

На правах рукописи



Сметанин Сергей Анатольевич

**Компенсация ухудшения характеристик авиационного
газотурбинного двигателя в эксплуатации средствами
автоматического управления**

Специальность 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном автономном учреждении «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Научный руководитель: **Гуревич Оскар Соломонович**, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Системы автоматического управления» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Официальные оппоненты: **Кретинин Геннадий Валентинович**, доктор технических наук, профессор, «ОКБ им. А. Люльки» филиал ПАО «ОДК-УМПО», главный специалист по перспективным разработкам

Лисовин Игорь Георгиевич, кандидат технических наук, АО «ОДК-Авиадвигатель», начальник отделения систем автоматического управления

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»

Защита состоится 18 сентября 2023 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

<https://mai.ru/upload/iblock/d2b/qkpej0ngumgsoxcqlbmjpayewz5tuvb/02-Smetanin-Dissertatsiya.pdf>

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06,
доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

От характеристик системы автоматического управления (САУ) авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) зависит возможность получения требуемых параметров рабочего процесса двигателя, заложенных при проектировании, в течение всего жизненного цикла. И до тех пор, пока характеристики узлов двигателя не отличаются от расчетных, это может быть достигнуто применением традиционных методов управления, обычно адаптирующихся к таким изменяющимся факторам, как давление и температура воздуха в атмосфере и в потоке на входе в двигатель, прогрев конструкции, изменение влажности и ряд других.

Однако в процессе эксплуатации характеристики узлов двигателя начинают меняться вследствие выработки ресурса, длительного воздействия пыли, песка, соленой воды, а также некоторых не трендовых, но оказывающих сильное влияние и опасных факторов, к которым относятся, например, действие обледенения, вулканического пепла.

В этих случаях происходит изменение геометрических параметров проточной части, ухудшаются характеристики лопаточных машин (компрессоров, турбин), их характеристики начинают отличаться от расчетных. Это вызывает, в свою очередь, изменение параметров рабочего процесса, в том числе связи регулируемых параметров двигателя с его характеристиками, приводящее к снижению основных показателей эффективности силовой установки (СУ): падает тяга, снижаются запасы газодинамической устойчивости (ГДУ), ухудшается экономичность, надежность.

В такой ситуации методы управления рабочим процессом, бывшие оптимальными в расчетных условиях работы, перестают быть таковыми, что также усугубляет положение.

Восстановление характеристик двигателя в эксплуатации с помощью используемой на нем системы автоматического управления, без выполнения ремонтных работ со снятием двигателя с крыла, является актуальной задачей. Имеющиеся резервы по параметрам рабочего процесса двигателя, способность современных САУ к реконфигурации делают возможной компенсацию появляющихся ухудшений характеристик.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями эффективности систем автоматического управления в различных условиях эксплуатации, положившими начало оценкам возможности компенсации ухудшения характеристик двигателей, занимались известные ученые и специалисты: Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Дружинин Л.Н., Швец Л.И. и др. Вместе с тем, постоянно происходящее совершенствование ГТД и аппаратного построения систем управления, базой для которых становятся быстродействующие электронные цифровые устройства, обладающие большой оперативной и постоянной памятью, открывает возможности для более глубокой реализации интеллектуальных функций управления двигателем. К настоящему времени нет известных работ, в которых рассматривалось бы комплексно влияние на изменение характеристик узлов двигателя (компрессора, турбины, проточной части) его износа в процессе выработки ресурса, различных типов обледенения, попадания вулканического пепла. Не

известны и исследования возможностей использования методов автоматического управления для снижения влияния этих изменений на характеристики двигателя в целом (тягу, ресурс, экономичность). Эти задачи решаются в настоящей работе.

Объектом исследования является авиационный газотурбинный двигатель с системой автоматического управления.

Предметом исследования являются методы автоматического управления, направленные на компенсацию ухудшения характеристик двигателя в эксплуатации.

Целью работы является исследование и разработка оптимальных способов управления ГТД, позволяющих компенсировать ухудшение характеристик двигателя при износе и кристаллическом обледенении.

Задачи работы:

1. Анализ влияния действующих в эксплуатации факторов на характеристики двигателя и их связи с методами управления.

2. Систематизация данных о влиянии эксплуатационных факторов на характеристики основных узлов двигателя.

3. Разработка математической модели двигателя, позволяющей имитировать ухудшение характеристик его узлов в эксплуатации (износ, кристаллическое обледенение).

4. Исследование влияния изменения характеристик узлов двигателя на его основные параметры.

5. Исследование методов управления, направленных на компенсацию ухудшения характеристик двигателя при износе и кристаллическом обледенении.

6. Экспериментальная проверка регулятора, позволяющего поддерживать характеристики двигателя в эксплуатации, на двигателем стенде для валидации результатов расчетных исследований.

Научная новизна результатов исследований:

1. Аналитическое исследование и систематизация данных по изменению характеристик узлов двигателя при износе в процессе выработки ресурса и при кристаллическом обледенении.

2. Динамическая математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая рассчитывать изменение параметров рабочего процесса в двигателе на установившихся и переходных режимах его работы при ухудшении характеристик узлов в эксплуатации.

3. Методы автоматического управления, позволяющие компенсировать ухудшение характеристик двигателя в эксплуатации.

4. Способы фиксации возникновения в двигателе кристаллического обледенения и методы борьбы с ним средствами САУ.

5. Применение бортовой математической модели двигателя (БММД) в составе САУ для управления по неизмеряемому параметру тяги в ситуациях ухудшения характеристик узлов.

6. Алгоритмы управления режимом работы двигателя по рассчитываемой в БММД величине тяги и их экспериментальная проверка на двигателе-демонстраторе.

Практическая значимость результатов исследований

Применение разработанных методов управления ГТД позволит поддерживать требуемые параметры рабочего процесса двигателя при ухудшении характеристик его узлов в процессе выработки ресурса, снизить стоимость жизненного цикла двигателя, повысить эксплуатационную технологичность вследствие увеличения межремонтных интервалов, повысить безопасность эксплуатации.

Предложенные способы фиксации и управления при кристаллическом обледенении позволят повысить безопасность работы двигателя в условиях полета в облаке ледяных кристаллов и могут быть использованы для выполнения доказательства соответствия требованиям Норм летной годности при сертификации двигателя.

Методология и методы исследования

Результаты работы получены при комплексном использовании расчетных и экспериментальных методов исследования. Для исследования влияния износа и обледенения на характеристики двигателя разработана термогазодинамическая математическая модель двигателя, позволяющая изменять характеристики каждой лопаточной машины в зависимости от воспроизводимого вида износа и размера наледи. Расчетные соотношения, составляющие модель, получены из уравнений механики (уравнение вращающихся масс), термодинамики и газовой динамики (уравнения неразрывности, сохранения энергии, состояния и т.д.).

С использованием такой модели выполнена расчетная оценка эффективности в эксплуатации традиционных методов управления, применяемых в современных двигателях, и интеллектуального метода управления величиной тяги, получаемой расчетом в БММД.

Для валидации результатов расчетов проведены экспериментальные исследования регулятора тяги на двигательном стенде. Выполнено программирование микроконтроллера демонстрационной САУ, реализующего бортовую математическую модель двигателя. Для обеспечения управления величиной тяги в программное обеспечение электронного регулятора САУ введены алгоритмы управления тягой. Разработана методика испытаний, в соответствии с которой износ компрессора высокого давления имитируется путем прикрытия входных направляющих аппаратов компрессора на повышенных режимах работы двигателя.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Оценка изменения характеристик узлов двигателя при износе в процессе выработки ресурса и при кристаллическом обледенении.
2. Особенности построения математической модели двигателя с САУ для расчета параметров рабочего процесса двигателя при ухудшении характеристик его узлов.
3. Сравнительный анализ и определение методов автоматического управления, позволяющих компенсировать ухудшение характеристик двигателя в эксплуатации.
4. Оценка зависимости влияния кристаллического обледенения на характеристики двигателя от способов управления рабочим процессом.
5. Способы фиксации возникновения в двигателе кристаллического обледенения и методы борьбы с ним средствами САУ.

6. Применение бортовой математической модели двигателя в составе САУ для управления по неизмеряемому параметру тяги при ухудшении характеристик узлов.

7. Алгоритмы управления режимом работы двигателя по рассчитываемой в БММД величине тяги и их экспериментальная проверка на двигателе-демонстраторе.

Достоверность результатов исследования основывается на:

- корректном использовании математических методов описания ухудшения характеристик узлов двигателя в эксплуатации, основанных на результатах экспериментальных исследований и данных эксплуатации;
- высоком уровне и точности математической модели двигателя, используемой для проведения исследований;
- экспериментальных исследований на аттестованном стенде;
- удовлетворительной сходимости результатов расчета в математической модели двигателя с экспериментальными данными, полученными при проведении испытаний на двигателе-демонстраторе.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на:

- Конгрессе международного совета по авиационным наукам ICAS-2018 (Белу-Оризонте, Бразилия, 2018 г.);
- Научно-техническом конгрессе по двигателестроению НТКД-2018 (Москва, 2018 г.);
- Международной научно-технической конференции SAE AeroTech Europe 2019 (Бордо, Франция, 2019 г.);
- Научно-технической конференции «Климовские чтения-2019. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2019 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки» (Москва, 2019 г.);
- Международной научно-технической конференции AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum (виртуальный формат, 2020 г.);
- Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям ICAM 2020 (Москва, 2020 г.);
- Международной научно-технической конференции AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum (виртуальный формат, 2021 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним опубликовано 5 работ.

Внедрение результатов работы

Результаты работы использованы на предприятии АО «ОДК-СТАР» при разработке систем автоматического управления двигателями ПД-8 и ПД-35, используются в ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» при выполнении государственных контрактов, хоздоговорных работ и при испытаниях на двигательном стенде У-7М.

Вклад автора в проведенное исследование

1. Аналитическое исследование особенностей традиционных способов управления, применяемых в современных ГТД, и интеллектуальных методов

управления, систематизация данных по изменению характеристик узлов двигателя при износе и кристаллическом обледенении.

2. Разработка динамической математической модели двигателя для учета влияния износа его узлов и обледенения, синтез алгоритмов регулятора тяги, математическое моделирование для решения задач работы.

3. Анализ и обоснование результатов исследований.

4. Проверка в эксперименте на двигателе-демонстраторе результатов теоретических исследований, включающая: разработку методики испытаний, введение бортовой математической модели двигателя в микроконтроллер системы управления, введение регулятора тяги в программное обеспечение демонстрационной САУ и его испытания, обработку и анализ результатов испытаний.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 80 наименований и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 105 страницах и включает 51 рисунок и 8 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю д-ру техн. наук Гуревичу О.С. за помощь на всех этапах выполнения диссертации, д-ру техн. наук Гольбергу Ф.Д. и к-ту техн. наук Швецу Л.И. за предоставление материалов их исследований, а также инженерам Трифонову М.Е., Ромашихину И.М., Чернышову В.И. и сотрудникам стенда У-7М ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» за помощь в выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена постановка задачи и обоснована актуальность темы исследования, определена цель диссертационной работы, отражена научная новизна и практическая значимость результатов исследования, представлены используемые методы исследования и обоснована достоверность полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ используемых методов управления ГТД и направлений их развития. Показано, что методы управления, применяемые в настоящее время в электронных САУ, в значительной степени аналогичны тем, которыми пользовались в заключительный период разработки и эксплуатации систем гидромеханического типа. Управление двигателем осуществляется по параметрам, косвенно характеризующим их эффективность – тягу, экономичность. Наиболее распространенным способом управления для поддержания требуемой тяги в турбореактивных двухконтурных двигателях (ТРДД) с высокой степенью двухконтурности является регулирование частоты вращения вентилятора.

При изменении характеристик узлов в процессе эксплуатации нарушается связь между характеристиками двигателя и регулируемыми параметрами, в результате чего характеристики двигателя начинают отличаться от оптимальных. В связи с этим актуальной задачей является использование средств автоматического управления для компенсации ухудшения характеристик двигателя в эксплуатации. Обзор проводимых в мире исследований в этом направлении показывает, что для поддержания требуемых параметров рабочего процесса в двигателе при ухудшении характеристик его узлов могут использоваться интеллектуальные методы управления,

основанные на применении бортовой математической модели двигателя, работающей в реальном времени и идентифицируемой в процессе эксплуатации. С использованием такой модели может быть реализовано непосредственное управление параметрами, прямо характеризующими рабочий процесс в двигателе, но недоступными для измерения.

Вместе с тем большинство рассмотренных работ, посвященных исследованию эффективности различных методов управления при ухудшении характеристик узлов двигателя, выполнено с рядом допущений, связанных со способом математического моделирования износа, снижающих достоверность полученных результатов. Поэтому в диссертационной работе выполняется анализ изменения характеристик узлов двигателя в эксплуатации, сравнительная оценка эффективности традиционных и интеллектуальных методов управления, проводится экспериментальная проверка наиболее эффективного регулятора на двигательном стенде.

Во второй главе исследованы и систематизированы данные по ухудшению характеристик узлов двигателя при износе и при кристаллическом обледенении.

Анализ работ, содержащих данные об изменении характеристик ГТД в процессе эксплуатации, показывает, что наиболее существенное влияние на параметры рабочего процесса двигателя оказывает ухудшение характеристик лопаточных машин. Возможные негативные эффекты, вызванные износом камеры сгорания, в основном связаны с изменением поля температур при практически постоянных других ее параметрах и проявляются в ухудшении характеристик турбины.

Износ лопаточных машин выражается в эрозии элементов проточной части, появлении разного рода отложений (нагара), ухудшении качества поверхности лопаток, затуплении входных кромок лопаток и изменении их формы, увеличении радиальных зазоров и пр. Все эти факторы комплексно влияют на характеристики лопаточных машин и приводят к ухудшению всех основных параметров машины: расхода воздуха (газа) $G_{пр}$, степени повышения (понижения) давления π^* , КПД η .

По результатам проведенного исследования определено влияние типовых видов износа лопаточных машин на их характеристики (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Изменение характеристик узлов двигателя при различных видах износа

Вид износа	Изменение характеристик узла			
	Приведенный расход воздуха/газа	Степень повышения/понижения давления	КПД	Относительное изменение параметров ($G_{пр} : \pi^* : \eta$)
Эрозия компрессора	$G_{к пр} \downarrow\downarrow$	$\pi_{к}^* \downarrow\downarrow$	$\eta_{к} \downarrow\downarrow$	1,5 : 1,5 : 1
Эрозия турбины	$G_{т пр} \uparrow$	$\pi_{т}^* \downarrow$	$\eta_{т} \downarrow$	1,5 : 1,5 : 1
Загрязнение компрессора	$G_{к пр} \downarrow\downarrow$	$\pi_{к}^* \downarrow\downarrow$	$\eta_{к} \downarrow\downarrow$	1,6 : 1,6 : 1
Загрязнение турбины	$G_{т пр} \downarrow$	$\pi_{т}^* \downarrow$	$\eta_{т} \downarrow$	1 : 1 : 1
Коррозия компрессора	$G_{к пр} \downarrow$	$\pi_{к}^* \downarrow$	$\eta_{к} \downarrow$	1,5 : 1,5 : 1
Коррозия турбины	$G_{т пр} \uparrow\uparrow$	$\pi_{т}^* \downarrow\downarrow$	$\eta_{т} \downarrow\downarrow$	1,6 : 1,6 : 1
Перегрев турбины	$G_{т пр} \uparrow$	$\pi_{т}^* \downarrow$	$\eta_{т} \downarrow\downarrow$	0,5 : 0,5 : 1
Попадание посторонних предметов	$G_{пр} \downarrow\downarrow$	$\pi^* \downarrow\downarrow$	$\eta \downarrow\downarrow$	1,6 : 1,6 : 1

Выполнен анализ ухудшения характеристик двигателя при одновременном износе всех его узлов в процессе выработки ресурса. Показано, что в эксплуатации износу в большей степени подвержен компрессор высокого давления (КВД), ухудшение его характеристик в 2–3 раза превышает ухудшение характеристик других узлов двигателя. При этом уменьшение расхода воздуха в компрессорах превышает снижение КПД ~ в 1,5 раза, а в турбинах соотношение между изменением η и $G_{пр}$ прямо противоположное – снижение КПД превышает изменение расхода воздуха ~ в 1,5 раза (расход воздуха в турбинах растет из-за эрозии лопаток и увеличения площади горла соплового аппарата). При наработке порядка 8000–12000 часов рост температуры газа за турбиной в среднем составляет 50–60 К.

Аналогично воздействию износа обледенение двигателя приводит к изменению характеристик лопаточных машин и ухудшению основных параметров рабочего процесса двигателя из-за изменения геометрии проточной части двигателя вследствие нарастания наледи, уменьшения проходного сечения, а также при повреждении компонентов двигателя в результате попадания в них оторвавшихся ледяных наростов. Существует несколько видов обледенения ГТД, большинство из которых к настоящему времени детально изучены и не представляют опасности в эксплуатации. Кристаллическое обледенение, исследование которого началось сравнительно недавно, сложно идентифицировать, при этом в мире отсутствует общепринятые подходы по защите двигателей от такого вида обледенения, и оно все еще может приводить к опасным последствиям (помпажу, выключению двигателей).

Анализ имеющихся данных по изменению характеристик узлов двигателя при воздействии кристаллов льда показывает, что кристаллическому обледенению в основном подвержены последние ступени компрессора низкого давления, при этом по мере роста наледи на направляющих аппаратах подпорных ступеней (ПС) и увеличения уровня обледенения (определяется долей площади, занимаемой наледью во внутреннем контуре двигателя) значительно снижаются запасы ГДУ, максимальные величины степени повышения давления $\pi^*_{ПС}$ и расхода воздуха $G_{ПС пр}$ на напорных кривых, сильнее при высоких частотах вращения $n_{в пр}$ (см. рисунок 1).

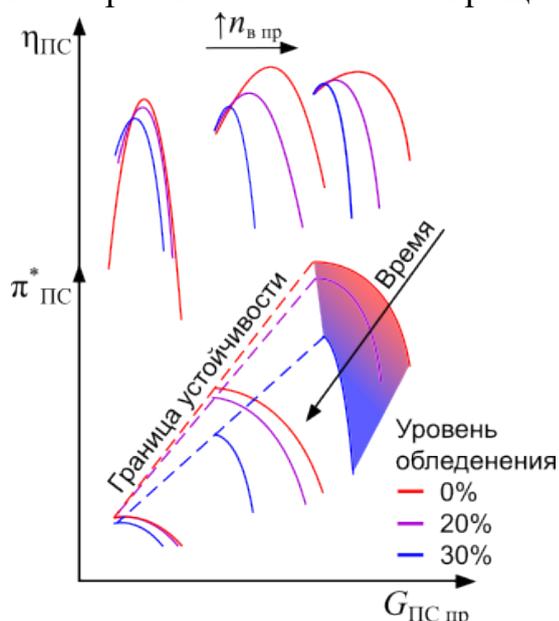


Рисунок 1 – Характеристики КПД при различных уровнях обледенения

Ухудшение характеристик узлов при износе и обледенении в зависимости от выбранного способа управления может приводить к снижению тяговых характеристик двигателя, экономичности и ускоренной выработке ресурса. Вместе с тем современные авиационные двигатели проектируются с запасом по температуре газа на входе в турбину порядка 100–150 К, который может быть использован для компенсации ухудшения характеристик двигателя средствами автоматического управления путем оптимального выбора метода управления.

В третьей главе приводится описание разработанной термогазодинамической математической модели двигателя, позволяющей воспроизводить ухудшение характеристик его узлов в эксплуатации.

Термогазодинамическая математическая модель двигателя строится по поузловой схеме, в которой к каждому узлу двигателя относится соответствующая часть программы. Расчетные соотношения, составляющие модель, получены из уравнений механики (уравнение вращающихся масс), термодинамики и газовой динамики (уравнения неразрывности, сохранения энергии, состояния и т.д.). Модель строится на базе статических характеристик лопаточных машин и позволяет осуществлять расчет параметров рабочего процесса в двигателе на всех установившихся и переходных режимах его работы.

На рисунке 2 показана расчетная схема рассматриваемого в работе ТРДД с высокой степенью двухконтурности – основные расчетные узлы двигателя и характерные сечения, в которых осуществляется расчет параметров рабочего процесса.

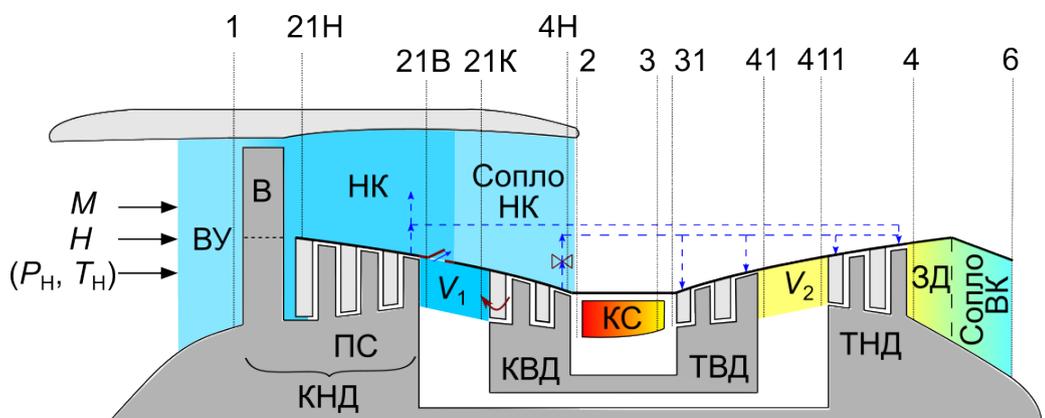


Рисунок 2 – Расчетная схема двигателя

В модели учитываются:

- зависимость газодинамических коэффициентов и энтальпии газа от температуры и состава газа,
- отбор мощности от роторов на привод агрегатов,
- перепуск и утечки воздуха из тракта двигателя,
- отбор воздуха из компрессора на охлаждение турбин и самолетные нужды,
- изменение коэффициента полноты сгорания в зависимости от параметров газа,
- зависимость потерь давления в проточных элементах двигателя от скорости потока воздуха (газа) и ряд других факторов.

Нестационарность процессов изменения параметров двигателя определяется:

- инерционностью вращающихся масс (роторов двигателя),

- нестационарностью процессов в газовых и воздушных емкостях.

При разработке модели принят ряд допущений, основные из которых:

- газодинамические процессы описываются в одномерной постановке;
- уравнения газовой динамики записываются без учета вязкости и массовых сил;
- характеристики лопаточных машин рассматриваются стационарными;
- в сечениях, где скорость потока значительно меньше скорости звука, показатель адиабаты и плотность рассчитываются по параметрам заторможенного потока;
- статическое давление в потоках газа и воздуха, вытекающих из внутреннего и наружного контуров, принимается одинаковым;
- воздух, охлаждающий турбины и возвращаемый в их тракте, имеет температуру, равную температуре в месте его отбора.

Принятые допущения не препятствуют достаточно точной идентификации модели в широком диапазоне изменения режимов работы двигателя и условий полета.

Используемая математическая модель системы автоматического управления позволяет воспроизводить все основные функции управления, которые должна выполнять САУ ТРДД:

- управление расходом топлива в камере сгорания на установившихся и переходных режимах работы двигателя;
- ограничение предельных значений параметров рабочего процесса;
- управление углами установки направляющих аппаратов компрессора;
- управление отбором воздуха, используемого для охлаждения турбин;
- управление положением клапанов перепуска воздуха за ПС и за КВД.

Такая математическая модель САУ совместно с моделью двигателя позволяет производить расчет параметров рабочего процесса на основных режимах его работы путем задания положения рычага управления двигателем (РУД) и внешних условий.

Для учета влияния ухудшения характеристик узлов двигателя при износе в математическую модель двигателя введена возможность изменения положения напорных ветвей на характеристиках лопаточных машин посредством ухудшения всех основных параметров машины π^* , $G_{пр}$ и η .

С учетом близкого изменения характеристик лопаточных машин при некоторых типовых воздействиях (см. таблицу 1) рассматриваются следующие виды износа:

- эрозия, загрязнение или повреждение вентилятора (В);
- эрозия, коррозия или загрязнение ПС и КВД;
- эрозия или коррозия турбины высокого давления (ТВД);
- появление отложений на сопловых аппаратах (СА) ТВД;
- перегрев лопаток ТВД.

Износ турбины низкого давления (ТНД), как правило, наименее выражен и, в основном, характеризуется ухудшением ее параметров из-за изменения радиальных зазоров вследствие выработки прирабатываемого покрытия, поэтому при имитации износа отдельных узлов двигателя ухудшение характеристик ТНД не рассматривалось.

С использованием результатов анализа, проведенного в главе 2, выбраны следующие показатели деградации характеристик отдельных лопаточных машин для каждого вида износа (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Изменение характеристик отдельных узлов при имитации их износа

Вид износа	Изменение характеристик узла, %		
	$\delta G_{пр}$	$\delta \pi^*$	$\delta \eta$
Эрозия, загрязнение или повреждение В	-4,8	-4,8	-3
Эрозия, коррозия или загрязнение ПС	-4,5	-4,5	-3
Эрозия, коррозия или загрязнение КВД	-4,5	-4,5	-3
Эрозия или коррозия ТВД	3	-3	-2
Отложения на СА ТВД	-3	-3	-2
Перегрев лопаток ТВД	1,5	-1,5	-3

Для имитации одновременного износа всех узлов двигателя при выработке ресурса в модель вводится изменение характеристик узлов в зависимости от величины наработки на основе имеющихся данных эксплуатации (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Одновременное ухудшение характеристик всех узлов при имитации выработки ресурса двигателя в эксплуатации

Эквивалентная наработка, ч	Изменение характеристик узла, %									
	Вентилятор		ПС		КВД		ТВД		ТНД	
	$\delta \eta$	$\delta G, \delta \pi$	$\delta \eta$	$\delta G, \delta \pi$	$\delta \eta$	$\delta G, \delta \pi$	$\delta \eta$	$\delta G, -\delta \pi$	$\delta \eta$	$\delta G, -\delta \pi$
10000	-1,5	-2	-1,5	-2	-3	-4	-2	1,5	-0,5	0,3
15000	-2	-3	-2	-3	-6	-9	-3	2	-0,7	0,4
20000	-3	-4	-3	-4	-9	-13,5	-4	3	-1	0,6

Математическое моделирование кристаллического обледенения двигателя выполняется посредством изменения формы напорных ветвей на характеристике КНД и их смещения в направлении ухудшения всех основных параметров лопаточной машины (аналогично рисунку 1). Предельный уровень обледенения, соответствующий загромождению наледью 30 % площади поперечного сечения проточной части двигателя, выбирался из условия сохранения достаточных запасов по температуре газа и ГДУ, которые могут быть использованы для оптимизации управления. Полученный в результате таких преобразований набор характеристик КНД представлен на рисунке 3.

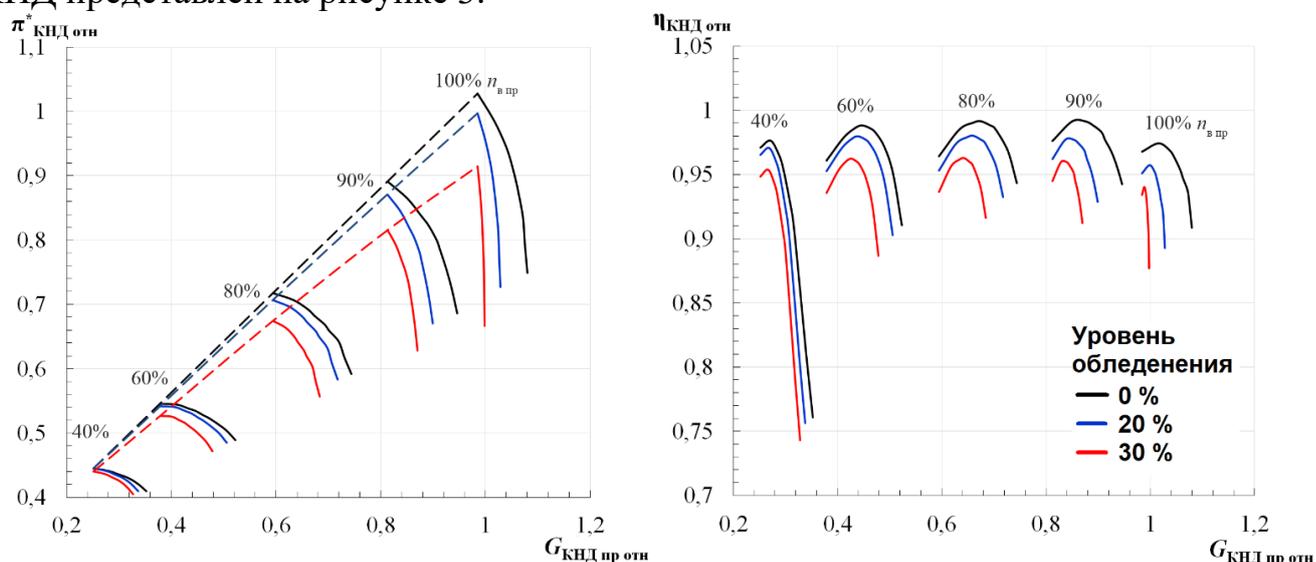


Рисунок 3 – Характеристики КНД для разных уровней обледенения

После соответствующей модификации математической модели двигателя введена возможность имитации непрерывного квазистационарного процесса обледенения путем интерполяции сформированных характеристик КНД. Это позволяет получать характеристики КНД для промежуточных уровней обледенения и воспроизводить непрерывное изменение параметров двигателя с течением времени, соответствующее постепенному росту наледи на элементах его конструкции.

В четвертой главе представлены результаты математического моделирования влияния изменения характеристик узлов двигателя в эксплуатации на его основные параметры при традиционном способе управления частотой вращения вентилятора n_v .

Анализ результатов моделирования износа отдельных лопаточных машин при комплексном ухудшении всех характеристик вентилятора, ПС и КВД показывает, что при традиционном законе управления частотой вращения n_v наибольшее влияние на величину тяги двигателя оказывает износ вентилятора, при котором происходит изменение зависимости тяги от регулируемого параметра. В этом случае наблюдается снижение взлетной тяги рассматриваемого ТРДД на величину порядка 12 %. При ухудшении характеристик ПС и КВД величина тяги сохраняется на практически базовом уровне из-за увеличения расхода топлива системой управления для поддержания заданного значения частоты вращения вентилятора, что, в свою очередь, приводит к росту температуры газа в камере сгорания на 40 К.

Изменение положения линии рабочих режимов (ЛРР) на характеристиках ПС и КВД при износе отдельных узлов (В, ПС и КВД) показано на рисунке 4.

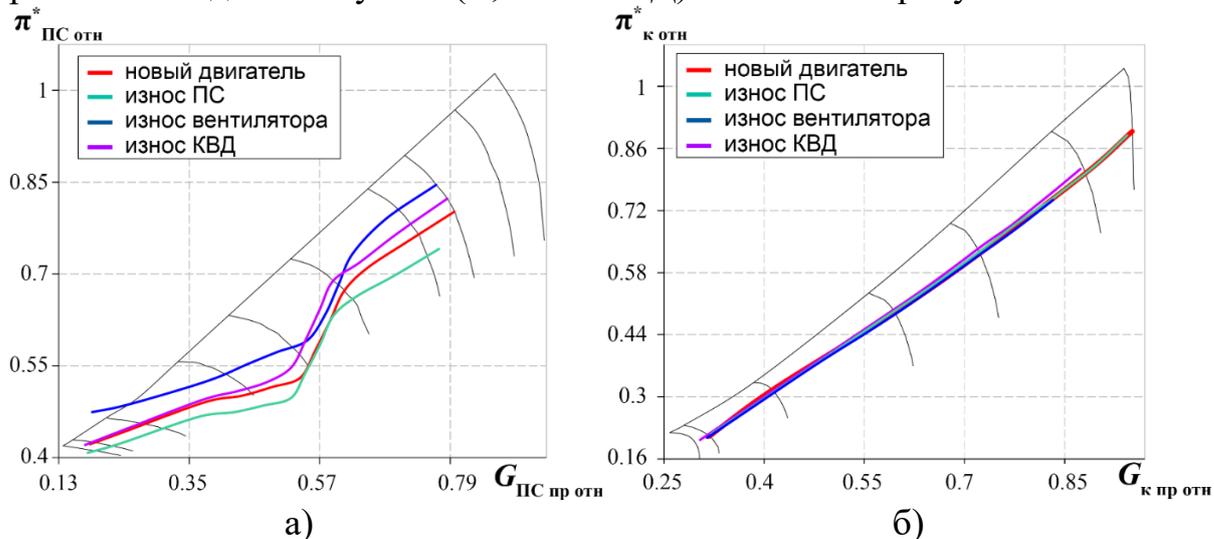


Рисунок 4 – Изменение положения ЛРР на характеристиках ПС (а) и КВД (б) при износе вентилятора, ПС и КВД

При износе КВД и вентилятора ЛРР на характеристике подпорных ступеней смещается ближе к границе устойчивости со снижением запасов ГДУ ПС $\Delta K_{уПС}$ на повышенных режимах на 5 и 10 % соответственно. При этом износ вентилятора приводит к критическому (на 30 %) снижению запасов $\Delta K_{уПС}$ на режимах близких к малому газу. Износ ПС, напротив, способствует перемещению ЛРР в направлении границы запирания, что приводит к увеличению $\Delta K_{уПС}$ на 6–10 %. Положение ЛРР на характеристике КВД при имитации износа вентилятора, ПС и КВД практически не изменяется. ЛРР на характеристике вентилятора определяется площадью сопла наружного контура и при изменении характеристик узлов не меняет своего положения.

Моделирование различных видов износа ТВД показывает, что ухудшение характеристик турбины не оказывает влияния на зависимость тяги от регулируемого параметра n_b . В этом случае САУ поддерживает требуемую величину тяги за счет увеличения расхода топлива, приводящего к росту температуры газа в камере сгорания на 16–30 К (больше при перегреве лопаток и меньше при эрозии).

При ухудшении характеристик ТВД линия рабочих режимов на характеристике ПС перемещается в сторону снижения запасов устойчивости на 2–6 % (см. рисунок 5).

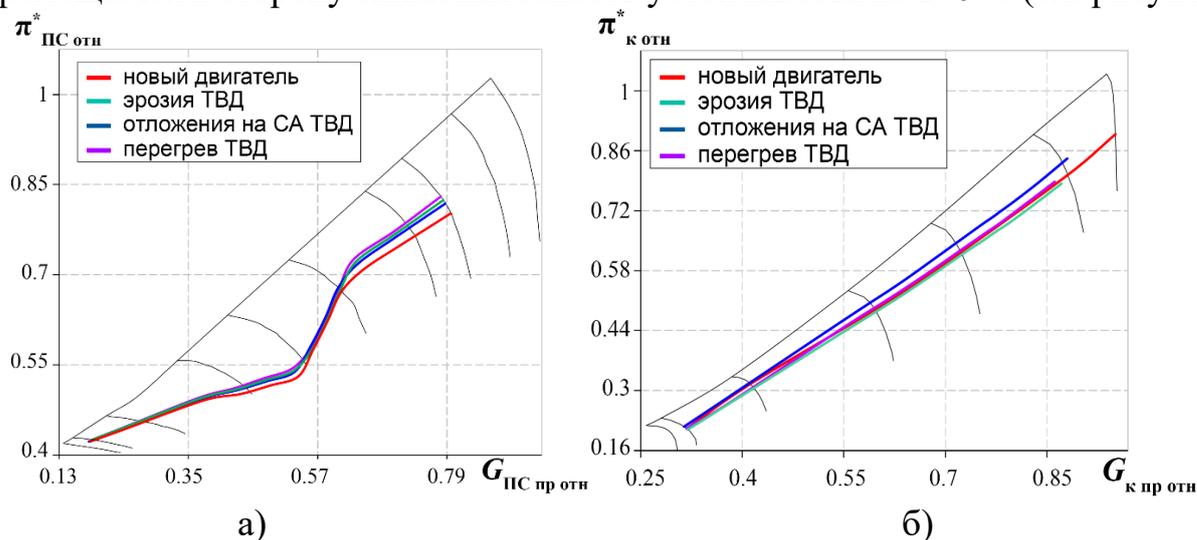


Рисунок 5 – Изменение положения ЛРР на характеристиках ПС (а) и КВД (б) при износе ТВД

На характеристике КВД, в зависимости от имитируемого вида износа, ЛРР может как подниматься со снижением запасов ГДУ КВД ΔK_{y_k} на 5 % (при появлении отложений), так и опускаться с повышением ΔK_{y_k} на 1–1,5 % (при эрозии).

При имитации одновременного ухудшения характеристик всех узлов двигателя (в соответствии с таблицей 3) показано, что применение регулятора частоты вращения n_b при наработке в эксплуатации 10000 ч приводит к снижению тяги R на взлетном режиме на 5 % и увеличению удельного расхода топлива C_R на 4,4 % при сохранении значительного (около 110 К) запаса по температуре газа T_g^* в стандартных условиях (МСА). Даже при наработке 15000 часов в условиях МСА в двигателе остается запас по температуре газа на входе в ТВД ~ 70 К, который может быть использован для оптимизации управления с целью компенсации возникающего снижения тяги на 7,5 %. Двигатель в стандартных атмосферных условиях практически полностью вырабатывает проектный запас по температуре газа после достижения наработки 20000 ч, а при повышении температуры атмосферы до 30 °С уже после 15000 часов эксплуатации в работу вступает ограничитель температуры T_g^* . Линии рабочих режимов на характеристиках узлов при выработке ресурса двигателя в эксплуатации смещаются вверх ближе к границе устойчивости ПС и КВД, что приводит к снижению запасов ГДУ КВД и ПС на 1–2 % и 10–30 % соответственно.

Для оценки влияния кристаллического обледенения (КО) на параметры рабочего процесса ТРДД при работе традиционного регулятора частоты вращения вентилятора выполнена верификация разработанной математической модели, по результатам которой продемонстрирована удовлетворительная сходимость с имеющимися расчетно-экспериментальными данными, и проведены расчеты

изменения параметров двигателя на крейсерском режиме в условиях $H = 11000$ м, $M = 0,8$, $t_{\text{н}} = \text{МСА} + 15$ °С, в которых в последние годы зафиксировано наибольшее число случаев КО. Результаты расчета изменения тяги R , частот вращения роторов двигателя $n_{\text{в}}$, $n_{\text{к}}$, расхода топлива $G_{\text{т}}$, температур $T_{\text{пс}}$, $T_{\text{г}}$ и давлений $P_{\text{пс}}^*$, $P_{\text{к}}^*$ за ПС и КВД при кристаллическом обледенении двигателя представлены на рисунке 6.

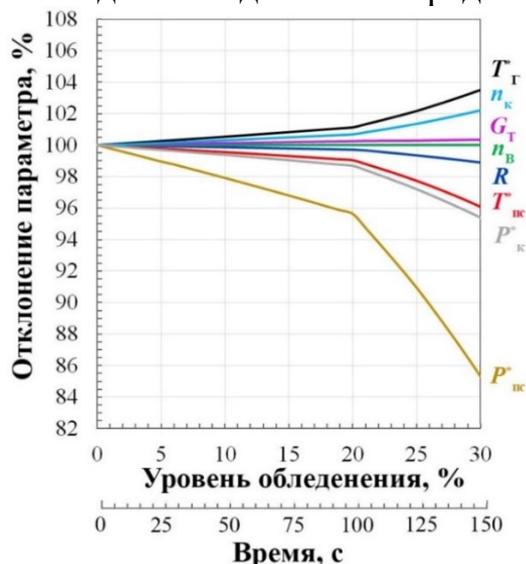


Рисунок 6 – Изменение параметров рабочего процесса в двигателе при работе регулятора частоты вращения $n_{\text{в}}$ в условиях кристаллического обледенения

Анализ полученных данных показывает, что при выбранном способе управления частотой вращения вентилятора загромождение наледью до 30 % площади проходного сечения внутреннего контура двигателя приводит к увеличению расхода топлива с одновременным снижением тяги на 1,5 %. Вместе с этим наблюдается рост температуры газа на входе в турбину (более чем на 50 К).

Результаты всех проведенных расчетов позволяют сделать вывод о сохранении в двигателе достаточных запасов по температуре газа и ГДУ компрессоров при ухудшении характеристик узлов двигателя в эксплуатации, которые могут быть использованы для оптимизации управления двигателем.

В пятой главе приводятся результаты исследования методов управления, направленных на компенсацию ухудшения характеристик двигателя в эксплуатации. С целью определения наиболее эффективного способа управления режимом работы двигателя при износе и кристаллическом обледенении синтезированы и введены в математическую модель САУ регуляторы параметров, применяемых в ТРДД: частоты вращения ротора высокого давления $n_{\text{к}}$, степени повышения давления в двигателе $\pi_{\text{дв}}^*$, коэффициента мощности ТРДД $\pi_{\text{компл}}^* = (P_{\text{к}}^* \cdot \sqrt{T_{\text{т}}^*}) / (P_{\text{вх}}^* \cdot \sqrt{T_{\text{вх}}^*})$, а также перспективный регулятор величины тяги $R_{\text{расч}}$, получаемой расчетом в бортовой математической модели двигателя. Описаны особенности построения САУ с БММД, позволяющей реализовать управление по величине тяги (см. рисунок 7).

С использованием разработанной математической модели ТРДД с системой автоматического управления изменяемой структуры выполнена сравнительная оценка эффективности традиционных и интеллектуальных способов управления при износе отдельных узлов двигателя (см. рисунок 8) и при совместном ухудшении характеристик всех узлов в эксплуатации (см. рисунок 9).

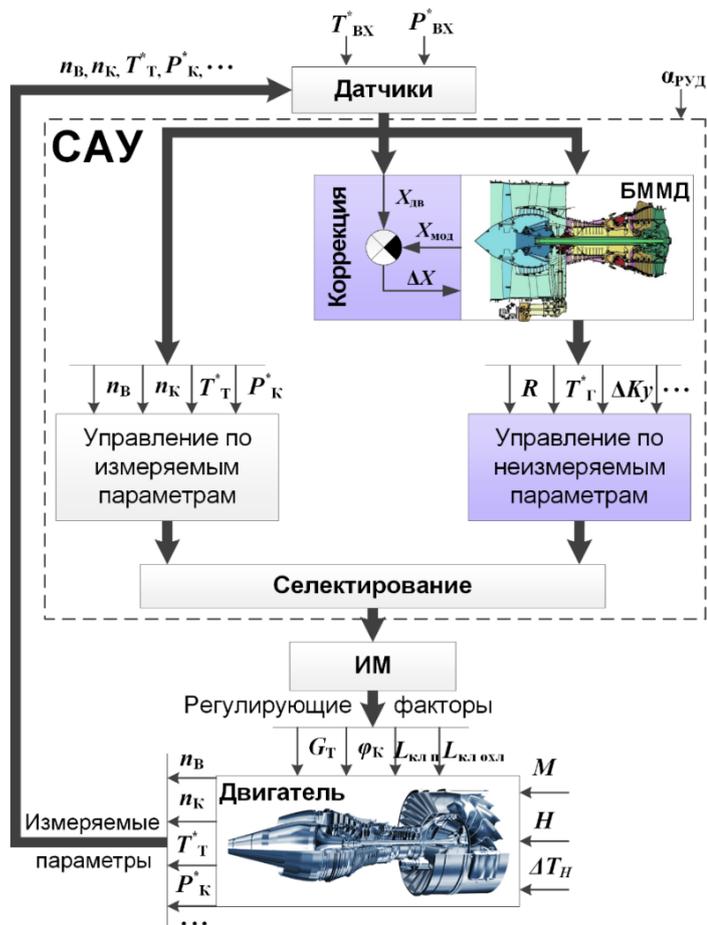


Рисунок 7 – Структурная схема САУ с БМД

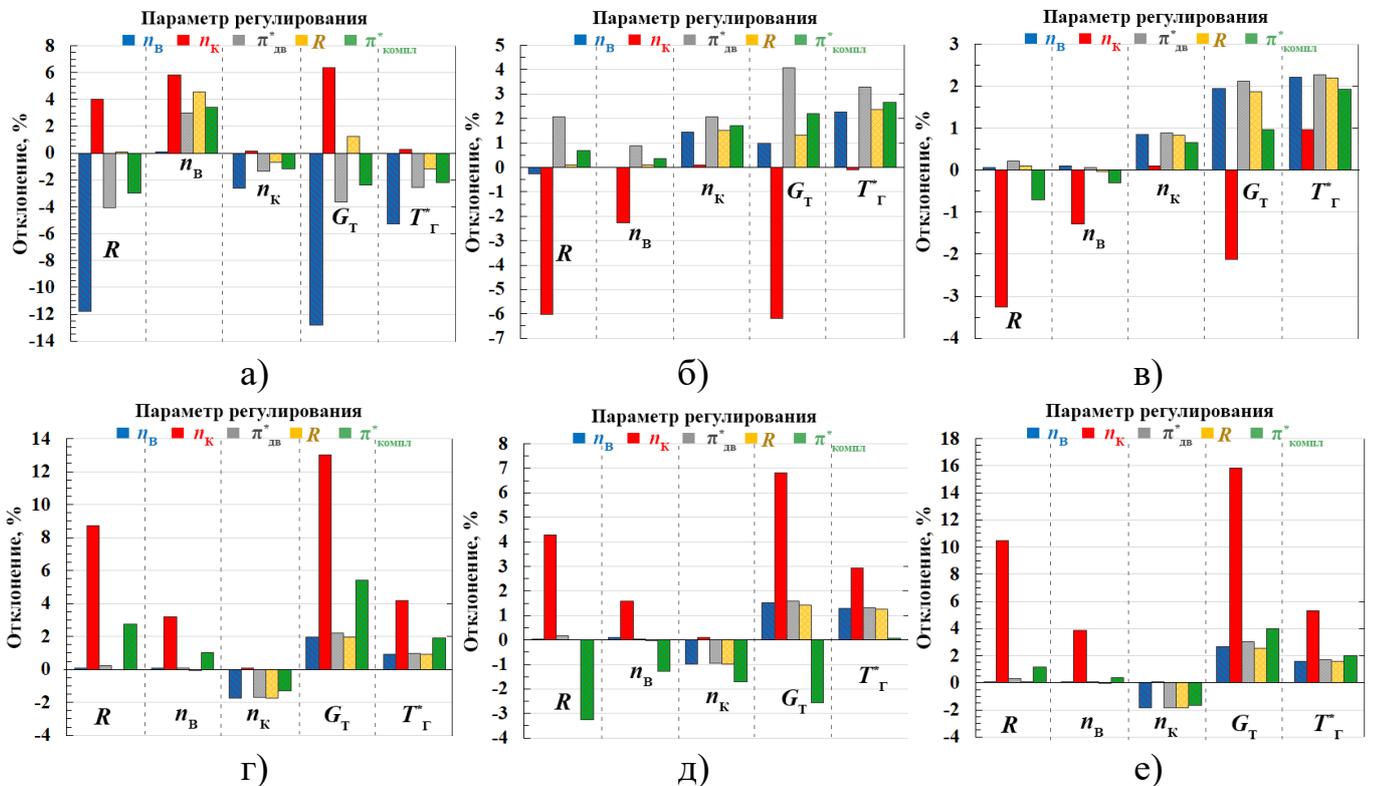


Рисунок 8 – Изменение параметров двигателя на взлетном режиме работы при имитации износа вентилятора (а), ПС (б), КВД (в), эрозии ТВД (г), отложений на ТВД (д) и перегрева лопаток ТВД (е) при разных способах управления

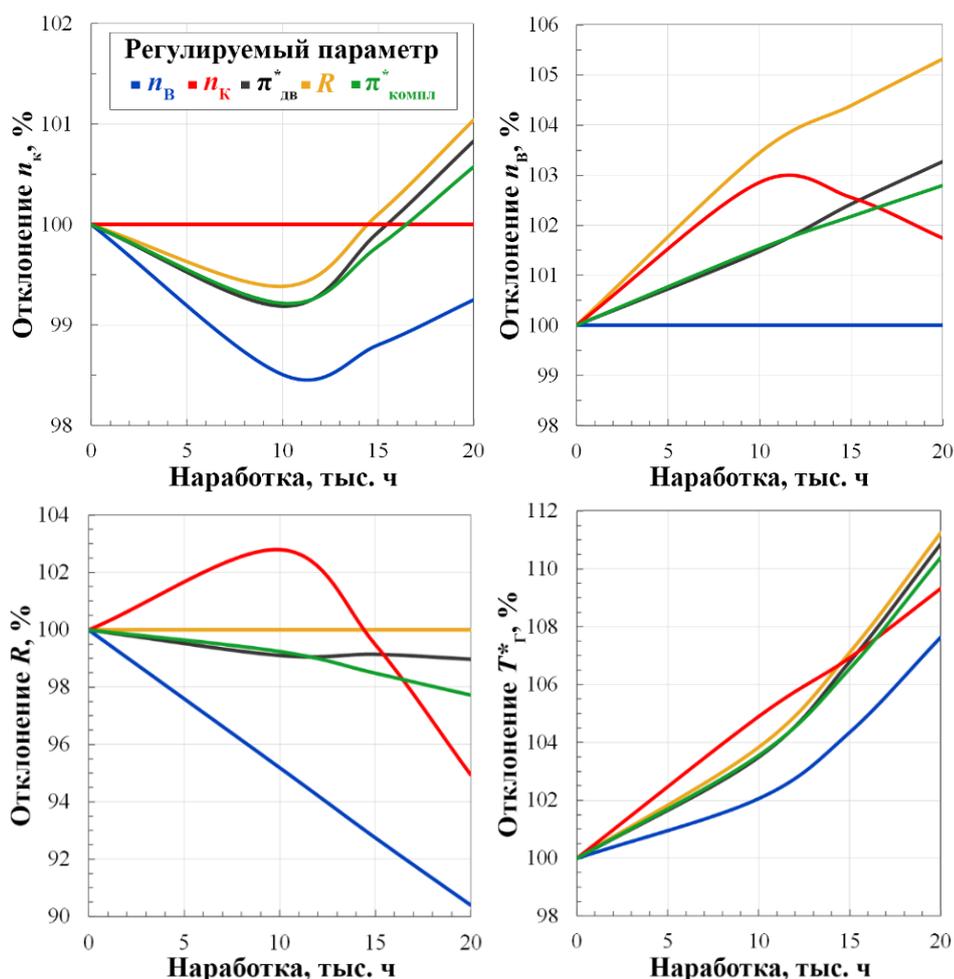


Рисунок 9 – Изменение параметров двигателя на взлетном режиме работы при совместном ухудшении характеристик всех узлов для разных способов управления

Анализ результатов расчетов показывает, что оптимальным способом управления во всех рассмотренных случаях является поддержание рассчитываемой в БММД величины тяги. При управлении по параметру $R_{расч}$ тяга двигателя может сохраняться на требуемом уровне в течение жизненного цикла до выработки двигателем запасов по температуре газа и ГДУ компрессоров. Погрешность в поддержании тяги будет определяться точностью расчета ее величины в модели и совершенством алгоритмов идентификации БММД.

При традиционном косвенном управлении тягой по измеряемым параметрам в большинстве случаев наилучшим является регулятор степени повышения давления в двигателе. При выраженном ухудшении характеристик отдельных узлов он не допускает снижения тяги более чем на 4 %, а при совместном ухудшении характеристик узлов вследствие выработки ресурса двигателя его эффективность сравнима с регулятором параметра $R_{расч}$ (погрешность в поддержании тяги менее 1 %). Однако применение такого способа управления ограничивается проблемами измерения давления в проточной части двигателя, связанными с точностью имеющихся датчиков и неоднородностью потока в двигателе. С учетом этого компромиссным вариантом является применение регулятора частоты вращения n_B , который не имеет проблем с точностью измерения регулируемого параметра и чувствителен только к ухудшению характеристик вентилятора, состояние которого

должно тщательно контролироваться в эксплуатации при выборе этого способа управления.

Управление по параметру $\pi^*_{\text{компл}}$, как показывают расчеты, позволяет несколько снизить чувствительность двигателя к износу КНД, но в большинстве других случаев проигрывает регуляторам частоты вращения вентилятора и $\pi^*_{\text{дв}}$ в точности поддержания тяги. Регулирование частоты вращения n_k является наихудшим способом управления в ТРДД с высокой степенью двухконтурности и не обеспечивает сохранения требуемых параметров рабочего процесса при износе.

Оценка эффективности разных способов управления при кристаллическом обледенении двигателя выполнена в характерных для него условиях крейсерского полета. На рисунке 10 представлены результаты расчета изменения параметров двигателя в процессе обледенения (до загромождения наледью 30 % проходного сечения проточной части) при применении регуляторов параметров n_B , n_k , $\pi^*_{\text{дв}}$ и $R_{\text{расч}}$.

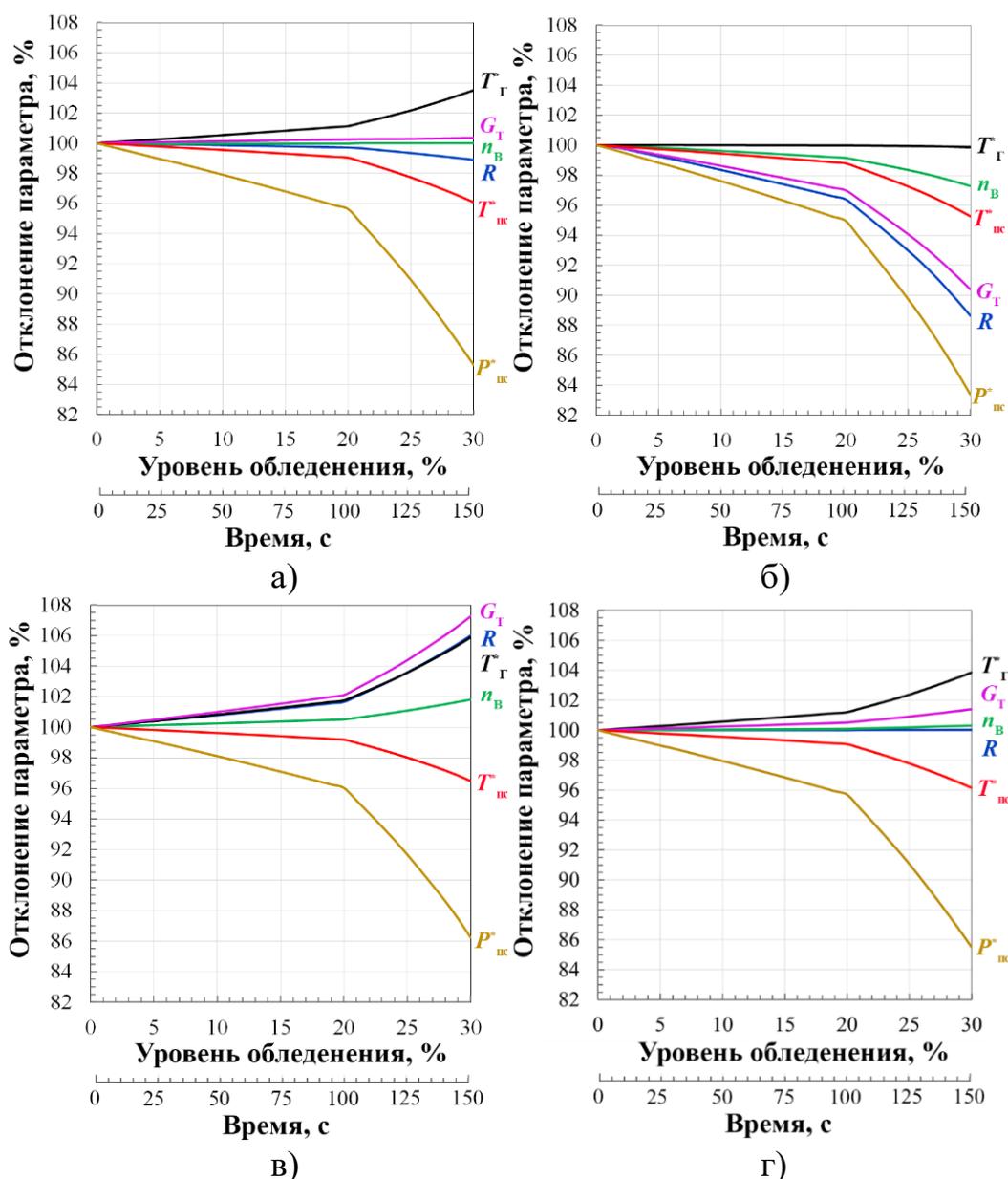


Рисунок 10 – Изменение параметров двигателя в процессе обледенения при работе регуляторов параметров n_B (а), n_k (б), $\pi^*_{\text{дв}}$ (в) и R (г)

По результатам выполненного математического моделирования показано, что наиболее эффективным способом управления в условиях кристаллического обледенения является управление по параметру $\pi_{\text{дв}}^*$, приводящее к росту частоты вращения вентилятора (на 2 %) и температуры газа (на 6 % ≈ 100 К) в процессе нарастания льда. Повышение частоты вращения и соответствующее ему относительное увеличение температуры потока во входном тракте и расхода воздуха может привести к отрыву еще не достигших критической величины ледяных наростов, а после отрыва льда повышенное значение этой температуры будет замедлять новый процесс образования наледи. Такое управление, при сохранении тяги на уровне не ниже требуемого, может позволить не допустить значительного нарастания наледи на лопатках подпорных ступеней и предотвратить возникновение опасных последствий, связанных с повреждением льдом элементов проточной части.

Управление величиной тяги, рассчитываемой в бортовой математической модели двигателя, или частотой вращения вентилятора способствует наиболее точному поддержанию тяги и замедлению скорости нарастания наледи по сравнению с регулятором частоты вращения $n_{\text{к}}$.

Оптимизация применения в эксплуатации разных способов управления может быть достигнута путем их интеграции с режимом полета самолета и выборочного использования на отдельных его этапах, например, поддержанием наибольшей тяги на этапах взлета и ухода на второй круг, наилучшей экономичности при крейсерском полете. Это реализуется посредством реконфигурации программ управления по сигналу о текущем режиме полета, поступающему из самолетных систем. В САУ, построенной по такому принципу, на критичных этапах полета целесообразно регулировать непосредственно величину тяги, на крейсерском режиме управление двигателем может осуществляться регулятором частоты вращения вентилятора при пониженной температуре газа в камере сгорания, а в условиях кристаллического обледенения в работу вступает регулятор степени повышения давления в двигателе, позволяющий снизить чувствительность двигателя к воздействию ледяных кристаллов.

Проведенные исследования показывают, что реконфигурация управления в условиях полета в облаке ледяных кристаллов, при отсутствии в настоящее время датчиков кристаллического обледенения, может осуществляться по сигналу о превышении предельной величины разности между измеренными в системе управления и рассчитанными в бортовой математической модели двигателя значениями температуры и давления воздуха за КНД, которые начинают снижаться при ухудшении характеристик подпорных ступеней из-за нарастания на них льда. Также идентификация наличия в атмосфере кристаллов льда может выполняться по показаниям датчика температуры воздуха за компрессором, чувствительного к снижению энтальпии потока вследствие таяния ледяных кристаллов во внутреннем контуре двигателя.

В шестой главе приводятся результаты экспериментальных исследований регулятора тяги при его работе в составе демонстрационной САУ (ДСАУ) с БММД на двигателе-демонстраторе АИ-25ТЛ.

Для повышения точности расчета тяги выполнена идентификация БММД и программирование микроконтроллера ДСАУ, реализующего программу расчета бортовой модели. Выполнен синтез регулятора тяги и сформирована программа управления величиной тяги. Алгоритмы регулирования тяги, выбранные в классе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, введены в программное обеспечение электронного регулятора демонстрационной САУ.

Разработана методика испытаний для оценки эффективности разных способов управления при ухудшении характеристик узлов двигателя, которая позволила выполнить такую оценку посредством имитации износа компрессора двигателя-демонстратора путем частичного прикрытия входных направляющих аппаратов (ВНА) компрессора на повышенных режимах работы двигателя. В этом случае наблюдается похожее изменение положения напорных ветвей на характеристике компрессора, как и при его износе (см. рисунок 11).

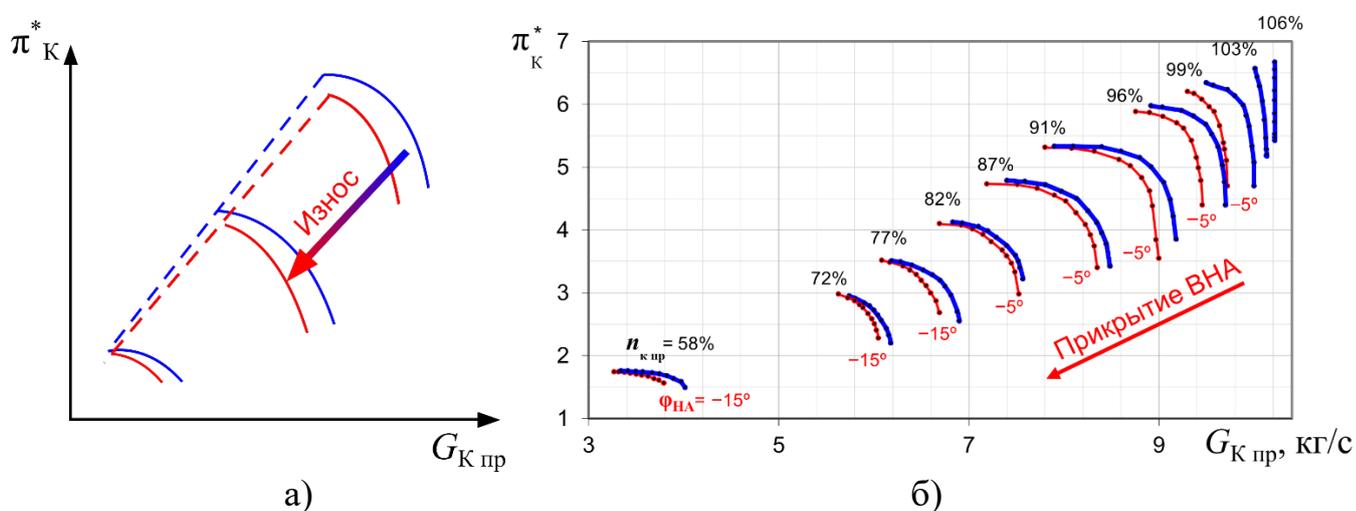


Рисунок 11 – Изменение характеристик компрессора при износе (а) и при прикрытии ВНА (б)

Проведены испытания традиционного регулятора частоты вращения ротора высокого давления и разработанного регулятора тяги на двигателе-демонстраторе при штатном управлении ВНА и при имитации износа компрессора путем прикрытия направляющих аппаратов. По результатам испытаний регулятор тяги обеспечил управляемость и устойчивую работу двигателя на всех проверенных режимах его работы.

При штатной программе управления ВНА наблюдалось аналогичное изменение параметров рабочего процесса в двигателе вдоль дроссельной линии при управлении частотой вращения n_k и величиной тяги. После прикрытия направляющих аппаратов на повышенных режимах работы двигателя ($n_{k \text{ отн}} > 90 \%$) регулирование частоты вращения компрессора приводило к снижению тяги на величину порядка 8 %, при этом разработанный регулятор тяги позволял поддерживать исходную величину тяги двигателя за счет увеличения частоты вращения компрессора на $\sim 2 \%$ и температуры газа за турбиной T_t^* на 20 К (см. рисунок 12).

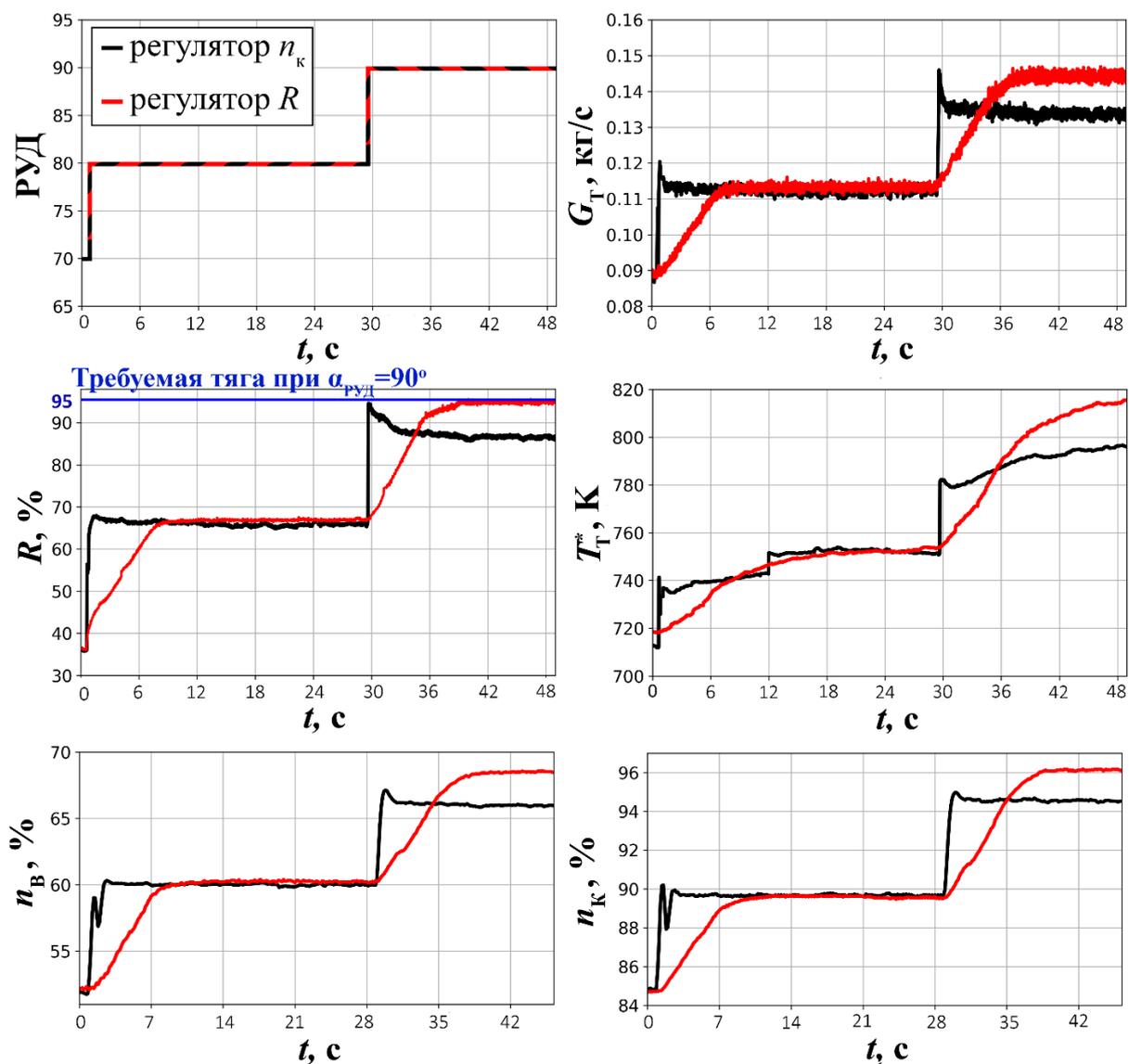


Рисунок 12 – Изменение параметров двигателя-демонстратора в испытаниях с измененной программой управления ВНА при работе регуляторов параметров R и n_k

Таким образом экспериментально подтверждена возможность сохранения требуемого уровня тяги при изменении характеристик компрессора посредством управления двигателем по рассчитываемой в бортовой математической модели величине тяги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы и систематизированы данные о влиянии различных видов износа узлов двигателя при выработке ресурса на характеристики газотурбинного двигателя и дана их количественная оценка.

2. Выполнен анализ особенностей влияния кристаллического обледенения ГТД на его характеристики, и определен метод оптимизации управления для снижения чувствительности двигателя к этому виду воздействия.

3. Разработана и верифицирована динамическая математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая рассчитывать изменение параметров

рабочего процесса в двигателе на установившихся и переходных режимах его работы при ухудшении характеристик узлов в эксплуатации.

4. Разработан метод управления величиной тяги с формированием параметра регулирования в бортовой математической модели двигателя, введенной в его систему автоматического управления.

5. Определены способы управления двигателем типа ТРДД с большой степенью двухконтурности, позволяющие компенсировать или уменьшить ухудшение его характеристик в эксплуатации при выработке ресурса и кристаллическом обледенении, снизить интенсивность обледенения и повысить безопасность работы двигателя в условиях полета в облаке ледяных кристаллов.

6. Разработан способ фиксации возникновения кристаллического обледенения в двигателе с использованием параметров, измеряемых в системе автоматического управления и рассчитываемых в бортовой математической модели двигателя, который может быть применен для реконфигурации управления с целью компенсации воздействия обледенения.

7. Выполнена экспериментальная проверка работы регулятора величины тяги на двигателе-демонстраторе при ухудшении характеристик компрессора, подтвердившая возможность компенсации снижения тяги двигателя при обеспечении его управляемости и устойчивой работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и публикации, приравненные к ним:

1. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Automatic control to reduce the effect of deterioration of gas turbine engine components on its performance characteristics // AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, virtual conference, August 9–11, 2021. 11 p.

2. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Analysis of the impact of control methods on turbofan performance in ice crystal conditions // AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, virtual conference, August 24–26, 2020. 10 p.

3. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Compensating the effects of ice crystal icing on the engine performance by control methods // SAE Technical Papers. 2019. 6 p.

4. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Оптимизация управления газотурбинным двигателем в процессе выработки его ресурса // Вестник Самарского университета. 2018. Т. 17, № 4. С. 47–56.

5. Gurevich O., Golberg F., Smetanin S., Romanenko N. Application of “virtual” controllers for integrated propulsion and aircraft control // 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018), Belo Horizonte, Brazil, September 9–14, 2018. 8 p.

Другие публикации:

6. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Исследование способов управления, инвариантных к ухудшению характеристик узлов двигателя в процессе эксплуатации // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2020 (18–21 мая 2021 г.). Сборник тезисов. М. : ЦИАМ, 2020. С. 88–92.

7. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Способы управления двигателем для снижения влияния обледенения на характеристики двигателя // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2020 (18–21 мая 2021 г.). Сборник тезисов. М. : ЦИАМ, 2020. С. 81–85.

8. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. К выбору способов управления ГТД с учетом выработки его ресурса // Системы автоматического управления авиационными силовыми установками : сборник научных трудов / Гос. науч. центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» ; под ред. О.С. Гуревича. М. : ЦИАМ, 2020. С. 29–34.

9. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Особенности автоматического управления режимом работы ГТД при кристаллическом обледенении // Системы автоматического управления авиационными силовыми установками : сборник научных трудов / Гос. науч. центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» ; под ред. О.С. Гуревича. М. : ЦИАМ, 2020. С. 35–40.

10. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Оценка ухудшения характеристик ГТД при кристаллическом обледенении и возможностей его компенсации методами управления // Авиационные двигатели. 2019. № 3. С. 17–24.

11. Трифонов М.Е., Сметанин С.А. Анализ влияния способа управления на характеристики газотурбинного двигателя при его износе // 11-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 18–22 ноября 2019 г.). Сборник аннотаций конкурсных работ. М. : МАИ, 2019. С. 127–128.

12. Гуревич О.С., Сметанин С.А., Трифонов М.Е. Исследование влияния износа узлов двигателя в эксплуатации на его характеристики // Научно-техническая конференция «Климовские чтения – 2019: перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 18 октября 2019 г.). Сборник статей. Санкт-Петербург : Скифия-принт, 2019. С. 295–301.

13. Сметанин С.А., Гуревич О.С., Трифонов М.Е. Исследование возможностей компенсации методами и средствами управления влияния кристаллического обледенения на газотурбинный двигатель // Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки» (Москва, 28–30 мая 2019 г.). Сборник тезисов докладов. М. : ЦИАМ, 2019. С. 277–279.

14. Трифонов М.Е., Гуревич О.С., Сметанин С.А. Исследование влияния на характеристики ТРДД износа его узлов в эксплуатации // Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки» (Москва, 28–30 мая 2019 г.). Сборник тезисов докладов. М. : ЦИАМ, 2019. С. 279–281.

15. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Сметанин С.А. и др. Оптимальное управление при выработке ресурса двигателя // Научно-технический конгресс по двигателестроению, НКТД-2018 (Москва, 4–6 апреля 2018 г.). Сборник тезисов. М. : «Ваш Успех», 2018. Т. 2. С. 62–65.

16. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Сметанин С.А. и др. Исследование возможностей компенсации ухудшения характеристик узлов ТРДД при их износе методами управления // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 12–14 сентября 2018 г.). Материалы докладов. М. : Самарский университет, 2018. С. 184–185.