

На правах рукописи

Зейдан Имад Мох'д Рашад

**РАЗРАБОТКА ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ
МНОГОКРАТНОИНТЕГРИРУЮЩИХ СИСТЕМ
ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОДНОМАССОВОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЛУЧШЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



00777964 (1)

Дисертацією являється рукопис

Робота виконана на кафедрі "Автоматизовані електричні системи" в Харківському державному політехнічному університеті.

Научний керівник доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович

Научний консультант кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Гуль Альберт Ігнатівич

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зеленов Анатолій Борисович

кандидат технічних наук
Кривицький Сергій Орестович

Ведуче підприємство: АО "Тяжпромелектропроект"

Захист дисертації состоится 30 марта 1995 г. в 14.30 на засіданні спеціалізованого ради К.068.39.06 в Харківському державному політехнічному університеті.

(310002, Харків-2, ГСП, ул.Фрунзе, 21)

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розіслано 28 лютого 1995 г.

Учений секретар
спеціалізованого наукового ради

Гончаров Ю.П.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В связи с бурным развитием научно-технической революции во всем мире все острее становится проблема ресурсосбережения. На Украине эта проблема еще более обострилась после распада СССР.

Для достижения ресурсосберегающего эффекта за счет повышения точности работы механизмов многие цифро-аналоговые системы автоматического регулирования электропривода (ЭП) выполняются двукратноинтегрирующими а некоторые и трехкратноинтегрирующими. При повышенных требованиях к динамической ошибке и чувствительности этих систем к параметрическим возмущениям становится актуальной задача их многопараметрической оптимизации на максимум контурного коэффициента усиления (максимум добротности) при заданном показателе колебательности. В известных методиках синтеза параметры их регуляторов или не соответствуют этому критерию или же определены только для аналоговых систем подчиненного регулирования (СПР). Соответствующие им методики настройки внешнего контура отягощены процедурами идентификации объекта регулирования, расчетами уточненных значений параметров регулятора и их уставок на реальном оборудовании и не дают, как показали исследования автора, даже теоретически наилучшего результата. Ряд технологий металлообработки требует не только высокой точности регулирования скорости и положения механизмов но и малой чувствительности к изменению параметров систем, работающих в тяжелых условиях. К ним относятся гибкие автоматизированные производства с металлорежущими станками, непрерывные станы горячей и холодной прокатки стального листа. Высокая точность позиционирования требуется в автоматизированных скоростных лифтах и ряде других промышленных механизмах.

Актуальность многопараметрической оптимизации цифро-аналоговых СПР подтверждается в решениях последних конференций с международным участием по проблемам автоматизированного ЭП.

Данная диссертационная работа, посвященная решению указанных выше и сопутствующим им задачам, выполнена в рамках приоритетного научного направления по программе 5.1.6 "Ресурсосберегающие электро-механические системы", утвержденной Государственным комитетом Украины по вопросам науки и технологии приказом № 15 от 1 марта 1993 года.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состоит в разработке методик инженерного проектирования и наладки многократноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР одномассовых электроприводов с улучшенными динамическими и точностными характеристиками на основе методов многопараметрической оптимизации их внешнего контура по нетрадиционным критериям: максимум добротности при заданной колебательности или минимум колебательности при заданной добротности.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решались следующие задачи:

1. Разработка с применением ЭВМ методик многопараметрической оптимизации цифро-аналоговых многократноинтегрирующих систем (МИС) по координатам седловой точки поверхности равного уровня усиления в пространстве параметров дискретной амплитудной частотной характеристики (АПЧХ) по каждому из двух предложенных критериев.

2. Разработка инженерных методик проектирования параметрически оптимизированных двукратно-, трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих контуров по предлагаемым критериям.

3. Сравнительный анализ характеристик и показателей оптимизированных систем с традиционно настроенными системами.

4. Исследование условий возникновения автоколебаний в параметрически оптимизированных МИС при неполадках в виде типового нелинейного звена (люфт, зона нечувствительности, насыщение и т.д.) и разработка методики их диагностики.

5. Обеспечение абсолютной устойчивости параметрически оптимизированных контуров с нелинейным ограничением подчиненной координаты.

6. Экспериментальная проверка инженерных методик оптимизации параметров цифро-аналоговых дву- и трехкратноинтегрирующих СПР скорости и положения методами структурного моделирования на ЭВМ и разработка методик их уточненной наладки на реальном оборудовании.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Исследование цифро-аналоговых многократноинтегрирующих СПР произведены на основе теории автоматизированного электропривода, частотных методов теории импульсных систем и автоматического управления. Многопараметрическая оптимизация достигалась применением метода чисел Фибоначчи при поиске максимума АЧХ и квадратичной интерполяции-экстраполяции при поиске минимума показателя колебательности. Инженерная методика разработана с помощью регрессионного анализа. Абсолютная устойчивость оптимизированных МИС при нелинейных ограничениях звеньев исследованы по частотному критерию Попова В.М. Использованы методы структурного моделирования на ЭВМ с применением метода Рунге-Кутты-Фельберга.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

-Методики многомерной параметрической оптимизации многократноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР по критериям: минимум показателя колебательности при заданном коэффициенте усиления, максимум коэффициента усиления при заданном показателе колебательности;

-Расчетная формула частоты автоколебаний параметрически оптимизированных трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих контуров цифро-аналоговых СПР для диагностики неполадок в контуре в виде люфта, зоны нечувствительности или насыщения звена;

-Методики обеспечения абсолютной устойчивости параметрически оптимизированных дискретных МИС с нелинейным ограничением сигнала

ла задания подчиненному контуру;

-Инженерные методики расчета и уточненной наладки параметров регуляторов высокоточных робастных электроприводов с многократно-интегрирующими контурами регулирования их цифро-аналоговых СПР.

ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ подтверждена соответствием принятых допущений цели и задачам исследования, применением апробированных альтернативных методов математического программирования и моделирования на ЭВМ, методов теорий электропривода и автоматического управления, а также сходимостью результатов расчета, проведенных на адекватной математической модели, с экспериментальными данными, полученными как автором так и другими исследователями для некоторых частных случаев.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА Впервые показано существование седлообразной области гиперповерхности равного уровня усиления цифро-аналоговых МИС в пространстве параметров их дискретных амплитудных частотных характеристик и разработан метод использования координат ее седловой точки для оптимизации этих систем по одному из двух предложенных критериев: минимум показателя колебательности при заданном контурном коэффициенте усиления, максимум контурного коэффициента усиления при заданном показателе колебательности.

Впервые доказана оптимальность желаемой дискретной логарифмической амплитудно частотной (ЛАЧХ) типа $n-1-0$, где n -кратность интегрирования МИС, и разработаны формулы расчета ее низкочастотных сопряжений и псевдочастоты среза по каждому из предложенных критериев параметрической оптимизации.

Впервые аналитически выведена расчетная формула частоты автоколебаний параметрически оптимизированных трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих цифро-аналоговых контуров для диагностики неполадок в виде люфта, зоны нечувствительности или насыщения.

Впервые предложены алгоритмы уточненной настройки оптимальных значений параметров регулятора многократноинтегрирующего контура по предложенным критериям непосредственно на оборудовании.

Впервые исследована абсолютная устойчивость многообразия структурных схем нелинейного ограничения подчиненной координаты в многократноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР и обоснован алгоритм ограничения с отключением входного сигнала интеграторов регулятора без глубокой отрицательной обратной связи.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. Предложенные инженерные методики многомерной параметрической оптимизации многократноинтегрирующих контуров цифро-аналоговых СПР по показателям колебательности и добротности, способствуют значительному улучшению их динамических и точностных характеристик и, благодаря их большой общности, могут быть рекомендованы в качестве единой типовой методики проектирования и наладки как дискретных так

и непрерывных МИС. Учет дискретного характера процессов позволяет при проектировании МИС выбрать пониженную тактовую частоту управляющего микропроцессора, а следовательно и его стоимость.

Разработанный алгоритм ускоренного поиска минимального значения показателя колебательности дискретной МИС непосредственно на действующем оборудовании значительно упрощает и повышает точность их наладки, открывая дорогу разработкам точной адаптивной самонастройки параметров на реальном оборудовании с помощью единого встроенного микропроцессора.

Оптимизация по предложенным критериям обеспечивает минимальную чувствительность МИС к изменению оптимальных значений параметров в силу равенства нулю частных производных в седловой точке гиперповерхности равного уровня усиления.

Полученные результаты могут быть использованы при создании и реконструкции высокоточных робастных электроприводов и систем управления технологическими объектами в том числе, например, систем регулирования разнотолщинности прокатываемой полосы металла, систем электропривода высокоточных станков и роботов, систем точного позиционирования скоростных лифтов.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Результаты исследования использованы в качестве основных положений инженерной методики проектирования и наладки МИС регулирования скорости высокоточных электроприводов по госбюджетной теме 5.51.06/037 "Разработка высокоточных автоматизированных электроприводов для ресурсосберегающих технологий", выполняемой по приоритетному научному направлению в рамках программы 5.1.6 "Ресурсосберегающие электромеханические системы", утвержденной Государственным комитетом Украины по вопросам науки и технологии приказом N 15 от 1 марта 1993 года.

Разработанный пакет диалоговых программ автоматизации проектирования цифро-аналоговых МИС электроприводов включен в библиотеку типовых программ персональных компьютеров типа IBM PC XT/AT для научных исследований и учебного процесса на кафедре "Автоматизированные электромеханические системы" ХГПУ (г. Харьков).

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Академии наук Украины "Динамика нелинейных электромеханических систем" (г. Харьков, 1991-1993), конференции "MICRO-CAD 92" в Мишкольцком университете (Венгрия, 1992 г.), научно-технических конференциях с международным участием "Проблемы подъемно-транспортной техники" (г. Алушта, 1993 г.) и "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" (г. Харьков, 1994 г.).

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание диссертации опубликовано в межвузовском научно-техническом сборнике "Оптимизация режимов ра-

боты систем электроприводов" Красноярск, КрПИ, 1992; вестнике ХПИ, Электромашиностроение и автоматизация промпредприятий.- вып.16, N492, Харьков, 1992.; а также в печатных материалах научно-технических конференций с международным участием "Проблемы подъемно-транспортной техники", секция 3, Алушта, 1993 г. и "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика", Харьков, 1994 г.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 97 страницах машинописного текста, и содержит 52 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 104 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ обосновывается актуальность работы, формулируются ее цель и научные задачи, отмечаются основные методы исследования и защищаемые научные результаты, достоверность и научная новизна, практическая ценность, реализация и апробация полученных результатов.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ дана характеристика сформировавшемуся к настоящему времени направлению в решении проблемы улучшения динамических и точностных показателей ЭП постоянного тока, снабженных СПР. Проведен анализ многочисленных исследований, выполненных в отраслевых институтах ВНИИэлектропривод, ВНИИМЕТМАШ, НИИ НПО ХЭМЗ, ВНИИР, АО "Тяжпромэлектропроект", а также вузов МЭИ, ЛЭТИ, ЛПИ, УПИ и др. Отмечаются достигнутые успехи в области совершенствования СПР путем построения систем с переменной структурой, использования видоизмененных методов оптимизации, принципов упреждающей коррекции, цифровой и микропроцессорной техники. Вместе с тем ряд вопросов не нашел достаточной разработки. Недостаточно внимания уделено вопросам ослабления противоречий между добротностью и колебательностью МИС ЭП методами параметрической оптимизации, снижению их чувствительности к параметрическим возмущениям и выбора нелинейной схемы ограничения подчиненных координат МИС по условию их абсолютной устойчивости.

Вышеизложенное определило основное содержание исследований, указанное в задачах диссертационной работы.

В данной работе в качестве объекта исследования рассматриваются цифро-аналоговые многократноинтегрирующие СПР ЭП постоянного тока, выполненные по системе управляемый преобразователь-двигатель с подчиненным контуром тока, настроенным аналоговым регулятором по модульному оптимуму на поведение линейного колебательного звена второго порядка при коэффициенте демпфирования 0,707. В качестве управляемого преобразователя может быть использован тиристорный или широтно-импульсный преобразователь, работающий в зоне непрерывного тока. При этом не вносится ограничение на расположение интеграторов в объекте управления или в составе регулятора. Механическая часть ЭП принята в виде одностепенной системы при отсутствии

зазоров.

На рис. 1а,б представлены структурные схемы типичных цифро-аналоговых, двукратно- и трехкратноинтегрирующих СПР скорости a на рис. 1в трехкратноинтегрирующей СПР положения без подчиненного контура скорости. Регуляторы внешнего контура, задатчики и датчики, преобразователи код-аналог и аналог-код реализованы на микросхемной, микропроцессорной элементной базе с кодовым представлением информации и обозначены на схемах в соответствии с общепринятой методикой следующим образом:

$D(z)$ -дискретные передаточные функции регуляторов внешнего контура с идеальными ключами на входе и выходе, работающими синхронно и синфазно с периодом T . На рис.1 $D_{\text{пи}}(z)$ - цифровой аналог пропорционально-интегрального регулятора, $D_{2\text{пи}}(z)$ - цифровой аналог двух последовательно соединенных пропорционально-интегральных регуляторов, $D_{\text{пид}}(z)$ - цифровой аналог пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. На выходе идеального ключа установлен фиксатор $W_{\text{ф}}$ в виде экстраполятора нулевого порядка $W_{\text{ф}}(p) = (1 - \exp(-pT))/p$. $\Phi(p)$ - подчиненный контур тока. Преобразователи аналог-код датчиков в зависимости от принятого типа могут быть описаны различными передаточными функциями с незначительной постоянной времени T_{Δ} и чистым запаздыванием $T_{\text{иД}}$ (см.рис.1).

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ разработаны нетрадиционные методики многопараметрической оптимизации МИС по критерию максимального ослабления противоречия между коэффициентом усиления (добротностью) и колебательностью этих систем в замкнутом состоянии, повышающие их динамические и точностные показатели [2,3,4].

Асимптотическая логарифмическая дискретная частотная характеристика (ЛАЧХ) разомкнутого многократноинтегрирующего контура, представленная на рис.2 сплошной ломаной линией, является обобщением типовых желаемых ЛАЧХ цифро-аналоговых МИС подчиненного регулирования с участком 20 дБ/дек на псевдочастоте среза λ_c . Согласно желаемой ЛАЧХ разомкнутой МИС аналитическое описание ее дискретной частотной характеристики $G(j\lambda)$ имеет вид

$$G(j\lambda) = K \cdot W_B(j\lambda) \cdot (j\lambda)^{-n} \cdot \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \lambda\lambda_i) \quad (1)$$

где λ - псевдочастота;

$$K = \lambda_c \cdot \prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \text{ - коэффициент усиления разомкнутого контура;}$$
$$i = 1$$

λ_i - низкочастотные сопряжения асимптот логарифмической ампли-

тудной частотной характеристики разомкнутой системы (ЛАЧХ);
 λ_c - псевдочастота среза ЛАЧХ;

$$W_B(j\lambda) = (1 - j\lambda T/2) \cdot [1 + j\lambda \cdot (T/2 - \Sigma T_m)] \cdot [1 + j\lambda \cdot (T/2 - \Sigma T_n)] / (1 + j\lambda T/2)^2$$

- высокочастотная часть характеристики;

T - такт повторения вычислений в контуре;

ΣT_m - сумма малых постоянных времени в контуре;

ΣT_n - суммарное запаздывание в контуре

Коэффициент усиления K разомкнутого контура, определяющий добротность, равен согласно (1) произведению псевдочастот сопряжения и псевдочастоты среза.

Введем параметрическое описание коэффициента усиления разомкнутого контура с базовым временем T_6

$$K = k \cdot (T_6)^{-n} \quad (2)$$

$n-1$

где $k = (a \cdot \prod_{i=1} b_i)^{-1}$ - параметрический коэффициент усиления;

$a = 1/(\lambda_c T_6)$ - параметр частоты среза ЛАЧХ;

$b_i = 1/(\lambda_i T_6)$ - параметры низкочастотных сопряжений ЛАЧХ;

$T_6 = \Sigma T_m + T/2 + \Sigma T_n$ - базовое время.

Выражениям (1) и (2) соответствует дискретная амплитудная параметрическая частотная характеристика (АПЧХ) замкнутой МИС в относительных единицах (о.е.)

$$|\Phi(jv)| = | \{ 1 + (jv)^n / [k \cdot W_B(jv) \cdot \prod (1 + j b_i v)] \}^{-1} |, \quad (3)$$

где $|\Phi(jv)|$ - амплитуда;

$v = \lambda T_6$ - псевдочастота в о.е.;

$W_B(jv)$ - высокочастотная часть характеристики (1) в о.е.;

В многоканальных системах ЭП, взаимосвязанных технологическим объектом, только после решения задачи автономности [1] АПЧХ каждого замкнутого многократноинтегрирующего канала системы можно адекватно описать формулой (3).

ФОРМУЛИРОВКА КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ. Как правило МИС проектируются для практически одномассовых электроприводов и настраиваются с повышенным коэффициентом усиления как колебательные системы, АЧХ которых согласно выражению (3) при $k = \text{const}$, всех $b_i = \text{const}$ и $v = \text{var}$ имеют ярко выраженный максимум $M = \max |\Phi(jv)|$ в среднечастотной области, являющийся показателем колебательности.

При $n=2$, $k = \text{const}$, $b_i = \text{var}$ и $v = \text{var}$ выражение (3) может быть наглядно изображено в трехмерном пространстве параметров в виде поверхности равного уровня усиления, приведенной на рис.3 двумя про-

екциями: а) плоскость амплитуда - частота ν ; б) плоскость амплитуда - параметр b_1 . В среднечастотной области поверхность имеет характерный седлообразный вид с единственной седловой точкой, в которой показатель колебательности M имеет минимальное значение $M_0 = \min\{\max|\Phi(j\nu)|\}$ на частоте $\nu = \nu_0$ при оптимальном значении параметра $b_1 = b_0$.

При $n=3$, $k = \text{const}$, $b_1 = \text{var}$, $b_2 = \text{var}$ и $\nu = \text{var}$ выражение (3) отображает гиперповерхность равного уровня усиления в четырехмерном пространстве параметров АПЧХ с характерной седлообразной областью в среднечастотном диапазоне с единственной седловой точкой, координаты которой по осям b_1 и b_2 равны единому оптимальному значению b_0 в силу коммутативности выражения (3) относительно этих параметров. Этим фундаментальным свойством равенства всех низкочастотных сопряжений ЛАЧХ разомкнутой системы в минимуме колебательности замкнутой системы при заданной добротности обладает весь класс МИС в силу все той же коммутативности выражения (3) относительно всех параметров низкочастотного сопряжения b_i

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots \lambda_i \dots = \lambda_n = \lambda_0, \quad (4)$$

где λ_0 - оптимальное значение низкочастотных сопряжений n -кратно-интегрирующей системы при заданной добротности.

В пределах задания коэффициенту усиления k значений, при которых сохраняется колебательный характер системы и ее устойчивость, седловая точка располагается на некоторой однозначной траектории, обозначенной на проекциях рис.3 штрих-пунктиром. Моделированием МИС с разнообразными передаточными функциями малых звеньев и порядками экстраполяторов, определяющих высокочастотную часть характеристики (1), установлено незначительное в области задания $1,5 < M < 2,5$ отклонение траектории седловой точки в пределах расширяющейся вверх трубки, что позволило разработать методами регрессионного анализа универсальную инженерную методику расчета оптимальных параметров регуляторов всего класса стационарных линейных двукратноинтегрирующих систем как аналоговых так и цифро-аналоговых с применением рассчитанного по формуле (2) значения базового времени T_6 .

Они имеют вид для первого критерия оптимизации

$$n=2; M_0 = 1/(0,36 + 0,028/k); b_0 = 1,2 + 0,47/k; \quad 0,1 < k < 0,25;$$

$$n=3; M_0 = 1/(0,39 + 0,0011/k); b_0 = 5,5 + 0,023/k; \quad 0,005 < k < 0,025;$$

$$n=4; M_0 = 1/(0,36 + 0,000042/k); b_0 = 9,3 + 0,00074/k; \quad 10^{-4} < k < 0,0015;$$

и для второго критерия оптимизации

$$n=2; k_0 = 0,35(1-1/M)^{1,16}; b_0 = 2,0/(1-1/M); \quad 1,5 < M < 3;$$

$$n=3; k_0 = 0,054(1-1/M)^{52,3}; b_0 = 3,7/(1-1/M); \quad 1,5 < M < 3;$$

$$n=4; k_0 = 0,005(1-1/M)^{53,35}; b_0 = 5,3/(1-1/M); \quad 1,5 < M < 3.$$

Исследованиями установлено, что в седловой точке оптимально реше-

но противоречие между добротностью и колебательностью МИС. Любое отклонение от оптимальных значений параметров ухудшает один из показателей M или k при неизменности другого и повышает чувствительность системы к параметрическим возмущениям.

В работе представлены результаты сравнительного анализа оптимизированных по предложенным критериям МИС с традиционными. Для двукратноинтегрирующих систем преимущества незначительны и это дает основание рекомендовать методику наряду с традиционной. Для трехкратноинтегрирующих СПР установлены значительные резервы по времени регулирования в 3,5 раза и добротности в 5,5 раза (базовый вариант из журнала "Электричество" №1, 1981).

Для четырехкратноинтегрирующих впервые найдены оптимальные значения перерегулирования и времени регулирования, оказавшиеся на уровне аналогичных показателей двукратноинтегрирующей СПР, традиционно настроенной на симметричный оптимум. Найденные максимальные значения коэффициентов усиления сводят к минимуму динамические ошибки МИС по возмущениям. Так например, при скачкообразном возмущении в трехкратноинтегрирующих МИС по входу с астатизмом первого порядка интегральная квадратичная оценка ошибки оптимизированной на максимум добротности системы меньше традиционного значения в 20 раз. При этом максимальное значение ошибки уменьшается в 4 раза.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ исследованы методом гармонического баланса условия возникновения автоколебаний в параметрически оптимизированных МИС при последовательном включении в них типового нелинейного звена типа "насыщение". Установлено, что двукратноинтегрирующие СПР обладают абсолютной устойчивостью при этом способе ограничения подчиненной координаты. В трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих СПР возможны колебания нелинейной природы на впервые аналитически найденной частоте ν_a

$$\nu_a = b_0^{-1} \operatorname{tg}[1,57(n-2)/(n-1)],$$

что приводит к выводу о недопустимости насыщения их звеньев или наличия существенных нелинейностей в основном контуре.

Исследована методом Попова В.М. с использованием графического дисплея абсолютная устойчивость параметрически оптимизированных трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих СПР при частичном охвате регулятора нелинейностью типа зона нечувствительности, представляющей свободу выбора абсолютно устойчивых структур из множества допустимых. Однако, абсолютная жесткость ограничения в найденных нелинейных структурах не может быть реализована из-за дискретной природы цифрового регулятора. Предложен и проверен имитационным моделированием алгоритм абсолютно жесткого ограничения подчиненной координаты СПР без глубокой обратной связи регулятора, состоящий в отключении входного сигнала интеграторов регулятора при превышении

выходным сигналом регулятора заданного уровня и подачи постоянного сигнала задания этого уровня на вход подчиненного контура. МИС при этом способе ограничения обладает абсолютной устойчивостью и он может быть рекомендован в качестве типового для комплектного ЭП.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА глава посвящена численным экспериментам на имитационных моделях МИС ЭП и разработке на основе этих исследований удобной методики точной настройки параметров регуляторов на действующем оборудовании. Расчетные соотношения и выводы диссертационной работы прошли экспериментальную проверку на двух двукратноинтегрирующих и двух трехкратноинтегрирующих цифро-аналоговых системах автоматического регулирования скорости и положения. Эксперименты полностью подтвердили достоверность и преимущества защищаемых методик. В процессе этих исследований были разработаны, в отличие от традиционных, методики точной настройки на оптимум на реальном действующем оборудовании с полным исключением измерений абсолютных величин и дополнительных расчетов.

Равенство низкочастотных сопряжений желаемой ЛАЧХ оптимального вида (4) имеет большое практическое значение, резко упрощая точную настройку действующих реальных систем при $n > 2$ простейшими поисковыми методами одномерной оптимизации независимо от сложности и кратности интегрирования этих систем. Сущность реализации этого способа многопараметрической настройки состоит в начальной ориентировочной установке соответствующих равным значениям низкочастотных сопряжений ЛАЧХ параметров регулятора и их последующей пропорциональной вариации единым органом настройки при постоянстве контурного коэффициента усиления системы. Поиск оптимального значения контролируется при этом или по минимальному значению максимума АЧХ замкнутой системы или более просто в наладке по минимуму перерегулирования переходной характеристики замкнутой системы рис.4б. Так например, в программе сдвоенного ПИ-регулятора трехкратноинтегрирующей СПР скорости рис.1б можно ввести единый настроечный коэффициент для вариации их пропорциональных компонент при неизменности контурного коэффициента системы (добротности по рывку) а в аналоговом варианте системы для этой же цели ввести сдвоенный переменный резистор рис.4а. Аналогично для этой же цели сдвоенный переменный резистор или единый настроечный коэффициент могут быть установлены и в ПИД-регуляторе положения СПР без подчиненного контура скорости рис.1в. Минимум показателя колебательности в этой системе необходимо определять по семейству АЧХ в связи с насыщением ПИД-регулятора при скачке задания.

Являясь многомерными по существу эти методики позволяют точно установить оптимальные значения параметров регулятора варьированием единственного органа настройки и наблюдением на экране осциллоскопа семейства переходных характеристик системы даже при полном

отсутствии математического описания объекта регулирования. Таким образом, открыта принципиальная возможность простой и точной настройки находящихся в эксплуатации многочисленных двукратно-интегрирующих систем ЭП (в том числе и многосвязных [1]) с непременным улучшением их характеристик а также менее многочисленных трехкратноинтегрирующих и сложных вновь проектируемых ЭП, трудно поддающихся точному математическому описанию, и достичь ресурсосберегающего эффекта за счет повышения точности технологических процессов ценой незначительных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработаны методики многомерной параметрической оптимизации цифро-аналоговых многократноинтегрирующих СПР по координатам седловой точки поверхности равного уровня усиления в пространстве параметров дискретной амплитудной частотной характеристики, позволяющие с помощью ЭВМ оптимизировать системы любой сложности и кратности интегрирования по одному из двух предложенных критериев: минимум показателя колебательности при заданном усилении и максимум усиления при заданном показателе колебательности.

2. Разработаны удобные инженерные методики оптимизации параметров двукратно-, трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР по предложенным критериям в области практических значений показателя колебательности от 1,5 до 2,5, учитывающие дискретный характер процессов и поэтому позволяющие выбор управляющего микропроцессора с пониженной тактовой частотой.

3. Предложен способ выбора с помощью ЭВМ нелинейного ограничения сигнала регулятора в параметрически оптимизированной цифро-аналоговой СПР по условию ее абсолютной устойчивости, состоящий в вариации охватываемой нелинейной связью части регулятора при неизменных параметрах всего регулятора с последующим анализом абсолютной устойчивости каждого варианта нелинейной системы известными методами.

4. Доказана абсолютная устойчивость параметрически оптимизированных, многократноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР с не более чем одним интегратором в объекте управления при ограничении подчиненной координаты способом полного охвата регулятора основного контура нелинейной обратной связью с любой формой однозначной характеристики.

5. Доказана абсолютная устойчивость параметрически оптимизированных, многократноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР с двумя интеграторами в объекте управления при ограничении подчиненной координаты способом охвата ПИ-компоненты регулятора внешнего контура нелинейной связью типа "зона нечувствительности".

6. Предложен алгоритм абсолютно жесткого ограничения выходного сигнала цифрового регулятора без глубокой отрицательной обратной связи и, поэтому не требующий повышенной тактовой частоты управляющей ЭВМ, состоящий в логическом отключении входных сигналов интегральных компонент регулятора и запоминанием его выходного сигнала при условии превышения выходным сигналом регулятора заданного уровня и одновременного совпадения его знака со знаком входного сигнала.

7. Установлено, что для цифро-аналоговых двукратноинтегрирующих систем параметры частоты среза $a=1,7$ и низкочастотного сопряжения $b=4,7$ обеспечивают в сравнении с традиционной настройкой на симметричный оптимум минимум показателя колебательности при равенстве их коэффициентов усиления $k=0,125$ и преимуществах по всем другим показателям: перерегулированию на 4%, времени регулирования на 12%, по показателю колебательности на 4% и частоте среза на 15%.

8. Установлено, что для цифро-аналоговых трехкратноинтегрирующих систем при равном показателе колебательности 1,79, соответствующем симметричному оптимуму, параметры частоты среза $a=1,7$ и низкочастотных сопряжений $b=8,9$ обеспечивают максимум коэффициента усиления и значительное преимущество над традиционной настройкой СПР по следующим показателям: коэффициенту усиления в 5,6 раза, времени регулирования в 3,5 раза, интегральной квадратичной оценке ошибки регулирования при скачке нагрузки с астатизмом первого порядка в 20 раз (базовый вариант из журнала "Электричество" N1, 1981).

9. Установлено что, характеристики цифро-аналоговых многократноинтегрирующих систем, оптимизированных на максимум коэффициента усиления при заданном на уровне симметричного оптимума значении показателя колебательности, имеют практически совпадающие показатели качества переходной характеристики (перерегулирование 60%, время регулирования порядка десятикратной суммы некомпенсированных малых постоянных времени непрерывной части системы и полупериода квантования цифрового регулятора, параметр частоты среза $a=1,7$).

10. Установлена общность разработанной инженерной методики как для дискретных так и для непрерывных МИС электроприводов, что позволяет рекомендовать ее в качестве единой типовой методики проектирования и наладки.

11. Предложен способ наладки двукратноинтегрирующего контура СПР с ПИ-регулятором на минимум перерегулирования или показателя колебательности, состоящий в вариации пропорциональной части ПИ-регулятора и наблюдении минимума перерегулирования выходной координаты или показателя колебательности.

12. Предложен способ наладки двукратноинтегрирующего контура СПР с ПИ-регулятором на максимум добротности при заданном перерегулировании или показателе колебательности, состоящий в последовательных приращении контурного коэффициента усиления с минимиза-

цией на каждом шаге перерегулирования или показателя колебательности по предыдущему способу п.11 до их совпадения с заданным уровнем.

13. Предложен способ наладки трехкратноинтегрирующего контура СПР с двойным ПИ*ПИ-регулятором на минимум перерегулирования или показателя колебательности, состоящий в вариации пропорциональных частей сдвоенного ПИ*ПИ-регулятора единым органом настройки и наблюдении минимума перерегулирования выходной координаты или показателя колебательности.

14. Предложен способ наладки трехкратноинтегрирующего контура СПР со сдвоенным ПИ*ПИ-регулятором на максимум добротности при заданном перерегулировании или показателе колебательности, состоящий в последовательных приращениях контурного коэффициента усиления с минимизацией на каждом шаге перерегулирования или показателя колебательности по предыдущему способу п.13 до их совпадения с заданным уровнем.

15. Доказана оптимальность желаемой ЛАЧХ разомкнутой МИС с равными значениями низкочастотных сопряжений и обеспечена минимальная чувствительность оптимизированных по предложенным методикам наладки систем электроприводов к параметрическим возмущениям.

16. Предложена формула расчета частоты автоколебаний параметрически оптимизированных трехкратно- и четырехкратноинтегрирующих цифро-аналоговых СПР для диагностики неполадок, связанных с образованием в контуре нелинейного звена типа "люфт", "зона нечувствительности" или "насыщение".

Содержание диссертационной работы опубликовано в следующих печатных работах:

1. Богданова Н.В., Зейдан И.М. Математическая модель многосвязной системы регулирования межсекционного натяжения бумажного подотна //Вестник ХПИ. Электромашиностроение и автоматизация промпредприятий.- вып.16, N492, Харьков, 1992. с.88-92.

2. Оптимизация двукратноинтегрирующей цифро-аналоговой системы подчиненного регулирования на максимум добротности/Клепиков В.Б., Богданова Н.В., Зейдан И.М., и др.//Оптимизация режимов работы систем электроприводов. КрПИ. Красноярск, 1992, с. 13-15.

3. Клепиков В.Б., Гуль А.И., Зейдан Имад Оптимизация автоматизированного электропривода скоростного лифта//печатн. материалы научн.-техн. конференции с международным участием "Проблемы электропривода подъемно-транспортной техники", секция 3. Алушта, 1993. с. 7-9.

4. Клепиков В.Б., Гуль А.И., Зейдан Имад Оптимизация параметров трехкратноинтегрирующих цифро-аналоговых систем электропривода на максимум добротности//печатн. материалы научн.-техн. конференции с международным участием "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". Харьков, 1994. секция 1, с.73-76.

Зейдан І.М. Розробка цифро-аналогових багатократноінтегруючих систем підлеглого регулювання одномасового електроприводу з поліпшеними характеристиками.

Розроблені оригінальні методи багатопараметричної оптимізації замкнутих багатократноінтегруючих систем одномасових електроприводів на математичній моделі у прострастві параметрів амплітудної частотної характеристики та безпосередньо на реальному обладнанні, значно зменшуючі їх динамічні помилки та чутливість до параметричних збурень та зпрощаючи їх настройку. Запропонован алгоритм абсолютно жорсткого обмеження підлеглої координати при абсолютній стійкості системи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: багатократноінтегруючі системи, автоматичне регулювання, цифро-аналогові системи, підлегле регулювання, параметрична оптимізація, абсолютна стійкість.

Zeidan I.M. Development of analog-to-digital multintegrated subordinate controlling systems of one-mass electric drive with improved characteristics.

Original methods of multiparametric optimization of closed multintegrated one-mass electric drive systems on mathematical model in space of amplitude-frequency characteristics parameters and directly on real equipment, decreasing their dynamics errors considerably and sensitivity to parametrical disturbances and simplifying their adjustment, has been developed. Algorithm of absolutely rigid restriction of subordinate coordinate at absolute system stability has been offered.

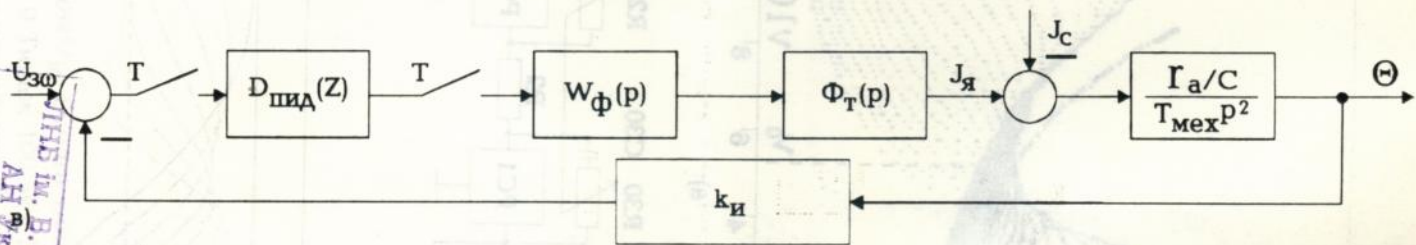
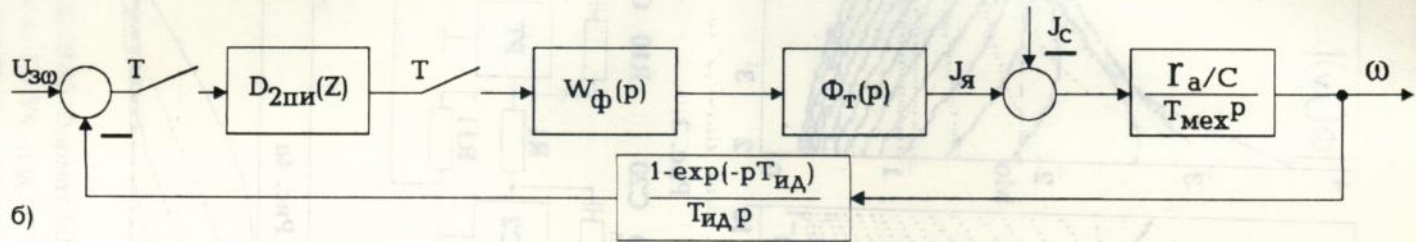
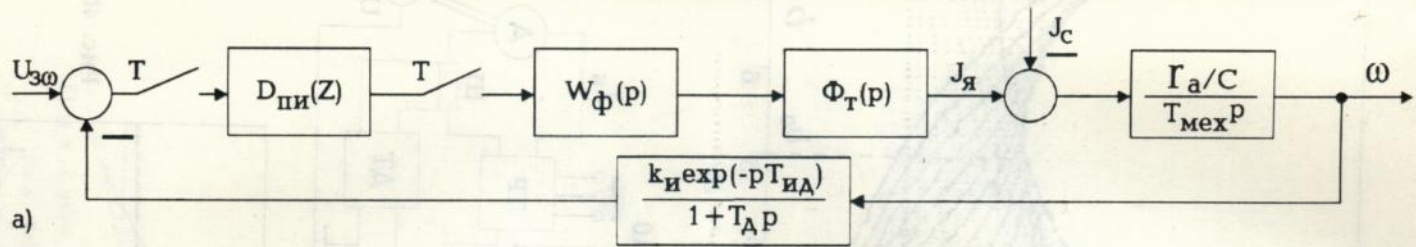
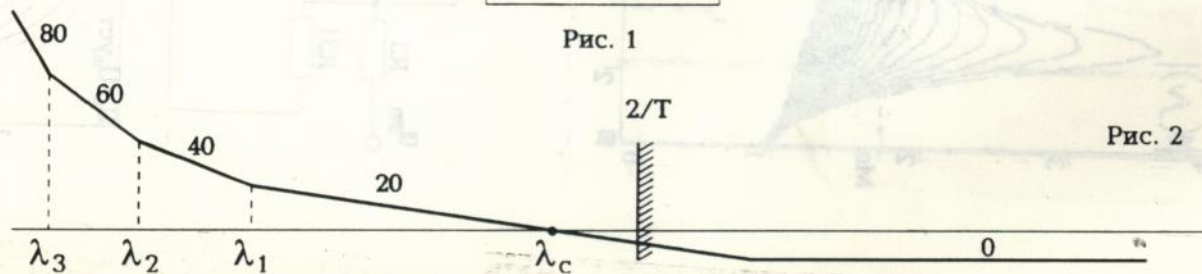


Рис. 1



ІНД ім. В. Стефана
АН України

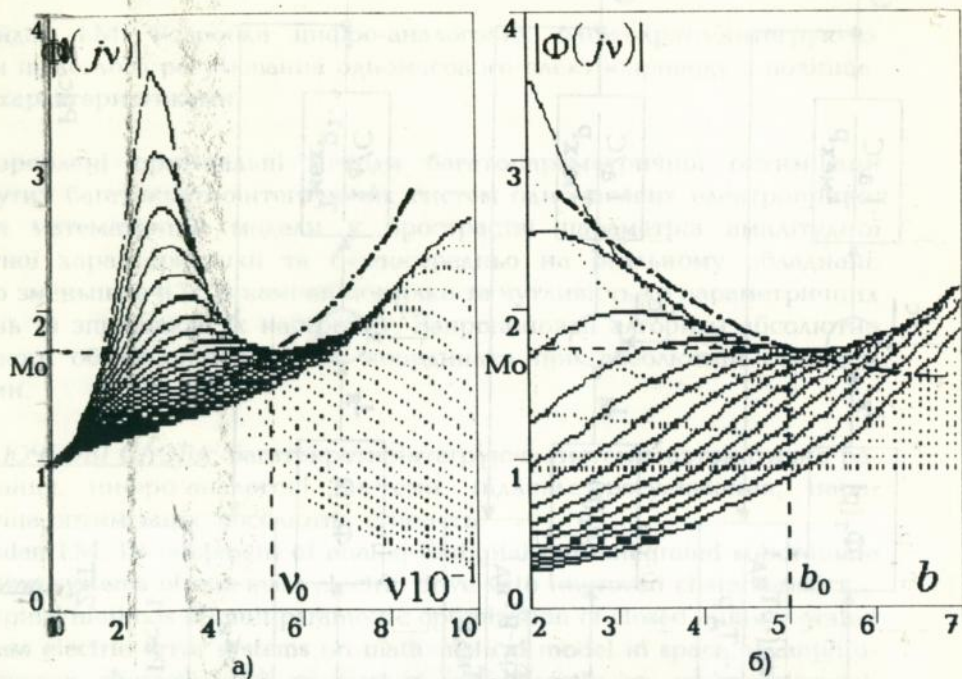


Рис. 3

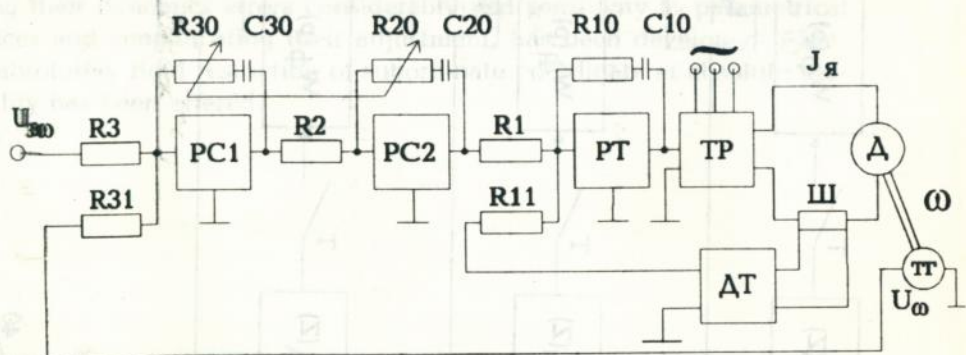


Рис. 4а

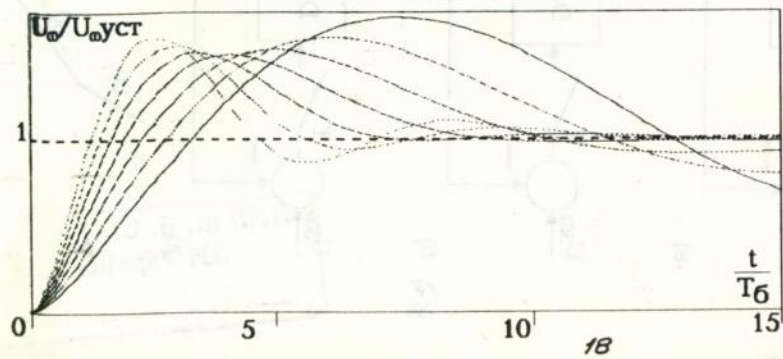


Рис. 4б

Подп. к печ. 28.02.95 Формат 60x84¹/₁₆. Бумага тип. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,0 Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ № 1104
Харьковское межвузовское арендное полиграфическое предприятие,
310093, Харьков, ул. Свердлова, 115

447878

