

1554 348

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

КРОПОВ Александр Николаевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ПРИВОДОВ С ПСЕВДОЛИНЕЙНЫМИ КОРРЕКТИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

05.02.03 - Системы приводов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1997

45. 41.33
62-83-52

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, с.н.с.
Чельшев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ермаков С.А.

кандидат технических наук, с.н.с.
Фомичев В.М.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт
авиационных систем.

Защита диссертации состоится "28" 04 1997 г. в 10 ч. на
заседании специализированного совета К.053.15.06. "Машиностроение"
в Московском государственном университете
им. Н.Э. Баумана
д.5.

Ваши отзывы
высылать по ука

С диссертаци
им. Н.Э. Бау

Автореферат

Ученый секре
специализирс
к.т.н., с.н.

1554 348

Объем 1 п.л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современной тенденцией развития методов проектирования силовых следящих систем является повышение точности и качества отработки сигналов управления, а так же снижение влияния на них технологических факторов изготовления исполнительных элементов и условий их эксплуатации. Особенно сложно решать эти задачи проектирования при использовании в качестве силовых элементов электрогидравлического безредукторного привода в котором измерение дополнительных параметров, обычно используемых при создании высокоточных систем с электроприводом, крайне затруднительно. Вместе с тем известные преимущества электрогидравлического привода (ЭГП) определило необходимость его широкого применения в качестве приводов различных робототехнических комплексов стационарного или мобильного базирования, бортовых систем слежения, систем наведения и др., где вопросы повышения точности и качества работы определяют эффективность изделия в целом. Во многих случаях такие системы строятся на базе электромеханических приводов, что не всегда является самым эффективным решением.

Сложившаяся практика проектирования электрогидравлических приводов с известными линейными и нелинейными корректирующими устройствами во многих случаях не решает проблем повышения точности до современных требований. Попытки достичь результата за счет усложнения технологии изготовления элементов электрогидравлического привода являются дорогостоящими и так же не всегда приводят к желаемому результату. Поэтому для создания высокоточного ЭГП необходима разработка специальных методов коррекции. Большие перспективы в этом направлении открывает применение все более сложных нелинейных алгоритмов, реализованных на базе микроБЕМ и микропроцессоров.

Цель исследования. В диссертационной работе представлены вопросы разработки псевдолинейных алгоритмов коррекции для следящих систем на базе дроссельных ЭГП. В работе выдвигались и решались следующие основные задачи.

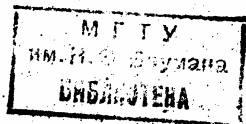
- анализ и выявление основных нелинейных свойств дроссельных ЭГП, определяющих точность следящей системы и определение требований к корректирующим алгоритмам для высокоточных ЭГП:

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1554348

Кропотов А. Н. Проектирова-



- создание методов построения псевдолинейных корректирующих алгоритмов (ПЛКУ), обеспечивающих повышения качества работы систем управления ЭПП;
- разработка способов реализации ПЛКУ средствами аналоговой и цифровой техники;
- создание инженерной методики проектирования ЭПП с ПЛКУ, разработка методики и программного обеспечения для автоматизированного определения параметров ЭПП и ПЛКУ.
- проведение экспериментальных исследований ЭПП с псевдолинейной коррекцией в контуре управления.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории автоматического регулирования и управления. При исследовании нелинейных систем использовался метод гармонической линеаризации, а так же специальные разработанные программы расчета на ЭВМ. Проверка полученных результатов осуществлялось методами математического моделирования на ЭВМ и натурного эксперимента на промышленных образцах цифровых систем следящих ЭПП.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований созданы, реализованы и испытаны псевдолинейные корректирующие алгоритмы с интегрирующими характеристиками, позволяющие повысить точность и быстродействие следящих автоматических и робототехнических систем электрогидравлических приводов. Использование материалов диссертации дает возможность проектировать и исследовать такие системы. Созданный на основе разработанной в диссертации методики проведения исследований электрогидравлических приводов отладочный стенд и его программное обеспечение позволяют проводить многосторонние автоматизированные испытания ЭПП, сократить сроки проектирования цифровой системы управления, выявлять отклонения от требований при изготовлении гидроприводов и могут быть использованы для создания системы автоматизированного контроля качества изготовления ЭПП.

Внедрение работы. Результаты диссертационной работы использовались и внедрены:

- в Научно-исследовательском институте приборостроения (г. Жуковский), при разработке цифровой системы управления высокоточного ЭПП и испытательного микропроцессорного стенда;
- в Научно-производственном объединении "Транат" (г. Минск), при создании натурной системы управления покрасочного робота "Контур ЭМ".

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на II Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов (г. Кострома, 1980 г.), на I Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов (г. Звенигород, 1984 г.), на Всесоюзной конференции "Технические средства изучения и освоения океана (г. Ленинград, 1985 г.), на Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов (г. Нарва, 1986 г.), на Всесоюзном совещании по робототехническим системам (г. Киев, 1987 г.).

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, перечня используемой литературы. Работа выполнена на 210 страницах, включая 122 страницы машинописного текста, 82 рисунка, 4 фотографий, 7 страниц списка литературы, 4 стр. приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели работы и задачи исследования, а так же приводится краткое содержание работы.

Первый раздел посвящен выбору основных требований к алгоритмам коррекции для высокоточных ЭПГ дроссельного регулирования, а также определению основных нелинейностей ЭПГ и анализу их влияния на точностные характеристики системы.

На рис. 1 представлена структурная схема ЭПГ дроссельного регулирования учитывающая его основные нелинейности. Учитывая сложность рассмотрения и анализа такой полной нелинейной модели ЭПГ был применен метод исследования, заключающийся в "обогащении" линейной модели ЭПГ нелинейными звеньями и на основании такого анализа определено влияние каждой выделенной нелинейности на точность. Приведенный в работе анализ статических составляющих ошибки ЭПГ от зоны нечувствительности и трения в золотниковом усилителе, трения в гидродвигателе, позволил сделать вывод о том, что статическая ошибка в герметичных ЭПГ определяется в основном зоной нечувствительности и величиной сухого трения в золотниковом усилителе.

Для компенсации влияния описанных нелинейностей и улучшения динамических и статических характеристик ЭПГ были рассмотрены следующие классические способы борьбы с зоной нечувствительности и сухим трением :



PMC. I

- включение в систему звена с переменным коэффициентом усиления;
- увеличение порядка астатизма в системе;
- введение осциллирующего перемещения золотника;
- введение местных отрицательных обратных связей;
- включение в систему нелинейных корректирующих устройств.

В дальнейшем был выбран и рассмотрен, как один из наиболее эффективных для ЭПП дроссельного регулирования, способ включения в систему последовательного нелинейного корректирующего устройства.

Приведенный анализ показал, что основными требованиями к алгоритмам коррекции высокоточных ЭПП следящих приводов являются:

- наличие интегрирующих свойств, позволяющих повышать порядок астатизма в системе, паряруя при этом статическую ошибку и неустойчивость параметров ЭПП;
- минимальный фазовый сдвиг, вносимый в систему;
- отсутствие скачков и разрывов при плавноменяющемся входном сигнале;

Учитывая противоречие между наличием интегрирующих свойств и малым вносимым фазовым сдвигом, решение данной проблемы возможно только в классе специальных нелинейных корректирующих устройств (НКУ), где нет жесткой связи между амплитудной и фазовой характеристиками.

Во втором разделе предложены принципы построения псевдолинейных корректирующих устройств с интегрирующими свойствами.

Реализация нелинейной коррекции, удовлетворяющей перечисленным в разделе 1 требованиям, основывается на применении ПЛКУ, структурная схема которого изображена на рис. 2. Принятые по схеме обозначения: D - оператор дифференцирования; X - блок перемножения. На выходе устройства сигнал получается как произведение выходных сигналов обеих ветвей:

$$y(t) = F(t) \cdot K_1 \cdot x(t), \quad (1)$$

причем, нелинейная функция $F(t)$ имеет вид:

$$F(t) = \int_{t_1}^t f(x) \cdot \frac{1}{T} dt, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f(x) &= 0 \text{ при } |x(t)| < \varepsilon_{\min}, \\ f(x) &= C \text{ при } |x(t)| > \varepsilon_{\min}. \end{aligned}$$

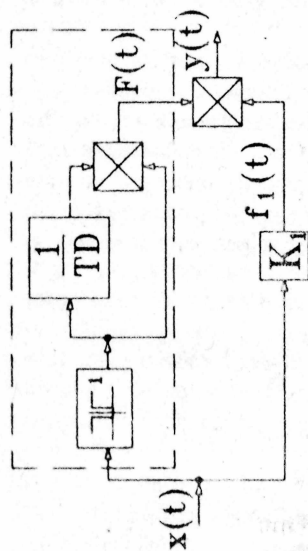


Рис. 2

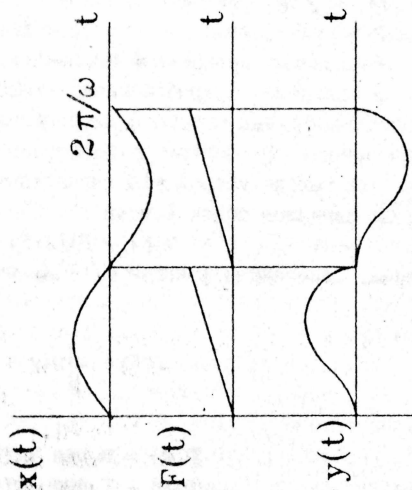
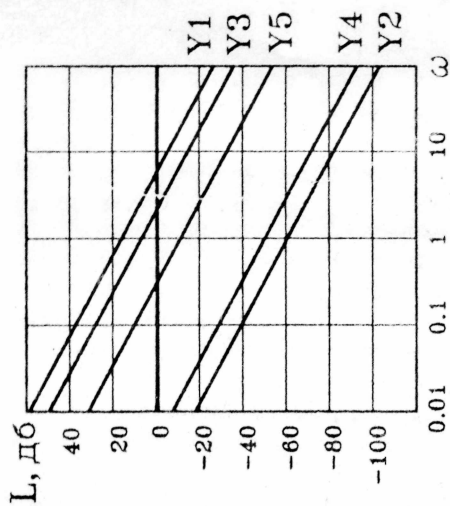


Рис. 3



φ , град

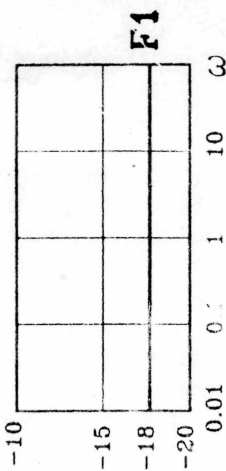


Рис. 4

$$F(t) = 0 \text{ при } f(x) = 0.$$

где C - постоянный коэффициент,

$\epsilon_{\min}$ - величина срабатывания порогового устройства.

С помощью метода гармонической линеаризации были проанализированы частотные характеристики такого устройства. Коэффициенты гармонической линеаризации в этом случае определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} q &= \frac{K_1 \cdot \pi}{2 \cdot T \cdot \omega}, \\ q' &= -\frac{K_1}{2 \cdot T \cdot \omega}. \end{aligned} \quad (3)$$

Фазовый сдвиг, вносимый рассматриваемым устройством постоянен и равен:

$$\varphi = \arctg\left(-\frac{K_1}{2 \cdot T \cdot \omega} \cdot \frac{2 \cdot T \cdot \omega}{K_1 \cdot \pi}\right) \approx -18^\circ. \quad (4)$$

В данных расчетах гармоники выше первой не учитывались. Как видно из выражения для коэффициентов гармонической линеаризации (3), они зависят только от частоты входного сигнала и не зависят от его амплитуды, что подтверждает псевдолинейный характер предложенного устройства. С учетом (3,4) линеаризованную передаточную функцию ПЛКУ запишем в виде:

$$W(j\omega) = (K/\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_{\text{плку}}}, \quad (5)$$

где

$$K = K_1 \cdot \frac{1}{T} \cdot 1,65, \quad \varphi_{\text{плку}} = -18^\circ.$$

Анализ выражения (5) показывает, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такого ПЛКУ соответствует звену типа интегратор, а фазовый сдвиг равен -18° , а не -90° , как у линейных интегрирующих устройств. В дальнейшем устройство такого типа будем называть нелинейным интегратором (НИ). Форма сигналов в характерных точках предложенного нелинейного интегратора представлены на рис.3. С помощью специально разработанного программного обеспечения частотные характеристики НИ также проанализированы с помощью ЗЕМ. Результаты этого моделирования приведены на рис. 4, что подтверждает вывод о наличии интегрирующих свойств и псевдолинейности ЛАЧХ. На рис.3 приняты следующие обозначения:

Y1..Y5 - модули амплитудно-частотной характеристики первой..пятой гармоник выходного сигнала ПЛКУ,

F1..F5 - фаза первой..пятой гармоники выходного сигнала ПЛКУ.

На основе принципа построения ПЛКУ, описанного выше, в зависимости от вида нелинейной функции $F(t)$ была реализована целая гамма корректирующих устройств с интегрирующими свойствами:

- нелинейное аperiodическое звено,
- нелинейный интегратор,
- нелинейный интегратор с управлением по знаку скорости,
- изодромное звено с нелинейным интегратором,
- нелинейный интегратор со степенной функцией.

Исследованы частотные характеристики перечисленных выше разработанных устройств, доказана независимость их коэффициентов гармонической линеаризации от амплитуды входного сигнала и наличие интегрирующих свойств.

В последнем подразделе второго раздела была проведена оценка фильтрующих свойств псевдолинейных корректирующих устройств с интегрирующими свойствами. Исследовались вопросы пропускания через предложенные ПЛКУ двухчастотного входного сигнала вида:

$$x = x_0 + B \cdot \sin(\omega t) \quad \text{или} \quad x = B \cdot \sin(\omega t) + B_1 \cdot \sin(\omega_1 t), \quad (6)$$

где x_0 - постоянный сигнал, $\omega_1 \gg \omega$.

При этом имеется в виду рассмотрение двух важных для практики случаев:

- входной периодический сигнал имеет постоянную составляющую,
- входной периодический сигнал имеет высокочастотную составляющую.

Фактически, это позволяет исследовать поведение системы с ПЛКУ при различных внешних воздействиях (движение с постоянной скоростью, движение с изменением скорости и ускорения входного сигнала, появление статического момента на выходном валу, уход нуля ЭГУ), а также при наличии помехи с датчика обратной связи.

В работе приведены результаты такого исследования как для разработанных так и для известных ПЛКУ. На рис. 5 и рис. 6 изображены зависимости коэффициента передачи и фазового сдвига вносимого в систему для ПЛКУ типа НИ (рис. 5) и для ПЛКУ с управлением по знаку скорости (рис. 6) от величины постоянного смещения X_0 во входном сигнале.

Анализ фильтрующих свойств ПЛКУ с интегрирующими свойствами при наличии постоянной или высокочастотной составляющих во вход-

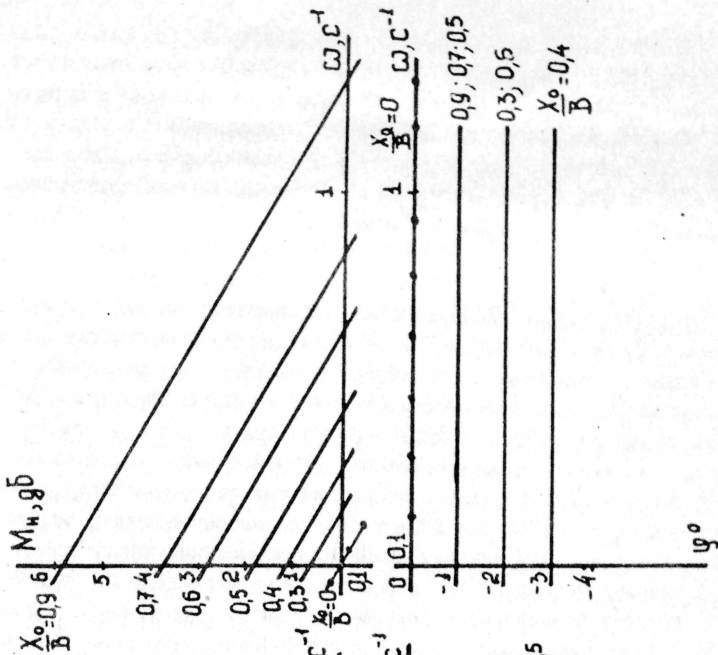


Рис. 5

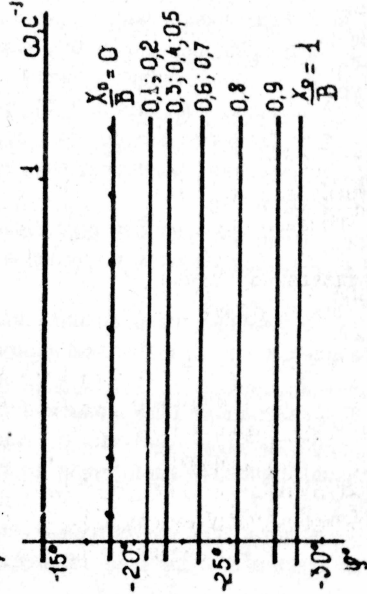


Рис. 6

ном сигнале показав, что у предложенных, а также известных ПЛКУ с интегрирующими свойствами частотные характеристики становятся зависимыми от соотношения постоянной X_0 и гармонической амплитуды X_1 составляющих входного сигнала. При этом коэффициент передачи и фазовый сдвиг растут с ростом постоянной составляющей, либо ПЛКУ теряют свои интегрирующие свойства при появлении высокочастотной составляющей входного сигнала. Такое изменение частотных характеристик предложенных ПЛКУ необходимо учитывать при синтезе системы.

В третьем разделе сформулированы основы синтеза ЭП с разработанными ПЛКУ, а также приведены методика расчета параметров ПЛКУ и требования к элементам и структуре цифровой системы с ПЛКУ.

Показано, что последовательность синтеза ЭП с ПЛКУ с использованием аппарата ЛАФЧХ принципиально не отличается от синтеза систем с линейными корректирующими устройствами. Был проведен сравнительный анализ вариантов коррекции типичного электрогидравлического привода на основе лопастного неполноповоротного гидроквadrанта с одинаковыми динамическими и статическими характеристиками различными типами ПЛКУ, рассмотренными в разделе 2. Сравнение результатов проведенного синтеза систем с одинаковыми параметрами неизменяемой части, скорректированных различными типами ПЛКУ и ПИ-регулятором показало, что предложенные ПЛКУ обеспечивают выигрыш в точности для низкоскоростных систем в 2..3 раза, а для высокоскоростных систем в 4..6 раз по сравнению с ПИ-регулятором. Для следящих систем при отработке сложных гармонических сигналов наиболее высокую точность обеспечивает НИ с управлением по знаку скорости.

Учитывая особенности предложенных ПЛКУ, в работе сформулированы и описаны способы построения эффективной системы управления с ПЛКУ:

- подавление резонансных явлений в ЭП с помощью включения дополнительного последовательного линейного апериодического звена;
- охватывание ПЛКУ прямой параллельной связью;
- построение системы с комбинированным управлением путем введения компенсирующей связи по скорости управляющего воздействия;
- защита ПЛКУ от случайных сбоев в цепи ошибки путем фильтрации сигналов с датчика обратной связи;

- постановка ограничения в амплитудный канал ПЛКУ;
- управление остановом выходного сигнала с интегратора ПЛКУ для устранения релаксационных колебаний в системе.

Цифровая реализация ПЛКУ имеет свои особенности, связанные как с общими особенностями дискретных систем, так и со спецификой, присущей только ПЛКУ. В работе показано, что конкретные детали цифровой реализации зависят от конфигурации ЭВМ и периферийного оборудования, имеющегося программного обеспечения.

В разделе представлены требования к выбору разрядности преобразователей в цифровой системе управления. Показано, что из-за нелинейностей ЭПП происходит потеря разрядности выходного преобразователя:

$$m = m_0 \cdot \Delta m_1 \cdot \Delta m_2 \cdot \Delta m_3, \quad (7)$$

где m_0 - разрядность выходного преобразователя, определенного без учета нелинейностей ЭПП,

Δm_1 - потери разрядности, обусловленные зоной нечувствительности в ЭГУ,

Δm_2 - потери разрядности, обусловленные трением в ГД,

Δm_3 - потери разрядности из-за превышения напряжения на усилителе мощности напряжения насыщения обмоток ЭМП.

Это позволяет сделать вывод, что дискретность выходного преобразователя, наличие нелинейностей в ЭПП сужает диапазон регулирования по скорости. Для расширения этого диапазона необходимо выбирать более высокоразрядный выходной преобразователь.

Наличие временной задержки в цифровой системе ведет к дополнительному фазовому запаздыванию, которое необходимо учитывать особенно для высокочастотных систем.

Фазовое запаздывание вносимое ЭВМ $\varphi_{ЭВМ}$ на частоте f гармонического сигнала при частоте замыкания f_T можно вычислить по формуле: $m1.0$

$$\varphi_{ЭВМ} = - 180^\circ \cdot (f/f_T) \quad (8)$$

Формула получена для идеального случая без учета шума квантования и ошибок квантования по уровню.

В разделе приведены рекомендации по следующим вопросам реализации цифровых систем управления с ПЛКУ:

- численные аспекты реализации;
- дискретная реализация дополнительных связей для ПЛКУ;
- обработка информации с датчиков;

- вычислительные задержки, выбор величины такта квантования.

Для определения параметров цифровых ПЛКУ приведены разностные уравнения определяющие как полный сигнал описанных в разделе 2 ПЛКУ, так и рекуррентные формулы.

В конце раздела показано, что ПЛКУ возможно легко комбинировать с линейными корректирующими звеньями. Рассмотрен способ коррекции ПЛКУ с линейным апериодическим звеном и приведены зависимости позволяющие выбрать оптимальные, с точки зрения точности, параметры линейного апериодического звена.

Четвертый раздел состоит из трех подразделов. В первом подразделе приведена методика снятия экспериментальных статических характеристик ЭТП. Особенностью данной методики является использование безразборных методов определения параметров ЭТП ориентированных на применение вычислительных средств. Показано как из полученных экспериментальных статических характеристик можно получить основные параметры ЭТП, используемые как для проектирования следящих систем, так и для определения возможных неисправностей.

Разработанная в работе методика автоматизированного исследования ЭТП и её программная реализация средствами микроЭВМ позволяют сократить время проектирования цифровых систем управления ЭТП.

Во втором подразделе приведено описание аппаратных и программных возможностей разработанного двухпроцессорного испытательного комплекса обеспечивающего автоматизацию и ускорение исследований ЭТП, исследования экспериментальных характеристик ЭТП, а так же создания и отладки алгоритмов цифровых корректирующих устройств.

В третьем подразделе представлены результаты экспериментальных исследований штатных образцов ЭТП с разработанными ПЛКУ.

Рассмотрены результаты проектирования цифровых систем управления сварочным роботом РС-1, контурным покрасочным роботом "Контур ЭМ", трехступенным приводом бортовой радиолокационной станции, электрогидравлическим приводом РА-8Э.

Результаты экспериментальных исследований полностью подтвердили правильность теоретических исследований представленных в разделах 2 и 3, а так же эффективность использования предложенных ПЛКУ с интегрирующими свойствами.

Например, на рис. 7 представлены сравнительные переходные процессы динамической ошибки в трехступенном электрогидравлическом

исходные данные: нелинейный интегратор, пи-регулятор
 $A=1000$ $W=0,5017$ $TI=6$ $TIK=0,01993$ $TI2=60$

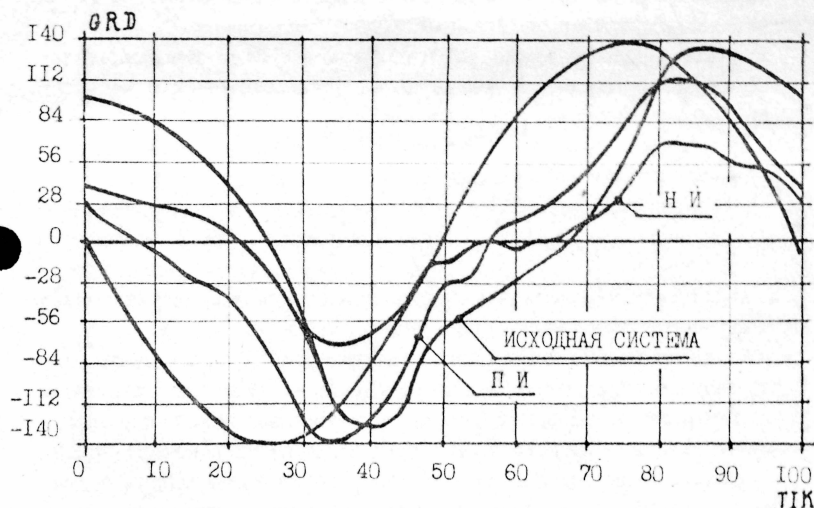


Рис. 7а

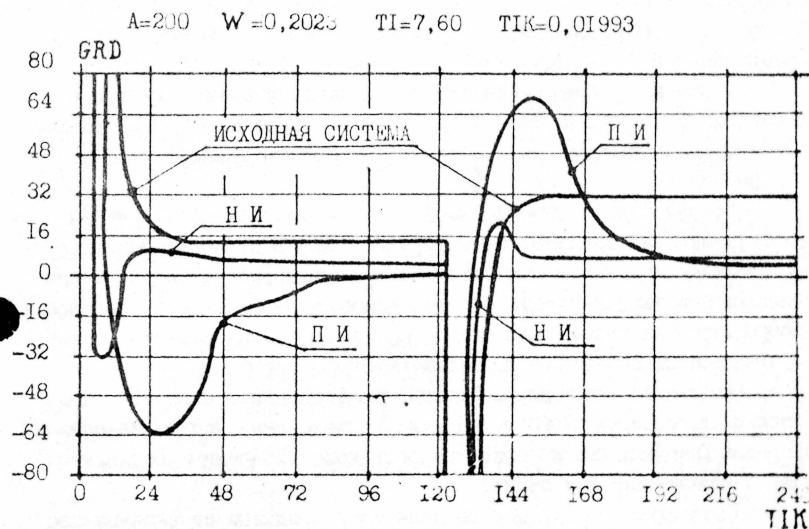


Рис. 7б

приводе для исходной, скорректированной линейными (ПИ- регулятор) и разработанными ПЛКУ (НИ) средствами коррекции систем. На рис. 7а представлены реакция на синусоидальное воздействие, а на рис. 7б реакция на ступеньку.

Применение разработанных ПЛКУ позволяет в 2-3 раза увеличить точностные динамические характеристики ЭПГ по сравнению с известными средствами линейной коррекции.

В приложении приведены документы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие новые научно-технические результаты:

1. Проведен анализ основных нелинейностей ЭПГ дроссельного регулирования и из их числа выделены наиболее влияющие на точностные показатели работы ЭПГ. На базе проведенного анализа сформулированы основные требования к корректирующим устройствам ЭПГ.

2. Разработаны и доведены до практической реализации новые способы построения псевдолинейных корректирующих алгоритмов с интегрируемыми характеристиками, обеспечивающие повышение динамической точности и быстродействия следящих систем и практически не вносящих фазового запаздывания.

3. Созданы математические модели псевдолинейных интегрирующих алгоритмов и разработаны методики исследования их частотных свойств в различных режимах работы и определения параметров высших гармоник на выходе ПЛКУ.

4. Разработана и опробована на практике методика инженерного синтеза следящих систем с учетом нелинейностей их характеристик базирующаяся на использовании ПЛКУ различных типов и основанная на применении метода гармонической линеаризации логарифмических частотных характеристик.

5. Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что применение ПЛКУ в следящих ЭПГ обеспечивает повышение его точностных характеристик в 2 - 3 раза по сравнению с использованием известных линейных средств коррекции, причем без ухудшения динамических показателей системы.

6. Предложена методика и комплекс аппаратно-программных средств для автоматизированного определения параметров ЭПГ, ПЛКУ

и всей следящей системы в целом.

На основании полученных в работе результатов сделаны общие выводы и рекомендации.

1. Применение разработанных ПЛКУ с интегрирующими характеристиками в следящих системах, построенных на базе ЭП, позволяет создавать высокоточные системы автоматического регулирования, что расширяет сферу применения ЭП. При этом улучшение точностных характеристик достигалось более простым и дешевым с точки зрения структуры системы способом за счет отсутствия датчиков параллельных корректирующих устройств.

2. Рассмотренный высокоточный ЭП с ПЛКУ обладает нелинейными частотными свойствами. При проектировании системы управления ЭП с ПЛКУ с интегрирующими свойствами необходимо применение специальных средств для улучшения фильтрующих свойств ПЛКУ и защита алгоритма от сбоев в канале ошибки.

3. Разработанная в работе методика автоматизированного исследования ЭП с ПЛКУ и ее программная реализация средствами микро-ЭВМ позволяет сократить время проектирования цифровых систем управления высокоточных ЭП на этапе создания их программного обеспечения.

Результаты диссертации отражены в следующих работах.

1. Житков В.В., Кропотов А.Н., Чельшев В.А. Нелинейные законы управления в следящих приводах промышленных роботов // Роботы и робототехнические системы: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Челябинск, 1983. - С. 62-63.

2. А.С. 1076870 СССР, МКИ³ G 05 B 5/1. Псевдолинейное корректирующее устройство для системы управления. / Л.Г. Агейков, В.В. Житков, А.Н. Кропотов и др. (СССР). - N 3513085/18-24, Заявлено 15.11.82; Опубл. 28.02.84 //Б.И. - 1984 - N 8.

3. Кропотов А.Н., Кузякин О.В., Яковлев В.Д. Нелинейные алгоритмы управления подводными манипуляторами //Технические средства изучения и освоения океана: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Ленинград, 1985. - С.86.

4. Житков В.В., Кропотов А.Н., Скобелев М.М. Методы повышения точности электрогидравлических манипуляторов // Промышленные роботы и гибкие автоматизированные производства: Тез. докл. Всесоюз. школы - семинара молодых ученых и специалистов. - Нарва,

1986. - С. 124- 127.

5. Проблемы управления промышленными роботами / В.Б. Житков, Н.А. Лакота, А.Н. Кропотов, В.А. Чельшев // Вклад наук в автоматизированное малолотное производство: Тез. докл. международной конференции. - Карл-Маркс-Штадт, 1986. С. 84-86.

6. Опыт проектирования контурных систем управления для электрогидравлических приводов / И.И. Зайченко, А.Н. Кропотов, М.М. Скобелев, В.И. Скобцов // Всесоюзное совещание по робототехническим системам: Тез. докл. - Киев; 1987. - Ч.1. - С7 201-203.

7. Разработка адаптивных систем управления электрогидравлическими приводами с низким механическим резонансом: Отчет о НИР / МЭТУ, Руководитель: Л.Д. Нечаев. - М-7-58, ГР 02870082512, инв. N 03870000671, М., 1987. - С. 25-47.

8. А.С. 1386954 СССР, МКИ³ G 05 B 5/01. Нелинейное корректирующее устройство / Е.М. Борисов, В.Б. Житков, В.А. Чельшев, А.Н. Кропотов и др. (СССР). - N 4095115/24-24, Заявлено 19.05.86; Оpubл. 07.04.88 // Б.И. - 1988. - N 13.

9. А.С. 1668748 СССР, МКИ³ F 15 B 19/00. Способ безаварного контроля дроссельного гидропривода с золотниковым распределителем/ М.М. Скобелев, А.Н. Кропотов, В.А. Чельшев и др. - N 4653013/29, Заявлено 22.02.89; Оpubл. 07.08.91 //О.И. - 1991.- N29.

10. Патент 2012029 РФ, МКИ⁵ G 05 B/01. Нелинейное корректирующее устройство / А.Н. Кропотов, М.М. Скобелев, В.А. Чельшев, Г.В. Вондарев - N5006190/24, Заявлено 04.09.91; Оpubл.30.04.94//О.И. - 1994.- N 8.

11. Скобелев М.М., Чельшев В.А., Кропотов А.Н. Прецизионные самонастраивающиеся системы с псевдолинейными интегрирующими алгоритмами коррекции резервированных электрогидравлических сервоприводов // Оборонная техника (М.), 1994.- N 1. - С. 64-68.

12. Чельшев В.А., Кропотов А.Н., Скобелев М.М. Микропроцессорные системы управления высокоточными электрогидравлическими следящими приводами // Юбилейная конференция посвященная 165 - летию МГТУ им. Н.Э.Баумана: Тез. докл. научно-технической конф. - Москва, 1995. - Ч1.- С. 176.

