференции “Достижения науки и техники – развитию города Красноярск” (Красноярск, 1997); на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Красноярск, 1998); на пятой Всероссийской конференции “Проблемы информатизации региона” (Красноярск, 1999); на научно-практической конференции “Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов” (Красноярск, 2000).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертации отражены в шести опубликованных работах, двух научно-технических отчетах, в двух зарегистрированных программах во Всероссийском научно-техническом информационном центре.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 76 наименования, пяти приложений. Работа изложена на 234 страницах печатного текста, содержит 109 рисунков, 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели диссертации, приведена аннотация работы и её структура.

В первой главе рассмотрены задачи, объекты и методы поисковой оптимизации. Значительная часть инерционных объектов оптимизации может быть представлена зависимостью вида

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ r(t) = Q(X, t) + \varepsilon(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $Q(X, t)$  - неизвестная целевая функция,  $Y$  - измеренное (вычисленное) значение целевой функции,  $U$  - вектор управляющих воздействий (управлений),  $X$  - ненаблюдаемый вектор состояния объекта,  $A$  и  $B$  - известные, либо неизвестные матрицы коэффициентов,  $\dot{X} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_k)$  - производные

по времени состояния динамического объекта,  $\varepsilon$  - аддитивная помеха. Объект вида (1) классифицируют как объект первого рода, когда динамика ОУ сосредоточена в каналах управления перед безинерционной нелинейной статической характеристикой.

Относительно свойств объекта (1) предположено следующее:

1) вид зависимости  $Q(X, t)$  неизвестен, но предполагается, что она является унимодальной функцией относительно вектора  $X$ ;

2) ошибки установления переменных  $u_i, i=1, \dots, k$  пренебрежимо малы в сравнении с ошибками наблюдения  $\varepsilon$ .

Задача экстремального управления формулируется в виде:

$$Q(X, t) \rightarrow \min_{U \in \Omega}; \quad (2)$$

$$\Omega: \left\{ U \in E^k, \dot{X} = AX + BU; u_i \leq u_i \leq \bar{u}_i, i=1, \dots, k; g_v(U) \geq 0, v=1, \dots, r; t_0 \leq t \leq t_N \right\},$$

где  $t_0$  и  $t_N$  - время начала и время завершения управления,  $E^k$  -  $k$ - мерное евклидово пространство,  $u_i$  - нижние и верхние допустимые ограничения  $i$ -ой управляющей переменной,  $g_v(U)$  - функциональное ограничение,  $\varepsilon$  - аддитивная помеха с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией  $\sigma_\varepsilon^2$ . Если аналитическая зависимость  $g_v(U)$  известна, то имеется возможность вычисления и проверки функциональных ограничений до проведения эксперимента на объекте. Ограничение на допустимое состояние  $X$  объекта достигается либо через позиционные, либо через функциональные ограничения. Задача (2) реализуется непосредственно на объекте в режиме реального времени. Элементы вектора  $U$  являются кусочно-непрерывными функциями времени, допускающими разрывы непрерывности первого рода. Задача экстремального управления (2) по времени разбивается на два интервала: 1)  $t_0 \leq t \leq t^*$  - интервал времени, на котором реализуется процесс поиска экстремума; 2)  $t^* \leq t \leq t_N$  - интервал времени, на котором реализуется отслеживание экстремума. Здесь  $t_0$  - момент времени начала экстремального управления, который известен,  $t^*$  - момент времени достижения экстремума, который обычно неизвестен и определяется в процессе поиска,  $t_N$  - момент времени окончания экстремального управления.

Задача (2) в зависимости от уровня информационного и технического обеспечения может быть решена: а) методом прямого поиска непосредственно на объекте без идентификации параметров динамической модели объекта управления (рис. 1а); б) методом прямого поиска непосредственно на объекте с текущей идентификацией параметров динамической модели (рис. 1б). Объект управления и устройство управления (УУ), реализующее

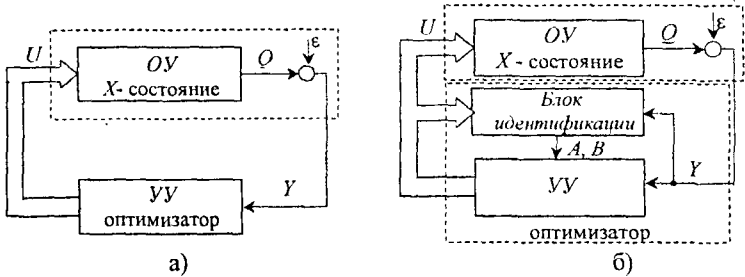


Рис.1. Структурная схема системы экстремальной управления: а) без идентификации; б) с идентификацией параметров динамической модели; ОУ – объект управления; УУ – устройство управления.

алгоритм поисковой оптимизации, в совокупности представляют собой систему экстремального управления (регулирования). Если в процессе поиска на основе анализа результатов наблюдений происходит коррекция параметров поиска, т.е. настройка параметров УУ, либо изменение стратегии поиска, то СЗУ относят к классу адаптивных систем. Устройство управления представляет собой техническое устройство (дискретное), реализующее алгоритм поиска. В диссертации это микропроцессорные комплексы, обеспечивающие широкие возможности измерения контролируемых переменных процесса, обработки, хранения предыстории поиска, для последовательного анализа эффективности поиска. При подключении экстремального регулятора, реализованного на промышленном контроллере, к объекту, система (1) преобразуется в дискретную форму вида:

$$\left. \begin{aligned} X(n+1) &= AX(n) + BU(n) \\ \Gamma(n) &= Q(X(n)) + \varepsilon(n) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $n$  – номер шага поиска,  $A$  и  $B$  – матрицы коэффициентов, отличные от матриц системы (1). При переходе к дискретной форме (4), момент времени  $t_n$  связан с номером шага поиска  $n$  выражением  $t_n = nT_n$ , где  $T_n$  – время между изменениями вектора  $U$  при переходе к новой вершине симплекса, в дальнейшем время управления (время поиска). Рассматриваемые алгоритмы экстремального управления базируются на локальной линеаризации модели объекта, не претендующей на раскрытие процессов в объекте, но отражающей в количественном отношении самые важные его закономерности. Приведена краткая характеристика основных методов экспериментальной оптимизации, рассмотрены их достоинства и недостатки. Приведён перечень критериев сравнительного анализа работы поисковых



алгоритмов в задачах экстремального управления. Для исследования на различных этапах поиска применяются следующие модели ОУ: вдали от экстремума

$$Q(X|n) = \sum_{i=1}^k c_i x_i(n), \quad (5)$$

в районе экстремума

$$Q(X|n) = \sqrt{\sum_{i=1}^k [c_i (x_i(n) - u_i^*(n))]^2}, \quad (6)$$

где  $u_i^*(n)$  - координаты экстремума целевой функции,  $n$  - номер шага поиска. Сделан вывод об актуальности разработки алгоритмов экстремального управления инерционными объектами на основе последовательных методов симплексного поиска. Для объекта с неизвестными параметрами динамической модели на основе проведённого обзора методов идентификации отдано предпочтение рекуррентному методу наименьших квадратов (РМНК), гарантирующего надёжную сходимость оценок при небольшом объёме измерений и небольшом объёме вычислений (в сравнении с методом стохастической аппроксимации, рекуррентным методом вспомогательных переменных, рекуррентным методом максимального правдоподобия), что особенно важно при реализации АСУТП на промышленных контроллерах. По результатам проведённого анализа были поставлены следующие задачи:

- 1) исследовать свойства алгоритмов симплексного поиска при оптимизации динамических объектов;
- 2) разработать эффективные алгоритмы экстремального управления объектами с известной и неизвестной динамикой каналов управления;
- 3) разработать алгоритмы для решения задачи экстремального управления нестационарными объектами со случайным и линейным дрейфом экстремума, обусловленным действием неконтролируемых возмущений;
- 4) разработать комплект программных средств, реализующих предложенные алгоритмы для применения в промышленности;
- 5) провести сравнительный анализ предложенных алгоритмов с алгоритмом ПСМ и выделить области их эффективного применения.

Во второй главе рассматриваются подходы, повышающие эффективность поиска в системе экстремального управления динамическим объектом с использованием алгоритмов ПСМ. Проводится анализ эффективности алгоритмов последовательного симплексного поиска на этапе движения к цели.

В 2.1 рассмотрен объект оптимизации вида (4) с диагональными матрицами состояния и связи со входом вида

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{kk} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & b_{kk} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $a_{ii} = a_i = \text{EXP}(-\tau_i)$ ,  $b_{ii} = b_i = (1 - a_i)$ ,  $\tau_i = \frac{T_{ii}}{T_i}$  относительное время поиска,  $T_i$  -

постоянная времени апериодического звена  $W(p) = \frac{1}{T_i p + 1}$ , по  $i$ -ому ка-

налу управления. Для решения проблемы влияния инерционности каналов управления на процесс поиска можно использовать: - методы оптимального управления по критерию быстродействия; - выбор достаточного для завершения переходного процесса времени поиска  $T_{\Pi}$  между выводом управлений. В 2.2 рассмотрены методы форсирования переходных процессов по каналам управления взаимосвязанного ОУ

$$\begin{cases} X(n+1) = AX(n) + BU(n) \\ Y(n) = Q(\Pi \cdot X, n) + \varepsilon(n) \end{cases}$$

с матрицами  $A$ ,  $B$  и  $\Pi$ , векторами  $X$  и  $U$  имеющими вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{21} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{kk} \end{pmatrix}_{(2k-1) \times (2k-1)}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & \dots & 0 \\ b_{21} & b_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & b_{kv} & b_{k\mu} \end{pmatrix}_{k \times k}, \quad \Pi = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}_{k \times (2k-1)},$$

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ \vdots \\ x_{kk} \end{pmatrix}_{(2k-1) \times 1}, \quad U = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_k \end{pmatrix}_{k \times 1},$$

где  $a_{\nu\nu} = \text{EXP}(-\tau_{\nu\nu})$ ,  $b_{\nu\nu} = (1 - a_{\nu\nu})$ ;  $i = 1, \dots, k$ ,  $\nu = 1, \dots, k$ ,  $\nu \leq i$ . Показано, что при форсировании переходных процессов по каналам управления объекта со связанными каналами управления отрабатываются значения управляющих переменных ограниченные диапазоном

$$\frac{u_{k+}}{2^{k+1}} \leq u_i(n) \leq \frac{u_{k+}}{2^{k-1}}, \quad i = 1, \dots, k, \quad n = 1, 2, \dots,$$

где  $u_{k+}$ ,  $u_{k-}$  - предельные значения управляющей переменной в  $k$ -ом канале управления. Важным показателем, определяющим эффективность экстремального управления, является отношение уровня полезного сигнала  $A = |\Delta U| \cdot |\text{grad}Q(X)$  на выходе объекта к уровню помех  $\sigma_{\varepsilon}$ . Полезный сигнал на выходе динамического объекта зависит от относительного времени поиска  $\tau$ , от предыстории движения симплекса в пространстве состояния, от динамических свойств каналов управления, от вида статической характеристики объекта и т.п. Поэтому исследование влияния динамики каналов управления на уровень полезного сигнала является весьма актуальным. В 2.3 проведён анализ движения симплекса в пространстве состояния для объекта с известной динамикой. Показано, что при отсутствии помех приращения  $\Delta x_i(n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$  по  $i$ -ой переменной в пространстве состояния на этапе движения к цели изменяются в циклической последовательности, состоящей из  $r$  приращений. Для  $r = \text{const}$ ,  $\sigma_{\varepsilon} = 0$  и номере шага  $n \rightarrow \infty$  вычислены величины приращений

$$\Delta x_i(r_{\text{ТЭК}}) = b_i \frac{1}{1 - e^{-\theta}} \sum_{q=0}^{r-1} e^{-\theta(q+i)} \Delta u_i(q+i) + b_i \left[ e^{-\theta r_{\text{ТЭК}}} \Delta u_i(r) + \sum_{l=1}^{r-1} e^{-\theta(r-l)} \Delta u_i(l) \right], \quad i = 1, \dots, k, \quad (9)$$

где  $r_{\text{ТЭК}}$  - номер шага в последней незавершённой последовательности приращений  $\theta \leq r_{\text{ТЭК}} \leq r$ . Разработана методика для экспериментального опре-

деления числа  $r$ . В 2.4 при использовании выражения (9) выведена аналитическая зависимость эффективности поиска на динамическом объекте от относительного времени поиска  $\tau$  при отсутствии помех. В качестве критерия эффективности поиска принято отношение

$$J = M[\lambda](\lambda'\tau), \quad (10)$$

характеризующего скорость (быстродействие) движения центра симплекса к цели, здесь  $M[\lambda]$  - математическое ожидание смещения центра симплекса за один шаг поиска,  $\lambda'$  - теоретическое смещение центра симплекса за один шаг поиска. Уменьшение  $\tau$ , с одной стороны, приводит к уменьшению уровня полезного сигнала в пространстве переменных состояния  $X$ , а следовательно, к снижению эффективности поиска за счет уменьшения величины перемещения симплекса к цели. С другой стороны, это дает возможность за один и тот же интервал времени сделать большее число шагов поиска и увеличить общее смещение к цели. Поэтому, для критерия эффективности поиска (10) существуют соотношения  $\tau = T_n/T$ , обеспечивающие максимум быстродействия поиска:

$$\max_{\tau} \left( \frac{M[\lambda]}{\lambda'\tau} \right),$$

при  $\frac{A}{\sigma_s} = \text{const}$  для  $T_1 = T_2 = \dots = T_k = T$ .

В 2.5 с использованием вероятностных цепей Маркова с конечной предьсторией выведена аналитическая зависимость быстродействия поиска (10) от времени поиска  $\tau$  при форсировании переходных процессов по каналам управления для размерности  $k=2$  и произвольной ориентации симплекса. Этот же результат был получен в работах А.П.Дамбраускаса для объектов статикн. В 2.6 проведено исследование алгоритма ПСМ на этапе движения к цели при  $k=2, \dots, 7$ . Показано, что для динамического объекта вдали от экстремума статической характеристики алгоритм ПСМ со стратегией запрета возврата (ЗВ) эффективнее алгоритма ПСМ со стратегией свободного отражения (СО) по критерию (10). Моделирование процесса поиска подтвердило существование максимума быстродействия

поиска  $M[\lambda](\lambda'\tau)$  для

$k=2, \dots, 7$ . Результаты исследований процесса поиска (ПСМ с ЗВ) при  $k=2$  представлены на рис.2.

Выполнена аппроксимация оценки оптимального значения  $\tau^*$  по критерию быстродействия поиска (10):

$$\tau = \frac{T_n}{T} = P_1 \cdot \exp\left(-\frac{A}{\sigma_s} P_2\right), \quad (11)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  - коэффициенты аппроксимации. Вычислены значения

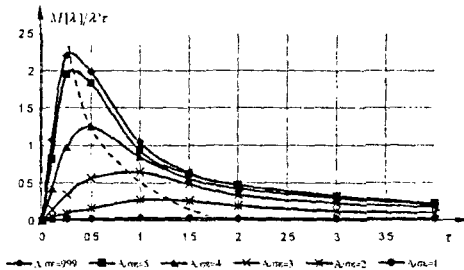


Рис. 2. Статистические характеристики быстродействия поиска  $M[\lambda](\lambda'\tau)$  для алгоритма ПСМ с ЗВ,  $k=2$ ,  $N = 1000 + (k+1)$ .

коэффициентов  $P_1$  и  $P_2$  для размерности

пространства управления  $k = 2, \dots, 7$ . Для минимального значения уровня полезного сигнала  $(A/\sigma_\varepsilon)_{\min}$ , при котором эффективность поиска на этапе спуска считается удовлетворительной, для функции (5) вычислено значение относительного времени поиска

$$\tau_{\min}(n) = -\ln \left[ 1 - \frac{(A/\sigma_\varepsilon)_{\min} \cdot \sigma_\varepsilon}{|\hat{\varepsilon}_r(n)| \cdot |\Delta U|} \right], \quad (12)$$

где  $\hat{\varepsilon}_r$  - оценка составляющей градиента статической характеристики (5), для которой минимум абсолютного значения определим дискретностью по уровню измерительного прибора  $|\hat{\varepsilon}_r| \geq |\Delta u_r|_{\text{МЭВ}}$ ,  $r$  - номер канала с минимальным значением  $\tau_r$  ( $T_i = \max T_i$ ),  $i = 1, \dots, k$ . Определён диапазон времени поиска  $\tau_{\min} \leq \tau_{\text{опт}} \leq 4$ , где  $\tau_{\min}$  определено выражением (12), в котором увеличение быстродействия поиска (10) при сокращении времени поиска  $\tau$  наиболее существенно. В 2.7 получено выражение для относительного времени поиска  $\tau$ , доставляющего максимум критерия быстродействия (10):

$$\tau_{\text{опт}}(n) = P_1 \cdot \exp \left[ - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k \hat{\varepsilon}_i^2(n-1) \cdot |\Delta U|} \cdot P_2 \cdot (A/\sigma_\varepsilon)_{\min}}{(1 - e^{-\tau_i(n-1)}) \cdot |\hat{\varepsilon}_r(n-1)| \cdot |\Delta U|} \right], \quad (13)$$

где  $\hat{\varepsilon}_i(n-1)$  - оценка составляющей градиента статической характеристики по  $i$ -ому каналу управления по результатам идентификации коэффициентов функции (5). Аналитически доказано, что значение времени поиска  $\tau_{\text{опт}}(n)$ , вычисленное по (13) находится в границах диапазона  $\tau_{\min} \leq \tau_{\text{опт}} \leq 4$ , где  $\tau_{\min}$  определено согласно (12). Показано, что изменение значения  $(A/\sigma_\varepsilon)_{\min}$  влияет на число опытов при движении симплекса от исходной точки до цели. Увеличение быстродействия поиска (10) при увеличении значения  $(A/\sigma_\varepsilon)_{\min}$  происходит за счёт увеличения затрат на проведение экспериментов (увеличение числа шагов поиска).

**В третьей главе** исследуются статистические свойства СЭУ для объектов с известной динамикой в области экстремума статической характеристики (6).

В 3.1 проводится исследование алгоритмов ПСМ с ЗВ и СО на этапе доводки. За критерий эффективности принято среднеквадратическое отклонение центра симплекса от цели

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (U^u(n) - U^*(n))^2}, \quad (14)$$

где  $N$  - число шагов поиска;  $U^u(n)$  - вектор  $U$  центра симплекса на  $n$ -м шаге;  $U^*(n)$  - вектор цели на  $n$ -ом шаге поиска,  $(U^u(n) - U^*(n))$  - вектор смещения центра симплекса от цели на  $n$ -ом шаге. Сравнительный анализ характеристик (14) и характеристик (10), представленных в п.2.6, показывает на необходимость изменения стратегии поиска в области экстремума

от ЗВ к СО. Показано, что на динамическом объекте алгоритм ПСМ с СО в области экстремума более эффективен в сравнении с алгоритмом ПСМ с ЗВ при увеличении времени поиска до  $\tau=4$ . В 3.2 и 3.3 проведено исследование влияния дрейфа экстремума статической характеристики (6) на алгоритм ПСМ с СО и алгоритм симплексного инвариантного метода поиска (СИМ) с повторными экспериментами. При дрейфе экстремума статической характеристики на показатель (14), с одной стороны, оказывают влияние относительное время поиска  $\tau$  и число повторных экспериментов  $\Gamma$  в текущей вершине симплекса, так как  $\tau$  и  $\Gamma$  изменяют отношение скорости дрейфа экстремума к максимально возможной скорости смещения центра симплекса за один шаг поиска  $\frac{V}{V_{\text{гп}}} = \frac{V}{(L/\tau)} \Gamma$ . С другой стороны, эф-

фективность экстремального управления при дрейфе статической характеристики зависит от эффективности алгоритма поиска. В алгоритме СИМ с оценкой скорости дрейфа экстремума за переменную контролируемого возмущения  $z_l$  принято значение промежутка времени между повторными экспериментами  $z_l = t_m - t_{m-1}$ , где  $m$  – номер повторного эксперимента в вершине симплекса. Оценка зависимости возмущение-выход вычисляется

по формуле  $b_n = \frac{\sum_{j=1}^{\Gamma} Y_j^m - \Gamma Y_j^0}{\sum_{j=1}^{\Gamma} z_j^m - \Gamma z_j^0}$ ,  $Y_j^0, z_j^0$  – результаты исходного эксперимента.

Коррекция отклика в алгоритме СИМ после очередного шага проводится по формуле  $C_j = Y_j - b_n z_j$ , где  $b_n$  отражает скорость дрейфа экстремума, выраженную в изменении целевой функции за рассматриваемый промежуток времени поиска. Результаты моделирования показали более высокую эффективность алгоритма СИМ. Показано, что наилучшая эффективность поиска в области экстремума соответствует числу повторных экспериментов  $\Gamma = 2 \div 3$  в обстановке помех  $A/\sigma_s = 1 \div 5$  и  $k = 2, \dots, 7$ . В 3.4 показано, что уменьшение относительного времени поиска  $\tau$  в области экстремума приводит к ухудшению маневренности симплекса, выраженного в увеличении показателя (14). Результаты исследований процессов автоколебаний в области экстремума согласуются с результатами исследований зависимости показателя (14) от  $\tau$ , проведённых в 3.1, и подтверждают вывод о нецелесообразности уменьшения времени поиска  $\tau$  при управлении в области экстремума. Существование области блужданий симплекса в области экстремума характеризует потери поиска, связанные с переводом управляющих переменных, поэтому экстремальное управление в области экстремума связано с принятием решения об оптимальности текущего режима и останове процесса поиска а также о его возобновлении при неоптимальном текущем режиме. Для решения задач стабилизации выходной переменной в 3.5 исследованы алгоритмы СИМ, ПСМ с последовательным анализом текущей ситуации на динамическом объекте. В 3.6 рассмотрено влияние параметров процедуры последовательного анализа на эффективность поиска. Приведены результаты испытаний алгоритмов

СИМ и ПСМ на модели с известной и вычисляемой в процессе поиска оценкой дисперсии помехи и медленным дрейфом экстремума. В 3.7 по результатам проведенных в предыдущих разделах исследований разработан алгоритм экстремального управления объектом с известной динамикой каналов управления с использованием алгоритма СИМ с временем проведения эксперимента в качестве контролируемой переменной. Дано описание алгоритма и разработана программа для реализации в АСУТП на промышленных контроллерах. Программа зарегистрирована во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНИИЦ). В 3.8 исследован самонастраивающийся алгоритм экстремального управления объектами с известной динамикой при отсутствии форсирования переходных процессов по каналам управления. Сделан вывод об асимптотической устойчивости итерационной процедуры вычисления времени поиска (13). Проведенные исследования показали, что алгоритм экстремального управления наиболее эффективен при значении коэффициента  $(A/\sigma_{\epsilon})_{\min} = 0.5$  по критерию усредненного быстродействия поиска (10).

В четвертой главе проводится разработка алгоритма экстремального управления объектом с неизвестной динамикой по каналам управления, для которых значения относительного времени поиска и значения составляющих градиента статической характеристики  $c_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  неизвестны. Поэтому, при реализации самонастраивающейся процедуры экстремального управления используются их оценки.

В 4.1 формализована задача идентификации параметров объекта (4) и проводится исследование идентификации параметров объекта вдали от экстремума. Для упрощения процедуры расчета оценок  $\tau_i$ ,  $c_i$  и высвобождения вычислительных ресурсов промышленного контроллера рационально объект представляется как  $k$ -одномерных объектов. При аппроксимации статической характеристики объекта функцией (5) оценка зависимости выхода объекта по  $i$ -ому каналу управления вычисляется по формуле

$$\hat{Y}(n) = Y(n-1)\hat{a}_i(n-1) + u_i(n-1)\hat{d}_i = \psi_i^T(n) \cdot \hat{\theta}_i(n-1), \quad i = 1, \dots, k, \quad (15)$$

где  $\psi_i^T(n) = (Y(n-1) \ u_i(n-1))$  - вектор наблюдений на шаге  $(n-1)$ ,  $\hat{\theta}_i(n-1) = \begin{pmatrix} \hat{a}_i(n-1) \\ \hat{d}_i(n-1) \end{pmatrix}$  - вектор оценок параметров по  $i$ -ому каналу на шаге  $(n-1)$ .

Оценка значения времени поиска  $\hat{\tau}_i$  вычисляются из выражения

$$\hat{\tau}_i = \frac{T_n}{T_i} = \ln\left(\frac{1}{\hat{a}_i}\right), \quad i = 1, \dots, k. \quad (16)$$

Оценка составляющей градиента  $\hat{c}_i$  находится из выражения

$$\hat{c}_i = \frac{d_i}{1 - \exp(-T_n \cdot \hat{T}_i)}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (17)$$

Обработка результатов измерений и вычисление оценок (16), (17) выполнена алгоритмом РМНК. За показатель качества идентификации принималось среднеквадратическое отклонение оценок параметров  $\sigma_a$ ,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_c$ ,

$\sigma_i$  относительно их оцениваемых значений. При исследовании процессов идентификации выбрано значение параметра сходимости  $\lambda$  оценок РМНК для поставленной задачи идентификации параметров уравнения (15). Данные экспериментальных исследований показали, что значения  $\sigma_a$  и  $\sigma_i$  возрастают пропорционально кубическому корню  $\sqrt[3]{k}$ , где  $k$  – размерность пространства управления. При исследовании процесса идентификации параметров объекта с несимметричной статической характеристикой коэффициенты функции (6) приняты равными  $c_i = i \cdot K_c$ ,  $c_1 = 1$ ,  $i = 2, \dots, k$ . Для объекта с неодинаковыми значениями постоянных времени  $T_1 \neq T_2 \neq \dots \neq T_k$  значения  $\tau_i = i \cdot \frac{1}{K_c}$ ,  $\tau_i = K_c \cdot i$ ,  $i = 2, \dots, k$ ,  $\tau_1 = 1$ , где коэффициенты  $K_c$  и  $K_i$  характеризуют несимметричность статической характеристики  $Q(X)$  и постоянных времени  $T_i$  по каналам управления. Показано, что при увеличении несимметричности статической характеристики, либо при увеличении разницы между постоянными времени динамических звеньев по каналам управления, заданных значениями коэффициентов  $K_c$  и  $K_i$ , среднеквадратические отклонения оценок  $\sigma_a$  и  $\sigma_i$  увеличиваются. В 4.2 исследуется задача идентификации параметров объекта в области экстремума статической характеристики вида

$$Q(X) = \sum_{i=1}^k [q_i (x_i(n) - u_i(n))^2], \quad (18)$$

где  $q_i$  – постоянные коэффициенты. Анализ результатов исследований идентификации параметров объекта в области экстремума статической характеристики показал, что при аппроксимации статической характеристики (18) зависимостью вида (5) значения  $\sigma_a$  и  $\sigma_i$  увеличиваются пропорционально отношению  $q/L$ , где  $L$  – длина ребра симплекса, характеризующая величину приращения управляющей переменной  $|\Delta U|$  в пространстве управления. Проведенный анализ свидетельствует о необходимости оценки отношения  $q/L$  и поддержания его постоянным как о способе улучшения сходимости оценок. Анализ результатов исследований процессов идентификации параметров объекта при дрейфе статической характеристики показал, что при отношении относительной скорости дрейфа экстремума к граничной скорости перемещения центра симплекса  $\frac{V}{V_{cr}} > 1$  на-

блюдается смещение оценок  $\hat{r}_i$  и  $\hat{c}_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  относительно оцениваемых значений  $r_i$  и  $c_i$ . По результатам исследований разделов 4.1 - 4.2 в 4.3 разработан алгоритм экстремального управления объектом с неизвестной динамикой. Дано описание алгоритма и разработаны программы для реализации в двухуровневой АСУТП на промышленных контроллерах. На первом, технологическом уровне управления выполняется последовательность действий алгоритма СИМ с временем проведения эксперимента в качестве контролируемой переменной  $z_1$ . Функции идентификации и самонастройки выделены во второй уровень двухуровневой системы управ-

ления для высвобождения вычислительных ресурсов промышленного контроллера под задачи двухпозиционного управления и повышения быстродействия экстремального регулятора в целом. Программы зарегистрированы во Всероссийском научно – техническом информационном центре. В 4.4 и 4.5 методом математического моделирования проведено исследование статистических характеристик самонастраивающегося алгоритма экстремального управления объектом с неизвестной динамикой при отсутствии форсирования переходных процессов соответственно для линейной и нелинейной статических характеристик. Анализ проведённых исследований показал, что введение самонастройки по времени поиска  $\tau$  для объектов с неизвестной динамикой увеличивает быстродействие поиска в сравнении с быстродействием ПСМ с ЗВ при  $\tau \geq 1$  для диапазона изменения отношения уровня полезного сигнала к уровню помех  $0.5 \leq (A/\sigma_z)_{\min} \leq 2$ .

В пятой главе рассмотрены вопросы практического применения разработанных алгоритмов экстремального управления в задаче автосопровождения спутника радиосвязи и задаче оптимизации технологического процесса обжига кокса, приведены прикладные результаты, полученные при разработке автоматизированной системы управления (АСУ) этим процессом.

В 5.1 рассмотрен процесс обжига кокса как объект управления. Показана взаимосвязь технологических показателей, разработаны критерии оптимизации, методика и алгоритмы расчета оптимальных режимов обжига кокса. Приведены характеристики процесса обжига, представляющего собой сложный многомерный объект управления с большим количеством управляющих переменных и контролируемых возмущений (плотность исходного кокса  $\rho$ , содержание летучих соединений  $V_d$ , температура начала окисления  $T_{ок}$ , содержание коксовой пыли и т.д.). Выделены основные управляемые переменные, за которые приняты расход кокса  $G_k$  ( $m^3/h$ ), расход топлива  $Q_{\text{м.г.т.}}$  ( $m^3/min$ ), расход воздуха  $Q_{\text{во.ю}}$  ( $m^3/c$ ), разрежение в печи  $Q_p$  ( $mm.600.cm$ ). В вектор оперативных управлений  $U = (u_1, u_2, u_3)$  включены параметры  $u_1 = G_{\text{м.г.т.}}$ ,  $u_2 = Q_{\text{во.ю}}$ ,  $u_3 = Q_p$ . Показано влияние управляемых и неуправляемых переменных на положение и длину зоны прокаливания. Применен способ контроля положения зоны прокаливания по температуре в верхней головке печи  $T_{ог}$ . Разработана функциональная структура АСУТП печи обжига. Разработан алгоритм экстремального управления процессом обжига кокса. Алгоритм построен на основе адаптивного алгоритма симплексного поиска, учитывающего при экспериментальной оптимизации информацию об измерениях контролируемых возмущений. Система экстремального управления технологическим процессом минимизирует квадрат отклонения  $Y = (T_{ог} - T_{ог}^a)^2$  температуры  $T_{ог}$  от оптимального её значения  $T_{ог}^a$ . Одной из важных функций АСУТП обжига является определение оптимального положения зоны прокаливания и вычисление температуры  $T_{ог}^a$ . При изменении  $\rho$ ,  $V_d$



и  $T_{ок}$  положение кривой квадрата невязки  $(T_{ор}^0 - T_{ор})^2$  в пространстве управлений изменяется как показано на рис.3. Как следствие, для  $\xi = 1, \dots, \Xi$  совокупностей выборочных наблюдений: плотности исходного кокса  $\rho_{\xi 1}, \rho_{\xi 2}, \dots, \rho_{\xi N}$ , содержания летучих соединений  $V_{\xi 1}, V_{\xi 2}, \dots, V_{\xi N}$ , температуры начала окисления  $T_{ок \xi 1}, T_{ок \xi 2}, \dots, T_{ок \xi N}$ , распределённых по законам  $\Phi(\rho_{\xi}), \Phi(V_{\xi}), \Phi(T_{ок \xi})$ , существует оптимальное значение температуры отходящих газов  $T_{ор \xi}$ ,  $\xi = 1, \dots, \Xi$ . Диапазон допустимого изменения температуры отходящих газов разбит на  $\Xi$  интервалов:  $T_{ор 1}, \dots, T_{ор 2}, \dots, T_{ор \Xi}$ . По данным лабораторного анализа кокса в период обучения системы оптимизации температуры отходящих газов выполнено  $\Xi \cdot N$  измерений  $T_{ор}$ , получены результаты анализа проб кокса ( $N$ -объём выборки), определяющие распределения вероятностей  $\Phi(\rho_{\xi}), \Phi(V_{\xi}), \Phi(T_{ок \xi})$  для значений температуры отходящих газов  $T_{ор \xi}$ , попадающих в интервал  $T_{ор \xi} \div T_{ор \xi+1}$ ,  $\xi = 1, \dots, \Xi$  (где  $T_{ор 1} = T_{ор мин}$ ,  $T_{ор \Xi+1} = T_{ор макс}$ ). В совокупности наблюдений  $\rho_{\xi 1}, \rho_{\xi 2}, \dots, \rho_{\xi N}$ ,  $V_{\xi 1}, V_{\xi 2}, \dots, V_{\xi N}$ ,  $T_{ок \xi 1}, T_{ок \xi 2}, \dots, T_{ок \xi N}$  включены только наблюдения, по времени

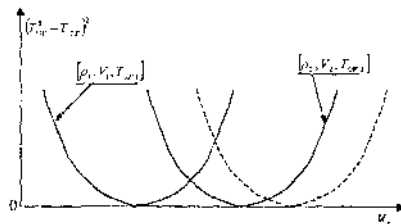


Рис.3. Кривые изменения квадрата невязки  $(T_{ор}^0 - T_{ор})^2$  в пространстве управления при изменении  $\rho, V, T_{ок}$

взятия проб соответствующие допустимому качеству получаемого продукта по результатам анализа плотности  $\rho_k^{поок}$  и удельного электрического сопротивления  $R_{\tau}^{поок}$  прокаленного кокса. Задача выбора оптимального значения температуры в верхней головке печи  $T_{ор}^0 = T_{ор \xi}^0$  решается определением номера  $\xi$  группы выборочных распределений  $\Phi(\rho_{\xi}), \Phi(V_{\xi}), \Phi(T_{ок \xi})$ , к которой с наибольшей вероятностью можно отнести результаты последнего анализа свойств исходного сырья  $\rho, V, T_{ок}$  с использованием формулы Байеса. В 5.3 решается задача управления наведением антенны радиосвязи как задача экстремального управления. Разработан алгоритм экстремального управления наведением антенны с предвычислением установившегося значения выходной переменной объекта

$$\Delta \mathcal{L}(n+1, \tau) = \sum_{i=1}^k f(\Delta u_i(n)) (1 - \exp(-\tau)), \quad \tau = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k.$$

Приводятся структурные схемы моделей электромеханической системы управления положением антенны и результаты исследования их динамики на ЭВМ.

В приложениях приводятся тексты разработанных в диссертации программ, а также некоторые материалы, поясняющие проведенные в ра-

боте математические расчёты. Приведены результаты внедрения разработанных алгоритмов на Красноярском алюминиевом заводе (КрАЗе) и в научно-производственном предприятии "Радиосвязь" (г. Красноярск).

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации с помощью методов и результатов теории адаптивного управления, теории идентификации и оптимизации, теории вероятностей и математической статистики, методов статистической теории симплексного поиска решена задача управления динамическими объектами с использованием алгоритмов последовательного симплексного поиска. Разработаны адаптивные алгоритмы экстремального управления объектами с известными и неизвестными динамическими характеристиками каналов управления.

1. На основе анализа вероятностных и статистических характеристик алгоритмов симплексного поиска обоснована актуальность разработки адаптивных алгоритмов симплексного поиска для решения задачи экстремального управления динамическим объектом. Полученные характеристики используются для решения теоретических и практических задач синтеза адаптивных алгоритмов, выбора методов поиска и оценки параметров поиска, обеспечивающих эффективный режим.

2. Разработан алгоритм форсирования переходных процессов для объектов со связанными каналами управления.

3. Выведена аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска при произвольной ориентации симплекса и отсутствии помех.

4. На основе анализа поведения системы экстремального управления с применением аппарата вероятностных цепей Маркова с конечной предысторией получена аналитическая зависимость быстродействия поиска от времени поиска для алгоритма ПСМ с форсированием переходных процессов по каналам управления, произвольной ориентацией симплекса и размерности пространства управления  $k-2$ . Показано, что применение в симплексном поиске самонастройки по времени поиска повышает его эффективность при оптимизации объектов в обстановке помех.

5. Получена аналитическая зависимость времени управления от оценок составляющих градиента статической характеристики на каждом шаге поиска, обеспечивающего максимальное быстродействие.

6. Разработан и исследован алгоритм останова процесса поиска с последовательным анализом текущей ситуации на динамическом объекте. Рассмотрено влияние параметров процедуры последовательного анализа на эффективность поиска. Анализ результатов испытаний алгоритмов ПСМ и СИМ с последовательным анализом текущей ситуации на динамическом объекте для модели с известной и вычисляемой в процессе поиска оценкой дисперсии помехи и медленным дрейфом экстремума показал, что алгоритм СИМ с последовательным анализом и учетом времени про-

ведения эксперимента повышает эффективность поиска за счет уменьшения количества неудачных шагов.

7. Разработаны адаптивные алгоритмы экстремального управления объектами с известными динамическими свойствами каналов управления на основе последовательного симплексного метода, использующие следующие подходы к решению задачи повышения быстродействия: форсирование переходных процессов по каналам управления, предвычисление установившихся значений выходной переменной объекта, поиск с адаптацией времени управления на каждом шаге поиска, обеспечивающего максимальное быстродействие. Дано описание алгоритмов и разработаны программы для реализации их в одноуровневой АСУТП на промышленных контроллерах. Программы зарегистрированы во Всероссийском научно-техническом информационном центре.

8. Разработан адаптивный алгоритм экстремального управления объектами с неизвестными динамическими свойствами каналов управления на основе последовательного симплексного метода с оценкой времени управления, обеспечивающего максимальное быстродействие поиска. Дано описание алгоритма и разработаны программы для реализации их в двухуровневой АСУТП на промышленных контроллерах. Программа зарегистрирована во Всероссийском научно-техническом информационном центре.

9. Разработанные в диссертации адаптивные алгоритмы симплексного поиска внедрены и нашли успешное применение при решении ряда производственных задач: для оптимизации технологического процесса обжига кокса и в системе управления наведением антенны спутниковой радиосвязи.

10. Разработанный в диссертации алгоритм управления включен в состав специального математического обеспечения автоматизированной системы оптимизации процесса обжига кокса, которая внедряется на КрАЗе. Результаты исследований и алгоритмы применены в системе управления наведением антенны станции спутниковой радиосвязи "Легенда МД", разрабатываемой в государственном научно-производственном предприятии "Радиосвязь" (г.Красноярск).

Результаты диссертации могут быть использованы для автоматизации технологических процессов в промышленности, энергетике, отрасли связи и т.д. Теоретические результаты, связанные с исследованием экстремальных систем, могут быть применены в других разделах науки. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Масальский Г.Б., Наумов А. В. Выбор параметров идентификации в задачах оптимизации динамических объектов// Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвузовский сборник/ Отв. Ред. В.А. Троян. Красноярск: КГТУ, 1999.-с.130-139.

2. Наумов А.В., Малашин С.А., Масальский Г.Б. Экстремальное управление технологическими процессами на основе промышленных контроллеров// Проблемы высшего образования на пороге XXI века: Тезисы

докладов региональной межвузовской научно-практической конференции. Красноярск, 1997. с.425.

3. Масальский Г.Б., Наумов А.В. Экстремальное управление динамическими объектами вдали от экстремума// Информатика и системы управления: Сб. научных трудов/ Отв. Ред. М.А. Воловик, Б.П. Соустин. Вып.4. Красноярск: НИИ ИГУ, 2000. с.147-156.

4. Наумов А.В. Форсирование переходных процессов по каналам управления// Информатика и системы управления: Сб. научных трудов/ Отв. Ред. М.А. Воловик, Б.П. Соустин. Вып.4. Красноярск: НИИ ИГУ, 2000. с.157-164.

5. Наумов А.В., Масальский Г.Б. Применение сети Sines H1 в двухуровневой системе управления технологическим процессом обжига кокса// Проблемы информатизации региона: Тезисы докладов пятой Всероссийской конференции. Красноярск, 1999. с.36.

6. 50990000117. Наумов А.В., Масальский Г.Б. Исследование режимов работы адаптивных алгоритмов поисковой оптимизации на базе последовательного симплексного метода/ КГТУ// Алгоритмы и программы. Инф. бюлл.-2000.№1.

7. 50990000139. Наумов А.В., Масальский Г.Б. Экстремальное управление инерционными технологическими процессами на основе последовательного симплексного метода оптимизации для промышленных контроллеров/ КГТУ// Алгоритмы и программы. Инф. бюлл.-2000. №1.

8. Масальский Г.Б., Наумов А.В. Опыт и возможности реализации экстремального управления на базе промышленных контроллеров// Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск: КГТУ, 2000, т.2 – с.145-146.



НАУМОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО  
СИМПЛЕКСНОГО ПОИСКА

Автореферат

---

Подписано к печати 4.04.2000. Формат 60×84×16. Бумага писчая №2.  
Уч. изд. л. 5. Тираж 100 экз. Заказ № 407.

---

Ротопринт КГТУ