549719

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

На правах рукописи
УДК 62-523

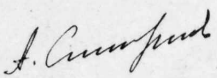
Смирнов Андрей Анатольевич

ФИЗИКО - МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СЛОЖНЫХ ГИДРОСИСТЕМ

05.02.03 - Системы приводов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 1995

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. Фомичев В.М.

Ведущее предприятие - НИИСУ

Защита диссертации состоится "18" марта 1996 г. на заседании диссертационного Совета К.053.15.06 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техническом университете 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 в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

Желающие присутствовать на защите должны заблаговременно известить Совет письмами заинтересованных организаций на имя председателя Совета.

Телефон для справок 263-69-49.

Автореферат разослан "12" февраля 1996 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент Максим

Подписано к печати 29.01.96 Объем 1 п.л. Тираж
Заказ 20 Типография МГТУ им. Н.Э

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1549719
Смирнов А.А. Физико-матема

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В гидравлических системах различных технических объектов, таких, как строительно-дорожные машины, станки, самолеты и др. находят широкое применение длинные трубопроводы с большим числом разветвлений. При работе технических объектов в трубопроводах возникают сложные нестационарные процессы. В ряде случаев возможны гидравлические удары, которые создают дополнительные динамические нагрузки на трубопроводы и элементы гидравлических агрегатов, а также могут нарушать функционирование всей системы. В целях предотвращения недопустимых нестационарных процессов в гидросистемах, необходимо на этапе проектирования проводить их математическое моделирование, рассчитывать возможные изменения давлений в различных точках системы. Для наиболее сложных гидросистем, например, авиационных, к надежности которых предъявляются высокие требования, проводятся также стендовые испытания. При стендовых испытаниях проверяются параметры гидросистемы в условиях такого же потребления энергии, как при работе в реальных условиях. Кроме того, стендовые испытания позволяют установить причины возникновения нештатных ситуаций при эксплуатации реальной гидросистемы.

Наибольшие трудности, возникающие при создании установок для испытаний гидросистем, часто связаны с наличием в этих системах электрогидравлических следящих приводов (ЭГСП). В реальных условиях на выходные звенья ЭГСП действуют различного вида нагрузки, крайне сложно воспроизводимые с помощью механических нагружающих устройств. Кроме того, при использовании натурных ЭГСП резко возрастает стоимость всей испытательной установки. Для упрощения и снижения стоимости установки натурные ЭГСП можно заменить имитаторами, которые при динамических испытаниях гидросистем обеспечивают такое же потребление жидкости из гидросистемы, как натурные приводы, при близких к реальным изменениях давлений. Однако известные методы стендовых испытаний рассматриваемых гидросистем, основанные на том, что гидроприводы заменяются клапанами или распределителями, пропускающими расходы жидкости, близкие к реальным расходам, хотя и упрощают всю конструкцию стенда, но при этом не обеспечивают моделирования нестационарных гидромеханических процессов, что сужает круг исследований, которые можно проводить на стенде.

Цель работы состояла в создании методов и средств физико-математического моделирования нестационарных гидромеханических процессов в системах гидроприводов с

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

распределенными параметрами.

Методы исследования. Основные задачи решались путем теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования базировались на использовании основных положений гидродинамики, механики и теории автоматического управления. При изучении протекающих в гидросистеме процессов применялись методы математического моделирования на ЭВМ с помощью специально разработанного диалогового программного комплекса автоматизированного расчета динамических процессов в сложных гидросистемах с распределенными параметрами.

Экспериментальные исследования проводились на стенде для испытания имитатора гидропривода с длинными гидролиниями.

Научная новизна. Разработана методика физико-математического моделирования сложных гидросистем с распределенными параметрами. Научной новизной разработки являются:

- структуры имитаторов гидропривода, отличительная особенность которых состоит в отсутствии исполнительных гидродвигателей и нагружающих устройств, управление имитаторами осуществляется от персональной ЭВМ;
- способы цифрового управления имитаторами гидроприводов в реальном масштабе времени;
- алгоритмы и программа автоматизированного построения математических моделей и расчета сложных гидросистем с распределенными параметрами.

Практическая ценность работы. Предлагаемая методика физико-математического моделирования нестационарных гидромеханических процессов в системах гидроприводов с распределенными параметрами предназначена для проведения расчетов и создания испытательных установок сложных гидросистем.

Программа расчета динамических процессов в сложных гидросистемах ориентирована на применение САПР для:

- расчета динамических характеристик сложных гидросистем и их элементов;
- выбора в диалоге конструктора с ЭВМ на стадии проектирования гидросистемы параметров элементов, входящих в ее состав, а также различных вариантов схемы системы.

Программа использована для выбора структуры и параметров имитаторов гидроприводов и эталонных моделей.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением обоснованных допущений, принятых при математическом моделировании. Кроме того, результаты расчетов процессов в гидросистеме с имитатором и длинными

гидролиниями подтверждены экспериментами, проведенными с использованием современных средств измерения переменных во времени физических величин.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы при создании полунатурного стенда для испытаний авиационной гидросистемы.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научных семинарах кафедры "Гидромеханика и гидропневмоавтоматика" МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1993-1995 гг.; на 1 Всесоюзной научно-технической конференции Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики, г. Киев, июнь 1991 г.; на семинаре по нестационарным процессам на кафедре теоретической механики МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1993 г.; на конференции "Студенческая весна" в МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1994 г.; на международной конференции "Гидромеханика, гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика" в МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994 г.

Публикации. По материалам диссертации имеются четыре опубликованных работы, в том числе одно авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений и содержит 100 страниц основного машинописного текста, 2 таблицы, 78 рисунков, список литературы из 53 наименований и 24 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава содержит результаты разработки и исследования имитаторов гидроприводов. По материалам отечественной и зарубежной печати, на примере авиационных гидросистем, проведен анализ условий работы нагруженных ЭГСП. Рассмотрены факторы, влияющие на вид переходных процессов по перепаду давлений в полостях привода и в соединенных с приводом длинных гидролиниях. Показано, что значения и характер нагрузок на выходные звенья гидроприводов существенно сказываются на процессах в гидросистеме, в которой установлены приводы. На основании проведенного обзора сделан вывод о том, что при стендовых испытаниях гидросистем особое значение приобретают способы моделирования нагрузок на выходные звенья исполнительных механизмов приводов. Правильный выбор нагружающих устройств во многом определяет достоверность полученных при испытаниях результатов.

Проведен анализ особенностей физического моделирования гидроприводов входящих в состав сложных гидросистем. Рассмотрены схемы существующих в настоящее время имитаторов гидроприводов. Предложены четыре варианта структуры имитаторов, не содержащих исполнительных гидродвигателей и механических нагружающих устройств, дана их сравнительная оценка и получены рекомендации по созданию экспериментальной установки. Общая схема разработанных имитаторов гидропривода приведена на рис. 1. В состав каждого имитатора входят: управляющее устройство, обеспечивающее заданный для моделируемого ЭГСП расход жидкости из гидросистемы; нагружающее устройство, обеспечивающее требуемый перепад давлений в выходных каналах моделируемого ЭГСП; гидроаккумуляторы или емкости, предназначенные для имитации полостей исполнительного гидродвигателя (гидроцилиндра) ЭГСП, а также для ограничения скоростей увеличения и уменьшения давлений p_1 и p_2 в каналах; датчики давлений ДД1 и ДД2 - для контроля состояния системы. Каналами питания и слива управляющее устройство подключается к испытуемой гидросистеме в месте подсоединения гидропривода. Рабочие каналы управляющего устройства соединены с гидроаккумуляторами и с каналами нагружающего устройства.

Управление имитаторами осуществляется с помощью эталонной модели ЭГСП, в которой формируются входные сигналы для управляющего и нагружающего устройств. В зависимости от способа реализации, эталонная модель содержит либо математическую модель исследуемого привода, либо таблицы входных сигналов, подаваемых на управляющее и нагружающее устройства имитатора. Каждый способ реализации эталонной модели ЭГСП предполагает проведение математического моделирования гидроприводов. Входной сигнал для управляющего устройства представляет собой сигнал рассогласования, полученный вычитанием сигнала обратной связи по положению выходного звена привода из подаваемого на вход эталонной модели сигнала управления. Входной сигнал нагружающего устройства определяется разностью фактического перепада давлений в полостях гидроаккумуляторов имитатора и перепада давлений, вычисляемого в эталонной модели.

Для всех вариантов имитаторов в качестве управляющего устройства выбран электрогидравлический усилитель (ЭГУ). Нагружающее устройство определяет вид имитатора гидропривода (ИГ). Этим устройством могут служить:

- дроссель с фиксированной настройкой (ИГ1);
- управляемый дроссель (ИГ2);
- ЭГУ с дополнительным источником питания жид-

костью под давлением (ИГ3);

– два ЭГУ с дополнительным источником питания жидкостью под давлением (ИГ4).

О точности моделирования, обеспечиваемой каждым из имитаторов можно судить сравнивая графики переходных процессов по перепаду давлений в полостях устройств и в полостях моделируемого ЭГСП, при подаче на вход привода различных входных сигналов. Основные параметры ЭГСП, при которых проводился расчет: диаметр поршня – 50 мм; ход поршня от упора до упора – 100 мм; масса нагрузки, приведенная к выходному звену – 2750 кг; давление питания – $2{,}1\times10^{7}$ Па; давление слива – 1×10^{6} Па. На рис.2 изображены графики переходных процессов, вызванных ступенчатым входным сигналом. Графики показывают, что наилучшую имитацию процесса изменения перепада давлений Δp в полостях гидроцилиндра ЭГСП обеспечивают устройства ИГ2, ИГ3 и ИГ4. Устройства ИГ3 и ИГ4 способны достичь полного соответствия процессов моделируемому приводу, ИГ2 не моделирует режима помогающей нагрузки, при котором направление нагрузки на выходное звено привода совпадает с направлением скорости его перемещения. Необходимость в четвертом варианте имитатора (ИГ4) возникла при создании физического макета устройства и была вызвана тем, что золотники у большинства ЭГУ имеют положительные перекрытия, из-за которых увеличивается нечувствительность ЭГУ к сигналам управления. Кроме того, для получения в имитаторе переходных процессов близких к реальным, проводимость золотникового распределителя нагружающего устройства должна быть в два раза больше проводимости золотникового распределителя управляющего устройства. Однако большая проводимость золотникового устройства распределителя может ухудшить устойчивость имитатора при малых сигналах управления из-за присутствия шумов в электрических цепях. Чтобы преодолеть эти трудности, в имитаторе в качестве нагружающего устройства можно применить два ЭГУ с золотниками, имеющими положительные перекрытия. Схемы имитаторов ИГ3 с одним ЭГУ и ИГ4 со сдвоенными ЭГУ в нагружающем устройстве даны на рис.3 и рис.4 соответственно.

1.Как было отмечено выше, для построения эталонной модели ЭГСП необходимо проводить математическое моделирование испытуемой гидросистемы. При моделировании сложных систем особенно остро встает вопрос о сокращении времени разработки математической модели и повышении надежности расчетов. Указанная проблема решается применением автоматизированных методов расчета, которые позволяют полностью исключить непосредственное програм-

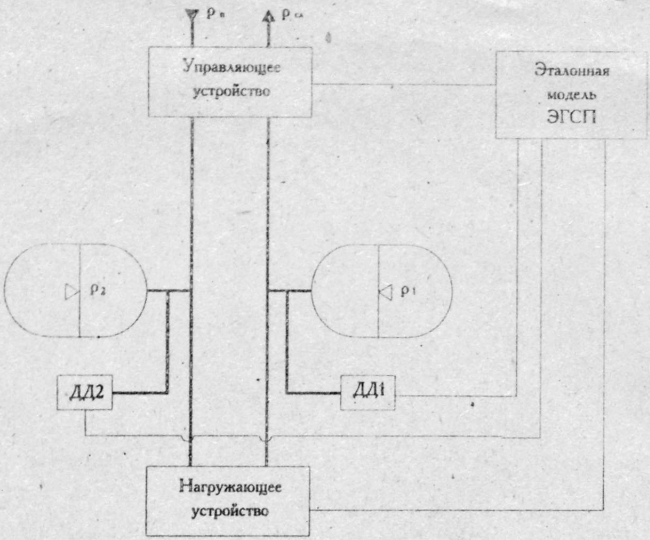


Рис.1. Общая схема имитаторов гидропривода.

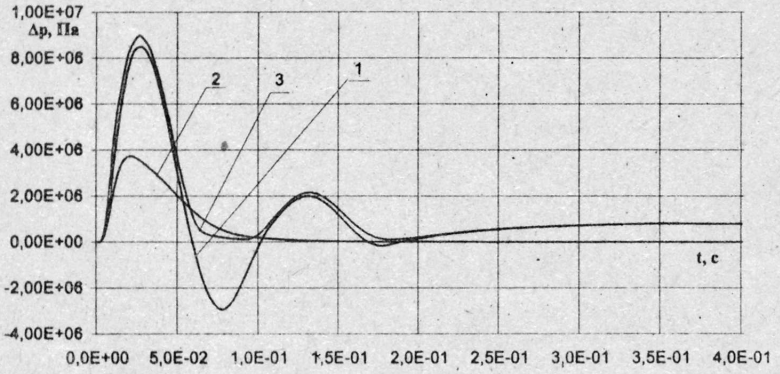


Рис.2. Переходный процесс по перепаду давлений.
1 - Моделируемый привод, имитаторы ИГ3 и ИГ4.
2 - Имитатор ИГ1.
3 - Имитатор ИГ2.

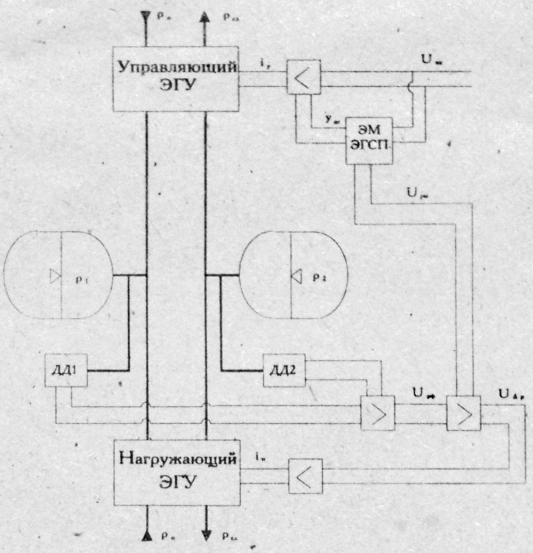


Рис.3. Схема имитатора ИГ3.

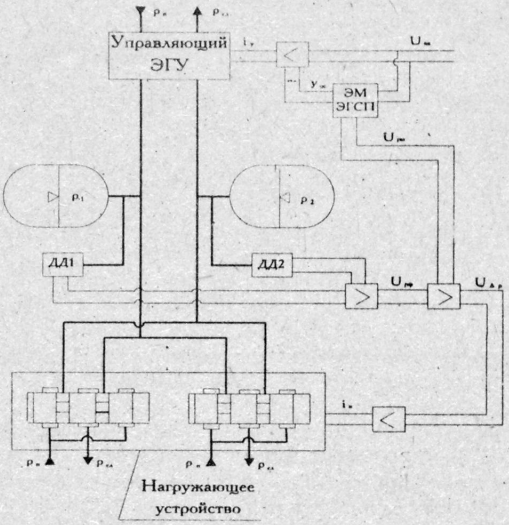


Рис.4. Схема имитатора ИГ4.

мирование на алгоритмических языках, повышая, тем самым надежность расчетов, а также в десятки раз сокращая временные затраты на разработку математической модели. По материалам отечественной и зарубежной печати проведен краткий обзор и анализ способов автоматизированного построения математических моделей систем различной физической природы. Среди них можно выделить:

- построение математических моделей систем с использованием матрично-топологических методов (схем замещения);
- построение математических моделей с использованием блочно-ориентированных элементов.

Первые методы хотя и позволяют вводить в состав математических моделей нелинейности, но исключают возможность расчета систем с распределенными параметрами. Второй подход основан на выборе из библиотеки моделей выделенных по функциональным признакам базовых элементов и определения связей между ними. Этот подход при наличии соответствующего алгоритма стыковки позволяет включить в состав библиотеки элементы с распределенными параметрами.

На основании проведенного анализа в диссертационной работе выделены следующие этапы дальнейшего исследования:

1. Разработка способов управления имитаторами гидроприводов в реальном масштабе времени.

2. Создание программного обеспечения для автоматизированного моделирования систем гидроприводов с распределенными параметрами.

3. Экспериментальная проверка функционирования наиболее общего вида имитатора гидропривода и проверка адекватности математической модели реальной гидросистеме по экспериментальным переходным процессам в имитаторе гидропривода.

Вторая глава посвящена анализу способов управления разработанными имитаторами. Показано, что по сравнению с аналоговым, цифровое управление приведет к лучшим результатам. Предложено два способа формирования цифровой эталонной модели. Один основан на применении ЭВМ с быстродействием, гарантирующим вычисление требуемых сигналов управления путем решения упрощенной системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в ЭГСП (дифференциальная эталонная модель). Другой способ состоит в том, что используются заранее сформированные таблицы, с помощью которых ЭВМ формирует требуемые сигналы управления.

Использование упрощенной математической модели в эталонной модели продиктовано необходимостью выполнения

вычислений в реальном масштабе времени. Для этого требуется максимально ускорить работу программы, что достигается прежде всего сокращением числа операций, связанных с большим числом тактов ЭВМ и соответственно имеющих большое время выполнения. Эти же соображения определяют и выбор одного из простейших методов интегрирования дифференциальных уравнений - метода трапеций. К недостаткам данного способа построения эталонной модели относятся довольно большое время выполнения одного цикла вычислений, а также погрешности при вычислениях, возникающие из-за использования упрощенной системы дифференциальных уравнений, интегрируемых методом трапеций.

Табличный способ построения эталонной модели основан на идее предварительного вычисления функций, которая используется в ЭВМ без сопроцессора, когда требуется сократить время выполнения программы, предполагающей либо сложные преобразования, либо получение значения параметров, непосредственно не связанных с вводимыми данными. Такие программы хранят результаты расчетов в виде таблиц параметров, которые каким-либо образом связаны с входными данными. Задача программы состоит в том, чтобы для конкретной входной величины выбрать из таблицы соответствующее значение выходной величины. Применительно к решаемой задаче таблица содержит зависимости для переменных во времени сигналов управления нагружающим и управляющим устройствами. Недостатком этого метода является необходимость формирования отдельной таблицы для каждого входного сигнала. К преимуществам относится отсутствие погрешности вычислений сигналов управления по отношению к "точной" математической модели и малое время обработки сигналов.

Табличная эталонная модель допускает также применение управляющего и нагружающего устройств с одинаковым быстродействием за счет возможности корректировки быстродействия нагружающего устройства введением в программу расчета таблиц управления корректирующего звена с передаточной функцией

$$W_к(s) = \frac{T_ф^2 S^2 + 2\zeta_ф T_ф S + 1}{T_ж^2 S^2 + 2\zeta_ж T_ж S + 1},$$

где $T_ф$ и $\zeta_ф$ - фактические постоянная времени и коэффициент относительного демпфирования нагружающего ЭГУ; $T_ж$ и $\zeta_ж$ - желаемые значения постоянной времени и коэффициента относительного демпфирования нагружающего ЭГУ.

Возможна также компенсация разброса параметров электрогидравлической части имитаторов в пределах 5 %,

которая достигается за счет введения динамической поправки к входному сигналу нагружающего устройства.

Было проведено тестирование каждого из способов управления. Тестирование проводилось на ЭВМ типа PC AT-286 с арифметическим сопроцессором и тактовой частотой 16 МГц. При этом для дифференциальной эталонной модели машинное время, затраченное на расчет одного цикла выдачи сигналов управления составило 2,9 мс, а для табличной эталонной модели - 0,17 мс. Погрешность расчетов в первом случае по отношению к "точной" математической модели привода составила 10-12%. Результаты тестирования показали, что табличная эталонная модель работает приблизительно в 17 раз быстрее, чем дифференциальная, что позволяет либо снизить требования к быстродействию управляющей ЭВМ, либо значительно увеличить число имитаторов, управляемых от одной вычислительной машины.

В третьей главе рассмотрены вопросы математического моделирования сложных гидросистем с распределенными параметрами. Для уменьшения сложности и сокращения времени проведения численного исследования динамики, разработан диалоговый программный комплекс. В круг задач программного комплекса входит формирование математической модели гидросистемы из набора базовых элементов и проведение расчета.

Исходя из этого выделены следующие основные проблемы, решаемые при построении такой системы автоматического моделирования на ЭВМ:

- формализованное описание структуры произвольной гидросистемы;
- систематизация исходных данных, необходимых для построения системы, и разработка метода их формирования и подготовки;
- разработка метода автоматического формирования системы уравнений, описывающих систему со сложной структурой;
- разработка математического описания элементов системы;
- выбор и реализация методов решения сформированной системы уравнений;
- программная реализация методов автоматизированного расчета рабочих процессов на ЭВМ.

Программа автоматизированного моделирования и расчета сложных гидросистем разработана на основе их представления как элементно-узловых структур. Весь обмен информацией с пользователем реализован в форме диалога. Все элементы диалога реализованы с помощью разработанной библиотеки оконного интерфейса с пользователем. Оконный интерфейс позволяет представлять информацию на

экране в структурированном виде, обеспечивать однозначную связь между состоянием программы и изображением на экране, что существенно облегчает восприятие. Исходный текст программы написан на языке программирования Си.

Программа анализирует исходную информацию, и в зависимости от состава блоков рассматриваемой схемы выбирает из библиотеки математических моделей необходимые уравнения, формируя общую математическую модель.

Все элементы условно разделены на два типа:

- блоки самих устройств;
- блоки управления устройствами.

В качестве блока устройства может выступать любое из функционально законченных устройств (насос, гидроцилиндр, ЭГУ, гидролиния и т.д.). Блоки управления устройствами служат для задания, вычисления и преобразования сигналов управления различной формы. Часть блоков управления содержат функциональные зависимости, остальные реализованы в виде динамических звеньев, принятых в теории автоматического управления (интегрирующее, апериодическое, колебательное и др.).

Главным достоинством разработанной программы по сравнению с другими программами, разработанными ранее, в частности - с программой "Симхид" (Symhyd), заключается в том, что она позволяет осуществлять стыковку систем дифференциальных уравнений в частных производных с системами обыкновенных дифференциальных уравнений, что необходимо при расчете гидросистем с учетом распределенных по длине гидролиний параметров. При этом граничные условия на концах гидролиний могут описываться нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений.

Основываясь на опыте многочисленных работ по исследованию систем гидроприводов, выбирались математические модели отдельных элементов, с помощью которых была составлена базовая библиотека. Все элементы этой библиотеки, за исключением длинных гидролиний, описываются системами нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений. Для описания процессов в длинных гидролиниях взята система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих квазиодномерное неустановившееся движение реальной жидкости в цилиндрическом трубопроводе с учетом распределенных значений массы, сил вязкого трения, сжимаемости рабочей жидкости и упругости стенок трубы

$$-\frac{\partial p}{\partial x}=\rho\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{4\tau_o}{d} \quad ;$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = B_{тр}\frac{\partial V}{\partial x},$$

где d - диаметр трубопровода;

$\tau_{он}$ - нестационарное касательное напряжение в потоке жидкости на стенке трубы;

$B_{тр}$ - приведенный модуль объемной упругости трубы, равный $B_{тр} = B_{ж}/\left(1 + B_{ж}\, d/\left(E_{м}\delta\right)\right)$;

$B_{ж}$ - модуль объемной упругости жидкости;

$E_{м}$ - модуль упругости стенки трубы;

δ - толщина стенки трубы.

Реализована возможность вычисления величины $\tau_{он}$ тремя способами. Первый способ основан на использовании известной из гидравлики зависимости изменения касательного напряжения на стенке трубы при квазистационарном ламинарном течении

$$\tau_{о.к.с} = \frac{8\rho\nu V}{d}.$$

Второй и третий способы предусматривают учет нестационарности $\tau_{он}$ с помощью передаточной функции, предложенной в гидромеханике Д.Н.Поповым:

$$W_{\tau V} = \frac{\tau_{он}(s)}{V(s)} = \frac{j\rho s J_1\left(jr_o\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}{\sqrt{\frac{s}{\nu}}J_2\left(jr_o\sqrt{\frac{s}{\nu}}\right)}.$$

Расчеты выполнены как по приближенному соотношению, содержащему разложенные в степенные ряды функции Бесселя, так и по точному соотношению, получаемым с помощью интеграла Дюамеля.

Для интегрирования нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений применен метод Рунге - Кутта - Фельберга 4 - 5 порядка, а для интегрирования систем уравнений в частных производных - метод характеристик. Чтобы обеспечить возможность совместного решения указанных систем уравнений, был разработан алгоритм стыковки решений.

Четвертая глава посвящена анализу результатов экспериментальных исследований имитатора типа ИГ4. Экспериментальный стенд содержит имитатор типа ИГ4, соединенный с насосной станцией двумя трубопроводами длиной 20 м, внутренним диаметром 6 мм и толщиной стенок 0,5 мм. Управление стендом осуществляется от ЭВМ через блок ЦАП-АЦП.

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

При экспериментальных исследованиях на этом стенде были решены следующие задачи:

- проверка функционирования табличного способа управления имитатором гидропривода, имеющего одинаковые быстродействия управляющего и нагружающего устройств, а необходимые динамические характеристики нагружающего устройства задаются введением в программу расчета таблиц управления корректирующих звеньев; компенсация разброса параметров реальных устройств достигается за счет введения динамической поправки к сигналу управления нагружающими ЭГУ с переменным коэффициентом усиления;
- проверка адекватности математической модели реальной гидросистеме с распределенными параметрами путем сравнения расчетных переходных процессов в моделируемом ЭГСП с учетом длинных линий, соединяющих привод с насосной станцией, и полученных при экспериментах переходных процессов в гидросистеме с имитатором типа ИГ4.

Перед выполнением экспериментальных исследований была осуществлена в лабораторных условиях тарировка всех измерительных каналов, а также проведена проливка всех ЭГУ для получения проводимостей щелей золотников.

В ходе экспериментальных исследований регистрировались значения давлений жидкости в полостях имитатора, а также в сечениях питающей и сливной гидролиний управляющего ЭГУ, расположенных по концам гидролиний.

Функционирование устройства проверялось при различных законах изменения входных сигналов. Их выбор был ориентирован на условия эксплуатации авиационных гидросистем. При проведении экспериментальных исследований использовалось пять законов изменения входных сигналов:

- ступенчатый с уровнем 1 В;
- ступенчатый с уровнем 5 В, соответствующий в данном случае перемещению поршня гидроцилиндра от упора до упора с максимальной скоростью при выходе ЭГУ привода в зону насыщения;
- линейно возрастающий по времени $U_{вх} = 5t$ В;
- гармонический с частотой 2 Гц и амплитудой 5 В - $U_{вх} = 5 \sin(4\pi t)$ В;
- сумма линейно возрастающего по времени сигнала и гармонического сигнала с частотой 2 Гц и малой амплитудой - $U_{вх} = 5t + 0{,}6 \sin(4\pi t)$ В.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных процессов позволяет сделать вывод об адекватности разработанных математических моделей реальным устройствам. Расхождения расчетных и экспериментальных процессов при всех типах сигналов не превышают 10%. Эти расхождения можно объяснить тем, что рабочие каналы управляющего и

нагружающих ЭГУ соединены друг с другом посредством гибких шлангов, изменение формы и объема которых не удается учесть при расчетах.

В конце главы приведена методика физико-математического моделирования сложных гидросистем, которая заключается в следующем:

1. На основании гидравлической схемы системы и параметров входящих в нее устройств составляется математическая модель исследуемой гидросистемы с помощью предложенных программных средств и методик.

2. Рассчитываются характерные режимы работы гидросистемы, и анализируются переходные процессы по перепадам давлений в полостях гидроприводов.

3. На основании анализа переходных процессов по перепадам давлений в полостях приводов для каждого гидропривода выбирается наиболее подходящий тип имитатора.

4. Создается испытательный стенд исследуемой гидросистемы, в котором реальные приводы заменены имитаторами.

5. Составляется программа испытаний гидросистемы, содержащая для каждого тестового режима циклограмму подачи входных сигналов на входы приводов.

6. С помощью программных средств, описанных в главе 3 создается математическая модель стенда, причем роль эталонных моделей имитаторов играют подробные математические модели гидроприводов, входящие в математическую модель исследуемой гидросистемы (см. п.1).

7. В соответствии с программой испытаний, для каждого тестового режима, определяемого циклограммой подачи входных сигналов на входы приводов, рассчитываются таблицы входных сигналов для управляющего и нагружающего ЭГУ каждого имитатора, необходимые для функционирования табличных эталонных моделей. Расчет таблиц входных сигналов ведется с помощью математической модели стенда, описанной в п.6.

8. В соответствии с программой испытаний проводятся эксперименты. Результаты экспериментальных исследований, преобразованные программой табличной эталонной модели сохраняются в файлах на жестком диске компьютера для дальнейших исследований.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана методика физико-математического моделирования сложных гидросистем с распределенными параметрами. Методика основана на применении имитаторов гидроприводов, управление которыми осуществляется с помощью табличной эта-

лонной модели.

Из четырех исследованных структур имитаторов электрогидравлического следящего привода для использования в полунатурных испытательных стендах сложных гидросистем наилучшие показатели качества имитации получены с устройствами типа ИГ3 и ИГ4. Разработанные имитаторы обеспечивают необходимую точность физического моделирования нестационарных процессов в сложных гидросистемах без дополнительных затрат на доработку выпускаемых промышленностью электрогидравлических усилителей.

При экспериментальных исследованиях гидросистемы с имитатором типа ИГ4 управление и регистрация результатов экспериментов осуществляется с помощью ЭВМ через плату цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователя. Цифровое управление позволяет учитывать нелинейность характеристик моделируемого гидропривода, рассчитывать сигналы управления с учетом распределенных параметров гидросистемы, а также сравнительно легко изменять параметры имитатора.

Для управления имитаторами гидроприводов в реальном масштабе времени, наилучшим является табличный способ, который позволяет вести расчет сигналов управления по подробным математическим моделям, а также применять в имитаторе электрогидравлические усилители с одинаковым быстродействием. При этом необходимое быстродействие нагружающего устройства достигается за счет введения в математическую модель расчета сигналов управления колебательного звена и форсирующего звена второго порядка. Табличная модель также позволяет осуществлять компенсацию в реальном масштабе времени разброса параметров реальных устройств, входящих в состав имитатора, если этот разброс не превышает ±5%. Для компенсации вводится поправка к вычисленному по подробной математической модели сигналу управления нагружающим устройством; величина поправки должна быть пропорциональна разности требуемого и фактического перепадов давлений в полостях имитатора.

Имитаторы типа ИГ2, ИГ3 и ИГ4, а также способ управления защищены авторским свидетельством.

Особенностью разработанной программы для расчета нестационарных процессов в системах гидроприводов с распределенными параметрами является блочный способ построения математической модели, который заключается в выборе из базовой библиотеки необходимых элементов и задании связей между ними. Составление математической модели с использованием такой программы ведется в диалоговом режиме и полностью исключает программирование на алгоритмических языках, что значительно сокращает

временные затраты на выполнение исследовательских работ. Преимущество предлагаемой программы по сравнению с уже существующими программами для решения тех же задач, состоит также в более детальном математическом описании базовых элементов и возможности расчетов с учетом распределенных параметров по длине гидролиний.

Применимость разработанной методики физико-математического моделирования, а также адекватность математической модели реальной гидросистеме с распределенными параметрами проверены на созданной для этих целей экспериментальной установке. При экспериментах осуществлено управление установкой и регистрация результатов с помощью ЭВМ. Результаты экспериментов подтверждают рассчитанные по математическим моделям процессы

Разработанная методика физико-математического моделирования нестационарных гидромеханических процессов в системах гидроприводов с распределенными параметрами, а также программа для расчета таких процессов ориентированы на использование при создании испытательных установок сложных гидросистем различного назначения (авиационных, наземных, транспортных и др.).

Материалы диссертации отражены в следующих работах:

1. 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, гидропневмомашин и их компонентов: Тезисы докладов 1 Всесоюзной научно-технической конференции Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики. - Киев, 1991. - С.2.

2. А.С. 1793111А1 СССР, МКИ F15B 19/00. Способ испытаний гидроприводов и устройство для его осуществления. / Д.Н.Попов, Н.Г.Сосновский, А.А.Смирнов // Б.И.- 1993. - №5.

3. Попов Д.Н., Смирнов А.А. Физико-математическое моделирование в задачах управления сложными гидросистемами. // Гидромеханика, гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Тезисы докладов международной конференции. - М.,1994. - С.77.

4. Попов Д.Н., Хван В.Л., Смирнов А.А. Расчет нестационарных процессов в сложных гидросистемах с распределенными параметрами // Вестник машиностроения. - 1994.-№11. - С.17-19.