

На правах рукописи



Чулков Максим Викторович

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ
И ГИДРОСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация
летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)

Научный **Волков Алексей Алексеевич**,
руководитель: кандидат технических наук, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Официальные **Ципенко Владимир Григорьевич**,
оппоненты: доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры аэродинамики, конструкции и прочности
летательных аппаратов, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет
гражданской авиации» МГТУ ГА, г. Москва

Труханов Кирилл Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Гидромеханика, гидромашины и
гидропневмоавтоматика» Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
МГТУ им. Баумана, г. Москва

Ведущая Центральный аэрогидродинамический институт имени
организация: профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская область

Защита состоится 17 октября 2024 года в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет) (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=180886

Автореферат разослан «__»_____ 2024 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н.



Стрелец Дмитрий Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время основным типом силового привода рулевых поверхностей самолетов является гидравлический привод дроссельного типа с питанием от централизованных гидросистем, в котором регулирование скорости движения выходного звена привода осуществляется за счёт изменения гидравлического сопротивления гидролинии и отвода части потока жидкости в гидробак без совершения полезной работы. Рост числа потребителей гидравлической энергии на борту самолета приводит к необходимости увеличивать установочную мощность блоков питания гидросистем, что неизменно приводит к увеличению массы гидросистемы и к снижению топливной эффективности самолета вследствие роста отбираемой от силовой установки мощности. Данная проблема актуальна для маневренных самолетов с неустойчивой аэродинамической компоновкой, к рулевым приводам которых предъявляются требования высокой скорости перемещения выходных звеньев и значительных развиваемых усилий, а, следовательно, высокой потребляемой мощности.

В связи с этим становится актуальной необходимость изыскания способов повышения энергетической эффективности гидросистем, что позволило бы снизить установочную мощность и массу блока питания гидросистемы. Традиционным путем снижения массы и объема гидроагрегатов стало повышение номинального уровня давления с 21 МПа до 28 и 35 МПа. Чтобы предотвратить сокращение ресурса гидроагрегатов вследствие функционирования при повышенном давлении в тех режимах полета, где не требуются большие развиваемые усилия и скорости отклонения рулевых поверхностей (например, в крейсерском полете), используются разгрузочные по давлению режимы работы блока питания гидросистемы. Еще одним путем повышения энергетической эффективности гидросистем является снижение непроизводительных потерь мощности, вырабатываемой блоком питания, переходящих в нагрев рабочей жидкости. Основными источниками тепловыделений в гидросистеме являются насосы и гидравлические приводы с дроссельным регулированием.

Другим актуальным направлением развития силовых систем управления современных самолетов является расширение применения в них вырабатываемой на борту электроэнергии в соответствии с концепцией «более электрического самолёта». «Электрификация» системы управления в настоящее время является одним из направлений, позволяющих улучшить эксплуатационные характеристики самолета за счет снижения стоимости наземного обслуживания.

Степень разработанности темы исследования

Ранее на кафедре 103 «Системы оборудования ЛА» учеными Матвеенко А.М., Долгушевым В.Г., Локшиным М.А., Бакулиным В.М. проведен обширный спектр научно-исследовательских работ по разработке методики аналитического проектирования гидросистем ЛА.

Работы авторов Гамынина Н.С., Рабиновича М.И., Редько П.Г., Хохлова В.А., Матвеенко А.М., Маслова В.Т., Абрамова Е.И., Колесниченко К.А., Меланьина А.Н. посвящены проектированию отдельных элементов гидросистемы, в т. ч. гидроприводов. Учеными Матвеенко А.М., Масловым В.Т., Редько П.Г. предложено для снижения тепловыделений и установочной мощности гидросистемы применять объемно-дроссельный привод, где совместно с изменением проводимости элементов дроссельного гидрораспределения изменяется структура привода – производится установка элементов дроссельного гидрораспределения в минимально дросселирующее положение. Однако в этих трудах не анализируется работа исполнительных механизмов при знакопеременных нагрузках.

Зарубежные авторы исследовали вопросы тепловыделений в основном применительно к электрогидростатическим приводам, методы исследований - имитационное моделирование динамических систем на основе численных методов решения дифференциальных уравнений, а также моделирование методами вычислительной гидродинамики (CFD). Точность моделирования подтверждена лабораторными экспериментами. Предложены способы снижения тепловыделений: регулятор мощности, матричный конвертер, разработка электродвигателей с более высоким КПД. Многие зарубежные публикации посвящены разработке и испытаниям электромеханических рулевых приводов, устанавливаемых, например, на рулевые поверхности беспилотных авиационных систем, на вертолеты, в подсистемах уборки-выпуска шасси.

Среди работ отечественных авторов много публикаций, посвященных конструкциям автономных гидроприводов, разработки которых велись с 1960-х годов; предложен и испытан на экспериментальных образцах такой способ повышения энергоэффективности автономного привода, как комбинированное регулирование скорости.

Концепция «более электрического самолёта» нашла отражение и практическое применение в некоторых серийно производимых самолетах зарубежной разработки. Опыт создания транспортных самолётов Airbus A-340, A-350 показал, что устанавливать автономные силовые приводы с питанием от системы электроснабжения летательного аппарата (ЛА) целесообразно на органы управления полётом, расположенные в хвостовой части самолёта и наиболее

удалённые от блоков питания гидросистем, размещенных в центроплане, – руль направления, рули высоты и переставной стабилизатор. Это позволило отказаться от прокладки длинных трубопроводных магистралей вдоль всего фюзеляжа с заменой трубопроводов более лёгкими электрическими силовыми кабелями. Другие преимущества данных мероприятий при сохранении на самолете централизованной гидросистемы – снижение установочной мощности её блока питания благодаря отсутствию потерь по длине в трубопроводах подвода питания к приводам рулевых поверхностей хвостового оперения; увеличение пожаробезопасности самолета.

Следующее направление повышения электрификации системы управления ЛА – применение автономных моноблочных электрогидравлических приводов, включающих в себя малоразмерную электроприводную насосную станцию, блок питания и силовой гидродвигатель. Конструктивные исполнения таких приводов приведены в главе 1.

Ключевая причина задержки внедрения автономных рулевых приводов на самолёты заключена в том, что тепловыделения приводов большой мощности создают неприемлемый перегрев рабочей жидкости. Одним из путей решения данной проблемы является адаптивное к нагрузке средство управления автономным приводом. В приводе, оснащённом таким устройством, электроприводной насос генерирует гидравлическую мощность только для преодоления фактической аэродинамической нагрузки, действующей на привод.

Цель диссертационной работы

Разработка новых конструктивных решений для повышения энергетической эффективности электрогидравлических рулевых приводов и гидросистем летательных аппаратов; выбор структуры и основных параметров исполнительных агрегатов, обеспечивающих минимизацию тепловыделений с целью снижения установочной мощности и массы гидросистемы.

Основные научные задачи

- разработка способов снижения тепловой напряжённости гидравлических систем ЛА с учётом их возможного существования в рамках концепции «более электрического самолёта».
- разработка конструктивных мероприятий по повышению энергетической эффективности силовых приводов системы управления полётом ЛА с учетом их работы в условиях знакопеременных нагрузок.

Научная новизна исследования

- разработана новая математическая модель тепловых процессов в гидросистеме самолета с учетом изменения нагружения гидроприводов системы управления полетом при различных углах и скоростях отклонения рулевых

поверхностей, при изменении высоты и скорости полета и с учетом режима работы блока питания гидросистемы;

- реализован алгоритм функционирования блока управления приводом рулевой поверхности и изменения структуры золотникового гидрораспределителя в зависимости от величины и направления нагрузки, действующей на выходное звено привода, и от давления нагнетания;

- реализован алгоритм управления режимом работы гидравлического блока питания автономного гидропривода с адаптивностью под внешнюю нагрузку.

Теоретическая значимость работы определяется ее новизной.

Практическая значимость работы заключается в разработке инженерных методик:

- расчета массы структуры энергообеспечения гидроприводов в хвостовой части пассажирского самолета при помощи электроприводных насосных станций;

- оценки в первом приближении изменения температуры рабочей жидкости гидросистемы в течение полета.

Также автором предложены:

- структура электрогидравлического привода и алгоритм управления приводом, предназначенные для снижения нагрева рабочей жидкости при дросселировании в золотниковом гидрораспределителе привода в случае воздействия внешней помогающей нагрузки на шток гидроцилиндра;

- структура автономного гидропривода, содержащего блок питания на базе насосной станции с адаптивной подстройкой номинального давления к внешней нагрузке на гидропривод и двухкаскадный золотниковый гидрораспределитель с электромеханическим преобразователем типа «линейный электродвигатель» в первом каскаде усиления.

Методология и методы исследования

Используются математические и имитационные модели процессов в гидравлических системах и агрегатах в статической и динамической постановке. Решение уравнений осуществляется численными методами, реализованными в программных пакетах Matlab-Simulink, Mathcad.

Положения, выносимые на защиту

1. Структура электрогидравлического привода с алгоритмом управления соотношением проводимости дросселирующих элементов в зависимости от величины и знака внешней нагрузки, предназначенным для снижения нагрева рабочей жидкости при дросселировании.

2. Структура автономного гидропривода, содержащая блок питания на базе насосной станции с адаптивной подстройкой номинального давления к внешней нагрузке на гидропривод.

3. Алгоритм адаптивного регулирования режима работы блока питания автономного гидропривода в зависимости от внешнего нагружения.

4. Математическая модель тепловых процессов в гидросистеме самолета и инженерная методика, предназначенная для оценки в первом приближении изменения температуры рабочей жидкости гидросистемы в течение полета.

5. Методика расчета массы структуры энергообеспечения гидроприводов в хвостовой части пассажирского самолета при помощи электроприводных насосных станций.

Степень достоверности результатов работы

Методика расчета изменения температуры рабочей жидкости гидросистемы в течение полета валидирована по данным летных испытаний тяжелого маневренного самолета Су-35-2, а именно, по расшифровкам записей бортового регистратора параметров полета. Имитационные модели электрогидравлических приводов, предназначенные для проверки предложенных технических решений по снижению тепловой напряженности приводов, выполнены с применением сертифицированного программного обеспечения Matlab Simulink, Mathcad и основаны на известных аналитических зависимостях гидростатики, гидродинамики, механики.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 11 научных конференциях:

№	Название конференции	Год
1	I Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»	2024
2	22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»	2023
3	2-я Международная научно-техническая конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения»	
4	XLIX Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (доклад получил диплом, 2 место в секции)	
5	21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»	2022
6	1-я Международная научно-техническая конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения»	
7	XLVIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»	
8	20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»	2021
9	Международная научно-техническая конференция ICASSE-2021	
10	XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»	
11	19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»	2020

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 трудах, в их числе: две статьи в журналах из Перечня ВАК Минобрнауки России по специальности 2.5.13.; одна статья в журнале, индексируемом в международной системе цитирования Scopus; одна статья в сборнике материалов конференции, индексируемом в международной системе цитирования Scopus; 9 тезисов докладов на научных конференциях в сборниках, индексируемых в РИНЦ.

Личный вклад соискателя

В представленной библиографии приведены ссылки на работы автора. Результаты диссертационного исследования, опубликованные в трудах [2, 4-12], получены лично соискателем. В работе [1] автор диссертации выступал в качестве соавтора с научным руководителем и сотрудниками кафедры 101 МАИ. В работе [3], выполненной в соавторстве с научным руководителем, автор диссертации разработал имитационную модель электрогидравлического привода со структурой, обеспечивающей снижение тепловыделений, исследовал с ее помощью работоспособность привода на различных режимах внешнего нагружения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 162 страницы, работа содержит 66 рисунков, 18 таблиц, четыре приложения. Список публикаций и использованных источников включает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность необходимости изыскания способов повышения энергетической эффективности гидросистем, что позволило бы снизить установочную мощность и массу блока питания гидросистемы. Дан краткий анализ существующих направлений повышения энергетической эффективности силовых систем управления ЛА, указаны недостатки ранее проведенных исследований на данную тему. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных современному состоянию концепции «более электрифицированного самолёта» применительно к силовым приводам системы управления, обозначены главные препятствия на пути ее внедрения. Рассмотрены принципиальные схемы и конструкции автономных электрогидравлических рулевых приводов, их достоинства и недостатки. Проведен обзор существующих направлений решения проблемы повышенной

тепловой нагруженности автономных рулевых приводов. Рассмотрено применение локальных гидравлических систем на базе электроприводных насосных станций в серийно производимых зарубежных самолетах. По результатам обзора сформулировано заключение о возможности повысить энергетическую эффективность гидросистемы ЛА путем адаптивности характеристик источника питания и самого гидропривода к режиму нагружения, что особенно актуально для гидроприводов с автономным источником питания. Повышение электрификации силовой системы управления боевого самолета является весьма неоднозначным и рискованным решением, приводящим к росту или крайне незначительному снижению массы самолета.

Во второй главе приведены основные соотношения математической модели гидропривода с дроссельным регулированием; представлена принципиальная схема и модель блока питания гидросистемы с переменным уровнем давления нагнетания; приведены зависимости КПД гидропривода и его связи с тепловыми потерями. Представлена выполненная автором модификация ранее разработанной на кафедре 103 «Системы оборудования летательных аппаратов» МАИ математической модели теплового состояния гидросистемы самолета. Необходимость уточнения модели обусловлена тем, что в существующих методиках расчета температуры рабочей жидкости не рассматривается совместное влияние на температуру жидкости ее нагрева при дросселировании через окна золотниковых распределителей и изменения внешних нагрузок на гидроприводы системы управления полетом по профилю полета. Также не учитывается зависимость объемного КПД гидронасоса от оборотов коробки агрегатов маршевого двигателя самолета, что на практике значительно влияет на тепловыделения в гидросистеме. Процесс теплообмена описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_f}{dt} &= (T_{konstr} - T_f(1 + \bar{k}_{fTO}) + \bar{k}_{fTO}T_{TO} + \Delta\bar{N}_T(T_{max} - T_{air}) + \sum_{i=1}^j \Delta T_i) \cdot \frac{1}{\tau_g} \\ \frac{dT_{konstr}}{dt} &= (T_{air} - T_{konstr} + \frac{1}{\bar{k}_{fTO}}(T_f - T_{konstr})) \cdot \frac{1}{\tau_{k0}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где j – количество дросселирующих элементов в гидросистеме, ΔT_i – приращение температуры на них, T_{air} – температура окружающей среды, T_{konstr} – температура конструкции ГС, T_f – температура рабочей жидкости, T_{max} – максимальная допустимая температура жидкости, \bar{k}_{fTO} – безразмерный коэффициент теплообмена, T_{mo} – температура хладагента (топлива) в топливо-масляном теплообменнике, $\Delta\bar{N}_T$ – доля установочной мощности насоса, переходящая в тепло, τ_g – постоянная времени теплообмена жидкости с элементами конструкции

гидросистемы, τ_{k0} - постоянная времени теплообмена конструкции гидросистемы с окружающей средой соответственно. Решение данной системы относительно переменных T_f , T_{konstr} производится численно. Начальные условия – температура жидкости T_f и температура конструкции гидросистемы T_{konstr} в начальный момент времени ($t = 0$). В формуле относительных тепловыделений от насоса введена зависимость общего КПД насоса от частоты вращения двигателя самолета:

$$\Delta \bar{N}_T = \bar{p}_H \bar{Q}_H \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right), \eta = \eta(n) \quad (2)$$

Как показали результаты стендовых испытаний насоса, представленные в главе 4 диссертационной работы, при изменении частоты вращения двигателя от 70 % (соответствует режиму «малый газ») до 100 % (соответствует режиму «максимал») для подачи насоса 84 % от максимальной изменение КПД насоса достигает 15,3 %.

Нагрев рабочей жидкости на дросселирующих элементах (распределительных золотниках) гидроприводов зависит от перепада давления на рабочих окнах золотников. Часть энергии потока жидкости при дросселировании превращается в тепловую и вызывает нагрев жидкости, дроссельного устройства и гидросистемы в целом. Из-за большой скорости жидкости в рабочем окне теплоотдачей от жидкости к дроссельному устройству можно пренебречь, считая, что все тепло идет на нагрев жидкости. На основе рекомендаций из научной литературы в модели учтено объемное расширение жидкости при нагреве.

$$\Delta T = \frac{\Delta p_{\partial p}}{\rho_g C_g I} \cdot (T_1 \beta - 1), \quad (3)$$

где T_1 – температура жидкости перед золотником, I – механический эквивалент, β - изобарический коэффициент объемного расширения жидкости, ρ_g – плотность жидкости, C_g – теплоемкость жидкости, $\Delta p_{\partial p}$ – перепад давления на рабочем окне золотника, который зависит от нагрузки на рулевой привод следующим образом:

$$p_2 = p_n - \Delta p_{\partial p} \quad (4)$$

$$p_1 = p_n - \Delta p_{\partial p} - \frac{R}{F_{эфф}} \quad (5)$$

$$\Delta p_{\partial p} = p_n - p_1 - \frac{R}{F_{эфф}}, \quad (6)$$

где p_n – давление нагнетания, p_1 – давление в полости гидроцилиндра, сообщенной со сливом, R – усилие, действующее на шток гидроцилиндра, $F_{эфф}$ – эффективная площадь гидроцилиндра.

В третьей главе предложена конструкция гидрораспределителя рулевого привода с изменением его структуры и соотношений гидравлических проводимостей дросселирующих элементов в зависимости от внешнего нагружения, предназначенная для снижения теплового нагружения привода. Гидропривод рулевой поверхности всегда работает в условиях знакопеременных нагрузок: при отклонении в одну из сторон он преодолевает действие нагрузки, обратное же движение к нейтральному положению осуществляется под действием помогающей нагрузки набегающего потока. В этом случае привод не перемещает рулевую поверхность, а сдерживает её движение. Однако и тогда насос обеспечивает работу привода при большом давлении, преодолевая сопротивление переменных дросселей золотникового распределителя. В выпускной полости гидроцилиндра возникает повышенное давление:

$$p_{\text{вып}} = p_{\text{вп}} + \frac{R}{F_{\text{эфф}}}, \quad (7)$$

где $p_{\text{вып}}$ – давление в выпускной полости, $p_{\text{вп}}$ – давление во впускной полости, R - внешняя нагрузка, $F_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь поршня гидроцилиндра.

Неидентичность характеристик золотников, обусловленная неточностями их изготовления, может привести к такому случаю, когда открыты все кромки золотника, за исключением одной выходной, в этом случае при помогающей нагрузке и возникает давление для двухкамерного привода, равное $4p_{\text{вп}}$, что вынуждает назначать большой запас прочности деталям гидроусилителя. Кроме того, при больших величинах помогающих нагрузок может произойти отрыв жидкости, не успевающей заполнять впускную полость гидроцилиндра, от поршня.

Устранить данные недостатки возможно установкой клапана кольцевания, через который осуществляется соединение с линией нагнетания той полости гидроцилиндра, давление в которой при помогающей нагрузке превышает давление нагнетания.

Для реализации перепуска жидкости через клапан при помогающих нагрузках в блок управления вводится дополнительная логическая часть. Суть её работы состоит в подаче сигнала на закрытие ЗГР2(2) (Рисунок 1), что обеспечивает переток жидкости из подпоршневой полости в надпоршневую через обратный клапан ОК(1), при одновременном выполнении следующих условий:

- 1) давление в полости гидроцилиндра, из которой жидкость должна поступать в слив, $p_2 \geq p_n$;
- 2) подан командный сигнал на открытие золотника слива ЗГР2(2);
- 3) $\frac{(p_1 - p_2)}{p_n} \geq 0,25$.

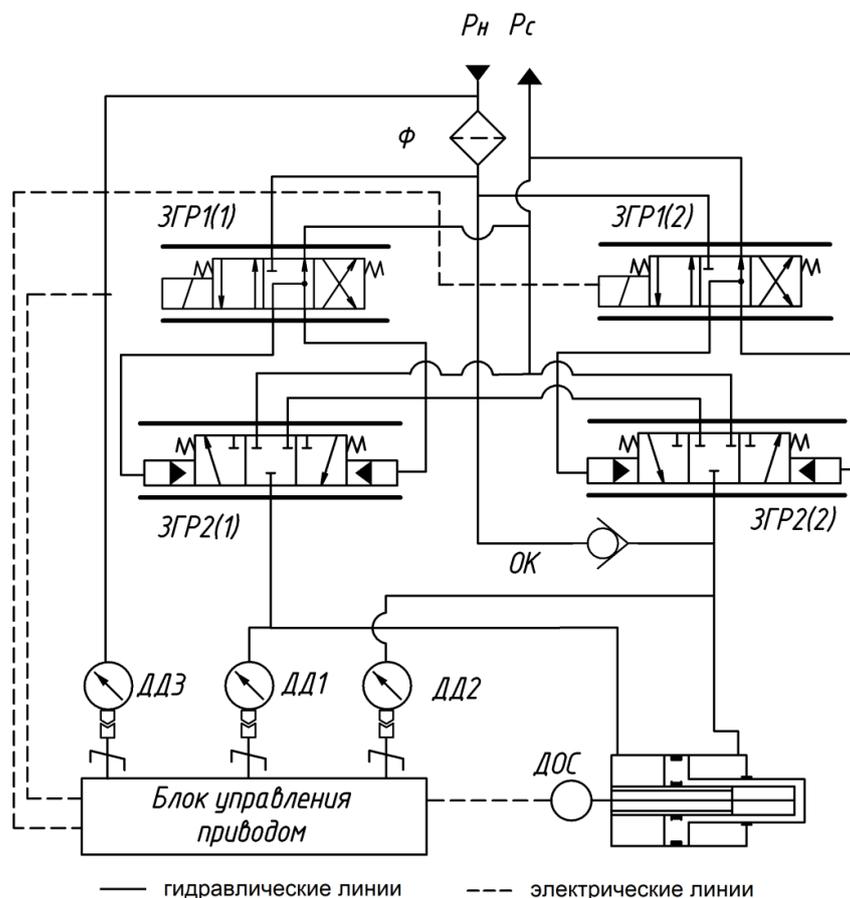


Рисунок 1 - Предлагаемая принципиальная схема привода: ЗГР1(1..2) – золотниковые распределители первого каскада усиления, ЗГР2(1..2) – золотниковые распределители второго каскада усиления, Ф – фильтр, ОК – обратный клапан, ДД1 – датчик давления p_1 в поршневой полости гидроцилиндра, ДД2 – датчик давления p_2 в штоковой полости гидроцилиндра, ДД3 – датчик давления нагнетания, p_n , p_c – давления нагнетания и слива гидросистемы соответственно

Информация о величинах давления жидкости p_1 , p_2 , p_n поступает в блок управления приводом от датчиков давления.

С целью проверки предложенных технических решений по структуре привода и её работоспособности проводилось имитационное моделирование гидропривода. В качестве инструмента моделирования был выбран пакет визуального программирования MATLAB Simulink, позволяющий исследовать динамику линейных и нелинейных систем.

Исследовались следующие расчётные случаи нагружения привода:

- 1) холостой ход, ступенчатая форма сигнала на выпуск штока гидроцилиндра, позволяет определить удовлетворение требованию скорости холостого хода;
- 2) линейно нарастающая помогающая нагрузка от 0 до R_{max} , синусоидальная форма сигнала с частотой π рад/с.

Моделирование показало, что привод с предложенной модификацией золотникового распределителя удовлетворяет требованиям по усилию торможения и скорости холостого хода, предъявляемым к его прототипу. При этом благодаря кольцеванию жидкости при помогающей нагрузке в 60 % от усилия торможения через линию с большим проходным сечением в обход дросселирующей щели золотника снижается нагрев рабочей жидкости с 2,8 °С до 0,1 °С, а потери давления на гидрораспределителе снижаются на 13 %, что позволит уменьшить массу насоса с исходной установочной мощностью 96 кВт на 10 %, а массу теплообменника на 15,5 %.

Также в третьей главе приведены результаты имитационного моделирования автономного гидропривода с адаптивной подстройкой давления нагнетания его индивидуального блока питания под внешнюю нагрузку (Рисунок 2). Проверена совместная работоспособность комплекса конструктивных мероприятий для снижения тепловой напряженности и повышения энергетической эффективности АРП с двухкаскадным гидроусилителем:

- адаптивная подстройка подачи и давления нагнетания насоса переменной подачи в зависимости от нагрузки на привод;
- алгоритм изменения проводимостей дроссельных элементов во втором каскаде усиления золотникового распределителя в зависимости от нагрузки на выходное звено гидроцилиндра.

Пример адаптивного регулирования давления нагнетания насоса для первого расчетного случая приведен на Рисунке 3. Видно, что при нагрузке на шток гидроцилиндра 10000 Н давление лежит в диапазоне от 11,5 до 14 МПа, а при нагрузке 70000 Н – от 30 до 34 МПа.

Сравнение нагрева жидкости при помогающих нагрузках для трех исполнений привода приведено на Рисунке 4. Моделирование производилось в течение 10 с для каждой ступени нагрузки (10000, 20000, ... 80000 Н), на вход привода поступал синусоидальный входной сигнал частотой π рад/с на полный ход штока гидроцилиндра. По мере роста нагрузки изменение температуры жидкости в модели привода без перепускного клапана и с адаптивностью увеличивается нелинейно вплоть до 16,8 °С, а в модели привода с перепускным клапаном и с адаптивностью остается приблизительно на одном уровне (3,1...3,8 °С). Наличие перепускного клапана меняет направленность зависимости $\Delta T(R)$ на противоположную (по сравнению с приводом без клапана), поскольку по мере роста нагрузки, и, соответственно, перепада давления на золотнике, всё большая доля объемного расхода жидкости поступает в слив через клапан кольцевания.

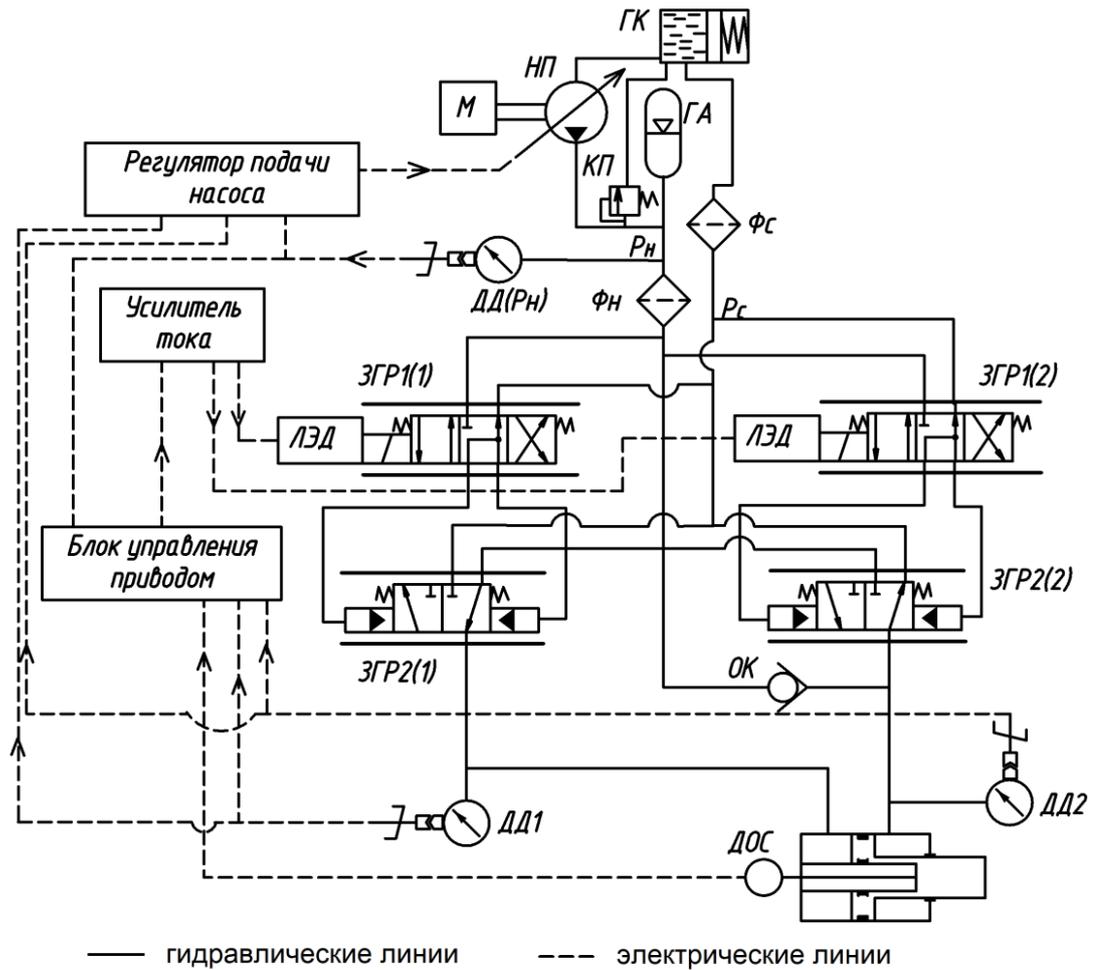


Рисунок 2 - Принципиальная схема автономного привода:

ГК – гидрокомпенсатор, ГА – гидроаккумулятор, НП – насос плунжерный переменной подачи, КП – клапан предохранительный, Фн – фильтр нагнетания, Фс – фильтр слива, ДД(Рн) – датчик давления нагнетания, ЗГР1(1,2) – золотниковые распределители первого каскада усиления, ЗГР2(1,2) – золотниковые распределители второго каскада усиления, ДД1, ДД2 – датчики давления в полостях гидроцилиндра, ОК – обратный клапан, ДОС – датчик обратной связи по положению штока гидроцилиндра

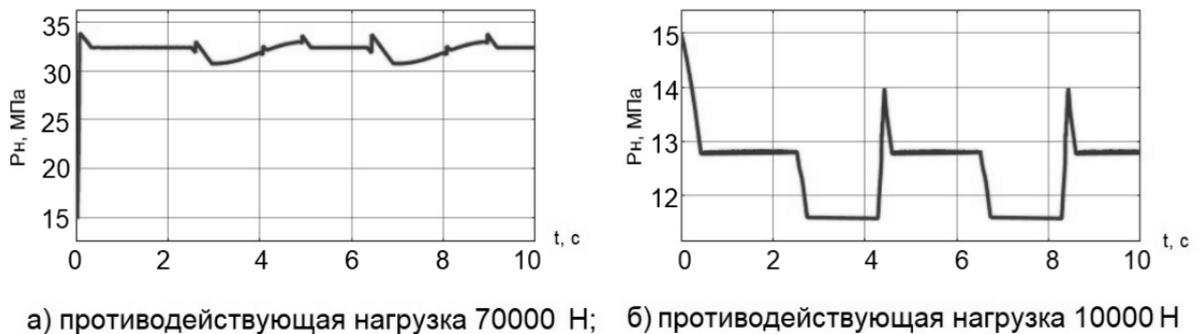


Рисунок 3 - Адаптивная подстройка давления нагнетания под нагрузку на гидропривод

Результаты имитационного моделирования продемонстрировали работоспособность предложенных решений по минимизации тепловыделений. Нагрев жидкости в автономном приводе с клапаном кольцевания и адаптивным регулированием характеристики насоса при помогающей нагрузке от 10000 до 80000 Н не превышает 4 °С, а нагрев жидкости в аналогичном приводе без перепускного клапана достигает 16,8 °С. Наличие адаптивного регулирования характеристики насоса позволяет значительно (с 10,2 до 3,6 °С) снизить нагрев жидкости.

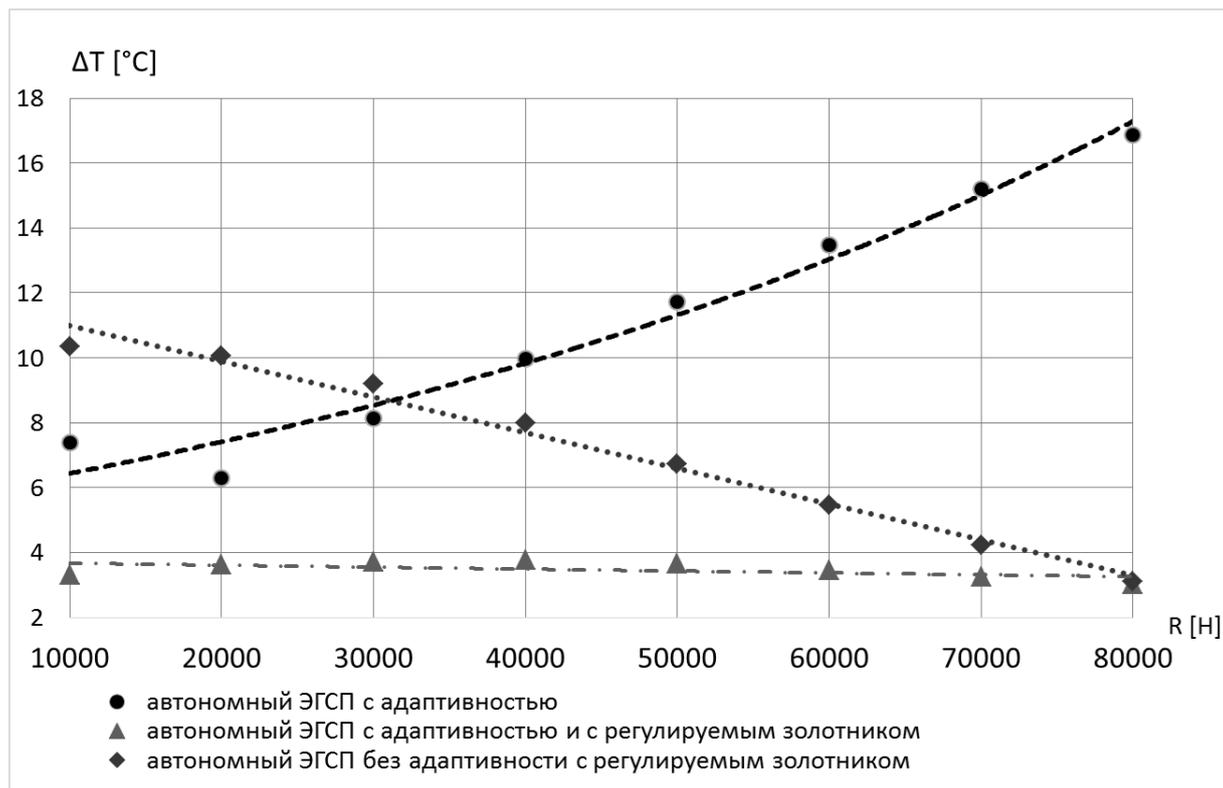


Рисунок 4 - Изменение нагрева жидкости ΔT в зависимости от нагрузки R для разных структурных схем гидропривода

Также в третьей главе представлена новая методика расчета изменения массы силовой системы управления транспортного самолета типа Ил-96-300 при переходе от централизованной структуры энергообеспечения рулевых гидроприводов хвостового оперения к структуре, содержащей локальные гидросистемы на базе электроприводных насосных станций. В методике учтено изменение массы основных насосов централизованных гидросистем при переходе к локальным гидросистемам, дополнительная масса электропроводки к насосным станциям и увеличение мощности генераторов системы электроснабжения самолета вследствие дополнительной нагрузки на нее. Результаты расчета показали, что переход к локальным гидросистемам для самолета размерности Ил-96-300 нецелесообразен, поскольку приводит к увеличению массы системы энергообеспечения рулевых приводов хвостового оперения на 168,626 кг.

Незначительное снижение массы насосов централизованных гидросистем при таком переходе (-2,2 кг каждый) и замена трубопроводных магистралей от блока питания гидросистемы до приводов на электрические кабели нивелируется собственной массой насосных станций локальных гидросистем и увеличением массы привод-генераторов системы электроснабжения (с 43 до 46,2 кг каждый).

В четвертой главе помещены результаты валидации математической модели теплового состояния гидросистемы, предложенной в главе 2, с учетом зависимости КПД гидронасоса от частоты вращения вала коробки агрегатов двигателя самолета, объемно-температурного расширения жидкости при ее дросселировании в золотниковых распределителях и зависимости нагрева жидкости от внешнего нагружения гидропривода.

Валидация проводилась путем сопоставления результатов решения математической модели (зависимость температуры рабочей жидкости от времени полета) и материалов натурных работ по расшифровкам системы бортовых измерений и средств объективного контроля летных испытаний реального ЛА. Рассмотрены две натурные работы:

- 1) полет на высоте до 1 км, $M = 0,4$;
- 2) полет на высотах 5, 10 и 7 км в диапазоне чисел M от 0,4 до 0,85.

Результаты валидации приведены на Рисунке 5 – для первой натурной работы, на Рисунке 6 – для второй натурной работы. Результаты расчета среднеквадратической ошибки и относительной погрешности валидации приведены в Таблице 1.

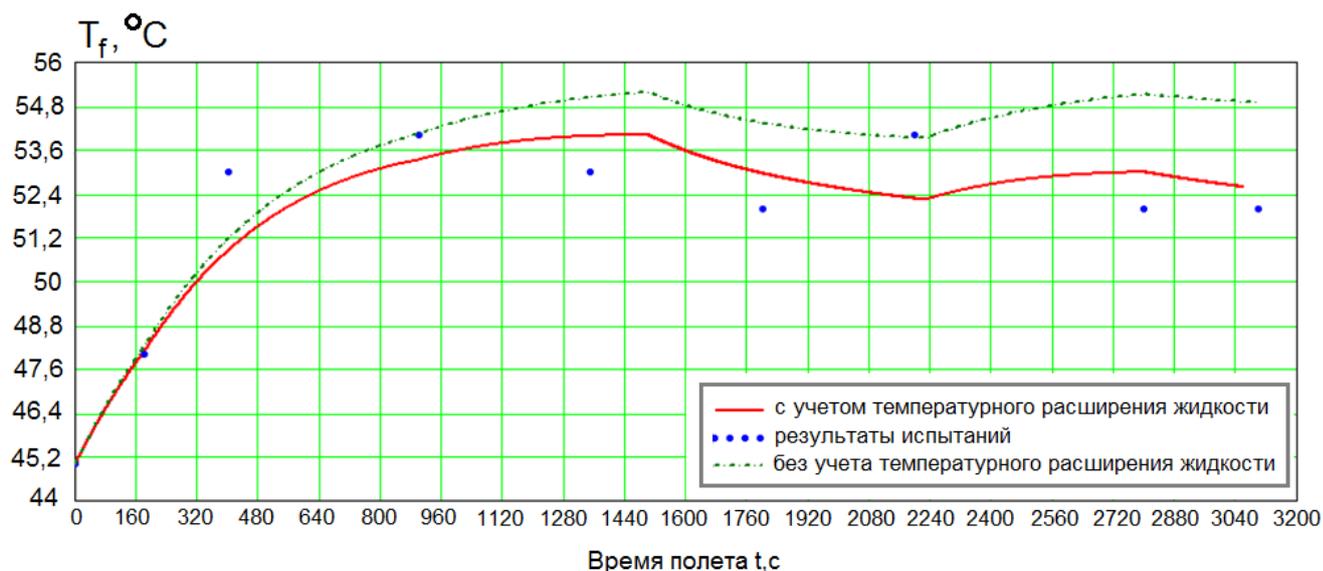


Рисунок 5 – Первая натурная работа.
Зависимость температуры рабочей жидкости от времени полета

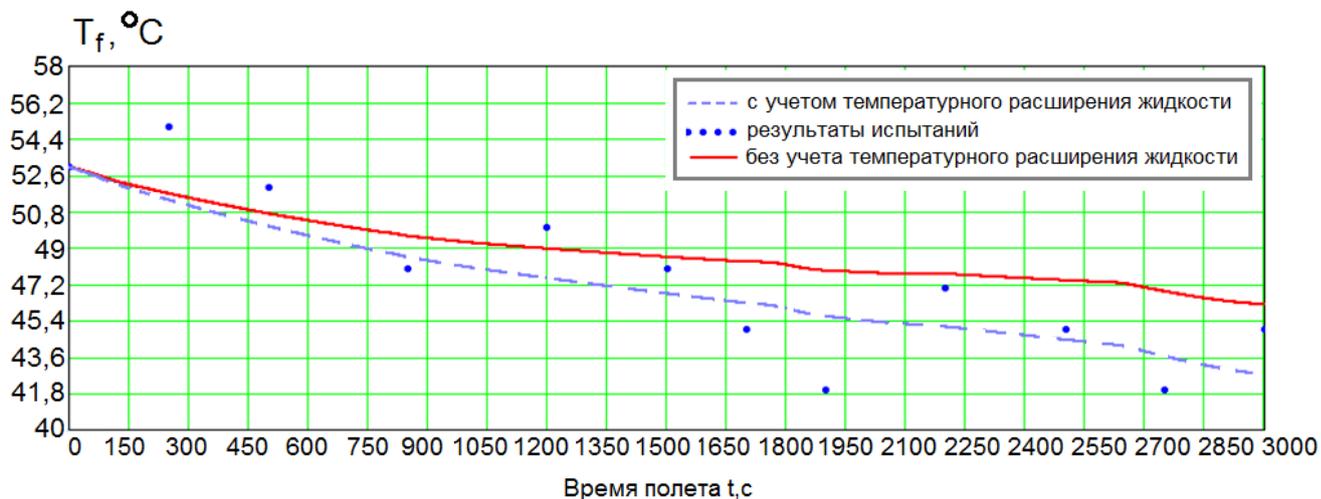


Рисунок 6 – Вторая натурная работа.
Зависимость температуры рабочей жидкости от времени полета

Таблица 1 - Результаты расчета погрешности валидации

Натурная работа	№ 1		№ 2	
	учтено	не учтено	учтено	не учтено
Температурное расширение жидкости	учтено	не учтено	учтено	не учтено
Среднеквадратическая ошибка, $^\circ\text{C}$	1,25	1,81	3,09	3,62
Средняя относительная погрешность, %	2,04	2,68	4,60	5,47

Практическое использование методики расчета температуры рабочей жидкости гидросистемы и математической модели тепловых процессов в гидросистеме подтверждается актом внедрения.

В заключении представлены результаты проведенной работы, соответствующие поставленной цели и задачам исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны новые конструктивные решения для повышения энергетической эффективности электрогидравлических рулевых приводов и гидросистем летательных аппаратов.

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработана структура электрогидравлического привода и алгоритм управления соотношением проводимости дросселирующих элементов привода в зависимости от величины и знака внешней нагрузки, предназначенные для снижения нагрева рабочей жидкости при ее дросселировании в золотниковом распределителе. Реализована обратная связь по нагрузке на привод через датчики давления в полостях гидроцилиндра. При помощи имитационного моделирования динамических процессов доказана работоспособность предложенного способа

снижения тепловыделений в гидроприводе с дроссельным регулированием скорости, заключающегося в автоматическом кольцевании рабочей жидкости через клапан в линию нагнетания в обход золотникового гидрораспределителя при величине помогающей внешней нагрузки на выходное звено привода в 30% от усилия торможения и выше. При этом полностью обеспечивается выполнение требований к энергетическим характеристикам привода – к усилию торможения и скорости холостого хода.

2. Разработана структура автономного гидропривода, содержащего блок питания с адаптивной подстройкой режима работы к внешней нагрузке на гидропривод. Результаты имитационного моделирования показали работоспособность предложенной структуры. Наличие адаптивной регулировки характеристики насоса под нагрузку на привод позволяет значительно (с 10,2 до 3,6 °С) снизить нагрев жидкости.

3. Разработан алгоритм адаптивного регулирования режима работы блока питания автономного гидропривода в зависимости от внешнего нагружения.

4. Разработана математическая модель тепловых процессов в гидросистеме самолета и инженерная методика оценки изменения температуры жидкости в гидросистеме в течение полета, позволяющая на этапе проектировочного расчета будущей гидросистемы оценить изменение температуры жидкости во времени по нескольким типовым полетным профилям и принять решения по регулированию тепловыделений, а на этапе поверочного расчета гидросистемы – рассчитать ее температурный режим для проверки правильности принятых технических решений до начала стендовых и летных испытаний. Модель учитывает параметры окружающей среды, внешнюю нагрузку на приводы, скорости и углы отклонения рулевых поверхностей, режим работы двигателя, КПД насоса, дросселирование жидкости в золотниковых распределителях, объемное расширение жидкости при проходе через них. Результаты моделирования показали, что расчетная кривая изменения температуры рабочей жидкости с учетом ее объемного расширения близка к данным летных испытаний.

5. Разработана методика расчета массы смешанной структуры энергопитания гидроприводов рулевых поверхностей хвостового оперения самолета Ил-96-300, источниками гидропитания в которой являются электроприводные насосные станции. Проведенные расчеты показывают, что применение для энергопитания приводов секций руля высоты и руля направления тяжелого магистрального самолета локальных гидросистем с источниками питания на основе электроприводных насосных станций с насосом переменной подачи приводит к увеличению массы систем самолета по сравнению с существующей структурой гидропитания приводов от централизованных гидросистем. Небольшой выигрыш в установочной массе гидронасосов

нивелируется приростом массы генераторов переменного тока и большей массой системы энергопитания приводов рулевых поверхностей хвостового оперения в целом.

6. Разработанные конструктивные решения для повышения энергетической эффективности электрогидравлических рулевых приводов позволят снизить массу теплообменных аппаратов гидросистемы самолета на 15,5 %, а массу основных насосов – на 10 %.

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития гидравлических систем летательных аппаратов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Более глубокая проработка предложенных технических решений по минимизации тепловой нагрузки на гидросистему самолета:

- дополнение имитационных моделей гидропривода (упругость механических звеньев, внутренние утечки и микрогеометрия золотникового распределителя, нелинейности в линейном электродвигателе);
- исследование быстродействия, точности и устойчивости гидропривода;
- исследование переходных процессов в автономном блоке питания привода;
- дополнение математической модели теплового состояния гидросистемы зависимостями теплоемкости и вязкости жидкости от ее температуры с целью снижения погрешности расчета.

В приложении А приведены зависимости функциональных параметров гидропривода от времени, полученные в результате моделирования работы алгоритма управления соотношением проводимости дросселирующих элементов привода в зависимости от величины и знака внешней нагрузки.

В приложении Б приведены результаты расчета массы гидравлических трубопроводов подвода питания к приводам рулевых поверхностей хвостового оперения самолета Ил-96-300 для централизованной и смешанной структур энергообеспечения, характеристики серийно производимых насосных станций авиационного назначения.

В приложении В приведены результаты валидации математической модели теплового состояния гидросистемы по данным летных испытаний.

В приложении Г приведен акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс Московского авиационного института.

Основные научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени:

в журналах, входящих в Перечень ВАК:

1. Волков А.А., Долгушев В.Г., Пугачев Ю.Н., Чулков М.В. Моделирование тепловых процессов в гидросистемах летательных аппаратов // Тепловые процессы в технике. – 2024. – Т.16. - № 1. – С. 17-25.

2. Чулков М.В. Имитационное моделирование автономного гидропривода, адаптивного к внешней нагрузке // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024 - № 1(145). – <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-1-2333>

в журналах, входящих в международные системы цитирования:

3. Chulkov, M., Volkov, A. Reducing of hydraulic losses at the hydraulic drive under helping loads. // Aerospace Systems. – 2022. – No. 5. – PP. 367-376. <https://doi.org/10.1007/s42401-022-00134-0>

материалы всероссийских и международных конференций:

4. Chulkov, M., Volkov, A. (2023). The Method of Thermal Calculation of the Aircraft Hydraulic System, Taking into Account Heat Losses at the Power Unit. In: Strelets, D.Y., Korsun, O.N. (eds) Recent Developments in High-Speed Transport. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9010-6_10

5. Чулков М.В. Влияние применения локальных гидравлических систем на массу системы управления тяжелого транспортного самолета // 2-я Международная научно-техническая конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения». 29 августа – 3 сентября 2023 года, Алушта. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023 – 19,3 Мб [Электронное издание]. - С. 33-35.

6. Чулков М.В. Имитационное моделирование адаптивного автономного гидропривода // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 20-24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023 – 4,2 Мб [Электронное издание]. – С. 54-55.

7. Чулков М.В. Оценка применения локальных гидравлических систем на тяжелом транспортном самолете // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLIX Гагаринские чтения 2023. — М.: Издательство «Перо», 2023. — 7,43 Мб. [Электронное издание]. – С. 56-57.

8. Чулков М.В. Имитационное моделирование блока питания локальной гидросистемы самолета // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 21-25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022 – 8,06 Мб [Электронное издание]. – С. 76-77.

9. Чулков М.В. Методика моделирования теплового состояния гидросистемы маневренного самолета // 1-я Международная научно-техническая

конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения». 29 августа – 3 сентября 2022 года, ОУЦ «Алушта» МАИ, 4-9 сентября, Федеральная территория Сириус». Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022 – 13,2 Мб [Электронное издание]. – С. 99-100.

10. Чулков М.В. Исследование электрогидравлического следящего привода с пониженным тепловыделением при помогающих нагрузках путём имитационного моделирования // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо». - 2021. – Мб. [Электронное издание]. – С. 75.

11. Чулков М.В. Влияние нагрева рабочей жидкости в золотниковых гидрораспределителях приводов системы управления полетом на тепловое состояние гидросистемы самолета // 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 22-26 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021 – 9,43 Мб [Электронное издание]. – С. 77-78.

12. Чулков М.В. Исследование электрогидравлического следящего привода с пониженным тепловыделением при помогающих нагрузках путём имитационного моделирования. // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо». – 2020. – С. 512-513.