МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

ЛИБЕРОЛЬ БОРИС ДАВИДОВИЧ

УДК 681.5.015

ПРОЕКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

05.13.01 — Управление в технических системах

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков — 1993

Работа выполнена в Харьковском государственном техническом университете радиоэлектроники.

Научный руководитель:

— доктор технических наук, профессор О. Г. Руденко.

Официальные оппоненты:

— доктор физ.-мат. наук С. В. Яковлев;

— кандидат технических наук Л. М. Любчик.

Ведущая организация — НИИРИ.

Защита диссертации состоится „31“ января 1994 г. в 14 часов на заседании специализированного совета К.068.037.01 в Харьковском государственном техническом университете радиоэлектроники (310726, Харьков-726, пр. Ленина, 14).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники.

Автореферат разослан „30“ декабря 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
профессор Э. А. Дедиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Быстрый прогресс вычислительной техники, постоянное повышение производительности различных процессоров и микропроцессоров открывают новые возможности для управления сложными промышленными и техническими объектами и технологическими процессами в реальном масштабе времени. При этом возникает необходимость разработки алгоритмов для систем управления такими объектами и процессами, полнее использующих возрастающие возможности вычислительной техники. Речь идет, прежде всего, об адаптивных системах управления, использующих поступающую информацию об измерениях различных параметров системы для выработки управляющих воздействий. При создании таких систем важнейшим этапом является разработка достаточно точной математической модели управляемого объекта на основе априорной информации. Определение структуры такой модели является, конечно, наиболее трудоемкой и принципиальной частью работы по созданию системы управления в целом. Обычно после разбиения (декомпозиции) системы на достаточно автономные подсистемы составляются уже более простые модели этих подсистем. При этом часто модель такой подсистемы уже имеет четкое параметрическое описание в том смысле, что определены входные и выходные величины, измеряемые в ходе работы, и требуется на основании этих измерений построить оценки изменяющихся значений каких-то внутренних параметров объекта; процесс получения таких значений принято называть идентификацией, хотя, в сущности, это есть чистая задача оценки параметров в конкретной ситуации. Полученные в ходе решения этой задачи значения параметров используются для управления работой объекта или процесса. Ясно, что реальным объектам присущи такие особенности, как зашумленность измерений и нестационарность самих характеристик объекта.

Несмотря на большое разнообразие возникающих задач, многие из них после некоторых преобразований сводятся к одной из наиболее часто встречающихся ситуаций - оценке параметров линейного объекта, входные и выходные параметры которого связаны линейным уравнением, содержащим параметры самого объекта; вследствие нестационарности значения этих параметров со временем изменяются, что создает некоторые особенности в анализе работы применяемых для отслеживания значений этих параметров алгоритмов. Одна из таких особенностей – важность анализа неасимптотических свойств оценок, так как вследствие нестационарности, или, как это будет называться далее, дрейфа параметров многие соображения, верные в асимптотике, становятся фактически неприменимыми.

Поэтому предметом данной работы является изучение свойств алгоритмов идентификации, или оценки параметров, объекта, описываемого линейным уравнением с нестационарными параметрами.

Целью работы является разработка алгоритмов оценивания параметров нестационарных объектов, имеющих улучшенные динамические характеристики при отсутствии априорной информации о характере дрейфа и наличии помех измерений.

Общая методика исследований заключается в применении методов теории вероятностей, линейной алгебры, теории матриц и матричного анализа для получения теоретических результатов, дающих возможность решить поставленную задачу, а также моделировании работы алгоритмов на ЭВМ и экспериментальной проверке теоретических положений.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. С единых позиций получены формулы итерации оценок параметров для адаптивных итерационных алгоритмов, использующих псевдообратные матрицы, включая алгоритмы с различным соотношением размерности задачи и глубины памяти (числа учитываемых при итерации измерений), таких, как МНК со скользящим окном и многошаговые проекционные алгоритмы.

2. Получены аналитические зависимости для важнейших характеристик работы этих алгоритмов (скорости сходимости, смещения оценок, среднеквадратичной ошибки) в компактном виде, что позволило проанализировать их свойства в условиях нестационарности.

3. На основании полученных формул определены оптимальные оптимальные параметры алгоритмов в различных ситуациях.

4. Получены новые алгоритмы, специально предназначенные для работы в условиях нестационарности, и показана их эффективность.

5. Выработаны рекомендации по практическому использованию алгоритмов в системах управления.

Практическая ценность работы. В результате проведенных исследований, во-первых, получены оптимальные параметры уже известных алгоритмов, во-вторых, получен новый перспективный для применения в условиях нестационарности алгоритм, имеющий определенные преимущества.

Внедрение результатов работы. Разработанные методы и алгоритмы вошли в состав математического обеспечения САПР "Сода" в НПО "Карбонат" /библиотека программ построения моделей технологических процессов ПКС/. Суммарный экономический эффект с учетом долевого участия составляет 25 тыс. руб. (в ценах 1985 г.).

Апробация работы. Основные результаты и положения проведенных исследований докладывались и обсуждались на шести всесоюзных и международных научно-технических конференциях и семинарах в период с 1985 по 1993 гг.

Публикации. По теме научных исследований опубликовано 17 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, содержит 17 рисунков, включает библиографию из 56 использованных источников. Общий объем диссертации 158 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ существующих методов оценивания параметров нестационарных линейных объектов и ставится задача исследования. Изучаются свойства алгоритмов оценки параметров объекта , описываемого линейным уравнением

$$y_n = c_n^{*T} x_n + \xi_n , \tag{1}$$

где y_n - наблюдаемый выходной сигнал ; x_n - вектор входных сигналов размерности $N \cdot 1$; c_n^* - вектор оцениваемых нестационарных параметров той же размерности; ξ_n - случайная помеха измерения выходного сигнала; n - номер временного шага (параметр дискретного времени задачи).

Предполагается, что коэффициенты c_n^* изменяются достаточно медленно (дрейф параметров), однако закон их изменения неизвестен. Поэтому для их оценки используются алгоритмы с конечной глубиной памяти.

Многие из имеющихся алгоритмов оценивания параметров нестационарных объектов, в том числе широко применяющиеся на практике модификации МНК со скользящим окном, можно описать единым способом. Такие алгоритмы часто называются (достаточно условно) проекционными; при анализе работы в условиях нестационарности используются многие свойства таких алгоритмов в стационарном случае, поэтому в главе рассматривается общий подход к построению таких алгоритмов и некоторые их свойства, полезные в дальнейшем.

Пусть на n-м шаге для объекта, описываемого уравнением (1), имеется оценка c_{n-1} и мы хотим произвести пересчет этой оценки с учетом информации о s последних измерениях (s - "память" алгоритма). Сделаем шаг поиска по c, $c_n = c_{n-1} + \Delta c_n$ минимальной длины так, чтобы после этого шага выполнялись (с минимальной ошибкой) s последних соотношений (1), то есть

$$\| Y_{n|s} - X_{n|s}^T c_{n-1} - X_{n|s}^T \Delta c_n \|^2 \Rightarrow \min, \quad \| \Delta c_n \|^2 \Rightarrow \min.$$

Введены s-мерный вектор $Y_{n|s} = (y_n, y_{n-1}, \ldots, y_{n-s+1})^T$ и матрица $X_{n|s}$ размерности $N \times s$ $X_{n|s} = (x_n | x_{n-1} | \ldots | x_{n-s+1})$. Известно, что решение такой задачи в общем виде дается с помощью псевдообратной к матрице $X_{n|s}^T$ матрицы $X_{n|s}^{T+}$:

$$\Delta c_n = X_{n|s}^{T+} (Y_{n|s} - X_{n|s}^T c_{n-1}).$$

Для общности в эту формулу вводится множитель γ_n, корректирующий длину шага с тем, чтобы уменьшить влияние помех, и для итерации вектора c_n получается формула

$$c_n = (I - \gamma_n P_{n|s}) c_{n-1} + \gamma_n X_{n|s}^{T+} Y_{n|s}.$$

Здесь $P_{n|s}$ - матрица проекции на линейную оболочку s векторов - столбцов матрицы $X_{n|s}$, равная произведению матриц $X_{n|s}^{T+} X_{n|s}^T$.

Эта формула при различных значениях параметра γ (длина шага), памяти алгоритма s и размерностью задачи N дает разнообразные варианты известных алгоритмов. При $\gamma_n = 1$ и переменном значении s=n (учет всех накопленных измерений) при $n > N$ получаем формулы МНК, при постоянном $s > N$ - формулы МНК со "скользящим окном" и при $s < N$ - формулы рекуррентных проекционных алгоритмов. При введении параметра коррекции длины шага $\gamma \neq 1$ для алгоритмов типа

МНК получаем варианты указанных алгоритмов со "взвешенными" оценками (оценка предыдущего шага учитывается с весом $1-\gamma$), а для проекционных алгоритмов - вариант итерационного процесса, сходящегося при наличии помех в область, уменьшающуюся с уменьшением γ_n или асимптотически сходящегося, если γ_n удовлетворяет условиям Дворецкого.

При анализе свойств алгоритмов предполагается, что выполняются определенные предположения о статистических свойствах сигналов и помех: 1) векторы $\{X_n\}$ - независимые гауссовы случайные векторы с нулевыми средними и скалярной матрицей ковариации (дисперсия компоненты σ_x^2);2) ξ_n - независимые случайные величины с нулевым средним и одинаковой дисперсией σ_d^2, некоррелирующие с векторами X. Сравнение свойств различных алгоритмов при выполнении этих стандартных предположений дает возможность качественно оценить характеристики их работы и выбрать оптимальный вариант, привязка же к конкретным условиям может потребовать дополнительного анализа.

Далее в главе изучаются свойства проекционных алгоритмов в стационарном случае при отсутствии помех. Работу алгоритма характеризуют величины средней ошибки оценивания $M(\theta_n)$ и среднеквадратичной ошибки $M(|\theta_n|^2)$ как функции числа шагов n.

С использованием изученных в работах [1-4] свойств случайных проекционных и псевдообратных матриц выводится рекуррентное соотношение, которому удовлетворяет величина $\alpha_n = M(|\theta_n|^2)$. Показано, что скорость сходимости последовательности α_n определяется максимальным по модулю корнем ε_{max} характеристического уравнения, коэффициенты которого равны соответствующим коэффициентам этого соотношения, имеющем при постоянном параметре γ вид

$$\varepsilon^s - \varepsilon^{s-1} + (2\gamma-\gamma^2)\sum_{1}^{s}(1-\gamma)^{2k-2}p_k\varepsilon^{s-k} = 0, \quad p_k = \frac{N-s}{(N-s+k-1)(N-s+k)}. \qquad (2)$$

При анализе уравнения сначала доказывается, что оно имеет действительные корни на интервалах $(0,(1-\gamma)^2)$ и $((1-\gamma)^2,1)$. Затем доказывается, что для контура области, содержащейся внутри окружности радиусом, равным наименьшему из положительных действительных корней уравнения, выполнены условия теоремы Руше для многочленов

$$f_1(z) = \varepsilon^s - \varepsilon^{s-1}, \quad f_2(z) = (2\gamma-\gamma^2)\sum_1^s (1-\gamma)^{2k-2} p_k \varepsilon^{s-k},$$

из чего после элементарного подсчета количества корней следует, что все остальные корни уравнения не превосходят по модулю наименьший из положительных действительных корней уравнения и поэтому скорость сходимости определяет максимальный положительный корень ε_{max}, не превосходящий 1. Затем доказывается, что ε_{max} монотонно уменьшается от 1 до 1 - 1/m при увеличении параметра коррекции шага γ от 0 до 1.

В <u>главе 2</u> проводится исследование свойств проекционных алгоритмов в условиях нестационарности, при этом предполагается, что на участке s=0(N) зависимость $c^*(n)$ можно считать линейной; в этом случае вектор выходных значений $Y_{n|s}$ можно представить в виде

$$Y_{n|s} = X_{n|s}^T c_n^* - DX_{n|s}^T a,$$

где

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s-1 \end{bmatrix}$$

- матрица размерности s × s, описывающая линейный дрейф. Смещение оценок алгоритма МНК со скользящим окном за счет дрейфа параметров определяется в наших условиях соотношением

$$M(\theta_n) = - M\,((X_{n|L} X_{n|L}^T)^{-1} X_{n|L} D X_{n|L}^T) a.$$

Использование симметрии зависимости смещения от векторов x_n позволяет получить простую формулу для смещения оценок рассматриваемой модификации МНК при дрейфе параметров:

$$M\,(\theta_n) = - \frac{L-1}{2} a.$$

Таким образом, смещение оценок МНК со скользящим окном с ростом ширины окна L растет линейно.

Далее показано, что для данного алгоритма величина среднеквадратичной ошибки оценивания $M(|\theta_n|^2)$ определяется соотношением

$$M\{\|\theta_n\|^2\} = \left(\frac{(L-1)^2}{2} + \frac{L+1}{12}\left(L\,\frac{(N+2)(L-2)}{(L+2)(L-N-1)} - 1\right)\right)\|a\|^2 + \frac{N\sigma_\xi^2}{(L-N-1)\sigma_x^2}.$$

Затем проводится исследование свойств проекционных алгоритмов, причем применяемый метод расчета дает более компактные и удобные для обозрения и исследования формулы, чем в работах [2,6]. Для смещения оценок получена неасимптотическая формула

$$\alpha_n = \left(1-\frac{1}{m}\right)^{n-s}\left(1-\frac{s}{N}\right)(\theta_0 + (N-s)a) - \left[N - s\left(1 - \frac{(s-1)}{2N}\right)\right]a,$$

из которой следует выражение для асимптотического смещения [2]

$$\alpha_\infty = -\left[N - s\left(1 - \frac{(s-1)}{2N}\right)\right]a,$$

что можно интерпретировать как запаздывание на $N - s\left(1 - \frac{(s-1)}{2N}\right)$ шагов.

Вычисление среднеквадратичной ошибки оценивания проводится с использованием той же методики. Рекуррентное соотношение для $\alpha_n = M\{\|\theta_n\|^2\}$, выполняющееся с $s+1$-го шага, имеет вид

$$\alpha_{n+1} = \left(1 - \frac{1}{m}\right)\alpha_n - 2\left(1 - \frac{1}{m}\right)M\{\theta_n^T a\} -$$

$$-\left(1 - \frac{1}{m}\right)M\left(a^T(I + X_{n|s}D_1X_{n|s}^+)P_{n|s-1}(I + X_{n|s}^{T+}D_1X_{n|s}^T)a\right) -$$

$$-2\left(1 - \frac{1}{m}\right)M\left(a^T(I + X_{n|s}D_1X_{n|s}^+)P_{n|s-1}a\right) +$$

$$+ M\left(a^T(I + X_{n|s}D_1X_{n|s}^+)(I + X_{n|s}^{T+}D_1X_{n|s}^T)a\right), \quad D_1 = D - I.$$

Для линейно зависящего от θ_n члена используется выписанное выше неасимптотическое выражение, вычисление остальных членов соотношения дает формулу

$$\alpha_n = \varepsilon\alpha_{n-1} + \frac{1}{m}D(N,s)\|a\|^2 + \varepsilon^n\tilde{\alpha}_0\ ;\ m = N - s + 1;$$

$$\tilde{\alpha}_0 = \varepsilon^{-s}(1 - \frac{s}{N})\left(\theta_0^T a + (N - s)\|a\|^2\right); \quad \varepsilon = 1 - \frac{1}{m};$$

$$D(N,s) = 2(N-s)^2 + N + 2s - 4 + (1 - \frac{s}{N})(s-2)^2 +$$

$$+ \frac{s(2s^2 - 7s + 8)}{3N} + \frac{s^2(s^2-1)}{6N(N-s-1)}.$$

Зависимость α_n от n в соответствии с этой формулой имеет вид

$$\alpha_n = D(N,s)\|a\|^2 + (n+1)\,\varepsilon^{n-s}(1 - \frac{s}{N})\left(\theta_0^T a + (N - s)\|a\|^2\right).$$

Среднеквадратичная ошибка сходится к области D(N,s) как $n\varepsilon^n$, то есть несколько медленнее геометрической прогрессии. Портящий сходимость член $n\varepsilon^n$ имеет максимум при

$$n \approx -\frac{1}{\ln\varepsilon} = \frac{1}{\ln(1 - 1/m)}$$

и при m >> 1 этот максимум равен $\frac{m}{e}$. После периода настройки порядка нескольких m алгоритм выходит на асимптотическое значение среднеквадратичной ошибки оценивания.

Основным недостатком применяемых для оценки параметров нестационарных объектов алгоритмов является наличие смещения оценок, эквивалентного запаздыванию на число шагов порядка N. Предлагается новый алгоритм оценки нестационарных параметров на основе прямых оценок вектора дрейфа, идея которого заключается в следующем. Если выбрать глубину памяти алгоритма s > N, то по этим измерениям можно исключить вектор c, умножая обе части (2) на любой из s-мерных векторов, принадлежащий ядру матрицы $X_{n|s}$, то есть вектор v, удовлетворяющий условию

$$X_{n|s}v = 0 \text{ (или } v^T X_{n|s}^T = 0).$$

Это позволяет получить соотношение, в которое входит только вектор a:

$$\tilde{y}_{n|k} = w_{n|k}^T a_n + \zeta_{n|k};\ \tilde{y}_{n|k} = v^T Y_{n|s};\ w_{n|k}^T = -v^T D_s X_{n|s}^T;$$

$$\zeta_{n|k} = v^T \xi_{n|s};\ k = \overline{1,\ s - N}.$$

Теперь можно построить оценку вектора а, для чего, как видно из этих формул, на каждом шаге следует вычислить пересчитанные значения входов $w_{n|k}$ и выхода $\tilde{y}_{n|k}$; так как зависимость выхода от входа дается линейным уравнением с вектором параметров а, для его оценки можно применять известные алгоритмы.

Необходимый для построения оценок вектор V, принадлежащий ядру матрицы $X_{n|s}$, или несколько таких векторов (для более быстрой сходимости оценки а) можно получить, строя матрицу МНК - псевдообратную матрицу $X^{T+}_{n|s}$; матрица проекции P_o на ядро матрицы $X_{n|s}$ дается формулой

$$P_o = I - X^T_{n|s} X^{T+}_{n|s} .$$

В качестве вектора V можно взять любую строку этой матрицы.

Имея достаточно хорошие оценки вектора а, можно строить оценки вектора с. Анализ показывает более высокую скорость сходимости по смещению и среднеквадратичной ошибке. Это подтверждают результаты моделирования, представленные в главе 4.

В <u>главе 3</u> исследуется влияние помех на свойства оценок. При наличии помех измерений выходной величины в стационарном случае при постоянном (или постоянном в асимптотике) параметре коррекции шага γ оценки остаются несмещенными, но среднеквадратичная ошибка с ростом числа шагов стремится к постоянному значению. При наличии помех измерений входных сигналов или, в более общем случае, при наличии корреляции входных сигналов и помех возникает смещение оценок. Наличие помех измерений выходной величины приводит к тому, что (без учета нестационарности) рекуррентное выражение для величины $\alpha_n = M(|\theta_n|^2)$ принимает вид

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} - (2\gamma - \gamma^2) \sum_1^s p_i \alpha_{n-i} + \gamma^2 \, P(s,N,\gamma) \frac{\sigma^2_\xi}{\sigma^2_x} ,$$

где p_i - те же, что и в (3),

$$P(s,N,\gamma) = f_0 - (2\gamma - \gamma^2) \sum_1^{s-1} (1-\gamma)^{2k-2} \frac{m-1}{m+k-1} f_k ;$$

$$f_i = d_i + 2(1-\gamma) b_i , \quad d_i = \frac{s-i}{(N-s+i-1)} \frac{\sigma^2_\xi}{\sigma^2_x} ;$$

$$b_i = \sum_{j=i+1}^{s-1} (1-\gamma)^{j-(i+1)} d_i .$$

Обозначая

$$D = D_0(s,N,\gamma) = \frac{\gamma}{2-\gamma} \frac{F(s,N,\gamma)}{\sum_1^s p_i} ,$$

получаем, что для последовательности $\omega_n = \alpha_n - D$ выполняется рекуррентное соотношение (2) , так что $\alpha_n = \omega_n + D$ сходится к величине D со скоростью, определяемой характеристическим уравнением . Зависимость D от параметров s, N, γ в явном виде исследовать аналитически слишком трудно, и были проведены расчеты на ЭВМ для конкретных значений параметров s и N. Результаты расчетов показали, что вплоть до областей $\approx 0,3\ D_0$ многошаговые алгоритмы эффективней одношагового в том смысле, что при той же величине асимптотической среднеквадратичной ошибки скорость сходимости их к этой величине выше, чем у одношаговых.

В тех же условиях среднеквадратичная ошибка оценивания МНК с окном дается формулой

$$\alpha_n = \frac{N}{(L-N-1)} \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_x^2} .$$

Далее в главе исследуется влияние помех измерений входных сигналов, когда входной вектор X_n измеряется с аддитивной помехой ε_n , то есть вместо X_n наблюдается вектор

$$\bar{X}_n = X_n + \varepsilon_n ,$$

который и используется для построения оценок в соответствии с формулой (2). Если компоненты помехи измерений входов ε_n независимы, а их статистические свойства аналогичны свойствам помехи на выходе, то оценки становятся смещенными, а величина асимптотического смещения дается формулой

$$\lim_{n\to\infty} M(\theta_n) = -\lambda c^*, \ \lambda = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_x^2 + \sigma_\varepsilon^2} .$$

Таким образом, наличие помех измерений входных векторов приводит к смещению оценок, зависящему от статистических свойств полезных сигналов и помех.

Среднеквадратичная ошибка, определяемая помехами измерения входов, стремится к предельному значению

$$\alpha_\infty = \lim_{n\to\infty} M(\|\theta_n\|^2) = \lambda(\lambda + \frac{N + s - 1}{N - s - 1}(1 - \lambda))\|c^*\|^2.$$

Доказывается, что асимптотическое смещение оценок параметров объекта не зависит от выбора последовательности длин шагов γ_n, которую можно выбирать любой, удовлетворяющей лишь условиям сходимости в отсутствие помех. Оказывается, при ширине окна $L > N$, то есть при работе алгоритма МНК со скользящим окном, смещение оценок дается теми же формулами.

Далее рассматривается общий случай наличия корреляции векторов входных сигналов и помех на выходе. С применением теоремы о нормальной корреляции получены смещение оценок алгоритмов и выражение для асимптотической среднеквадратичной ошибки оценивания для проекционных алгоритмов и алгоритма МНК окном.

В четвертой главе проведено моделирование работы алгоритмов на ЭВМ на модельных и реальных данных. Проведен сравнительный анализ работы алгоритмов с нестационарными объектами, на основе выведенных ранее аналитических зависимостей получены оптимальные параметры алгоритмов как функции размерности задачи. Так, для алгоритма МНК с окном среднеквадратичная ошибка оценивания минимальна при ширине окна порядка 4/3N (N - размерности задачи), для проекционных алгоритмов - при глубине памяти порядка 0,6N, причем проекционные алгоритмы дают оценки с лучшими свойствами.

Приводятся результаты моделирования работы различных алгоритмов, в том числе на реальных данных технологического процесса производства кальцинированной соды. Результаты моделирования находятся в согласии с теоретическими выводами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. С единых методологических позиций выведены формулы итерации оценок, осуществляемых с помощью различных проекционных алгоритмов (в том числе и МНК), в которых используются свойства псевдообратных матриц.

2. Заново с использованием аппарата теории функций комплексной переменной проведено исследование характеристического уравнения, корни которого определяют скорость сходимости

среднеквадратичной ошибки проекционных алгоритмов в отсутствие помех и скорость сходимости к области, определяемой помехами, при наличии помех. Доказана также монотонная зависимость задающего скорость сходимости максимального по модулю корня характеристического уравнения от параметра длины шага.

3. Применен новый метод расчета аналитических зависимостей для характеристик работы алгоритмов, давший возможность получить эти зависимости в компактном виде, позволяющем проанализировать их свойства при работе в различных условиях. Особый интерес представляют формулы, описывающие зависимость смещения оценок и среднеквадратичной ошибки оценивания от глубины памяти, или ширины окна, алгоритмов; это дало возможность проанализировать эти формулы на наличие минимума.

4. На основе проведенного анализа полученных формул найдены оптимальные параметры алгоритмов при работе в нестационарных условиях.

5. Проведено исследование влияния ошибок в измерениях входных переменных на свойства оценок. Показано, что это приводит к смещению оценок, и получена оценка такого смещения. Изучен также более общий вопрос о влиянии корреляции сигналов и помех, к которой сводится, и случай измерения входных векторов с помехами, на свойства оценок. Показано, что наличие указанной корреляции приводит к смещению оценок изучаемых алгоритмов , получены формулы для смешения оценок при наличии такой корреляции.

6. Предложен новый алгоритм оценки нестационарных параметров, основанный на прямой оценке скорости дрейфа. Этот алгоритм превосходит известные по своим характеристикам и является весьма перспективным, сформулирован также ряд новых задач по дальнейшему исследованию его свойств.

7. Проведено моделирование работы алгоритмов на ЭВМ.

8. Выработаны рекомендации по практическому использованию алгоритмов в системах управления.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Многошаговые алгоритмы идентификации линейных объектов //Докл. АН УССР. Сер.А.-1985.-№ 7.- С.62-64.

2. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д.,Руденко О.Г. Адаптивное оценивание параметров нестационарных объектов // Докл. АН УССР. Сер.А.- 1985.- № 12. - С.70-72.

3. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д.,Руденко О.Г. Псевдопроекционные алгоритмы параметрической идентификации // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума "Методы идентификации в задачах измерительной техники и метрологии".- Новосибирск.-1985.- с.57-58.

4. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д.,Руденко О.Г. О свойствах одного класса многошаговых адаптивных алгоритмов идентификации // Кибернетика.-1986.-№ 1.-С.92-96.

5. Бобух А.Э., Либероль Б.Д., Роговенко В.В., Руденко О.Г. Псевдопроекционные алгоритмы оценивания параметров регрессионных моделей химико-технологических процессов // Статистические методы в основной химии. - Харьков, НИОХИМ, 1986.- Т. 63.-С.39-60.

6. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д., Руденко О.Г. О свойствах одного класса многошаговых алгоритмов идентификации // Автометрия.- 1987.- № 1.- С.8-12.

7. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Исследование вопросов сходимости алгоритмов идентификации с памятью // Автоматика.- 1987.-№ 3.-С.68-71.

8. Либероль Б.Д., Минухин С.В., Руденко О.Г. Оценка скорости сходимости и регуляризация многошаговых адаптивных алгоритмов идентификации // Деп. в УкрНИИНТИ, 1987, №27-31-Ук 87.-16 с.

9. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Влияние корреляции сигналов и помех на свойства алгоритмов идентификации // Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума "Методы идентификации в задачах измерительной техники и метрологии".- Новосибирск.-1989.- с.51-52.

10. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Проекционные алгоритмы идентификации нелинейного объекта // Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума "Методы идентификации в задачах измерительной техники и метрологии".- Новосибирск.-1989.- с.6-7.

11. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. О свойствах проекционного алгоритма оценивания коэффициентов квадратичной формы // Докл. АН УССР.Сер.А.-1989.-№ 5.-С.67-70.

12. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Свойства проекционных алгоритмов

идентификации при наличии корреляции сигналов и помех // Докл. АН УССР.Сер.А.-1989.-№ 6.- С.65-67.

13. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. О смещении оценок дрейфующих параметров, полученных с помощью проекционных алгоритмов // Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции "Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества продукции".- Тарту. -1989.- с.44-45.

14. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Проекционные процедуры выделения тренда // В кн. "Методы и микроэлектронные средства цифрового преобразования и обработки сигналов. (Тезисы докладов конференции)." .- Рига, 1989. - с.123-124.

15. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. О свойствах проекционных алгоритмов оценивания параметров нестационарных объектов // Докл. АН УССР.Сер.А.-1990.-№ 4.-С.71- 74.

16. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Двухступенчатый алгоритм оценивания параметров нестационарного объекта // Докл. АН УССР.Сер.А.-1990.-№ 7.-С.74-76.

17. Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Оценивание нестационарных параметров линейной регрессионной модели // Методы представления и обработки случайных сигналов и полей. III Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Харьков: 1993.- С.113.

Подписано к печати 2I.I2.93г.

Объем I печ.л. Уч. -изд.л. 0,75

Формат бемаги 60 х 84

Тираж I00 экз. Зак. 2/I4I4

Типография ХВУ, Сумская, 77/79

идентификации при наличии аномальных измерений и помех // Изв. АН УзССР.Сер.А.-1988.-№ 6.- С.88-92.

13. Абдуллаев Б.А., Гуляшко О.Г. О смещенных оценках приближенных параметров, полученных в условиях производственных [illegible] // Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции "Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества продукции". - Тарту, 1989. - [illegible]

14. Абдуллаев Б.А., Гуляшко О.Г. Производные и проекции [illegible] // [illegible] Методы и микропроцессорные средства цифрового преобразования и обработки сигналов. [illegible] конференции. - Рига, 1988. - С.125-126.

15. Абдуллаев Б.А., Гуляшко О.Г. О локальных производных [illegible] идентификации параметров нестационарных объектов // Докл. АН УзССР.Сер.А.-1990.-№ 1.-С.71- 74.

16. Абдуллаев Б.А., Гуляшко О.Г. Двухступенчатый алгоритм оценивания параметров нестационарных объектов // Докл. АН УзССР.Сер.А.-1990.-№ 7.-С.71-73.

17. Абдуллаев Б.А., Гуляшко О.Г. [illegible] параметров [illegible] // [illegible] III Всесоюзная научно-техническая конференция [illegible]. - Ташкент, 1990. - [illegible]

Подписано в печать 11.12.90.
Формат [illegible] Усл.печ.л. [illegible]
Бумага [illegible]
Заказ [illegible] Тираж [illegible] экз.

Типография [illegible], Ташкент, [illegible]