

Королев Виктор Владимирович

**ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТОПЛИВОПИТАНИЕМ МНОГОСВЯЗНОГО АВИАЦИОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Картовицкий Лев Леонидович

Официальные оппоненты: Мельник Валерий Иванович,
доктор технических наук, старший
научный сотрудник, ОАО ГНЦ "Летно-
исследовательский институт им. М.М.
Громова", главный научный сотрудник

Коршенко Валерий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
ОАО "Климов", главный научный
сотрудник

Ведущая организация: ОАО «Компания «Сухой» – филиал
ОАО «Компания «Сухой» «ОКБ
Сухого»

Защита состоится «16» декабря 2013 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г.Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета доктор технических наук,
профессор

Ю.В.Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

По мере совершенствования авиационной техники вопросы оптимального управления самолетом и режимами работы силовой установки становятся все более актуальными и наукоёмкими. Многосвязное управление двигателем двухконтурной схемы (ТРДД) необходимо осуществлять таким образом, чтобы обеспечить наилучшие тяговые и экономические показатели в полном диапазоне режимов ее функционирования и условий полета.

Для боевых маневренных самолетов тяговооруженность является его одним из важнейших показателей. Высокий показатель тяговооруженности означает лучшую динамику маневренного самолета и меньшее время набора продольной скорости при увеличении тяги силовой установки. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности к силовым установкам перспективных маневренных самолетов предъявляются более жесткие требования по времени приемистости двигателя, что обеспечивается оптимизацией законов управления многосвязной системы автоматического управления (САУ) с учетом ограничений, накладываемых на эксплуатационные режимы функционирования силовой установки.

Целью исследований диссертационной работы является:

- разработка оптимальной структуры многосвязной САУ перспективной силовой установки, алгоритмов ее функционирования и анализ работы многосвязной САУ, обеспечивающей для перспективного двигателя пятого поколения заданное требование по минимизации времени приемистости. Данное требование должно удовлетворять ограничению не более 3 секунд, а алгоритмы синтеза законов управления должны учитывать весь спектр нелинейных особенностей газодинамических и тепловых процессов элементов силовой установкой

Применение цифровых систем автоматического управления для газотурбинных двигателей в сравнении с гидромеханическими и

электронно-гидромеханическими системами позволяет повысить эффективность силовой установки путем применения гибких алгоритмов управления. В этой связи такой показатель, как малое время приемистости, без создания многосвязной САУ, позволяющей учитывать вектор эксплуатационных ограничений для силовой установки маневренного истребителя, не представляется возможным.

Исследования и их практическое воплощение, направленные на разработку новых оптимальных алгоритмов управления многосвязной САУ, управляющей режимами приемистости и сброса газа ТРДД с учетом эксплуатационных ограничений, являются актуальными в связи с необходимостью оптимизации переходных режимов по мере выявления новых динамических особенностей объекта управления.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка структуры многосвязной САУ и синтез оптимальных законов управления, позволяющих уменьшить время приемистости ТРДДФ с учетом ограничений, предъявляемых к элементам и топливной системе двигателя.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих современных требований к режимам полетного и земного малого газа (ПМГ и ЗМГ) и качеству управления динамическими режимами ТРДД.
2. Выполнить анализ существующих работ в области многосвязного управления динамическими процессами силовой установки, реализующих минимизацию времени приемистости.
3. Выполнить анализ свойств ТРДД как объекта управления: его газодинамические особенности и динамические свойства в переходных режимах, а также особенности режимов

функционирования и структуры системы топливопитания, связанной с газодинамическими и тепловыми процессами объекта управления.

4. Сформулировать ограничения, которые необходимо учитывать при синтезе законов управления и оптимизации структуры САУ.
5. Сформулировать критерии выбора оптимальных вариантов для законов управления, реализуемых в оптимальной структуре САУ.
6. Синтезировать законы и оптимизировать структуру многосвязного управления с учетом значимых управляющих факторов. В этой связи оптимизация структуры и взаимодействие контуров управления предполагает решение нижеперечисленных задач:
 - синтез закона подачи топлива в основную камеру сгорания (ОКС);
 - синтез закона управления углом установки направляющих аппаратов (НА) компрессора высокого давления (КВД);
 - синтез закона управления давлением топлива перед дозаторами топлива ОКС.
 - синтез распределенной структуры системы топливопитания.
7. Выполнить анализ эффективности управления динамическими режимами, устойчивости и робастности разработанной САУ с использованием натурального эксперимента.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе научных задач использовались теория газотурбинных двигателей, методы системного анализа, методы классической и современной теории автоматического управления, многомерных САУ, цифровых САУ, методы идентификации объектов управления, современные комплексы прикладных программ моделирования динамики двигателя.

Научная новизна

Выполнен синтез структуры системы многосвязного управления механизацией компрессора и топливопитания и оптимизация законов топливоподачи с учетом эксплуатационных ограничений для узлов ТРДД и идентифицированных особенностей ускорения роторов в динамических режимах с целью минимизации времени приемистости.

Разработаны алгоритмы управления, обеспечивающие динамические характеристики системы в заданной области эксплуатации с учетом деградации основных узлов двигателя в процессе выработки ресурса.

На защиту выносятся

1. Методика синтеза законов управления топливной системой, обеспечивающих выполнение требований, предъявляемых к динамическому качеству ТРДД в общей структуре системы управления, и газодинамических ограничений.
2. Структура многосвязной распределенной САУ, позволяющей достичь желаемого времени приемистости двигателя при сохранении запасов газодинамической устойчивости (ГДУ) компрессора и устойчивости горения в ОКС и с учетом ограничений по нагрузкам на узлы двигателя.
3. Метод идентификации динамических свойств двигателя с учетом особенностей его разгонных характеристик.
4. Законы динамического распределения расхода топлива по коллекторам ОКС в зависимости от режима работы ТРДД.
5. Законы управления насосом переменной производительности с учетом особенностей распределенного дозирования топлива в камеры сгорания.
6. Алгоритмические решения, реализованные в программно-математическом обеспечении цифрового блока управления ТРДД.
7. Результаты экспериментальной отработки разработанной САУ ТРДД.

Практическая полезность и реализация результатов

Разработки многосвязной САУ переходными режимами двигателя применяются в ОКБ им. А. Люльки для создания распределенной САУ перспективным авиационным ТРДДФ.

Реализованные структурные решения позволили исключить индивидуальную настройку параметров САУ для обеспечения заданных динамических качеств ТРДД.

Полученные алгоритмы и структура реализованы в САУ ТРДДФ, разработанной в ОКБ им. А. Люльки, и в настоящий момент проходят опытную летную эксплуатацию.

Достоверность и обоснованность результатов достигается

Достоверность положений, результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается:

- Адекватностью экспериментальных данных данным моделирования динамики системы на основе динамической модели ТРДД, используемой в ОКБ им. А. Люльки.
- Стендовыми испытаниями и испытаниями в составе летных объектов. Собрана и обработана статистика по значительному количеству двигателей во всей области эксплуатации силовой установки, в том числе статистика для периода наработки в пределах заданного ресурса.
- Подтверждена робастность разработанных законов управления и структуры цифровой САУ (ЦСАУ) к отклонениям параметров объекта управления и характеристик агрегатов САУ.

Апробация работы и публикации

Основными результатами работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III международная Научно-Техническая Конференция «Авиадвигатели XXI века», ЦИАМ, Москва 2010.
- Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», МАИ, Москва 2012.

По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК; получено 3 патента.

Личный вклад автора

Автором были разработаны:

- методы исследования объекта и анализ динамических особенностей разгонной динамики двигателя,
- структурные решения многосвязной САУ переходными режимами, а также систем управления подачей топлива и положением НА КВД,
- алгоритмы реализации структурных решений в цифровой САУ ТРДД и программно-математическое обеспечение (ПМО) цифрового блока САУ ТРДДФ.

Автор принял участие во внедрении структурных решений на всех этапах разработки и доводки системы управления опытного двигателя.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 134 страницах и включает в себя 73 иллюстраций и 21 таблицу. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемой литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируются задачи исследования,

отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ существующих способов динамическими режимами ТРДД.

При обзоре способов управления проведен анализ отечественного и зарубежного опыта в области исследований процессов и систем управления основным контуром ТРДД, а также научно-технических работ по данному направлению в отечественном двигателестроении.

Анализ состояния проблемы управления динамическими режимами показал следующее:

– зарубежные фирмы ведут теоретические и экспериментальные исследовательские работы по созданию многосвязных систем управления основным контуром с применением цифровых регуляторов. Однако публикации по этим исследованиям носят описательный характер, технические решения не приводятся или приводятся без достаточного обоснования.

– В эксплуатируемых электронных системах управления (например, ЭСУД для НК-32) применены законы управления, эквивалентные законам управления гидромеханических систем (например, временные законы управления приемистостью).

– Большая часть представленных в них предложений касается частных вопросов улучшения работы гидромеханических систем управления. Открытых работ, связанных с управлением динамическими режимами в ЦСАУ, практически нет.

Ограниченное количество открытых публикаций по управлению динамическими режимами связано с серьезным военным ориентированием проблематики, а также с коммерческими соображениями. Работы, описывающие объект управления как многосвязную систему, методы и законы управления, носят закрытый характер, а результаты скупы

докладываются на конференциях и носят скорее рекламный, а не научно-технический характер.

Известные методы управления приемистостью не учитывают всех современных требований, предъявляемых к объекту управления.

Одно из основных требований, предъявляемых к ТРДД для маневренных самолетов – пониженная заметность в задней полусфере ТРДД; это налагает существенные ограничения на использование площади РС как управляющего фактора на дроссельных режимах двигателя.

Исследования, проведенные в ОКБ им. А.Люльки применительно к современному ТРДДФ, показали, что использование механизации изделия (НА КВД и НА компрессора низкого давления (КНД)) в широком диапазоне углов установок приводит к существенному росту нагрузок на межроторные подшипники ТРДДФ, снижает ресурс двигателя, а также приводит к существенному ухудшению экономических показателей двигателя.

Применение несвязанных дискретно переключаемых структур САУ (для установившихся и динамических режимов) приводит к скачкообразному изменению тяги ТРДДФ в момент переключения, что затрудняет пилотируемость летательного аппарата и сужает область применения алгоритмов.

Данные аспекты не позволяют использовать известные методы управления быстрого изменения тяги (БИТ), разработанные в ФГУП ЦИАМ.

Некоторые работы ограничиваются лишь синтезом законов управления и не рассматривают синтез структуры САУ. В частности, определенные трудности возникают при реализации законов управления, связанных с применением поэлементных моделей ТРДДФ для расчета ненаблюдаемых параметров (например, прямое управление по расчетным запасам ГДУ компрессоров). Для точной реализации данных законов управления необходимы прецизионные датчики давления за

компрессорами и расхода топлива. Используемые в настоящий момент датчики не позволяют реализовать законы для всей области частот роторов: так, на режимах, близких к режиму МГ двигателя, погрешность измерения давления приводит к потере 20% от располагаемых запасов ГДУ компрессора. К тому же разработка динамической модели двигателя и ее идентификация с реальным объектом управления – длительная и весьма сложная задача, сопоставимая по времени разработки с разработкой САУ динамическими режимами.

Данная работа является актуальной, так как использует комплексный подход к решению задачи управления приемистостью:

- синтезированные законы управления учитывают весь спектр требований к ТРДДФ
- синтезированы не только законы управления основными контурами ТРДДФ, но и структура САУ, а также разработано ПМО реализующее синтезированные алгоритмы.
- реализация синтезированных законов и структуры возможна в современной САУ ТРДДФ с учетом налагаемых ограничений на комплектующие.

Во второй главе на основе экспериментальных данных проанализированы свойства объекта управления, произведена его идентификация, рассмотрена структура системы топливопитания.

❖ В качестве объекта управления ЦСАУ рассматривается современный турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) малозаметного многорежимного маневренного самолета.

Для двигателей, применяемых в подобного класса маневренных самолетах, характерны следующие особенности:

- применение насоса регулируемой производительности

$$\Delta P = f(L_{HA}, n^2, Gt_{\Sigma})$$

- регулируемые направляющие аппараты компрессоров высокого и низкого давлений (НА КВД и ВНА КНД), характеризуемые углом установки:

$$\alpha_{НАКВД} = f(n_{2np})$$

$$\alpha_{НАКНД} = f(n_{1np})$$

- регулируемая площадь критического сечения реактивного сопла (РС)

$$F_{РС} = f(\alpha_{руд}) \text{ или } F_{РС} = f(n_{1пр})$$

❖ **Проанализированы ограничения, накладываемые на программы управления площадью РС.**

Одними из требований к режимам работы ТРДДФ являются

1. Обеспечение посадки объекта с большими углами атаки,
2. Снижение эффективной поверхности рассеивания изделия в задней полусфере.

Для обеспечения данных требований на бесфорсажных полетных режимах должна быть обеспечена минимальная площадь критического сечения РС. Поэтому вопросы управления контуром РС на бесфорсажных режимах в данной работе не рассматриваются.

❖ **Выполнен анализ переходных процессов в ТРДД при изменении угла установки НА КНД.** Сделан вывод, что применение специальных программ НА КНД на динамических режимах нецелесообразно.

❖ **Выполнен анализ переходных процессов в ТРДД по частотам вращения роторов ВД и НД при изменении угла установки НА КВД.** Программа угла установки НА КВД в области частот МГ ТРДД выбирается исходя из основного условия – минимальной тяга двигателя, что возможно обеспечить снижением расхода воздуха через ТРДД. Выбранная программа положения может быть неоптимальна с точки зрения поддержания максимального коэффициента полезного действия (КПД) компрессора.

Критерии выбора программы положения НА КВД для динамических режимов могут быть совершенно иными: обеспечение максимального расхода воздуха через газогенератор, увеличение КПД компрессора, обеспечение необходимых запасов ГДУ. Таким образом, программа положения, выбранная для установившихся режимов работы, будет являться неоптимальной для динамических.

При гидромеханическом управлении углом установки НА КВД было невозможно реализовать несколько программ управления для различных режимов работы ТРДД. При цифровом управлении возможность эта появилась, возникли задачи:

- синтеза программы управления НА КВД для динамических режимов работы ТРДД,
- синтеза структуры управления, позволяющей реализовать плавный переход с одной программы управления на другую и сохранить заданную зависимость тяги от положения рычага управления двигателем (РУД).

Экспериментально подтверждено, что программа НА КВД для установившихся режимов является неоптимальной с точки зрения обеспечения потребного расхода воздуха через внутренний контур ТРДД на режимах приемистости и КПД КВД в области частот МГ.

При изменении угла установки НА КВД в сторону открытия увеличивается расход воздуха через внутренний контур ТРДД, что дополнительно сопровождается увеличением КПД компрессора и увеличением частоты вращения ротора КНД. Увеличение расхода воздуха обеспечивает возможность дополнительного увеличения избытков расхода топлива на режиме приемистости без уменьшения запасов ГДУ компрессора. Сделан вывод о целесообразности применения двух программ управления в зависимости от режима работы ТРДД: установившегося или динамического.

❖ **Рассмотрена система топливопитания, и в частности, структура дозирования топлива в ОКС;** выполнен анализ факторов, препятствующих снижению времени приемистости двигателя в существующих системах управления.

Для рассматриваемого объекта управления характерно отношение расхода топлива в ОКС на максимальном режиме к расходу топлива на режиме запуска около 50:

$$\frac{Gt_{\text{ОКСmax}}}{Gt_{\text{ОКСзапуск}}} \approx 50$$

Обеспечить подобную кратность расходов без использования двух топливных коллекторов форсунок ОКС не представляется возможным. При этом следует отметить, что процесс подключения второго топливного коллектора ОКС существенно влияет на характер приемистости двигателя.

Подробно рассмотрены и проанализированы переходные процессы в двигателе в момент подключения второго коллектора форсунок ОКС.

Отмечены следующие недостатки использования гидромеханического распределителя топлива:

1. На время заполнения второго коллектора форсунок ОКС расход топлива, заполняющий коллектор, не компенсируется регуляторами основного контура ТРДД, что приводит к увеличению времени приемистости двигателя. При этом время заполнения коллектора может достигать 0.8...2с.

2. Переход топливного коллектора из незаполненного состояния в заполненное сопровождается резким изменением характеристик горения при впрыске суммарного расхода топлива в камеру сгорания. При этом имеет место изменение параметров работы двигателя, возможен срыв пламени в первичной зоне ОКС и потеря устойчивости компрессора.

3. Подключение второго топливного коллектора форсунок ОКС происходит в зависимости от суммарного расхода топлива и не учитывает изменения параметров работы ОКС. Таким образом, переходный процесс, связанный с подключением второго коллектора, может протекать как

плавно, так и со значительными возмущениями в газо-воздушном тракте (в зависимости от темпа изменения расхода топлива в ОКС и давления в камере).

4. Невозможность динамического распределения топлива по коллекторам ОКС в зависимости от режима работы ТРДД.

В связи с этим в САУ ТРДД применяется независимое дозирование топлива в коллекторы форсунок ОКС двумя дозаторами с электронным управлением положения дозирующего элемента.

Применение независимых дозаторов топлива с электронным управлением позволяет реализовать различные алгоритмы распределения топлива по коллекторам ОКС.

Для оценки влияния процесса подключения второго топливного коллектора форсунок ОКС были выполнены специальные работы в составе двигательного стенда и в составе объекта.

Методика оценки включала в себя анализ серии переходных процессов с различными параметрами подключения коллектора: расходы заполнения второго коллектора, расходы через первый коллектор, порог подключения коллектора по параметрам работы ТРДД, темпы перераспределения топлива по мере увеличения режима.

Наиболее характерно это влияние проявляется при плавном увеличении режима работы ТРДД (рис. 2).

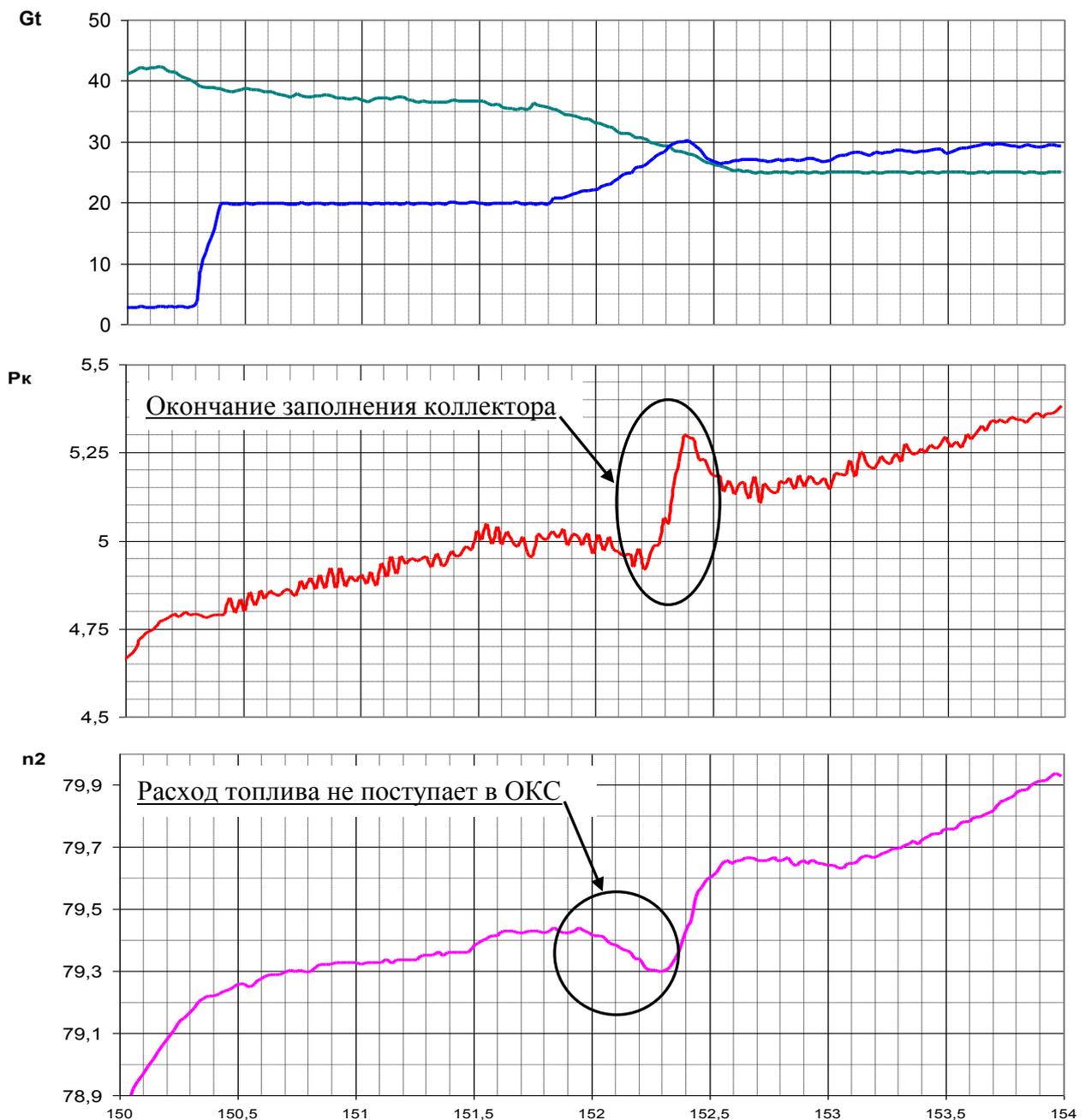


Рис. 2. Изменение параметров режима работы ТРДД при включении в работу второго топливного коллектора ОКС: расход топлива в ОКС (Gt), давление за КВД (Pk), частота вращения РВД (n2) по времени

По результатам анализа графиков переходных процессов при подключении второго топливного коллектора ОКС были выделены факторы, которые необходимо учитывать при выборе программы распределения топлива по коллекторам ОКС на установившихся и динамических режимах работы ТРДД:

- Время заполнения второго коллектора может достигать 2с в зависимости от величины расхода топлива в процессе заполнения коллектора;
- Расход топлива на заполнение второго коллектора;
- Процесс приемистости ТРДД полностью зависит от расхода топлива, дозируемого через первый коллектор, во время заполнения второго коллектора;
- Увеличение расхода топлива через второй коллектор снижает время заполнения коллектора, но увеличивает возмущение по параметрам работы ТРДД в момент окончания заполнения.

❖ **Рассмотрена система насосной подачи**, отмечен основной недостаток применяемой системы насосной подачи – подогрев топлива на режимах планирования и крейсерских режимах полета.

Подробно рассмотрена система подачи топлива.

В системе для подачи топлива в ОКС используются два насоса переменной производительности: плунжерный насос аксиального типа и гидроприводной центробежный насос (НГП):

$$\Delta P_{НГП} = f(\Delta P_{НГП}) \quad \Delta P_{НГП} = f(L_{НА}, n^2, Gt_{\Sigma})$$

Переключение между насосами осуществляется по командам ЦСАУ на дроссельном режиме, выше режима малого газа двигателя.

При обеспечении времени приемистости ТРДД в соответствии с требованиями, предъявляемыми к современным системам, важным фактором становится быстродействие контура управления заданным давлением. Время переходных процессов по давлению топлива должно быть не более 0,1..0.15с. Построение быстродействующего контура управления без использования модели НГП представляется затруднительным.

Характеристики НГП представляют собой трехмерную зависимость напора насоса (разности давлений за и перед НГП) от частоты вращения входного вала, суммарного расхода топлива и положения направляющих аппаратов НГП.

Из-за технологических разбросов узлов каждый агрегат имеет индивидуальные характеристики. Достоверной аналитической модели для расчета характеристик нет. Экспериментальное определение трехмерных полей характеристик каждого агрегата представляет собой трудоемкую и крайне дорогостоящую задачу. Использование индивидуальной трехмерной модели реального времени требует ввода больших массивов данных в память цифрового блока управления ТРДД и, следовательно, недопустимо.

Возникают задачи:

- определения необходимого и достаточного объема экспериментальных данных для построения модели НГП,
- разработки методики получения характеристик с учетом технических возможностей испытательных стендов,
- разработки модели НГП реального времени,
- представления характеристик НГП в компактной форме по ограниченному объему экспериментальных данных для идентификации модели НГП.

Для построения корректной модели НГП необходимо последовательно получить зависимости регулируемого параметра (перепада на НГП) от влияющих факторов.

Для получения характеристик питающего насоса были проведены специальные испытания на двигательном стенде.

Проведенные испытания позволили за короткое время (время работы около 15 минут) получить точные характеристики НГП в форме удобной для анализа и построения модели НГП.

В третьей главе

❖ Синтезирована программа положения НА КВД для переходных режимов работы ТРДД

Для ускорения переходных процессов необходимо повысить расход воздуха через внутренний контур. Это достигается путем введения дополнительной программы НА КВД для переходных режимов – программы приемистости. Программа приемистости смещена на (5...10) градусов относительно программы для установившихся режимов в сторону раскрытия НА (рис. 6). Ограничением для смещения программы является граница вибропрочности лопаток компрессора. Проанализирована эффективность перестройки программы положения НА КВД (рис. 7).

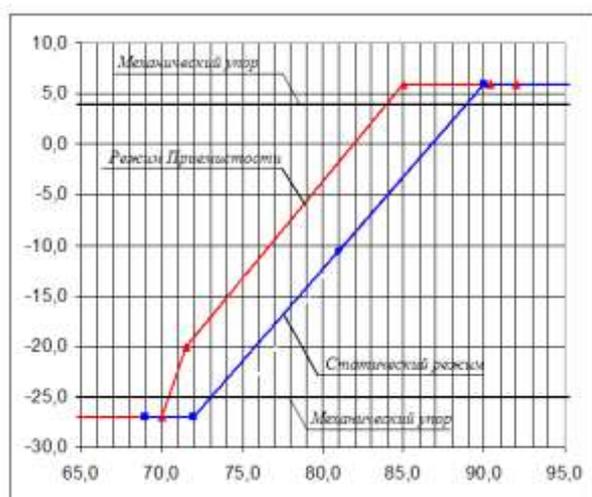


Рис. 6. Синтезированные программы положения НА КВД для установившихся и переходных режимов.

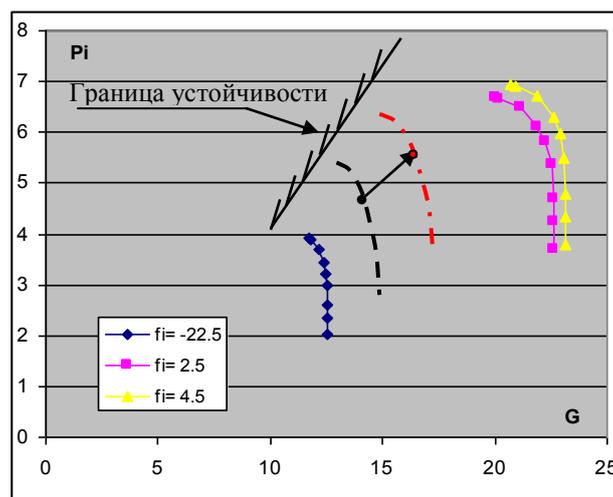


Рис. 7. Оценка изменения параметров работы КВД при изменении угла установки НА

❖ Выполнен анализ основных законов управления приемистостью с точки зрения сохранения запасов ГДУ компрессора и времени приемистости при действии основных факторов: выработка ресурса, прогрев конструкции, отборы мощности с валов двигателя и отборы воздуха из тракта.

В качестве основного закона управления был выбран закон $dn_{np}/dt/P_k=f(n_{2np})$, который:

- Практически не критичен к погрешности расходных характеристик дозаторов топлива. Влияние погрешности расходных характеристик усиливается при переменном давлении топлива на входе в дозаторы. При применении данного закона не требуется индивидуальная настройка характера приемистости для каждого двигателя. Управление с использованием данного закона также минимизирует разброс времен приемистости при изменении условий работы ТРДД.
 - Учитывает параметры работы газогенератора и позволяет точнее контролировать запасы ГДУ компрессора при ухудшении характеристик компрессора. Использование в качестве аргумента давления за компрессором позволяет автоматически корректировать темп раскрутки двигателя при раскрытии направляющих аппаратов, а также при раскрутке ротора низкого давления в высотных условиях.
- ❖ **Синтезирован закон управления, обеспечивающий оптимальное управление давлением за топливным насосом.**

На всех режимах работы ТРДД за насосом должно поддерживаться минимальное давление топлива, при котором обеспечивается управляемость и заданные динамические характеристики двигателя.

Потребное давление в топливной системе, необходимое для работы клапанов поддержания постоянного перепада давлений на агрегатах дозирования, определяется как максимум из потребных давлений для коллекторов ОКС и ФКС, с учетом потерь в агрегатах топливной магистрали.

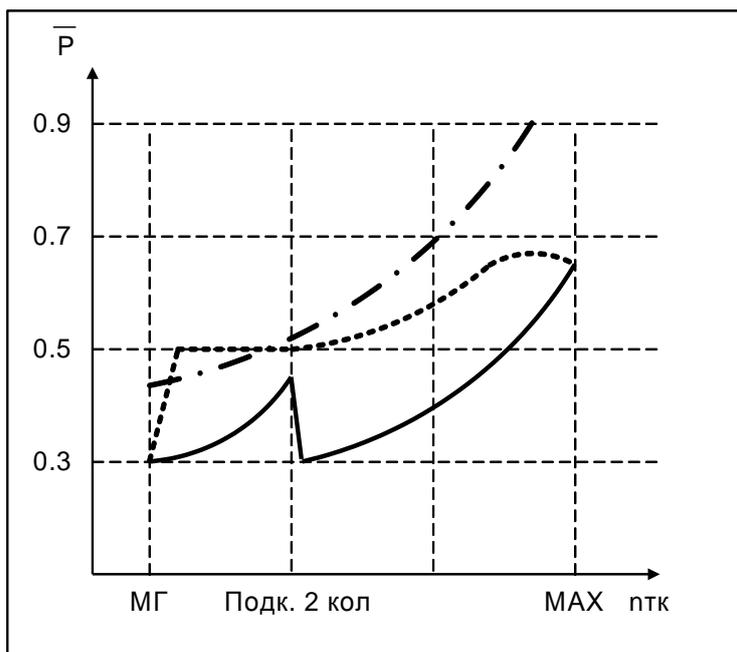
$$P_{НП} = \text{MAX} (P_{ОКСкол1} + \Delta P_{КЗД} + \Delta P_{ТТТ1}, P_{ОКСкол2} + \Delta P_{ТТМ2} + \Delta P_{ТТТ1} + \Delta P_{КЗД}, \\ P_{ФКСкол1}, P_{ФКСкол2}, P_{ФКСкол3}, P_{ФКСкол4}, P_{ФКСкол5} \\ + \Delta P_{АУПН} + \Delta P_{ТТМ1}) \quad (1)$$

Величины потерь давления на агрегатах топливной магистрали: $\Delta P_{АУПН}$, $\Delta P_{ТТТ1}$, $\Delta P_{ТТМ1}$, $\Delta P_{ТТМ2}$, $\Delta P_{КЗД}$ – являются постоянными величинами и

практически не зависят от режима работы ТРДД. Данные характеристики нормируются при разработке агрегата.

Потребные давления для коллекторов ОКС и ФКС зависят от давлений в камерах сгорания и определяются с учетом расходных характеристик форсунок коллекторов.

Синтезированный закон обеспечивает необходимое давление в топливной системе в установившихся и переходных режимах (рис. 9):



Сплошной линией показано фактическое (равно потребному с точностью 1%) давление на ЛУР, пунктиром — фактическое давление в динамических режимах работы двигателя (режим приемистости) в условиях стенда, штрих-пунктиром показано фактическое давление

Рис. 9. Давление в топливной системе перед дозаторами топлива в серийной системе, оснащенной агрегатом НР.

Применение синтезированных законов позволяет снизить давление в топливной системе в 1.5..2 раза в условиях стенда.

В четвертой главе оптимизирована структура регулирования расхода топлива в ОКС:

❖ **Определены критерии**, в соответствии с которыми производится подключение второго коллектора форсунок ОКС. Эти критерии учитывают текущий режим работы двигателя, а также режим работы двигателя в конечной точке траектории.

❖ **Разработана модель заполнения коллектора**, позволяющая в режиме реального времени учесть расход топлива, расходуемый на заполнение второго коллектора форсунок ОКС.

❖ **Синтезированы законы распределения топлива по коллекторам** в зависимости от режима работы двигателя: установившийся режим, плавный выход, приемистость.

1. Во время приемистости на время заполнения второго коллектора форсунок ОКС расход топлива в первый коллектор поддерживается близким к максимальной пропускной способности коллектора с учетом полноты сгорания топлива.
2. Для минимизации времени приемистости суммарный расход топлива в ОКС, сформированный регуляторами, корректируется на величину отборов топлива, расходуемых на заполнение коллектора ОКС.
3. Расход, дозируемый во второй коллектор для его заполнения, ограничен расчетной величиной для минимизации влияния режима истечения топлива из коллектора на параметры работы ТРДД в момент его полного заполнения. Оптимальность расчетного ограничения сформирована по результатам экспериментального тестирования алгоритма управления.
4. На установившихся режимах работы для снижения неравномерности поля температур в ОКС и уменьшения удельных расходов топлива снижен расход топлива в первый коллектор ОКС при одновременной работе двух коллекторов.

Комплекс разработанных решений позволил:

1. Исключить работу при незаполненном втором коллекторе;
2. Минимизировать негативное влияние изменений подачи топлива через второй коллектор на качество рабочего процесса в камере сгорания;

3. Обеспечить равномерность поля температур в ОКС и повысить полноту сгорания топлива на всех режимах работы ТРДД;
4. Скомпенсировать отборы топлива, идущего на заполнение второго коллектора ОКС, обеспечить разгон двигателя в момент подключения второго коллектора ОКС, тем самым сократив время приемистости;
5. В процессе приемистости двигателя оптимально распределить суммарный расход топлива в ОКС между коллекторами с целью уменьшения времени приемистости при выполнении ограничения на запас газодинамической устойчивости;
6. Гарантировать стабильное время приемистости с нормированным допуском $\pm 10\%$ от номинального значения во всех условиях эксплуатации.

❖ Синтезирована структура регулятора поддержания заданного перепада давления на НГП.

Регулирование давления за насосом реализовано по программно-замкнутой схеме с использованием модели системы топливопитания и камер сгорания двигателя.

Модель системы топливопитания включает модели дозаторов топлива, камер сгорания, насоса НГП и агрегатов системы топливоподачи. В реальном времени рассчитывается требуемое давление для каждого из коллекторов основной и форсажной камер сгорания с учетом потерь давления на агрегатах топливной магистрали, и из них выбирается максимальное значение.

Программный канал позволяет обеспечить увеличение производительности насоса синхронно с резким изменением расхода топлива в ТРДД, например при включении аварийного слива или начале приемистости.

Были проанализированы режимы работы топливной системы, и с учетом различных требований по точности поддержания давления за НГП

экспериментально полученные характеристики НГП были аппроксимированы зависимостью вида:

$$\Delta P_{\text{НГП}} = (f(L_{\text{НА}}) \cdot K_{\text{PL}_{\text{НА}}} \cdot K_{\text{N}_k} - K_{\text{PQ}}Q) - P_{\text{ДЦН}}, \quad (3)$$

где:

$\Delta P_{\text{НГП}}$ – расчетный перепад давления на НГП,

$L_{\text{НА}}$ – положение НА

$K_{\text{PL}_{\text{НА}}}$ – коэффициент передачи от положения НА к давлению НГП при постоянной частоте входного вала.

K_{N_k} – коэффициент коррекции напорной характеристики в зависимости от частоты вращения ротора КВД

K_{PQ} – коэффициент наклона напорной характеристики в зависимости от расхода топлива

Q – расход топлива

$P_{\text{ДЦН}}$ – давление за двигательным центробежным насосом

Погрешность применяемой аппроксимации не превышает 1.5% текущего значения.

В качестве регулятора давления за НГП используется программно-замкнутый ПИ-регулятор. Выбор подобного структурного решения диктуется следующими факторами:

1. Разброс характеристик насосов от агрегата к агрегату может превышать 5 кг/см² при одних и тех же условия работы;
2. При приемистости ТРДД давление за насосом должно формироваться с опережением по сравнению с расходом топлива, формируемым регуляторами основного контура;
3. Обеспечить требуемое быстродействие интегрального регулятора давления не удастся из-за высокого уровня шумов в сигнале давления топлива и необходимости применения фильтров;

4. Необходим резервный закон управления на случай потери информации о давлении топлива за насосом при отказах датчиков давления;
5. При резких изменениях режима работы ТРДД, например в момент включения аварийного слива или при вступлении насоса в работу, необходимо упреждение при формировании сигналов управления.

❖ **Синтезирована система управления насосом с использованием модели НГП и системы топливопитания (рис. 15), обеспечивающая заданные динамическую и статическую точность**

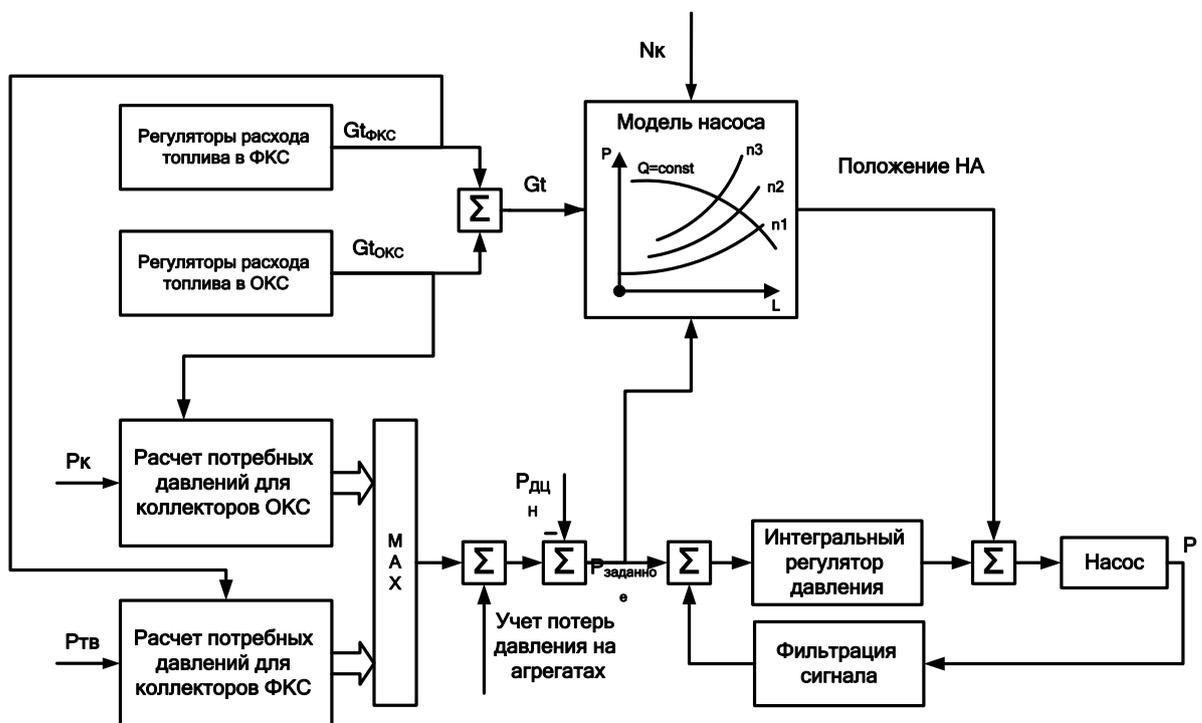


Рис. 15. Система управления давлением в топливной системе

❖ **Синтезирована система многосвязного управления расходом воздуха через газогенератор, расходом топлива в ОКС ТРДД и давления за питающим насосом (рис. 16).**

Синтез производился для обеспечения требований к качеству регулирования в ТРДД при изменении режима его работы как в малом, так и при частичной и полной приемистости, а также к времени приемистости и запасам ГДУ при условии согласования режимов работы ОКС, газогенератора и топливной системы ТРДД.

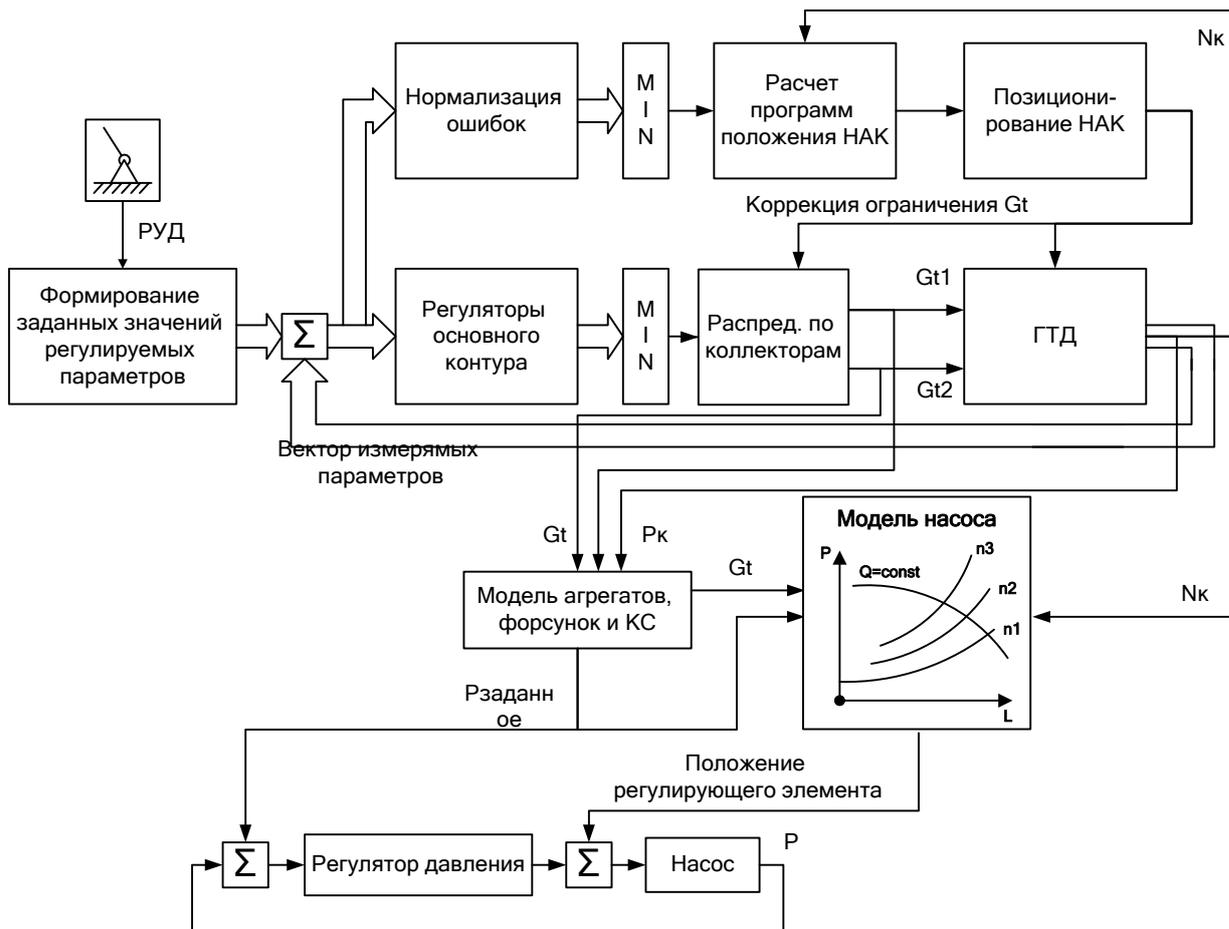


Рис. 16. Оптимальная многосвязная САУ положением НА КВД, расходом топлива в ОКС и давлением в топливной системе.

Синтезированная САУ позволяет точно согласовать режим работы компрессора, расхода топлива в ОКС и режим работы топливного насоса и тем самым добиться существенного сокращения времени приемистости двигателя.

Смещение программы НА КВД происходит пропорционально степени изменения режима работы ТРДД. В зависимости от темпа изменения положения РУД НА КВД занимают промежуточное положение между программой установившихся режимов и программой приемистости.

При резком изменении положения РУД НА КВД переходят на программу приемистости, что обеспечивает

- увеличение в 1.5 расхода воздуха через газогенератор;
- опережающую раскрутку ротора КНД, а значит увеличение суммарного импульса тяги за время приемистости;

- увеличение запасов ГДУ компрессора;
- снижение температуры газов перед турбинами, что позволяет дополнительно увеличить расход топлива в ОКС.

Синхронно с раскрытием направляющих аппаратов повышается максимально допустимый расход топлива в ОКС и ускорение ротора ВД. Важно отметить, что повышение ограничения суммарного расхода топлива в ОКС и допустимых ускорений ротора КВД происходит пропорционально в зависимости от смещения НА КВД от программы установившихся режимов. Таким образом, обеспечивается защита ТРДД от неустойчивого режима работы, возникающего вследствие нарушения баланса между расходом воздуха и расходом топлива, например при сниженном быстродействии контура позиционирования НА КВД.

НА НГП устанавливаются в заданное положение программным контуром с использованием информации от модели насоса. Время установки НА в заданное положение не превышает 0,1с, что обеспечивает рост давления перед дозаторами, синхронный с темпом изменения расхода топлива. Интегральный регулятор давления корректирует положение направляющих аппаратов для точного поддержания давления на минимальном уровне.

❖ Проведен анализ робастности и устойчивости синтезированной САУ.

Оценка параметров производилась во всей области частот. В работе проиллюстрированы результаты, полученные для трех частот вращения ротора (режим, близкий к режиму МГ ТРДД, крейсерский режим, режим, близкий к максимальному режиму работы).

Синтезированная структура и параметры САУ обеспечивают запасы по амплитуде (12,5 дБ) и фазе (35°) при неизменной полосе рабочих частот: 5с^{-1} . Данные показатели определены экспериментально по переходным процессам в замкнутой системе.

❖ Проведен анализ с точки зрения заданных запасов ГДУ компрессора.

Анализ проводился расчетно-экспериментальным методом с применением разработанной на предприятии динамической математической модели ТРДДФ.

Используя экспериментальные данные: значения расходов топлива через дозаторы ОКС, ускорения роторов двигателя, значения температуры газов за ТНД с компенсацией инерционности термопары – определялся эффективный расход топлива в ОКС. Далее именно этот расход топлива использовался в динамической модели ТРДДФ для расчета ГДУ компрессора.

Сходимость используемой модели с экспериментальными данными оценивалась по ускорениям роторов двигателя и температуре за ТНД. Точность модели позволяет использовать ее для оценки ГДУ компрессоров НД и ВД. Модель подтверждает, что запасы ГДУ компрессора составляют не менее 15% даже во время подключения второго коллектора ОКС в работу

❖ На основе экспериментальных данных проведен анализ эффективности разработанных решений.

На рис. 21 представлены сравнения экспериментальных процессов приемистости ТРДД с режима МГ до режима МАХ в серийной и разработанной САУ по частотам вращения роторов.

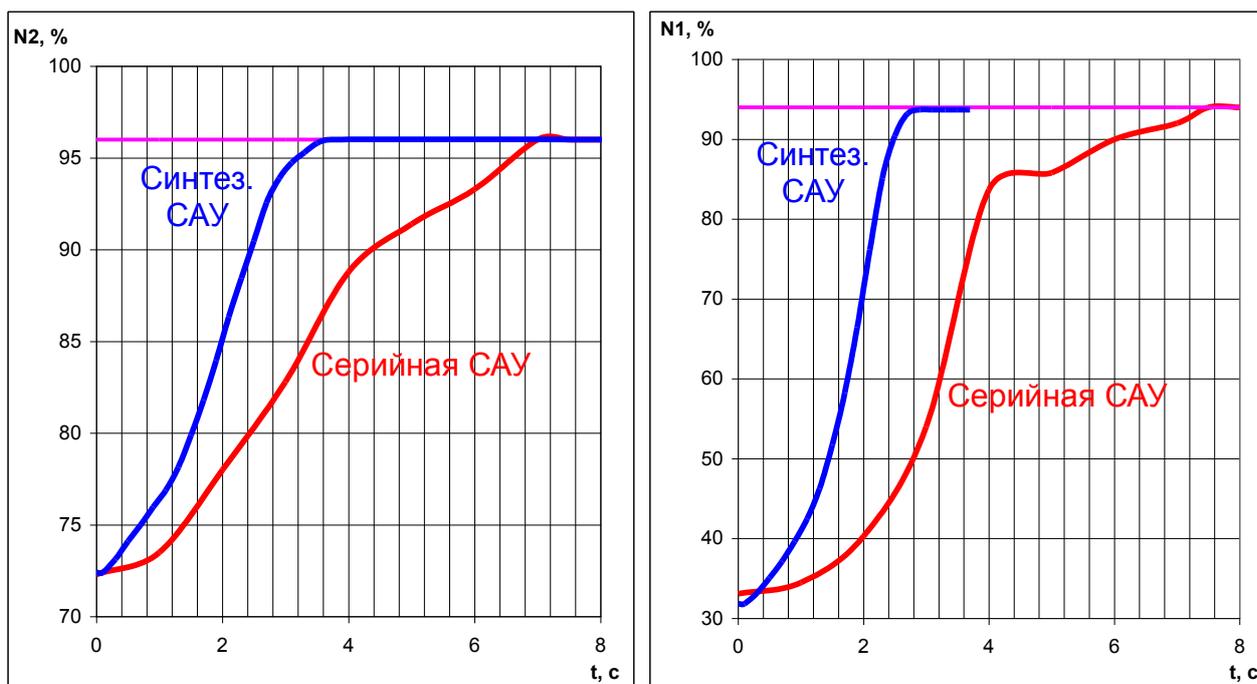


Рис. 21. Сравнение экспериментальных процессов приемистости ТРДД в серийной и разработанной САУ

Как видно из материалов, время приемистости ТРДД составляет около 2.8 секунды. Превышение частот вращения над заданным значением составляют менее 0.5%. Суммарный импульс тяги увеличился более чем в 2 раза.

На рис. 22 и 23 приведено сравнение точности поддержания заданного времени приемистости, в зависимости от начальных условий, в серийной и разработанной САУ.

Данные получены на основе анализа летных испытаний САУ во всей области эксплуатации объекта. Совершено не менее 300 полетов с различными образцами ТРДДФ и режимами работы силовой установки, включая сверхманевренность, перевернутый полет, встречная приемистость.

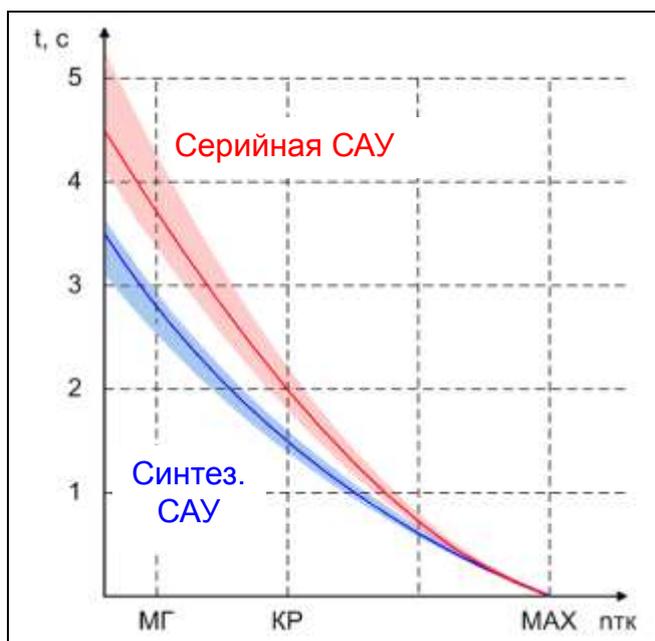


Рис. 22

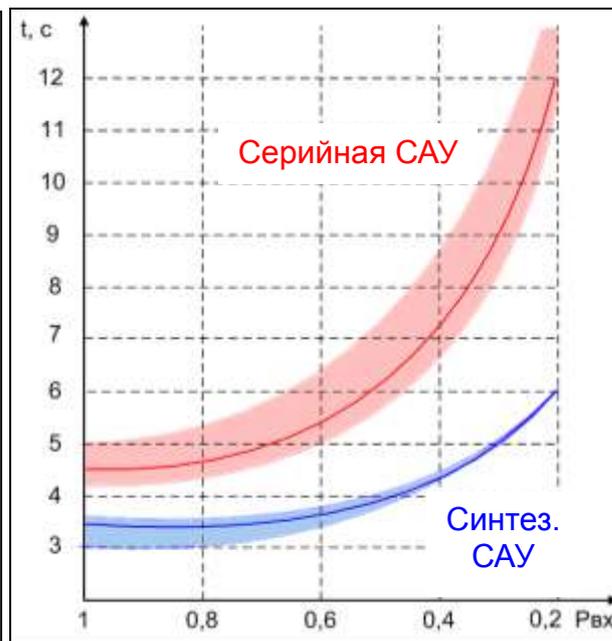


Рис. 23

Данные подтверждают существенное (на 50%) снижение разброса времени приемистости в зависимости от условий полета и образцов ТРДД.

Основные результаты и выводы

В процессе выполнения работы получены следующие основные результаты:

1. Выполнена идентификация объекта управления.
2. Проанализированы основные факторы, препятствующие сокращению времени приемистости:
 - влияние заполнения второго коллектора ОКС,
 - неоптимальная программа управления положением НА КВД на переходных режимах работы двигателя.
3. Синтезированы законы управления основными регулирующими факторами на переходных режимах работы двигателя:
 - положением НА КВД,
 - суммарным расходом топлива в ОКС,
 - давлением перед дозаторами топлива в ОКС.
4. Синтезированы законы распределения суммарного расхода топлива по коллекторам ОКС, позволяющие

- повысить полноту сгорания топлива в установившихся и динамических режимах работы ТРДД,
- обеспечить заданный темп ускорения роторов ТРДД на протяжении всего процесса приемистости, в том числе во время подключения второго коллектора в работу.

5. Синтезированы структура регулятора и закон управления давлением топлива перед дозаторами в ОКС, что позволяет

- существенно снизить подогрев топлива в топливной магистрали и минимизировать вероятность возникновения кавитации,
- обеспечить необходимый перепад давления на дозирующих элементах во время приемистости для минимизации влияния расходных характеристик дозаторов топлива на процесс приемистости ТРДД.

6. Оптимизирована структура многосвязной САУ переходными режимами, позволяющая

- увеличить расход воздуха через газогенератор и расход топлива в ОКС во время приемистости ТРДД,
- точно согласовать режим работы ОКС и КВД для сохранения запасов ГДУ во время приемистости ТРДД, в том числе и при недостаточном быстродействии исполнительной гидромеханической части САУ позиционирования направляющих аппаратов КВД,
- исключить работу ТРДД на частично заполненном втором коллекторе ОКС, повысив тем самым полноту сгорания топлива
- исключить частое переключение режима работы ОКС с работы от одного коллектора на работу от двух коллекторов.

7. Разработанные алгоритмы, законы и структура САУ были последовательно испытаны:

- a. с применением среды математического моделирования Simulink, для определения начальных параметров структуры;
- b. в составе автономного вычислителя с применением простейшей кусочно-линейной математической модели ТРДД, для проверки алгоритмов управления;
- c. в составе двигательного стенда, для проверки функционирования ЦСАУ в наземных условиях с широким набором регистрируемых параметров работы ТРДД;
- d. в составе летающей лаборатории, для подтверждения качества работы ЦСАУ во всей области эксплуатации, по мере выработки ресурса и с другими образцами агрегатов топливной системы.

Комплекс примененных технических решений позволил:

- сократить время приемистости на 30% по сравнению с САУ-прототипом при сохранении заданных ограничений по запасам ГДУ компрессора, нагрузок на узлы, температурному состоянию лопаток турбин;
- увеличить более чем в 2 раза суммарный импульс тяги ТРДД за время приемистости;
- повысить надежность системы;
- обеспечить робастность системы к изменению характеристик агрегатов топливной магистрали, условиям эксплуатации ТРДД и по мере выработки ресурса т.е. при деградации характеристик объекта управления, разброс времени приемистости с учетом этих факторов снижен на 50%;
- упростить пилотирование объектом за счет исключения режимов нелинейного изменения тяги в зависимости от положения РУД.

Список публикаций по теме диссертации

1. Королев В.В. Построение программ управления направляющими аппаратами компрессора многосвязного ГТД. // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 2. С. 136-142.
2. Королев В.В. Управление переходными процессами авиационного газотурбинного двигателя. Распределение расходов топлива по коллекторам основной камеры сгорания [Электронный ресурс] // Труды МАИ [Электрон. журн.] 2013. № 67. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41513> (дата обращения 05.11.2013)
3. Королев В.В., Картовицкий Л.Л. Ремизов А.Е. Управление насосом регулируемой производительности авиационного газотурбинного двигателя. // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета. 2013. № (25). С. 5 - 8.
4. В.И. Федюкин, А.А. Инюкин, В.В. Королев. Система управления с полной ответственностью для ТРДДФ. [Электронный ресурс] // Авиадвигатели XXI века: материалы конф. – Электрон. дан. - М.: ЦИАМ, 2010., с. 123–126.
5. Королев В.В. Оптимизация времени приемистости ГТД. // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». 17–20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон», с. 17
6. Способ регулирования подачи топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя и система для его осуществления : пат. 2474711 Рос. Федерация : МПК f02c9/26 / Марчуков Е.Ю., Федюкин В.И., Королев В.В., и др.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Сатурн" (ОАО "НПО "Сатурн") – № 2011134422/06; заявл. 17.08.2011 ; опубл. 10.02.2013

7. Способ управления газотурбинным двигателем и система для его осуществления : пат. 2490492 Рос. Федерация : МПК f02c9/00 / Марчуков Е.Ю., Федюкин В.И., Королев В.В., и др.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Сатурн" (ОАО "НПО "Сатурн") – № 2012104200/06; заявл. 07.02.2012 ; опубл. 20.08.2013
8. Система подачи топлива в газотурбинный двигатель : пат. 122705 Рос. Федерация : МПК f02c9/26 / Федюкин В.И., Королев В.В., и др.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Сатурн" (ОАО "НПО "Сатурн") – № 2012121438/28; заявл. 24.05.2012 ; опубл. 10.12.2012