

и 87300

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана

---

На правах рукописи

Сосновский Николай Геннадьевич

УДК 62-522

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР ПРАКТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫХ  
РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВODOB

05.02.03 - Системы приводов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Носов*

Москва

1993

---

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена  
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного  
Знамени Государственном техническом университете  
им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель - д.т.н., профессор Попов Д.Н.

Официальные оппоненты - д.т.н., профессор Ермаков С.А.,

к.т.н. Стобецкий В.Н.

Ведущее предприятие - НИИСУ

Защита диссертации состоится "31" мая 1993 г.  
на заседании специализированного Совета К.053.15.06 в Московс-  
ком ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Тру-  
дового Красного Знамени Государственном техническом универси-  
тете им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.  
Э. Баумана.

|                |      |
|----------------|------|
| Ваши отзывы    | ЮСИМ |
| высылать по у  |      |
| Желающие       | ЭННО |
| известить Сове | ИМЯ  |
| председателя С |      |
| Телефон д.     |      |

Авторефера

Ученый сек|  
специализи|  
к.т.н., доц

Подписано к  
Заказ 240

1181300

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение современных задач автоматизации и механизации разнообразных процессов требует создания машин и транспортных средств с оптимальными системами управления. Применение гидроприводов в таких технических системах является одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности машин и получения качественно новых их характеристик, что обусловлено прежде всего такими преимуществами гидроприводов, как малые габариты и масса при высокой энергоемкости, высокая точность, большое быстродействие, надежность, широкий диапазон скоростей движения исполнительных органов.

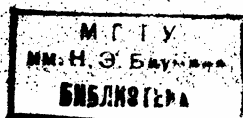
В системах автоматического управления (САУ) наиболее широкое применение получили электрогидравлические приводы (ЭГП) с дроссельным регулированием, в связи с чем в данной работе рассмотрен именно этот класс приводов.

Номенклатура гидроприводов роботов и манипуляторов, станков и систем автоматизации технологических процессов, систем управления летательными аппаратами и других изделий машиностроения постоянно увеличивается, расширяются их функции и растут требования к характеристикам. Статические и динамические характеристики ЭГП должны также быть стабильными при изменении условий эксплуатации.

Для создания совершенных систем управления энергетических установок, мобильных машин, роботов и манипуляторов, необходимо решение ряда задач, одна из которых состоит в разработке методов проектирования оптимальных по нескольким показателям качества ЭГП.

Развитие микроэлектроники, сопровождающееся внедрением микропроцессоров и ЭВМ, позволяет создавать ЭГП практически с любыми функциональными свойствами. При этом могут быть реализованы новые концепции выбора структуры гидроприводов, например, на основе наблюдателя состояния, электронной самонастраиваемой модели привода и других перспективных методов управления процессами.

Технико-экономические и эксплуатационные характеристики ЭГП могут быть улучшены за счет совершенствования схем и оптимизации параметров электронных регуляторов, встраиваемых в



контур управления привода, что указывает на актуальность проблемы оптимального проектирования структуры и параметров ЭГП с электронными регуляторами.

Цель работы – создание методики выбора структуры и параметров электронных регуляторов для оптимизации по нескольким показателям качества электрогидравлических следящих приводов с дроссельным регулированием.

Методы исследования. Основные задачи решались в работе теоретическими и экспериментальными методами. Теоретические исследования базируются на использовании основных положений гидродинамики, механики и теории автоматического управления. При изучении протекающих процессов как в отдельных элементах, так и во всем гидроприводе в целом, применялись методы математического моделирования.

Оптимизация структуры и параметров электронных регуляторов базировалась на интегральных критериях качества и пакете прикладных программ МОДС. При расчете на ЭВМ математических моделей ЭГП применялись также подпрограммы с использованием методов Рунге-Кутты и Гира.

Экспериментальные исследования проводились на специальном стенде для испытания ЭГП и его элементов.

Научная новизна. Разработана стратегия практической оптимизации структуры и параметров электронных регуляторов для ЭГП с дроссельным регулированием. Научной новизной разработки являются:

- разных уровней сложности математические модели ЭГП общепромышленного назначения;
- алгоритмы оптимизации электронных регуляторов по нескольким критериям качества с учетом технических требований к ЭГП;
- методика определения оптимальной структуры электронных регуляторов ЭГП.

Практическая ценность работы. Полученные математические модели ЭГП и его элементов, алгоритмы и программы оптимизации ориентированы на применение в САПР для:

- расчета статических и динамических характеристик ЭГП;
- выбора в диалоге конструктора с ЭВМ различных электронных регуляторов и их оптимальных параметров на стадии проекти-

рования ЭГП.

Методика расчета использована при выборе структуры и параметров имитаторов ЭГП, заменяющих реальные приводы при исследовании на стендах нестационарных процессов в сложных гидросистемах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением обоснованных допущений, принятых при математическом моделировании как отдельных элементов, так и всего ЭГП. Кроме того, результаты расчетов процессов, протекающих в ЭГП и его отдельных элементах подтверждены экспериментами, проведенными с использованием современных средств измерения, имеющих свидетельства о метрологической аттестации.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при создании базовых комплектных электрогидравлических следящих приводов дроссельного регулирования для промышленных роботов, а также при разработке и создании полунатурного стенда с имитаторами рулевых приводов для испытания гидросистемы нового самолета.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научных семинарах кафедры "Гидромашин, гидропривод и гидропневмоавтоматика" МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1985-1988 гг.; на конференции молодых ученых и специалистов в МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1985 г.; на зональной конференции "Проектирование и эксплуатация промышленных гидроприводов и систем гидропневмоавтоматики", г. Пенза, июнь 1986 г.; на городской конференции молодых ученых и специалистов в ИГиМ АН СССР "Роботы и их применение в народном хозяйстве", г. Москва, май 1987 г.; на Всесоюзном межотраслевом научно-техническом совещании в ЛМИ "Приводы - 90", г. Ленинград, июнь 1990 г.; на Всесоюзном совещании по робототехническим системам, Институт проблем механики АН СССР, г. Геленджик, октябрь 1990 г.; на Всесоюзной конференции Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики, г. Киев, июнь 1991 г.

Публикации. По материалам диссертации имеются десять опубликованных работ, один отчет по НИР, одно авторское свидетельство и одно положительное решение.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений и содержит

127 страниц машинописного текста, 9 таблиц, 60 рисунков, список литературы из 83 наименований и 72 страницы приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулирована цель работы и кратко изложены пути ее достижения.

Первая глава носит обзорный характер. По материалам отечественных и зарубежных авторов рассмотрены области применения и технический уровень ЭГП различного назначения, а также сделан обзор электрогидравлических усилителей (ЭГУ). Рассмотрены технические характеристики лучших на сегодняшний день ЭГП и ЭГУ, их тенденции развития и перспективный уровень.

Далее рассмотрены факторы, вызывающие нестабильность характеристик ЭГП. Среди внешних и параметрических возмущений наибольшее значение имеют изменения давления питания и температуры рабочей жидкости, а также изменение внешней нагрузки на выходное звено ЭГП.

Приведен краткий обзор и анализ состояния методов регулирования гидроприводов и стабилизации их характеристик. Среди них можно выделить:

- пассивную коррекцию;
- построение робастных систем;
- построение адаптивных систем.

К первым методам обычно относят термостатирование отдельных элементов, применение защитных экранов, реулировку или замену износившихся элементов и т.п. Второй вид методов основан на введении в контур управления электронных типовых регуляторов, регуляторов состояния с наблюдателями, регуляторов с переменной структурой. Третий метод связан с применением в системах самонастраивающихся регуляторов.

Проведенный обзор и анализ литературных источников, посвященных вопросам применения и развития ЭГП, их достоинствам и недостаткам, а также способам регулирования гидроприводов показал, что задачи синтеза структуры и параметров электронных регуляторов ЭГП в полной мере еще не решены и требуют дальнейшего рассмотрения.

В связи с этим в диссертационной работе выделены следующие этапы:

1. Математическое моделирование процессов в ЭГП с дроссельным регулированием с учетом действия внешних и параметрических возмущений.
2. Экспериментальные исследования статических, динамических и точностных характеристик гидропривода, подтверждение адекватности цифрового моделирования гидромеханических процессов реальным процессам, протекающим в ЭГП.
3. Разработка стратегии практической оптимизации ЭГП, создание алгоритмов и программных модулей для выбора структуры и параметров электронных регуляторов в зависимости от требований, предъявляемых к характеристикам ЭГП.
4. Проведение численных экспериментов на ЭВМ с целью изучения свойств различных проектных вариантов ЭГП с типовыми регуляторами, с регуляторами состояния, с самонастраивающимися регуляторами и проверка результатов оптимизации.
5. Составление рекомендаций по выбору структуры, параметров и выбору разработанных программ для проектирования практически оптимальных регуляторов ЭГП.

Во второй главе разработаны математические модели ЭГУ и ЭГП, ориентированные на решение задач оптимизации. Для получения указанных моделей были рассмотрены известные из литературных источников подходы к описанию ЭГП с дроссельным регулированием и отобраны те из них, которые наилучшим образом отвечают поставленным задачам. Базовыми образцами для исследования ЭГУ служили:

- ЭГУ с механической обратной связью (ОС);
- ЭГУ с неединичной гидромеханической ОС.

Математические модели основаны на уравнениях, определяющих расходы жидкости через дроссельные устройства, уравнениях неразрывности течения, состояния рабочей жидкости, уравнениях напряжений в электрических цепях и движения отдельных механических звеньев. Модели также содержат уравнения, описывающие процессы в электромеханических преобразователях и соотношения, учитывающие ОС.

В диссертации сделан акцент на два вида математических моделей. Первый вид - это линеаризованная модель, в которой

ЭГУ представлен колебательным звеном, а точка линеаризации выбрана при  $x_3 = 0$ ,  $p_n = 0,1 p_n$ . Структурная схема этой модели представлена на рис. 1; по ней предлагается проводить оптимизацию структуры и параметров ЭГП, что дает существенную экономию времени счета на ЭВМ.

Полученная в результате более подробного математического описания ЭГП его нелинейная модель предназначена для уточнения регламентированных показателей качества и характеристик оптимизированного по линейной модели ЭГП. Структурная схема такой модели представлена на рис. 2, где передаточная функция ЭГУ  $W_{ЭГУ}$  имеет четвертый порядок. По сравнению с известными нелинейными моделями ЭГП - предложенная математическая модель требует меньше затрат машинного времени.

В структурных схемах применены следующие обозначения:

$y$ ,  $u_{220}$  - координата и задаваемое положение штока гидроцилиндра (ГЦ);  $K_{uy}$  - коэффициент передачи электрической ОС (ЭОС) по положению штока ГЦ;  $W_{рег}$  - передаточная функция электронного регулятора (если регулятор ЭГП представлен пропорциональным звеном, то  $W_{рег} = K_n$ , где  $K_n$  - коэффициент усиления пропорционального регулятора);  $T_i$ ,  $\zeta_i$  - постоянная времени и коэффициент собственного демпфирования ЭГУ;  $K_{ст}^p$ ,  $T$  - коэффициент передачи и постоянная времени по внешней нагрузке;  $K_{гп} = K_{ЭГУ} / T_{гп}$ , где  $K_{ЭГУ}$  - коэффициент усиления ЭГУ,  $T_{гп}$  - гидравлическая постоянная времени ЭГП;  $T_n$ ,  $\zeta_n$  - механическая постоянная времени и коэффициент собственного демпфирования ГЦ;

$U_{220}$  - электрическое напряжение, подаваемое на ЭГП;  $x_3$  - положение золотника ЭГУ;  $p_n$ ,  $p_n$  - давление питания и перепад давлений в полостях ГЦ;  $z_1$ ,  $z_2$  - параметрические возмущения, вызывающие неустойчивость характеристик ЭГП;  $k_3$  - удельная проводимость окон золотникового распределителя ЭГУ;  $F_n$  - рабочая площадь поршня ГЦ;  $k_{тр}$  - коэффициент вязкого трения;  $m$  - приведенная масса нагрузки;  $P_n$  - сила, приложенная к штоку ГЦ;

$P_{тр,0}$  - величина сухого трения.

При построении математических моделей принято, что колебательность линейной модели при любых входных воздействиях несколько больше колебательности нелинейной модели.

Принятое здесь математическое описание ЭГП требует привлечения экспериментальных зависимостей для уточнения парамет-

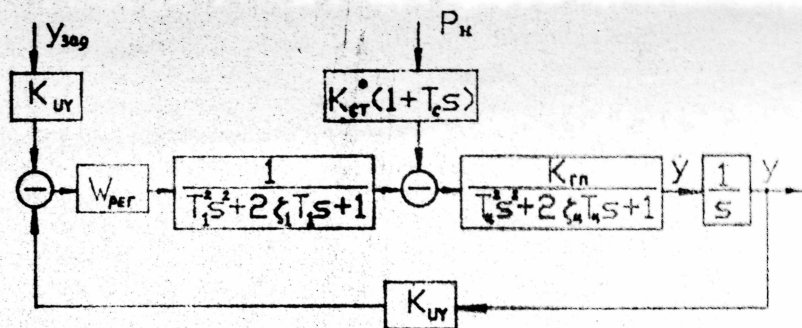


Рис. 1

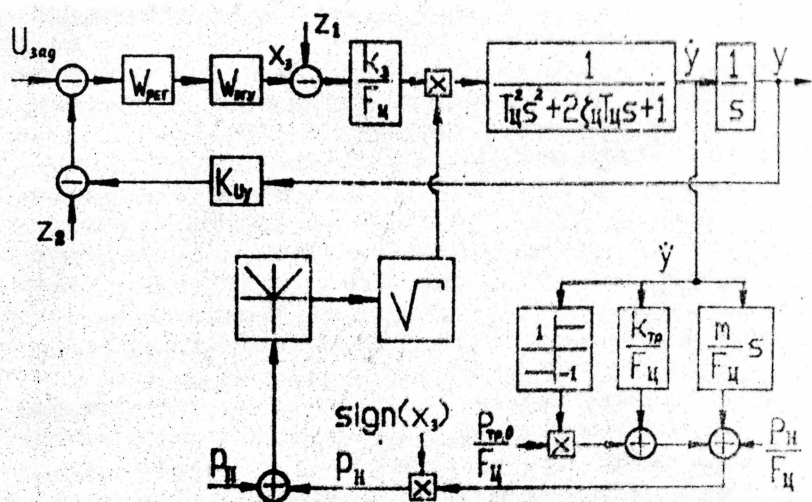


Рис. 2

ров, коэффициентов передачи и постоянных времени гидропривода, поэтому уточнение полученных математических моделей производилось путем их параметрической идентификации по экспериментальным статическим и динамическим характеристикам ЭГУ и ЭГП.

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований характеристик ЭГУ и ЭГП. Экспериментальный ЭГП состоит из ЭГУ, силового ГЦ и ЭОС с датчиком перемещения штока ГЦ. Расположенный вертикально ГЦ, нагружающее его устройство и датчик ЭОС закреплены на одной станине. Стенд содержит также насосную станцию, блок управления и регистрирующую аппаратуру.

Оценка погрешностей измерений физического эксперимента проводилась в соответствии с ГОСТ8.207-76.

В процессе работы были проверены различные способы определения характеристик, в том числе и динамических характеристик ЭГУ. Проведенные исследования показывают, что определение фазовых сдвигов, возникающих в ЭГУ между входным и выходным сигналами может быть осуществлено без измерения переменных во времени значений расхода или перемещения золотника. Выходные каналы при этом соединены через дроссель, а в качестве выходной величины регистрируется перепад давлений в каналах ЭГУ.

Динамические свойства ЭГП, как элемента САУ, можно исследовать с помощью имитатора нагрузки на выходное звено. Применение электронного имитатора нагрузки в контуре управления ЭГП обеспечивает с необходимой точностью реальный переходный процесс по положению выходного звена. Однако при этом перепад давления в полостях исполнительного гидродвигателя получается значительно меньшим, чем при реальной нагрузке. Рассмотренный метод моделирования целесообразно использовать при проверке внешних (вход-выход) динамических характеристик ЭГП, а также при моделировании систем управления с такими приводами. Метод был использован при исследованиях, связанных с проектированием ЭГП для сварочных роботов.

Сравнение частотных характеристик ЭГУ и переходных процессов ЭГП, полученных в результате экспериментов и моделирования на ЭВМ, позволило сделать вывод об адекватности разработанных математических моделей реальным устройствам.

Введение ЭОС в контур управления ЭГУ улучшает его характеристики и дублирует внутреннюю ОС, то есть повышает надеж-

ность, поскольку при выходе из строя одной из ОС - ЭГУ остается работоспособным, хотя и с худшими характеристиками.

В связи с тем, что параметрические возмущения и вызванное ими нарушение стабильности характеристик ЭГУ и ЭГП плохо поддается расчету, были выполнены соответствующие экспериментальные исследования.

При предварительных испытаниях ЭГУ и ЭГП с электронными типовыми регуляторами наблюдалось улучшение стабильности их характеристик и уменьшение дрейфа нуля. Более глубоким исследованием ЭГП с различными электронными регуляторами методом численного эксперимента посвящена следующая глава данной работы.

В четвертой главе разработана методика выбора структуры и параметров электронных регуляторов, встраиваемых в контур управления ЭГП. Предлагаемый алгоритм структурно-параметрической оптимизации гидропривода включает в себя два этапа. На первом этапе, после анализе технического задания (ТЗ) на проектирование ЭГП определенного назначения, формируются функциональные ограничения или требования к характеристикам привода, а также определяются структура, конструкции устройств и силовой энергетический канал гидропривода. Далее составляется более полная математическая модель ЭГП, исходя из которой формируется упрощенная нелинейная модель привода. После вычисления коэффициентов и постоянных времени привода рассчитываются силовая, энергетическая и статические его характеристики, которые необходимо проверить на соответствие ТЗ. Этот этап проектирования можно отнести к первому уровню оптимизации гидропривода. Если полученные характеристики соответствуют требованиям ТЗ, то можно переходить ко второму уровню оптимизации. Если нет, то заменяются либо составляющие ЭГП устройства, либо изменяются их размеры, либо изменяется структура привода.

Далее математическая модель ЭГП линеаризуется. Эта линеаризованная модель ЭГП и является основой для его оптимизации. На втором уровне оптимизации осуществляется выбор структуры регуляторов из известного множества решений для обеспечения требуемых динамических и точностных характеристик ЭГП. Затем формализуются показатели качества. При оптимизации ЭГП по одному критерию качества выбирается функционал, например описан-

ный ниже ITAE, и ищется минимум этого функционала при изменении параметров выбранного регулятора с введением ограничений по обусловленным ТЗ показателям качества.

После нахождения оптимальных значений параметров регуляторов и моделирования ЭГП анализируются показатели качества последнего и проверяется их соответствие требованиям ТЗ. При неудовлетворительном результате выбирается более сложная структура регулятора и ЭГП вновь оптимизируется. Если показатели качества ЭГП удовлетворяют поставленным требованиям, то производится расчет гидропривода по нелинейной математической модели и уточняются показатели качества, а при необходимости и параметры регуляторов.

Если перебор известных структур регуляторов не дает удовлетворительных результатов, то необходимо перейти на первый уровень оптимизации, где изменяется структура и конструкции устройств, составляющих ЭГП. Далее вся процедура оптимизации повторяется до тех пор, пока будут удовлетворены требования ТЗ.

Описанный алгоритм синтеза ЭГП реализован с помощью пакета прикладных программ МОДС (моделирования и оптимизации динамических систем). В этом пакете использованы идеи структурного программирования, что позволяет непосредственно по структурной схеме исследуемого ЭГП выполнять моделирование, параметрическую оптимизацию, производить статический и частотный анализ.

Критерием оптимизации выбран известный из теории управления функционал: интеграл от произведения времени  $t$  переходного процесса на абсолютную динамическую ошибку (ITAE):

$$I = \int_0^{\infty} t |y_{\text{зад}} - y| dt.$$

Если целью управления ЭГП считать переходной процесс с наименьшей колебательностью, то предложенный функционал должен быть близок к минимуму. При оптимизации ЭГП по функционалу ITAE можно также накладывать ограничения на время переходного процесса или на перерегулирование.

При оценке качества ЭГП рассматривались следующие показатели:

- добротность;
- максимальная динамическая ошибка при переходном про-

цессе (перерегулирование).  $\delta$  :

- время переходного процесса (время "входа" в 3-х или 5-ти процентную трубку),  $t_{\text{вх}}$ ;

- показатели частотных характеристик: частота входного сигнала при падении амплитуды выходного сигнала на 3 дБ,  $f_{-3\text{дБ}}$  ;

- статическая жесткость - величина, обратная податливости, вводимая для оценки "просадки" выходного звена под воздействием внешней силы; в общем случае находится из амплитудной частотной характеристики динамической жесткости на низких частотах,  $C_F$ ;

- динамическая жесткость, характеризующая смещение выходного звена в зависимости от приложенной к нему переменной во времени внешней силы, выражается логарифмическими амплитудной и фазовой характеристиками (ЛАХ и ЛФХ);

- коэффициенты чувствительности функционала качества ИТАЕ к вариациям наиболее характерных параметров гидропривода. Наиболее существенные неустойчивые параметры ЭГП можно привести к постоянной времени  $T_{\text{г}}$ , коэффициентам  $\zeta_{\text{г}}$  и  $K_{\text{гп}}$  математической модели гидропривода. Оценить влияние каждого параметра на выходную переменную (функционал ИТАЕ) позволяет функция чувствительности, определяемая как частная производная от выходной переменной по параметру, в предположении стационарности последнего. Коэффициент чувствительности  $Z_i$  определяется в точке  $x_i = 0$  ( $x_i$  - вариация 1-го параметра):

$$Z_i^1(t) = \left. \frac{\partial I(t, x)}{\partial x_i} \right|_{x_i=0}$$

Методом численного эксперимента был исследован ЭГП с различными видами электронных регуляторов: типовых пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД), регуляторов с переключающейся структурой, регуляторов состояния с наблюдателями Ливенбергера, самонастраивающихся регуляторов. На основе представленных в диссертации результатов сделаны количественные оценки различных концепций регулирования. На рис.3 показаны графики переходных процессов положения выходного звена ЭГП, полученные при численном эксперименте с различными электронными регуляторами. Кривая 1 соответствует переходному процессу в

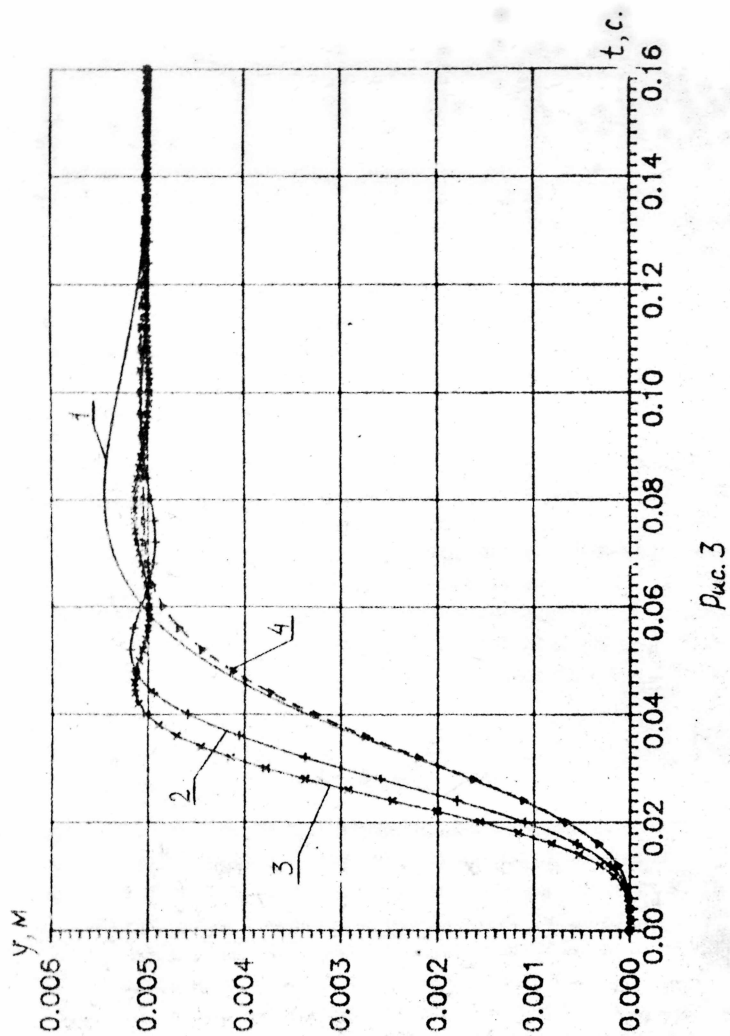


Рис. 3

ЭГП с оптимальным пропорциональным регулятором (тип П), кривая 2 - переходному процессу с оптимальным пропорционально-дифференцирующим регулятором (тип ПД), кривая 3 - с оптимальным регулятором состояния, а кривая 4 - с самонастраивающимся регулятором с эталонной моделью. Ниже дана таблица показателей качества ЭГП с различными электронными регуляторами, содержащая результаты численного эксперимента по линейной модели гидروпривода. Эти показатели взяты по отношению к принятым за единицы показателям качества ЭГП с П-регулятором.

Таблица

| Регулятор                                                   | ИТАЕ,<br>1/с           | $C_r$ ,<br>Н/мкм | $\sigma$ ,<br>% | $t_{n/n}$ ,<br>мс | $f_{1-3\sigma}$ ,<br>Гц | $Z_z^I$                |                       |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
|                                                             |                        |                  |                 |                   |                         | $T_u$                  | $\Sigma_u$            |
| П<br>$K_n=1.412$                                            | 1<br>$5,22 \cdot 10^4$ | 1<br>36,9        | 1<br>9,0        | 1<br>113,5        | 1<br>10,1               | 1<br>$3,98 \cdot 10^4$ | 1<br>$9,2 \cdot 10^4$ |
| ПИ                                                          | 2,98                   |                  | 6,2             | 1,9               | 1,42                    | 4,7                    | 2,9                   |
| ПД                                                          | 0,47                   | 1,66             | 0,44            | 0,5               | 1,72                    | 1,63                   | 0,029                 |
| ПДТ1                                                        | 0,46                   | 1,67             | 0,38            | 0,48              | 1,81                    | 0,73                   | 0,16                  |
| ПИД                                                         | 2,24                   |                  | 5,8             | 1,08              | 1,6                     | 0,84                   | 0,86                  |
| П-ПИ                                                        | 2,66                   |                  | 1,24            | 0,97              | 1,07                    | 4,27                   | 2,17                  |
| Регулятор состояния по $u, \dot{u}, \ddot{u}$ :             |                        |                  |                 |                   |                         |                        |                       |
| $K_n=1.412$                                                 | 0,61                   | 1                | 0,18            | 0,473             | 1,18                    | 1,1                    | 0,161                 |
| $K_n=3.636$                                                 | 0,37                   | 2,58             | 0,32            | 0,33              | 1,67                    | 0,99                   | 0,009                 |
| Регулятор состояния по $u, \dot{u}, \ddot{u}, x, \dot{x}$ : |                        |                  |                 |                   |                         |                        |                       |
| $K_n=1.412$                                                 | 0,31                   | 2,24             | 0,136           | 0,317             | 1,76                    | 0,196                  | 0,112                 |
| $K_n=17,4; K_2=100$                                         | 0,25                   | 5,62             | 0,19            | 0,285             | 1,86                    | 0,56                   | 0,088                 |
| СНС с ЭМ (ОС по $\ddot{u}$ )                                |                        |                  |                 |                   |                         |                        |                       |
| $K_n=1.412$                                                 | 0,74                   | 1                | 0,15            | 0,53              | 0,67                    | 1,63                   | 0,446                 |

Предлагаемые стратегия и алгоритм практической оптимизации ЭГП предусматривают применение ЭВМ в диалоговом режиме и позволяют за счет выбора рациональной структуры и параметров электронного регулятора достичь требуемых показателей качества ЭГП, к основным из которых относятся точность позиционирования

выходного звена, динамические характеристики, а также малая чувствительность привода к внешним и параметрическим возмущениям. Разработано программное обеспечение для решения всего комплекса поставленных задач оптимизации.

Рассмотренные методы математического моделирования и управления ЭГП были также использованы для решения задачи имитации динамических характеристик при испытаниях сложных гидросистем. Реальные ЭГП при этом заменены электронно-гидравлическими имитаторами. Такие имитаторы достаточно точно воспроизводят динамические процессы в исследуемых гидросистемах при различных значениях нагрузок, что позволяет уменьшать затраты на создание испытательных установок. Предлагаемый имитатор гидропривода состоит из двух ЭГУ, двух гидравлических аккумуляторов и управляющей обоими ЭГУ эталонной модели нагруженного гидропривода. При этом один из ЭГУ должен иметь независимое от гидросистемы питание жидкостью под давлением. В случае малых инерционных нагрузок на выходное звено имитируемого гидропривода необходимость в независимом питании отпадает.

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе ранее разработанных другими авторами математических моделей ЭГП сформированы математические модели для практической оптимизации ЭГП с электронными регуляторами. Особенность этих моделей заключается в их относительной простоте, в возможности учета внешних, а также параметрических возмущений. Результаты численного исследования динамических характеристик моделей проверены и скорректированы по результатам экспериментов, проведенных на специально созданной лабораторной установке.

2. Предлагаемая методика выбора структуры и параметров электронных регуляторов состоит в том, что оптимизация ЭГП с дроссельным регулированием осуществляется по ряду показателей качества. Структура и параметры электронных регуляторов могут быть выбраны по двухуровневому алгоритму оптимизации с учетом технических требований к ЭГП. Разработан программный комплекс синтеза ЭГП.

3. Наилучшие показатели качества ЭГП обеспечиваются регу-

ляторами состояния, если отношение собственных частот ЭГУ и нагруженного ГЦ больше 1.5. Если это отношение больше 4, то достаточно применения регулятора по трем координатам состояния. При выборе регулятора необходимо учитывать, что увеличение числа координат состояния в регуляторе существенно усложняет его техническую реализацию.

4. При одинаковой сложности технической реализации, ЭГП с самонастраивающимся регулятором более чувствителен к изменению параметров нагрузки, влияющих на постоянную времени и демпфирование исполнительного гидродвигателя, чем ЭГП с регуляторами состояния.

5. ЭГП с электронными регуляторами типа ПД несколько уступают по своим свойствам приводам с регуляторами состояния, но в тех случаях, когда к ЭГП не предъявляются высокие требования в части чувствительности к внешним и параметрическим возмущениям, а также динамических характеристик, в соответствии с критерием сложности целесообразно использование регуляторов типа ПД.

6. Кроме решения задач оптимизации ЭГП показано, что разработанные математические модели гидропривода и его элементов могут быть использованы также при создании стендов для исследования нестационарных процессов в сложных гидросистемах, в которых реальные Э.П. заменены электронно-гидравлическими имитаторами. Такие имитаторы позволяют достаточно точно воспроизводить динамические процессы в исследуемых гидросистемах при одновременном упрощении применяемого оборудования. Результаты исследования ЭГП использовались также при проектировании сварочных роботов.

Материалы диссертации отражены в следующих работах:

1. Сосновский Н.Г. Повышение стабильности характеристик электрогидравлического привода робота // Роботы и их применение в народном хозяйстве: Тезисы докладов горьковской конференции молодых ученых и специалистов. - М., 1987. - С. 11-12.

2. Попов Д.Н., Сосновский Н.Г. Влияние гидродинамических характеристик электрогидравлических усилителей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - № 2. - С. 75-78.

3. Попов Д.Н., Лисовский Г.Е., Сосновский Н.Г. Повышение стабильности характеристик электрогидравлических усилите-

лей с помощью электронных регуляторов // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - № 5. - С. 70-73.

4. А.С. 1430616 СССР, МКИ F15 В3/00. Электрогидравлический усилитель/ Д.Н. Попов, Г.Е. Лисовский, Н.Г. Сосновский // Открытия, изобретения, ... - 1988. - № 38.

5. Попов Д.Н., Лисовский Г.Е., Сосновский Н.Г. Имитационное моделирование нагрузки на выходное звено гидропривода // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 6. - С. 53-56.

6. Попов Д.Н., Сосновский Н.Г. Математическое моделирование и синтез гидроприводов с дроссельным регулированием // Приводы-90: Тезисы докладов Второго всесоюзного совещания. - Л., 1990. - С. 88.

7. Попов Д.Н., Сосновский Н.Г. Синтез робастных электрогидравлических приводов роботов // Пятое Всесоюзное совещание по робототехническим системам: Тезисы докладов. - М., 1990. - Ч. 2. - С. 159-160.

8. Попов Д.Н., Лисовский Г.Е., Сосновский Н.Г. Электрогидравлический усилитель с электронным ПИ-регулятором // Машины, приборы, стенды: Каталог МГТУ. - 1990. - № 12. - С. 10.

9. Попов Д.Н., Сосновский Н.Г., Смирнов А.А. Имитационные модели электрогидравлических приводов для исследования нестационарных процессов в гидросистемах // Проектирование, производство и эксплуатация систем гидропневмопривода, гидропневмоавтоматики, гидропневмомашии и их компонентов: Тезисы докладов 1 Всесоюзной научно-технической конференции Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики. - Киев, 1991. - С. 2.