

На правах рукописи

Худяев Александр Андреевич

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОКАНАЛЬНЫХ  
ИТЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

05.09.03 - Электротехнические комплексы и  
системы, включая их управление  
и регулирование

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Харьков - 1995



00754811 (Q)

пись

AB 33.865

Работа выполнена на кафедре "Системы управления и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов" Украинской инженерно-педагогической академии (УИПА).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор

Осмоловский Павел Федорович

Научный консультант - доктор технических наук, профессор, академик Кузнецов Борис Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Акимов Леонид Владимирович  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Калногуз Анатолий Николаевич

Ведущее предприятие: Институт машин и систем (ИМИС) Министерства машиностроения, военно-промышленного комплекса и конверсии Украины и Национальной академии наук Украины (г.Харьков)

Защита состоится " 8 " февраля 1996 г. в 14<sup>30</sup> на заседании специализированного ученого совета К 02.09.14 в Харьковском государственном политехническом университете (ХГПУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направить по адресу: 310002, г.Харьков-2, ГСП, ул. Фрунзе, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ХГПУ.

Автореферат разослан " 6 " января 1996 г

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

Гончаров Ю.П.

АВ - 33.865  
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из основных стратегических направлений развития электротехнической промышленности является создание прецизионных систем воспроизведения движений (СВД) различных промышленных модулей (ПМ) и локальных объектов электротехнических комплексов и технологических процессов на базе высокоточных систем автоматического управления (САУ) исполнительными электроприводами. Это относится прежде всего к системам управления нажимными исполнительными устройствами (ИУ) клетей прокатных станков, антенными установками следящих систем, промышленными роботами (ПР) точных технологических операций, силовыми позиционирующими манипуляторами сборочных линий и механизмами подачи тяжелых механособрабатывающих станков инструментального производства, где наряду со значительными усилиями требуется высокая точность управления и микронная точность позиционирования.

В настоящее время эффективным средством повышения точности управления освоенными и вновь разрабатываемыми воспроизводящими промышленными электро- и электрогидроприводами остаются структурные методы. При этом, как показала практика опытного освоения и промышленного внедрения, наибольший эффект может обеспечить и дает применение многоканальных систем, работающих по принципу последовательных приближений (итераций) управляющего воздействия к заданному закону движения, то есть грубого и точного управления силовыми ИУ различных ПМ. В таких многоканальных системах существенное повышение качества управления в широком частотном диапазоне достигается за счет итерационной структуры системы управления без значительного усложнения усилительных и корректирующих устройств. Создание промышленных СВД, построенных и функционирующих по итерационному принципу, может послужить толчком и дать инструмент практического освоения новых высокоточных технологий и, в итоге, выпуска высококачественной конкурентноспособной продукции.

**Цель работы** - разработка эффективных методов и алгоритмов идентификации, параметрического синтеза и анализа многоканальных СВД, построенных по итерационному принципу. В соответствии с поставленной целью в диссертации решены следующие основные задачи.

1. Обосновано применение итерационного принципа построения и синтезирован итерационный алгоритм функционирования многоканальных линейных стационарных СВД.
2. Разработаны методика и алгоритм оптимальной идентификации линейных объектов многоканальных СВД.
3. Выполнена идентификация манипуляционной системы опытно-промышленного робототехнологического сварочного комплекса - РТК

ЛНБ им. В. Стефанова

"Дуга".

4. Выполнена оценка эффективности по критерию минимума дисперсии ошибки двухканальной итерационной системы с типовой настройкой каналов.

5. Разработаны алгоритмы и выполнен параметрический синтез многоканальных итерационных систем с заданной и свободной структурой каналов при случайных входных воздействиях.

6. Разработаны метод и алгоритм расчета и анализа по упрощенной эквивалентной структуре переходных процессов в многоканальных итерационных СВД с операторами каналов общего вида.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач применялись: общие методы теории автоматического управления, в том числе методы статистического синтеза САУ с заданной и свободной структурой; общие и специальные методы высшей математики, в частности операторные и матричные преобразования; методы экспериментальной идентификации во временной области; прикладное нелинейное программирование; численные методы оптимизации и прикладные методы теории алгоритмов.

**Научная новизна.** Созданы и апробированы методы и алгоритмы параметрического синтеза и исследования нового класса САУ повышенной точности - многоканальных СВД, построенных по итерационному принципу грубого и точного воспроизведения. Синтезирован во временной области итерационный алгоритм функционирования таких систем.

Разработаны методика и алгоритм оптимальной идентификации и моделирования динамики в переходных режимах линейных объектов и систем методом временных моментов функции веса.

Получены аналитические расчетные соотношения для дисперсий ошибок, на основании которых выполнена оценка эффективности и анализ случайных ошибок двухканальной итерационной СВД с типовой настройкой каналов по критерию технического оптимума. Разработан алгоритм расчета интегральных квадратичных функционалов качества типа дисперсий ошибок и устойчивости линейных итерационных систем эффективным методом рекуррентных уравнений К.Острема.

Разработан единый алгоритм квазиглобального параметрического синтеза по критерию минимума дисперсии ошибки многоканальных (до 3-х каналов) итерационных систем с заданной эталонной структурой каналов произвольного порядка. Решена задача синтеза и оценки эффективности последовательно-оптимальной итерационной системы со свободной структурой каналов.

Разработаны метод и алгоритм расчета и анализа переходных процессов в многоканальных итерационных системах с эталонными операторами каналов общего вида по упрощенной эквивалентной структуре

с параллельным соединением каналов.

**Практическая ценность.** Приведенные итерационные структуры СВД позволяют выбрать общую структуру системы управления воспроизводящим приводом повышенной точности. По разработанным методам и алгоритмам созданы три пакета прикладных программ для IBM-совместимых ПЭЕМ, которые могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования для решения задач идентификации и параметрического синтеза при заданных управляющих воздействиях многоканальных высокоточных воспроизводящих систем различного назначения.

**Внедрение и реализация результатов.** Методика и результаты параметрического синтеза и анализа многоканальных итерационных СВД при случайных воздействиях и с типовой настройкой каналов внедрены на Новосибирском научно-исследовательском, опытно-конструкторском и технологическом институте комплектного электропривода (НИИКЭ) в разработку и создание базовых вариантов многоканальной итерационной системы автоматического регулирования толщины и профиля проката реверсивного стана холодной прокатки 850 Новосибирского металлургического завода (НМЗ) им. А. Н. Кузьмина.

Разработанные методы, алгоритмы и программы для решения задач оптимальной идентификации линейных объектов, параметрического синтеза и анализа динамики многоканальных итерационных СВД, а также результаты идентификации и моделирования движений манипуляционной системы ПР, работающего в прямоугольной системе координат, внедрены на НПО "Ротор" (г. Черкассы) в проектирование и производство базового варианта опытно-промышленного сварочного комплекса РТК "Дуга". Основные результаты диссертации применяются на этом предприятии в качестве средства труда с 1989 г.

Итерационный принцип построения и результаты статистического синтеза многоканальных систем с заданной и свободной структурой каналов внедрены в техническую документацию и НИР на ряде других предприятий и организаций Украины и России, в том числе в проектирование и разработку следящих систем повышенной точности на ВНИИ "Сигнал" (г. Ковров) и КВИРТУ ПВО (г. Киев).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 конференциях, семинарах и симпозиумах различного уровня, в том числе на 6 всесоюзных, 3 республиканских и 3 отраслевых.

**Публикации.** По материалам и теме диссертации опубликовано 36 печатных работ, в том числе 19 статей, 3 доклада и 14 тезисов докладов на НТК. Техническая новизна защищена Патентом на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 144 страницах основного машинописного текста, иллюстрируется 44

рисунками и 6 таблицами на 48 страницах и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 105 наименований и 11 приложений, оформленных отдельным томом.

На защиту выносятся следующие результаты, полученные автором.

1. Итерационный алгоритм функционирования многоканальных линейных стационарных СВД во временной области.

2. Методика и алгоритм оптимальной идентификации линейных объектов и систем методом временных моментов функции веса.

3. Алгоритм квазиглобального параметрического синтеза по критерию минимума дисперсии ошибки многоканальных (до 3-х каналов) итерационных систем с эталонной структурой каналов произвольного порядка.

4. Расчетные соотношения для определения последовательно-оптимальных передаточных функций линейных стационарных каналов и выигрыша в точности многоканальной (до 3-х каналов) итерационной воспроизводящей системы со свободной структурой каналов.

5. Метод и алгоритм расчета и анализа по упрощенной эквивалентной структуре с параллельным соединением каналов переходных процессов в многоканальных (до 3-х каналов) итерационных СВД с эталонными операторами каналов общего вида.

6. Результаты идентификации, параметрического синтеза, расчета и анализа динамических характеристик промышленных и типовых двухканальных итерационных СВД.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы, указаны научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

В первой главе обосновано применение итерационного принципа построения систем и выделен специальный класс многоканальных СВД повышенной точности, решающих задачу воспроизведения полезного сигнала  $x(t)$  последовательными приближениями (итерациями), реализуемыми соответствующими каналами  $W_i^*$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

В многоканальных итерационных СВД каждый последующий  $i$ -ый канал вносит поправку в сформированное предшествующими  $(i-1)$ -м каналами текущее значение воспроизводимого закона движения, повышая эффективность всей системы, а сам процесс воспроизведения  $x(t)$  с учетом аддитивных помех может быть описан рекуррентными соотношениями вида

$$y_i(t) = y_{i-1}(t) + \Delta y_i(t), \quad (1)$$

$$\Delta y_1(t) = \int_{t_0}^t W_1^*(t-\tau_1)[x(\tau_1) - y_{1-1}(\tau_1) + f_1(\tau_1)]d\tau_1 \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $y_1(t)$  -  $i$ -ое приближение к  $x(t)$ ,  $y_0(t)=0$ ;  $\Delta y_1(t)$  - поправка, вносимая на  $i$ -ом этапе итераций;  $y_N(t)=y(t)$  - выходной сигнал  $N$ -канальной СВД;  $W_1^*(t)$  - функция веса  $i$ -го линейного стационарного канала;  $f_1(t)$  - помеха, приведенная ко входу  $i$ -го канала. Из (1), (2) для ошибок  $\varepsilon_1(t) = x(t) - y_1(t)$  в установившемся режиме ( $t_0 \rightarrow -\infty$ ) получим

$$\varepsilon_0(t)=x(t), \quad \varepsilon_1(t)=\varepsilon_{1-1}(t) - \int_{-\infty}^t W_1^*(t-\tau_1)[\varepsilon_{1-1}(\tau_1) + f_1(\tau_1)]d\tau_1 \quad \forall i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что ошибки  $\varepsilon_1(t)$  уменьшаются с ростом номера  $i = 1, 2, \dots, N$  канала воспроизведения, и точность  $N$ -канальной ( $N \geq 2$ ) СВД может быть существенно повышена по сравнению с одноканальной ( $N=1$ ) системой за счет подключения уточняющих каналов. Наличие помехи  $f_N(t) \neq 0$  в последнем уточняющем канале ограничивает достижение максимально высокой точности воспроизведения с помощью итерационных систем, так как ошибка, обусловленная  $f_N(t)$ , остается некомпенсированной.

Рассмотрены рекуррентные соотношения, реализующие итерационный алгоритм (1)...(3) в операторной форме. Из уравнений для операторов системы, представленных через операторы отдельных каналов, следуют основные свойства собственно итерационных систем, определяющие их высокие точностные характеристики. Приведены формулы, позволяющие исследовать динамические и точностные характеристики двух- и трехканальных СВД.

Получены операторные уравнения для расчета ошибок итерационных СВД с учетом аддитивных шумов без накопления. Рассмотрены основные варианты структурных схем, в том числе применяемые при разработке многоканальных СВД, реализующие итерационные алгоритмы функционирования.

Во второй главе рассмотрены методика и алгоритм оптимальной идентификации линейных объектов многоканальных систем методом временных моментов функции веса. Методика основана на аппроксимации передаточной функции или дифференциального уравнения объекта структурами низкого порядка и выборе наиболее адекватной из них.

Пусть  $m/n$  - структура нормированного дифференциального уравнения  $A_n(p)y(t) = B_m(p)x(t)$ ,  $p \triangleq d/dt$ , или передаточной функции  $W(s) = y(s)/x(s)$  ( $s$  - оператор Лапласа) исследуемого объекта или системы. Назовем аппроксимирующей передаточной функцией или математической моделью объекта дробь

$$W_{\chi\nu}(s) = B_\chi(s)/A_\nu(s) = \tilde{K} \left( 1 + \sum_{j=1}^{\chi} \tilde{b}_j s^j \right) / \left( 1 + \sum_{i=1}^{\nu} \tilde{a}_i s^i \right), \quad \chi \leq \nu, \quad (4)$$

где  $\tilde{K}$ ,  $\tilde{b}_j$ ,  $\tilde{a}_1$  - постоянные коэффициенты модели.

Перебор аппроксимирующих структур  $\chi/\nu$  строится так, чтобы при фиксированных в (4) максимальных показателях степени  $\chi$ ,  $\nu$  модели для аппроксимирующей  $W_{\chi\nu}(s)$  и истинной  $W(s) = B_m(s)/A_n(s)$  передаточных функций выполнялись соотношения:  $\nu \leq n$ ,  $\chi + \nu \leq m + n$ ,  $m \leq n$ . При  $\chi = m$ ,  $\nu = n$  дробь  $W_{\chi\nu}(s)$  имеет структуру  $W(s)$ .

При  $x(t) = \delta(t)$  модели (4) можно получить по результатам идентификационного эксперимента, проведенного при нулевых начальных условиях, путем измерения временных моментов  $\mu_k$  или  $P_k$  импульсной переходной характеристики (или функции веса)  $\omega(t)$  объекта вида

$$\mu_k = \int_0^{\infty} t^k \omega(t) dt, \quad P_k = \int_0^{\infty} t^k \omega(t) \exp(-\alpha t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

называемых соответственно коэффициентами Тейлора и Пуассона. В частности, для моментов  $\mu_k$  в соответствии с преобразованием  $W(s) =$

$$= \int_0^{\infty} \omega(t) \exp(-st) dt \text{ выполняется}$$

$$\mu_k = \int_0^{\infty} t^k \omega(t) dt = (-1)^k \lim_{s \rightarrow 0} [d^k W(s) / ds^k] \quad \forall k = 0, 1, 2, \dots,$$

откуда для коэффициентов  $M_k$  разложения  $W(s)$  в ряд по степеням  $s$

$$W(s) = M_0 + M_1 s + M_2 (2!)^{-1} s^2 + M_3 (3!)^{-1} s^3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (k!)^{-1} W^{(k)}(0) s^k \quad (6)$$

находим связь:  $\mu_0 = k$ ,  $M_0 = \eta_0 = 1$ ,  $M_k = (-1)^k \eta_k$ ,  $\eta_k = \mu_k / \mu_0 \quad \forall k = \overline{1, \infty}$ .

Требуемые импульсные реакции  $\omega(t)$ , входящие в (5), не всегда удается получить из-за сложности воспроизведения испытательного сигнала. Часто в распоряжении исследователя имеются экспериментальные данные только в виде осциллограмм или реализаций переходных процессов  $h(t)$ , по которым, используя связь  $\omega(t) = dh(t)/dt$ , рассчитываются нормированные моменты  $\eta_k$  весовой функции  $\omega(t)$ .

Приравнивая правые части (4) при  $\chi = m$ ,  $\nu = n$  [ $W_{\chi\nu}(s) = W(s)$ ] и (6), получим неограниченную идентификационную систему линейных уравнений относительно  $\tilde{b}_j = b_j$ ,  $\tilde{a}_1 = a_1$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , которая при фиксированных  $m$  и  $n$  полностью определяет передаточную функцию  $W^0(s) = W(s) / \mu_0$  объекта в установившемся режиме. На основании анализа идентификационной системы уравнений сформулировано и доказано утверждение об условиях соответствия аппроксимирующей структуры  $\chi/\nu$  передаточной функции объекта его истинной структуре  $m/n$ .

Алгоритм оптимальной идентификации сводится к оценке истинной структуры  $m/n$  объекта или системы последовательно перебираемыми структурами  $\chi/\nu$  низкого порядка и выбору оптимальной структуры  $\chi^*/\nu^*$ , первой во множестве допустимых структур  $G$  удовлетворяющей условиям Утверждения и соответствующей устойчивой модели исследуе-

мого объекта или системы, причем для оптимальной структуры должно выполняться:  $\nu^* \leq n$ ,  $\chi^* + \nu^* \leq m + n$ ,  $\chi^* \leq \nu^*$ .

В качестве меры близости оцениваемой аппроксимирующей структуры  $\chi/\nu$  к истинной  $m/n$  принимается величина модуля невязки  $\delta_{\chi\nu}$ , определяемой из условий Утверждения и зависящей от коэффициентов характеристического полинома  $\tilde{a}_i$  и безразмерных моментов  $\gamma_j$  функции веса объекта:

$$\delta_{\chi\nu} = \frac{(-1)^{\xi}}{\xi!} \gamma_{\xi} - \sum_{\substack{i=1 \\ j=\chi+1 \\ i=\nu}}^{j=1} \frac{(-1)^{j+1} \gamma_j}{j! \eta_j \xi-j} \tilde{a}_i, \quad (7)$$

где  $\gamma_j = \eta_j / \eta_1^j$  ( $\eta_1 \neq 0$ )  $\forall j = \overline{\chi+1, \xi}$ ;  $1 = \chi + \nu$ ,  $\xi = \chi + \nu + 1$ .

Значение модуля  $|\delta_{\chi\nu}|$  (7) играет роль критерия оптимальности перебираемых структур  $(\chi/\nu) \in G$ , характеризующего степень близости  $W_{\chi\nu}^0(s)$  к  $W^0(s)$ . Под оптимальной понимается структура  $\chi^*/\nu^*$ , для которой значение модуля  $|\delta_{\chi\nu}|$  минимально! Качество идентификации оценивается по величине среднеквадратической ошибки между экспериментально полученной  $h(t)$  и модельной  $h_M(t)$  кривыми переходного процесса.

В третьей главе рассмотрена эффективность многоканальных итерационных воспроизводящих систем с унифицированными каналами при случайных входных воздействиях. В качестве критерия эффективности принята суммарная дисперсия ошибки системы в установившемся режиме. Выполнена оценка эффективности двухканального воспроизводящего привода с типовой настройкой каналов на технический оптимум.

Предполагается, что динамические характеристики отдельных каналов  $W_i^*$  ( $i = \overline{1, N}$ ) подобны характеристикам эталонной модели, соответствующей стандартной форме, и отличаются лишь среднегеометрическим корнем  $\Omega_i^*$  характеристического уравнения. Принято, что в многоканальной системе модель первого автономного канала  $W_1^*$  совпадает с эталонной:  $\Omega_1^* = \Omega_0$ , а характеристики остальных каналов  $W_i^*$  ( $i = \overline{2, N}$ ) отличаются только масштабным множителем  $z_i$ , т.е. масштабом относительного времени

$$\tau_i = z_i \tau_0 = \Omega_0 z_i t \quad \forall i = \overline{2, N}, \quad (8)$$

где  $z_i = \Omega_i^* / \Omega_1^*$  - отношение собственных частот  $i$ -го и первого каналов. Откуда следует, что параметр  $z_i$  характеризует относительную полосу пропускания  $i$ -го автономного канала.

Показано, что при заданной эталонной модели автономных каналов и заданных моделях входных воздействий суммарные дисперсии ошибок  $\overline{\epsilon_N^2}$  двух- ( $N = 2$ ) и трехканальной ( $N = 3$ ) системы при  $\Omega_1^* = \Omega_0^* = \text{const.}$  определяются соответственно только одним  $z_2$  и двумя  $z_2, z_3$

безразмерными параметрами, что существенно облегчает анализ и оценку эффективности таких систем.

В случае двухканальной итерационной системы функция эффективности имеет вид

$$Q = \overline{\epsilon_x^2} = \overline{\epsilon_x^2} + \overline{\epsilon_1^2} + \overline{\epsilon_\phi^2} = \overline{\epsilon^2}(z_2) \rightarrow \min_{z_2}, \quad (9)$$

где  $\overline{\epsilon_x^2}$ ,  $\overline{\epsilon_1^2}$ ,  $\overline{\epsilon_\phi^2}$  - составляющие установившегося значения дисперсии ошибки системы  $\overline{\epsilon^2}$  соответственно по полезному сигналу  $x(t)$  и от действия помех  $i(t)$  на первый и  $\phi(t)$  на второй каналы. Дисперсии  $\overline{\epsilon_x^2}$ ,  $\overline{\epsilon_1^2}$ ,  $\overline{\epsilon_\phi^2}$  с учетом (8) рассчитываются через эталонную передаточную функцию  $W_\theta(s) = B_\theta(s)/C_\theta(s)$ .

При разработке промышленных электроприводов широкое применение получили унифицированные блочные системы подчиненного регулирования благодаря простоте их проектирования и эксплуатации. Динамика процессов в такой системе, настроенной на технический (модульный) оптимум, приближенно описывается уравнением второго ( $n=2$ ) порядка, соответствующим колебательному звену с коэффициентом демпфирования  $\xi = \sqrt{2}/2$ . При этом операторы автономных каналов системы совпадают с операторами фильтра Баттерворта 2-го порядка и с учетом (8) имеют вид

$$\begin{aligned} W_1^*(p) &= W_\theta(p) = (p^2 + \sqrt{2} p + 1)^{-1}, \\ W_1^*(p) &= W_\theta(z_1^{-1} p) = (z_1^{-2} p^2 + \sqrt{2} z_1^{-1} p + 1)^{-1} \quad \forall i=2, N. \end{aligned} \quad (10)$$

Для заданных типовых моделей случайных входных воздействий на основании (9) получены аналитические расчетные соотношения и выполнена оценка эффективности двухканального ( $N=2$ ) воспроизводящего привода с операторами (10) и заданной собственной частотой  $\Omega_1^* = \Omega_0 = 10 \text{ с}^{-1}$  эталонной модели первого грубого канала  $W_1^*$ . Анализ показал принципиальную возможность существенного уменьшения дисперсии ошибки  $\overline{\epsilon^2}$  двухканального привода по сравнению с дисперсией  $\overline{\delta^2}$  одноканального. Повышение точности достигается за счет итерационной структуры построения системы и выбора оптимальных значений  $z_{2\text{опт}}$  масштабного множителя  $z_2 = \Omega_2^*/\Omega_1^*$ , которые могут быть получены изменением частоты  $\Omega_2^*$ , определяемой настройкой параметров точного (компенсирующего) канала  $W_2^*$  двухканального привода. Вместе с тем, при расширении полосы пропускания  $\Omega_2^*$  дисперсия ошибки  $\overline{\epsilon_\phi^2}$  от помехи  $\phi(t)$  увеличивается пропорционально  $z_2$ , что ограничивает точность двухканального привода в установившемся режиме.

Для количественной оценки эффективности двухканальной системы

по сравнению с одноканальной введен выигрыш в точности  $G_2$ , характеризующий потенциальную эффективность двухканальных систем,

$$G_2 = \frac{\delta^2}{\epsilon^2}(z_2, \rho) = (\delta_X^2 + \delta_I^2) / [\epsilon_X^2(z_2, \rho) + \epsilon_I^2(z_2, \rho) + \epsilon_\Phi^2(z_2, \rho)], \quad (11)$$

где  $\rho = \sqrt{S_\Psi(0)/S_I(0)}$  - соотношение интенсивностей помех в каналах при  $\omega = 0$ ,  $S_I(\omega) = V_I(s)V_I(-s)$ ,  $S_\Psi(\omega) = V_\Psi(s)V_\Psi(-s)$ .

Двухканальный привод даже при одинаковом уровне помех в первом и втором каналах ( $\rho = 1$ ) позволяет при оптимальной настройке ( $z_{2\text{опт}} = 0.9$ ;  $\Omega_{2\text{опт}}^* = 9 \text{ с}^{-1} \approx 56.5 \text{ рад/с}$ ) уменьшить дисперсию ошибки  $\epsilon^2$  в  $G_2 \approx 7.71$  раза по сравнению с дисперсией ошибки  $\delta^2$  заданного первого канала. Практически уровень интенсивности  $S_\Psi(0)$  помехи во втором менее мощном канале  $W_2^*$  гораздо ниже, чем уровень  $S_I(0)$  в первом грубом канале  $W_1^*$ , что позволяет значительно повысить точность работы двухканальных воспроизводящих приводов с типовой настройкой каналов.

**Четвертая глава** посвящена вопросам параметрического синтеза многоканальных итерационных СВД с заданной и свободной структурой каналов, в частности, разработке алгоритма квазиглобальной параметрической оптимизации многоканальных систем с заданными эталонными операторами.

В связи с высокой размерностью оптимизационных задач, обусловленной многоканальностью синтезируемых систем, воспользуемся методом эталонных операторов, вытекающим из метода эталонных моделей, рассмотренного в гл.3. При этом линейные дифференциальные операторы каналов  $W_i^*(p)$ ,  $i = \overline{1, N}$  представим в виде

$$W_i^*(p) = W_{ei}^*(r_i, p) \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (12)$$

где  $r_i = (\Omega_i^*)^{-1}$  - формирующий параметр, характеризующий полосу пропускания  $i$ -го канала;  $W_{ei}^*(p) = B_{ei}^*(p)/O_{ei}^*(p)$ ,  $i = \overline{1, N}$  - заданные эталонные операторы каналов.

Тогда целевая функция  $Q$  (9) для выбора оптимальных значений  $r_1^*$ ,  $r_2^*$ , ...,  $r_N^*$  формирующих параметров  $N$ -канальной системы по критерию минимума дисперсии ошибки  $\epsilon_N^2$  примет вид

$$Q = \epsilon_N^2 = \epsilon_X^2 + \sum_{i=1}^N \epsilon_{fi}^2 = \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) \longrightarrow \min_{r_1, r_2, \dots, r_N} \quad (13)$$

где  $\epsilon_X^2$ ,  $\epsilon_{fi}^2$  - составляющие дисперсии  $\epsilon_N^2$  по полезному сигналу и помехе на  $i$ -й канал; предполагается, что помехи  $f_i(t)$ ,  $i = \overline{1, N}$  некоррелированы между собой. С учетом (3) для расчета  $\epsilon_N^2$  получим формулу:

$$\epsilon_N^2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \prod_{i=1}^N E_{ei}^*(r_i s) E_{ei}^*(-r_i s) V_X(s) V_X(-s) ds + \quad (14)$$

$$+ \frac{1}{2\pi j} \sum_{i=1}^N \int_{-j\infty}^{+j\infty} W_{ei}^*(r_i s) W_{ei}^*(-r_i s) \prod_{k=i+1}^N [E_{ek}^*(r_k s) E_{ek}^*(-r_k s)] V_{fi}(s) V_{fi}(-s) ds$$

где принимают  $\prod_{k=i+1}^N E_{ek}^*(r_k s) E_{ek}^*(-r_k s) = 1$  при  $k > N$ ;  $E_{ei}^*(s) = 1 - W_{ei}^*(s)$  - эталонная передаточная функция ошибки  $i$ -го канала.

В результате сложная задача синтеза оптимальных операторов каналов  $N$ -канальной системы сводится к более простой задаче параметрической оптимизации в области минимального числа формирующих параметров  $r_1, r_2, \dots, r_N$ , равного числу каналов.

В процессе параметрической оптимизации систем основной объем памяти и времени ЦЭМ идет на вычисление значений дисперсий ошибок на каждом шаге движения к оптимуму  $Q^*$  целевой функции (13):  $Q^* = \min_{r_1, \dots, r_N} Q$ . Объем вычислений резко возрастает с увеличением сложности системы, т.е. с увеличением числа  $N$  каналов и размерности их операторов. В связи с этим разработан алгоритм расчета интегральных квадратичных функционалов качества и устойчивости итерационных систем эффективным методом рекуррентных уравнений К.Острема. Алгоритм позволяет сравнительно просто и надежно вычислять квадратичные оценки, в том числе дисперсии ошибок  $\epsilon_N^2$  (14), представимые в виде интегралов

$$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \frac{B(s)B(-s)}{A(s)A(-s)} ds, \quad (15)$$

где  $A(s)$  и  $B(s)$  - полиномы с рациональными коэффициентами, на каждом шаге движения к оптимуму, что существенно облегчает решение сложной задачи параметрического синтеза многоканальных итерационных СВД при заданных операторах каналов  $W_i^*(p)$ ,  $i=1, N$  и характеристиках внешних воздействий.

Для автоматизации процесса решения задач последовательного и параллельного параметрического синтеза итерационных систем на ЦЭМ разработан единый алгоритм и программа PARAMETERS OPTIMIZATION квазиглобальной параметрической оптимизации по критерию минимума дисперсии ошибки (14) многоканальных (до 3-х каналов) итерационных систем с заданными эталонными операторами каналов произвольного порядка. Алгоритм основан на сочетании методов полного перебора и градиентного спуска с оптимизацией длины шага и позволяет решить 12 различных вариантов оптимизационных задач, в том числе с учетом функциональных ограничений на фазовые переменные каналов.

Выполнен параметрический синтез последовательно-оптимальной и

параллельно-оптимальной двухканальной ( $N=2$ ) итерационной системы с эталонными операторами каналов вида (10), настроенных по критерию технического оптимума. Показано, что наилучшим качеством воспроизведения полезного сигнала  $x(t)$  обладает параллельно-оптимальная двухканальная система, а техническая реализация последовательно-оптимальной двухканальной системы с эталонной настройкой каналов весьма затруднительна. Эффективность оптимальных систем, оцениваемая по выигрышу в точности (11), обратно пропорциональна соотношению  $\rho$  интенсивностей случайных помех в каналах.

Для различных значений  $\rho$  получена таблица оптимальных параметров  $r_1^* = (\Omega_{1opt}^*)^{-1}$ ,  $r_2^* = (\Omega_{2opt}^*)^{-1}$  двухканальной СВД, позволяющая настраивать собственные частоты  $\Omega_1^*$ ,  $\Omega_2^*$  каналов управления типовыми электроприводами на максимальную эффективность работы системы по качеству воспроизведения  $x(t)$ . Полученные оптимальные значения  $\Omega_{1opt}^*$  и  $\Omega_{2opt}^*$  технически реализуемы.

Для достаточно общих моделей входных сигналов решена задача синтеза и оценки эффективности 3-х канальной последовательно-оптимальной итерационной системы со свободной структурой каналов. Из решения интегрального уравнения Винера-Хопфа относительно оптимальных функций веса  $\hat{W}_i^*(t)$  на каждом  $i$ -ом ( $i=1, N$ ) этапе синтеза для практически важного случая некоррелированных между собой случайных входных воздействий  $x(t)$  и  $f_i(t)$  получена система простых рекуррентных соотношений, которые позволяют путем факторизации определять оптимальные передаточные функции разомкнутого  $\hat{R}_i^*(s)$  и замкнутого  $\hat{W}_i^*(s)$   $i$ -го ( $i=1, 2, \dots, N$ ) канала последовательно-оптимальной итерационной системы.

Для типовых моделей входных воздействий рассмотрены примеры синтеза двух- ( $N=2$ ) и трехканальной ( $N=3$ ) последовательно-оптимальной СВД со свободной структурой. В частности, для двухканальной системы оптимальные передаточные функции разомкнутых каналов имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{R}_1^*(s) &= \alpha(1 + \tau_1 s)[s(1 + T_x s)]^{-1}, \\ \hat{R}_2^*(s) &= k_2(1 + \tau_2 s)[1 + (\alpha^{-1} + \tau_1)s + \alpha^{-1}T_x s^2]^{-1}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\alpha$ ,  $k_2$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $T_x$  - постоянные коэффициенты, определяемые параметрами моделей входных воздействий. На основании (14), (15), (16) выполнена численная оценка эффективности оптимальной двухканальной ( $N=2$ ) воспроизводящей системы по сравнению с оптимальной одноканальной ( $N=1$ ).

В последовательно-оптимальной двухканальной системе со свободной структурой каналов достигается максимально возможная точность на каждом этапе воспроизведения. При этом, как и для систем с

фиксированной структурой, выигрыш  $\hat{G}_2$  тем больше, чем выше отношение  $\rho^{-1}$  интенсивностей помех в первом канале ко второму. Существенный выигрыш может быть достигнут только при достаточно малых  $\rho$  ( $\rho < 0.5$ ).

В пятой главе рассмотрены метод и алгоритм расчета и анализа динамических характеристик многоканальных итерационных СВД. Предварительно выполнена качественная оценка переходных процессов в итерационных системах. На основании анализа уравнений динамики, определяющих реакцию  $y(t) = y_3(t)$  трехканальной ( $N = 3$ ) системы на  $x(t)$ , показано, что переходные процессы в итерационных системах в основном определяются наиболее широкополосным и быстродействующим каналом, как правило, последним уточняющим каналом  $W_N^*$ .

На примере трехканальной системы с эталонными операторами каналов общего вида разработаны метод и алгоритм TRANS.RESP., позволяющие упростить и ускорить процедуру расчета и анализа на ЭВМ переходных процессов в  $N$ -канальных итерационных СВД за счет применения упрощенной эквивалентной структуры с параллельным соединением  $N$  каналов. В частности, при  $x(t) = 1(t)$  определены формулы для построения переходной характеристики  $h(t) = h_3(t)$  трехканальной системы по известным переходным характеристикам  $h_i^{**}(t)$  и  $(n_i - 1)$ -ой их производным:  $d^k h_i^{**}(t) / dt^k$  ( $k = \overline{1, n_i - 1}$ ) первого, второго и третьего автономных каналов с эталонными операторами вида  $W_{ei}^{**}(p) = 1 / O_{ei}^*(p)$ ,  $i = \overline{1, 3}$ :

$$h(t) = h_u(t) + h_v(t) + h_z(t), \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} h_u(t) &= u_0 h_1^{**}(t) + \sum_{i=1}^{n_1-1} u_i [d^i h_1^{**}(t) / dt^i], \\ h_v(t) &= v_0 h_2^{**}(t) + \sum_{j=1}^{n_2-1} v_j [d^j h_2^{**}(t) / dt^j], \\ h_z(t) &= z_0 h_3^{**}(t) + \sum_{k=1}^{n_3-1} z_k [d^k h_3^{**}(t) / dt^k]. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь  $u_i, v_j, z_k$  ( $i = \overline{0, n_1 - 1}; j = \overline{0, n_2 - 1}; k = \overline{0, n_3 - 1}$ ) - рассчитанные по алгоритму значения коэффициентов полиномов числителей операторов эквивалентных параллельно соединенных каналов  $W_u, W_v, W_z$ . В составе TRANS.RESP. разработан алгоритм численного дифференцирования таблично заданных переходных функций  $h_i^{**}(t)$  ( $i = \overline{1, 3}$ ) и расчета переходных характеристик трехканальной системы в соответствии с (17), (18).

Для отработки метода создана подпрограмма RAS, позволяющая рассчитывать и исследовать динамические характеристики двухканальной ( $N = 2$ ) итерационной СВД с эталонными операторами каналов второго ( $n_1 = 2$ ) порядка. С применением RAS выполнен расчет и анализ переходных характеристик двухканальной системы с эталонным

оператором каналов типа колебательного звена. Рассмотрено влияние варьируемых параметров оператора:  $\alpha = 2\xi$  и  $r = r_2/r_1$  на показатели качества переходных характеристик системы.

Результаты расчетов показали работоспособность метода и преимущества по затратам машинного времени алгоритма TRANS.RESP. по сравнению с расчетами, выполненными непосредственно по векторно-матричной модели системы. Эффективность метода возрастает с увеличением порядка операторов каналов.

Показано, что применение двухканальной воспроизводящей системы с операторами типа колебательного звена позволяет существенно повысить быстродействие системы по сравнению с основным (первым) воспроизводящим каналом с таким же оператором. При этом перерегулирование  $\sigma\%$  может быть отрегулировано. Добиться требуемых показателей качества процесса позволяют: преимущества итерационной структуры двухканальной системы управления; оптимальный и технически реализуемый для конкретной системы выбор значений формирующих параметров основного  $r_1 = (\Omega_1^*)^{-1}$  и компенсирующего  $r_2 = (\Omega_2^*)^{-1}$  автономных каналов (в общем случае должно выполняться:  $r = r_1/r_2 = \Omega_2^*/\Omega_1^* \geq 4$ ), а также соответствующий подбор коэффициента  $\alpha$ , определяющего демпфирование эталонного оператора  $W_B^{**}(p)$  и обеспечивающего приемлемое качество перерегулирования  $\sigma\%$  эталонной переходной характеристики (выбирают из условия:  $\alpha \geq \sqrt{2}$ ).

Этому требованию удовлетворяет двухканальная система с каналами, настроенными по критерию технического оптимума, которому соответствует эталонный оператор колебательного звена вида (10) ( $\xi = \sqrt{2}/2 \approx 0.707$ ). При задании  $\sigma\% \leq 20\%$  операторы автономных каналов  $W_i^{**}(p)$  ( $i = 1, 2$ ) могут быть представлены в виде

$$W_1^{**}(p) = (1 + \sqrt{2}p + p^2)^{-1}, \quad W_2^{**}(p) = (1 + 0.25\sqrt{2}p + 0.0625r^2)^{-1}.$$

**Шестая глава** посвящена внедрению и практическому применению результатов работы. Кратко рассмотрены вопросы, связанные с участием автора в разработке и освоении многоканальных итерационных систем управления глубокорегулируемым электроприводом с ЧПУ для СВД промышленного назначения, в том числе систем управления манипулятором инструмента опытно-промышленного сварочного комплекса РТК "Дуга" и многоканальным электроприводом на линейных синхронных двигателях для механизмов подачи станков инструментального производства.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, полученные в диссертации.

1. Обосновано применение итерационного принципа построения и синтезирован итерационный алгоритм функционирования во временной области многоканальных линейных стационарных СВД. Рассмотрены вари-

анты структурных схем, реализующих итерационные алгоритмы функционирования с учетом помех, приведенных ко входам каналов.

2. Разработаны методика и алгоритм, реализованные в виде программы IDENTIF для ЭВМ, оптимальной идентификации линейных объектов и систем методом временных моментов функции веса. Выполнена экспериментальная идентификация манипуляционной системы опытно-промышленного сварочного комплекса РТК "Дуга".

3. Получены аналитические расчетные соотношения для дисперсий ошибок, на основании которых выполнена оценка эффективности и анализ случайных ошибок двухканальной итерационной СВД с типовой настройкой каналов на технический оптимум.

4. Разработан алгоритм расчета интегральных квадратичных функционалов качества типа дисперсий ошибок и устойчивости итерационных систем эффективным методом рекуррентных уравнений К.Острема.

5. Введены эталонные операторы и оптимизируемые параметры автономных каналов. Разработаны метод и единый алгоритм PARAMETERS OPTIMIZATION квазиглобального параметрического синтеза по критерию минимума дисперсии ошибки многоканальных (до 3-х каналов) итерационных систем с заданной эталонной структурой каналов произвольного порядка, позволяющий решить 12 различных вариантов оптимизационных задач, в том числе с учетом функциональных ограничений на основные фазовые переменные каналов.

6. Выполнен параметрический синтез и оценка эффективности последовательно-оптимальной и параллельно-оптимальной двухканальной итерационной системы с унифицированными каналами, настроенными по критерию технического оптимума.

7. Для некоррелированных между собой стационарных случайных внешних воздействий решена задача синтеза и оценки эффективности трехканальной последовательно-оптимальной итерационной системы со свободной структурой каналов.

8. Выполнена качественная оценка переходных процессов в многоканальных итерационных СВД. На примере трехканальной системы разработаны метод и алгоритм расчета и анализа переходных процессов в N-канальных итерационных системах с эталонными операторами каналов общего вида по упрощенной эквивалентной структуре с параллельным соединением N каналов.

9. Выработаны рекомендации по выбору значений определяющих параметров (коэффициента демпфирования и собственных частот) каналов, обеспечивающих требуемые показатели качества переходной характеристики двухканальной итерационной системы с эталонными операторами каналов типа колебательного звена.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

1. Осмоловский П.Ф., Худяев А.А. Реализация условий инвариантности методом последовательных приближений //Теория инвариантности, теория чувствительности и их применения. Тез.докл. VI Всесоюзного совещания. Москва, 1982. С. 86 - 87.
2. Осмоловский П.Ф., Галаган В.П., Худяев А.А. Переходные процессы в двухканальных итерационных системах //Системы управления летательных аппаратов. -1982. -Вып.7. -С.3 - 16.
3. Осмоловский П.Ф., Худяев А.А. Итерационный алгоритм использования избыточности информации при воспроизведении взаимосвязанных координат подвижных объектов //Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах. Ленинград, 1983. С. 166 - 169.
4. Худяев А.А. Алгоритм расчета дисперсий ошибок многоканальных итерационных систем методом рекуррентных уравнений//Автоматика. -1986. -N 6. -С.43 - 52.
5. Худяев А.А., Московец В.И. Эффективность итерационных алгоритмов построения следящих систем с неидентичными входными координатами //Автоматизация технологических процессов и производств: Сб. науч.тр. -Харьков, 1988. -С. 130 - 143.
6. Осмоловский П.Ф., Худяев А.А., Руденко В.Е. Синтез и оценка эффективности последовательно-оптимальной двухканальной следящей системы с итерационной структурой//Вест.Харьк.политехн.ин-та N 263: Техн. кибернетика и ее прил. -1989. -Вып.9. -С.17 - 22.
7. Осмоловский П.Ф., Худяев А.А. Влияние запаздывания входных координат на динамическую точность двухканальной итерационной измерительной системы //Автоматика. -1990. -N 2. -С. 35 - 42.
8. Алгоритм контроля качества и расчета на ЦЕМ набора экспериментальных оценок статистических характеристик промышленных случайных процессов /А.А. Худяев и др. //Проектирование комплексно-автоматизированных производств: Сб.научн.тр. -Харьков, 1990. -С. 75-87.
9. Кузнецов Б.И., Худяев А.А. Автоматизация проектирования двухуровневых систем управления робототехническими модулями //Системы автоматизированного проектирования технологической подготовки производства в машиностроении. Тез.докл. Всесоюзного науч.-техн.семинара. Севастополь, 1991. С.16.
10. Двухканальная квазиитерационная система управления порталным роботом по линейной координате /А.А.Худяев и др. //Автоматизированные системы проектирования и управления:Сб.науч.тр.-Харьков, 1991. -С. 61-71.
11. Функциональная схема двухканального привода порталного манипулятора /А.А.Худяев и др. //Автоматизированные системы проектирования и управления: Сб.науч.тр. -Харьков, 1991. -С. 91-98.

12. Кузнецов Б.И., Худяев А.А., Некрасов И.М. Двухканальные электроприводы переменного тока // Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями. Тез. докл. IX Всесоюзной науч.-техн. конф. Екатеринбург, 1992. С.31.
13. Худяев А.А., Кузнецов Б.И., Некрасов И.М. Алгоритм оптимальной идентификации промышленных электроприводов на ЭВМ // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвуз. сб. науч. тр. - Красноярск, 1992. - С. 101 - 106.
14. Исследование на ЭВМ динамических характеристик двухканального электропривода с упругим звеном для портального робота / Б.И. Кузнецов, Р. Козиол, И.М. Некрасов, А.А. Худяев // Изв. вузов. Электромеханика. - 1993. - N 1. - С. 82 - 85.
15. Худяев А.А. Алгоритм оптимальной идентификации линейных объектов методом временных моментов // Автоматика. - 1993. - N 2. - С. 27-36.
16. Худяев А.А., Московец В.И. Построение математических моделей корректирующих цепей в переменных состояниях // Компьютерные интеллектуальные модели и системы: Сб. науч. тр. - Харьков, 1993. - С. 35-45.
17. Исследование на ЭВМ динамических характеристик двухканальной системы управления радиотелескопом с упругими связями / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, Л.Б. Курцева, В.И. Московец // Компьютерные интеллектуальные модели и системы: Сб. науч. тр. - Харьков, 1993. - С. 123-134.
18. Двухкорный линейный синхронный привод обрабатывающего центра / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.М. Некрасов, В.И. Русаев // Электротехника. - 1993. - N 4. - С. 11 - 18.
19. Худяев А.А., Кузнецов Б.И. Параметрический синтез многоканальных систем с итерационной структурой // Материалы 1-й Украинской конф. по автоматич. упр-ю: Автоматика-94. Киев, 1994. Ч.1. С.118.
20. Патент N 2025035 России. Электропривод / Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.М. Некрасов и др. Оpubл. в Б.И., 1994, N 46.

Khudyaev A. A. "Parameter synthesis of the multichannel automatic motions reproduction systems of the iterative type".

The items under consideration are identification, parameter synthesis and analysis of the new class of high accuracy control systems - multichannel automatic motions reproduction systems (MRS) of the iterative type. Iterative algorithm of multichannel systems functioning was synthesized. Algorithm of optimal identification of linear objects of MRS was worked out by the method of time moments of the weight function. The identification of manipulation system of the industrial welding installation RTC "Duga" was carried out. Efficiency of two-channel system under stochastic signals and stan-

standard channels tuning was estimated. Methods and algorithms were worked out and as a result parameters synthesis according to criterion of minimum disperse of the error of the multichannel (up to 3 channels) MRS of the iterative type with model and free structure of the channels was carried out. Method and algorithm of computing and analysis of the dynamical characteristics were worked out. The analysis of transient responses in the two-channel MRS with operators of the channels oscillation unit type was carried out. The recommendations as to the selection of parameters of the channels were performed. The results of the research work are introduced in the process of designing and performance test of motions reproduction systems of electrical engineering industry and servosystems objects.

Хуляєв Олександр Андрійович "Параметричний синтез багатоканальних ітераційних систем відтворення рухів". Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - "Електротехнічні комплекси і системи, включаючи їх управління і регулювання". Харківський державний політехнічний університет - Харків, 1995 р.

Розглядається питання ідентифікації, параметричного синтезу і аналізу нового класу САК підвищеної точності багатоканальних систем відтворення рухів (СВР), побудованих за ітераційним принципом грубого і точного керування. Синтезовано ітераційний алгоритм функціонування багатоканальної відтворювальної системи. Розроблені методи та алгоритм оптимальної ідентифікації лінійних об'єктів СВР за методом часових похідних функції ваги. Виконано ідентифікацію моделі зухвалісної системи дослідно-промислового зварювального комплексу РТК "Дура" опівнено ефективність двоканальної системи при випадкових впливах і з тильовим пристроюванням каналів. Розроблені алгоритми та виконано параметричний синтез за критерієм мінімуму дисперсії помилки багатоканальних (до 3-х каналів) ітераційних СВР з еталонною та вільною структурою каналів. Розроблені метод і алгоритм розрахунку і аналізу динамічних характеристик. Проведено аналіз нестабільних процесів в двоканальних СВР з операторами каналів типу коливальної ланки. Сформульовані рекомендації, що до вибору параметрів каналів. Результати впроваджені у проектування і створення систем відтворення рухів об'єктів електротехнічної промисловості та слідуючих систем.

Ключевые слова: многоканальная итерационная система, итерационный алгоритм функционирования, идентификация, оптимизация, эталонный оператор канала, формирующий параметр, полоса пропускания, дисперсия ошибки, выигрыш в точности, переходный процесс.







---

Подп. к печати 30.12.95. Формат 60x84/16. Бумага типограф.  
Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100. Зак. 11-10.

---

Редакционно-издательский отдел  
Харьковского государственного политехнического университета  
310002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.

11/12/95

AB 33.865

**AB 33.865**