

1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

К выполнению контрольной работы следует приступить только после изучения в полном объеме необходимого теоретического материала по рекомендованной литературе и соответствующих разделов данного пособия.

Объем расчетно-пояснительной записки 15-20 страниц формата А4.

Записка должна быть написана разборчиво, темными чернилами или пастой, с полями для пометок рецензента. Страницы должны быть сброшюрованы и пронумерованы. Титульный лист оформляется согласно приложению 1.

Содержание и последовательность изложения материала контрольной работы должны соответствовать настоящему пособию. Необходимые теоретические сведения и рекомендации к выполнению контрольной работы изложены в последующих разделах данного пособия либо имеются в рекомендованной литературе.

Структурно пояснительная записка состоит из:

титульного листа;

технического задания (расчет всех цифр варианта задания, формулировка решаемых задач, объект исследования и др.);

основной части (краткое описание объекта исследования, методика проведения расчетных исследований, расчетные формулы, необходимые пояснения и др.);

- выводов по результатам выполненной работы.

Расчетную записку следует оформлять с учетом требований ЕСКД и СИ. Схемы, диаграммы и графики необходимо вычерчивать на миллиметровой или чертежной бумаге формата А4.

В заключение работы следует сформулировать общие выводы, в которых проанализировать полученные данные и результаты расчетов.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ "АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АД"

2.1. Роль и место дисциплины в системе профессиональной подготовки специалистов по специальности 160901

Применение систем автоматического управления (САУ) является важнейшим фактором в развитии всей авиационной техники и, в частности, в решении вопросов надежности, долговечности и экономичности силовых установок, используемых на летательных аппаратах.

Авиационные газотурбинные силовые установки (АГТУ) современных летательных аппаратов достигли высокой степени технического совершенства. Они позволяют получать при работе на расчетном режиме необходимую тягу (эквивалентную мощность) при относительно низких значениях удельной массы и удельного расхода топлива. Однако для улучшения характеристик силовых установок на

нерасчетных режимах при различных окружающих условиях, а также по мере расширения диапазона скоростей и высот полета летательных аппаратов возникает потребность в управлении все большим числом параметров рабочего процесса, в усложнении программ управления (регулирования) и в повышении их точности. Успешное решение этих задач возможно только средствами автоматики, т.е. в результате использования систем автоматического управления (регулирования).

Системы автоматического управления (регулирования) реализуют без непосредственного участия человека в замкнутом контуре САУ все выработанные человеком заранее или в процессе функционирования объекта алгоритмы действия. Роль человека при этом сводится к пуску и выключению системы, эпизодическому контролю за правильностью ее работы, регулированию, отладке, техническому обслуживанию и другим вспомогательным функциям, непосредственно не связанным с выполнением системой процесса регулирования АГТСУ.

В курсе учебной дисциплины "Автоматическое управление авиадвигателями" изучаются общие принципы построения и классификации САУ; параметры, регулирующие факторы и программы регулирования авиационных ГТД; элементная база гидромеханических САУ; системы регулирования и регуляторы отдельных параметров или элементов двигателя, а также перспективы развития САУ авиационных ГТД. Этот курс является необходимым для подготовки авиационных специалистов в области технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей ГА.

Основной задачей изучения дисциплины является приобретение знаний по принципам действия, особенностям конструктивного выделения, условиям работы и характеристикам САУ в целом, а также их основных элементов или звеньев.

Теоретические разделы дисциплины, содержащие математические выкладки, дают возможность разобраться в том, какие физические процессы описывают рассматриваемые уравнения, какие величины входят в эти уравнения и как различные конструктивные и эксплуатационные факторы влияют на эти величины.

Работу элементов САУ и их взаимодействие рекомендуется изучать, используя структурные и принципиальные схемы конкретных систем. При изучении принципа работы и устройства отдельных автоматов (например, автомата приемистости, автомата запуска и др.) полезно использовать отдельные функциональные схемы и чертежи этих устройств.

При рассмотрении процессов, происходящих в САУ, необходимо особое внимание уделить пониманию физической сути изучаемых явлений, уяснить механизмы влияния различных факторов на изучаемый процесс.

Изучая конкретную систему автоматического управления, необходимо, используя знания, полученные при изучении дисциплины "Основы автоматики", расчленить ее на отдельные функциональные элементы (типовые звенья), выяснить, зачем то или иное автоматическое устройство введено в данную схему. После этого следует разобраться, как работает

каждый элемент данной системы, как он обеспечивает реализацию предъявляемых к системе требований, выяснить преимущества и недостатки данного элемента по сравнению с другими элементами, обеспечивающими выполнение тех же функций в других известных САУ.

При изучении автоматических устройств наряду с усвоением принципа их действия надо обратить внимание на конструкцию основных элементов и, в первую очередь, датчиков, усилителей, сервомеханизмов и исполнительных органов. Конструкцию указанных устройств сначала следует изучать, используя отдельные функциональные схемы и чертежи, а в конце - на примере конкретных САУ.

Особое внимание при изучении отдельных элементов САУ следует обратить на регулировочные элементы, используемые на практике для выполнения заводских и эксплуатационных настроек регулятора. В частности, необходимо уяснить, как влияет положение регулировочных устройств на протекание эксплуатационных характеристик регуляторов и автоматов САУ.

После изучения каждой из учебных тем дисциплины следует проверить усвоение материала, отвечая на вопросы для самопроверки.

2.2. Перечень дисциплин и основных тем, необходимых для изучения дисциплины " САУ АГТД "

Изложение учебного материала данной дисциплины опирается на знания, полученные при изучении следующих дисциплин и их тем.

- высшая математика:
 - алгебраические уравнения, решения алгебраических уравнений;
 - основные положения дифференциального исчисления;
 - обыкновенные дифференциальные уравнения, решение линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами;
 - неопределенные и определенные интегралы;
 - комплексные числа и функции комплексных переменных, алгебраические действия с комплексными числами;
- физика:
 - физические свойства жидкостей и газов;
 - законы сохранения массы, количества движения и энергии;
 - первый и второй законы Ньютона;
 - динамика материальной точки, условия равновесия механической системы, единицы размерности физических величин;
- теория авиационных двигателей:
 - многоступенчатые осевые компрессоры;
 - характеристики компрессоров;
 - работа и характеристики газовых турбин;
 - эксплуатационные характеристики авиационных ГТД;
- основы автоматики (весь курс).

2.3. Перечень дисциплин, в которых используется данная дисциплина:

техническая эксплуатация летательных аппаратов и авиадвигателей.
 техническая диагностика;
 конструкция и прочность авиационных двигателей;
 самолеты и двигатели ГА.

2.4. Целевая установка

Изучение дисциплины "Автоматическое управление авиадвигателями" обеспечивает подготовку студентов к изучению специальных учебных курсов, входящих в программу подготовки инженеров специальности 160901 и в частности таких курсов как:

- техническая эксплуатация ЛА и АД;
- диагностика технического состояния АД;
- безопасность полетов (техническая эксплуатация и расследование летных происшествий);
- конкретная техника;
- дипломное проектирование.

В результате изучения дисциплины " Автоматическое управление авиадвигателями " студенты должны

ЗНАТЬ:

- основные понятия и определения, терминологию САУ авиационными ГТД;
- требования, предъявляемые к системам автоматического управления авиационных двигателей в соответствии с нормами летной годности и безопасности полетов;
- принципы действия, особенности конструктивного исполнения, работу и эксплуатационные характеристики отдельных элементов и систем автоматического управления в целом;
- влияние отдельных устройств или элементов авиационной автоматики на работу авиационных ГТД.

УМЕТЬ:

- анализировать системы регулирования авиационных ГТД по их структуре;
- устанавливать возможные причины и проводить инженерный анализ эксплуатационных отказов, связанных с нарушениями работы элементов САУ;
- формировать требования к проведению отладки автоматических систем управления ГТД.

3. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

3.1. Основная учебная литература

1. Черкасов Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. - 360 с.

2. Березлев В.Ф. и др. Системы автоматического регулирования газотурбинных двигателей.: Конспект лекций. Киев: КИИГА, 1984. - 40 с.
3. Сидоренко И.В. Автоматика ТРДД АИ-25. М.: МИИГА, 1988. - 52 с.

3.2. Дополнительная учебная литература

4. Гаевский С.А. и др. Автоматика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. проф. А.В.Штоды. М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1980. - 248 с.
5. И.И. Кринецкий. Основы авиационной автоматики. М.: Машиностроение, 1983. - 404с.
6. С.А.Сиротин, В.И.Соколов, А.Д Шаров. Автоматическое управление авиационными двигателями. М.: Машиностроение, 1991. - 176 с.

3.3. Регламентирующая литература

7. Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения. ГОСТ 23851-79. М.: Государственный комитет по стандартам, издательство стандартов, 1980. - 100 с.
8. Схемы гидравлические. Условные обозначения. ГОСТ 31754-79. М.: Государственный комитет по стандартам, издательство стандартов, 1980. - 28 с.

3.4. Литература по конкретной авиационной технике

9. Авиационный турбовинтовой двигатель АИ-24ВТ: Техническое описание. М.: Машиностроение, 1973. - 156 с.
10. Авиационный двухконтурный турбореактивный двигатель Д-30КУ: Техническое описание. М: Машиностроение, 1975. - 192 с.
11. Авиационный двухконтурный ГТД НК-86. Техническое описание: Основные данные, конструкция. М.: Машиностроение, 1978. - 232 с.

4. СТРУКТУРА И УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

Учебная дисциплина " Автоматическое управление авиадвигателями " состоит из следующих логически связанных учебных тем:

1. Системы автоматического управления (регулирования) авиационных газотурбинных силовых установок (АГТСУ).
2. Управление авиационными ГТД.
3. Газотурбинные двигатели как объекты управления.
4. Элементная база гидромеханических САУ.
5. Система управления частотой вращения ротора ГТД.
6. Система управления степенью повышения (понижения) давления.
7. Система управления температурой газа.
8. Автоматизация процессов приемистости и запуска авиационных ГТД.
9. Автоматические системы осевых компрессоров.
10. Автоматические ограничители неуправляемых величин.

11. Системы управления устройствами реверсирования тяги авиационных ГТД.

12. Управление отдельными системами и устройствами авиадвигателей.

13. Электронные цифровые и аналоговые системы управления.

Изучение курса " Автоматическое управление авиадвигателями " студентами заочной формы обучения предусматривает:

- прослушивание вводно-установочных лекций;
- самостоятельную работу над материалом курса;
- выполнение контрольной работы (после выполнения она высылается в институт в установленном порядке для проверки до начала зачетно-экзаменационной сессии);

- прослушивание обзорных лекций в период зачетно-экзаменационной сессии, а также лекций по некоторым ключевым и наиболее сложным разделам курса;

- изучение работы, конструкции и характеристик САУ авиационных двигателей на практических занятиях;

- выполнение лабораторных работ.

К сдаче экзамена по дисциплине студент допускается только в случае своевременного представления на кафедру и успешной защиты контрольной работы, а также проведения и сдачи всех предусмотренных учебным планом и рабочей программой лабораторных работ.

5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ПРОГРАММЫ

Тема I. Системы автоматического управления (регулирования) авиационных газотурбинных силовых установок (АГТСУ)

Обоснование необходимости применения САУ для обеспечения надежного и эффективного управления АГТСУ. Краткие сведения об истории развития автоматических систем управления.

Определение САУ АГТСУ, состав, назначение, основные требования. Системы и устройства силовых установок, работа которых управляется с помощью автоматических систем.

Классификация основных типов АС управления современных АГТСУ. Система автоматического управления (регулирования) авиационного ГТД как основной элемент САУ АГТСУ воздушных судов гражданской авиации.

Литература: [1, с.3-7], [2, с.3-7] , [4, с.5-14], [7, с.30-32].

Методические указания

При изучении настоящей темы необходимо получить общее представление о том, что такое автоматическая система управления, о ее назначении, составе и требованиях, предъявляемых к САУ авиационных газотурбинных силовых установок (АГТСУ).

Сложность современных АГТСУ как объекта управления, необходимость периодического изменения и корректировки режима работы двигателей воздушных судов, случайность действующих на них возмущений, которые быстро и в широком диапазоне изменяются во времени, занятость экипажа в полете переработкой поступающей информации делают практически невозможным качественное ручное управление (регулирование) авиационными силовыми установками. Решить эту задачу регулирования АГТСУ в таких условиях возможно только средствами автоматики, т.е. с помощью автоматических систем управления.

В развитие автоматики вложен труд многих отечественных и зарубежных ученых. Следует особое внимание уделить работам М.В.Ломоносова, И.И.Ползунова, И.А.Вышнеградского, К.Э.Циолковского, А.М.Михайлова. Из зарубежных ученых значительный вклад И. Стодола, А. Гурвица, Н.Рауса, Х.Стерна и многих других.

В процессе работы с литературой необходимо четко усвоить основные понятия автоматики: система автоматического управления, объект автоматического регулирования, основные элементы САУ и др.

Система автоматического управления АГТСУ является комплексной системой, состоящей из совокупности отдельных, более простых систем управления (регулирования) и, в частности, систем управления воздухозаборником, турбокомпрессором, форсажной камерой, реактивным соплом и воздушным винтом.

Важным вопросом, требующим при изучении настоящей темы серьезного внимания, является вопрос о классификации современных систем автоматического управления АГТСУ и применяемых законов управления. В современных АГТСУ воздушных судов гражданской авиации находят применение почти все типы АС, которые знает современная техника, за исключением систем, работающих на принципе адаптации (приспособлении при недостаточной для качественного управления входной информации).

В заключение необходимо отметить, что в литературе очень часто САУ АГТСУ называют САУ двигателя, поскольку важнейшим элементом АГТСУ является турбокомпрессор или двигатель, если рассматривать его как тепловую машину. Это наиболее справедливо для двигателей прямой реакции, у которых отсутствует воздушный винт, нет форсажной камеры, а воздухозаборник и реактивное сопло являются нерегулируемыми.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение автоматической системе управления, изобразите структурную схему САУ.
2. В чем основные причины необходимости применения САУ для современных АГТСУ воздушных судов ГА.
3. Перечислите требования к АС управления авиационными СУ.
4. Расскажите о вкладе отечественных ученых в развитие САУ.
5. Основные элементы современных систем управления авиационными силовыми установками.

6. Что такое авиационная силовая установка? Состав авиационной газотурбинной силовой установки?

7. Назначение систем автоматического управления авиационных силовых установок, предъявляемые к ним требования.

8. Перечислите, какие системы и устройства автоматизированы в современных авиационных силовых установках.

9. Классификация основных типов АС управления современных АГТСУ.

10. В чем разница между системами автоматического управления и регулирования?

Тема 2. Управление авиационными ГТД

Система управления авиационным ГТД как составная часть АС управления АГТСУ. Основные режимы работы авиационных ГТД, дроссельные характеристики.

Регулируемые параметры и регулирующие факторы авиационных газотурбинных двигателей. Требования к регулируемым параметрам.

Программы регулирования одновального ТРД, двухвального ТРД или ТРДД и ТВД. Изменение различных параметров двигателей при изменении внешних условий (например, температуры окружающего воздуха) для различных программ регулирования. Влияние программы регулирования на положение рабочей линии или линии рабочих режимов при дросселировании двигателя на характеристики компрессора.

Литература: [1, с. 7-28] , [2, с. 7-28] , [7, с. 39-42].

Методические указания

Как было показано, САУ АГТСУ - это комплексная система, в которой система управления турбокомпрессором или двигателем является составной частью, обеспечивающей ручное или автоматическое управление режимом работы двигателя и обязательно автоматическое поддержание или изменение установленного режима по заданной программе.

При изучении второго раздела необходимо разобраться в том, что такое режим работы двигателей, какие параметры в основном определяют режим работы. Какова номенклатура основных режимов работы авиационных ГТД в соответствии с ГОСТ 23851-79, и какова роль САУ в обеспечении надежной и эффективной работы авиационных ГТД на различных режимах.

Каждому режиму работы авиационного ГТД соответствует определенное сочетание различных физических величин, характеризующих рабочий процесс. Однако далеко не все физические величины или параметры можно использовать в качестве регулируемых параметров. Далее следует обязательно уточнить, что такое регулируемые параметры, требования, предъявляемые к ним, и знать, какие параметры принимаются в качестве регулируемых в различных двигателях ВС гражданской авиации.

Средства воздействия на работу авиационных ГТД, с помощью которых можно обеспечить наиболее эффективное изменение регулируемых параметров данного двигателя, называются регулирующими факторами.

Закон изменения основных регулируемых параметров двигателя в зависимости от внешних условий и положения РУД, осуществляемый системой регулирования, принято называть программой регулирования.

Далее следует рассмотреть программы регулирования различных типов авиационных ГТД. Изучение этого учебного материала рекомендуется начинать с программ регулирования простейшего авиационного двигателя - одновального ГТД.

Завершить изучение настоящей темы следует определением влияний внешних условий (и в первую очередь температуры окружающего воздуха) на изменение основных параметров двигателя при различных программах регулирования. Для физического толкования изменения режима работы и внешних условий следует привлекать характеристики компрессора с указанием на ней линии совместной работы турбины и компрессора.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое САУ авиационного ГТД? Какова ее связь с системой автоматического управления АГТСУ?
2. Перечислите основные режимы работы АГТСУ, покажите их расположение на дроссельной характеристике двигателя, охарактеризуйте основные параметры работы двигателя на каждом из типовых режимов.
3. Дайте определение таких понятий, как регулируемый параметр, регулирующий фактор и программа регулирования.
4. Требования к регулируемым параметрам .
5. Каково количественное соотношение между числом регулируемых параметров, регулирующих факторов и систем автоматического управления?
6. Назовите основные управляющие органы различных ГТД.
7. Перечислите основные требования к регулируемым параметрам авиационных двигателей.
8. Назовите основные программы регулирования одновальных ТРД, двухвальных ТРДВ и одновальных ТВД.
9. Покажите изменение основных параметров авиационных ГТД (ТРД, двухвальных ТРДВ и ТВД) при изменении внешних условий для различных программ управления.
10. В чем особенность программы регулирования современных ТВД по сравнению с авиационными ГТД.

Тема 3. Газотурбинные двигатели как объекты управления

Динамические свойства ГТД по частоте вращения. Понятие о собственной устойчивости двигателя. Влияние температуры газов перед турбиной на динамические свойства и устойчивость авиационных ГТД.

Самовыравнивание энергетического объекта. Признаки собственной устойчивости двигателя.

Уравнение одновального ТРД как объекта регулирования при независимой системе подачи топлива. Определение постоянных коэффициента дифференциального уравнения одновального ТРД с помощью экспериментальных характеристик отдельных элементов. Влияние на устойчивость ГТД системы топливоподачи с приводным топливным насосом.

Особенности уравнений ТВД и двухвальных ГТД как объектов регулирования.

Литература: [1. с. 97-114] ,[2. с. 28-39.]

Методические указания

В общем случае ГТД представляет собой сложную динамическую систему с аккумуляторами механической и тепловой энергии, массы рабочего тела, а также со многими возмущающими воздействиями, учесть которые в полной мере затруднительно. Однако можно показать, что определяет динамические свойства ГТД по частоте вращения ротора двигателя, как аккумулятор механической энергии, обладающей определенной инерционностью. Это позволяет на основании анализа баланса энергий или крутящих моментов турбины и компрессора судить о поведении двигателя на переходных режимах.

При проработке вопросов, связанных с собственной устойчивостью ГТД, необходимо обратить особое внимание на влияние характера протекания характеристик компрессора и турбины на собственную устойчивость двигателя, на физические причины самовыравнивания.

Вывод уравнений различных ГТД как объектов регулирования основан на анализе уравнения движения ротора двигателя. Необходимо разобраться в том, от чего зависит избыточный момент ротора различных двигателей и понять общие закономерности вывода уравнений ТРД, ТРДД и ТВД как объектов регулирования.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое самовыравнивание двигателя?
2. Дайте определение собственной устойчивости авиационных газотурбинных двигателей.
3. Перечислите, какие вы знаете критерии собственной устойчивости ГТД, основанные на анализе характеристик турбины и компрессора.
4. Напишите уравнение динамики ротора ГТД.
5. Зависит ли устойчивость двигателя от режима работы?
6. Каково влияние температуры газов перед турбиной на устойчивость работы двигателя, на положение точки устойчивости работы двигателя по частоте вращения?

7. Напишите уравнения ТРД, ТРДД и ТВД как объектов регулирования и объясните основные положения вывода этих уравнений.

Тема 4. Элементная база гидромеханических САУ

Элементы системы питания двигателей топливом, влияющие на процесс управления работой ГТД. Клапаны, применяемые в САУ. Чувствительные элементы регуляторов и датчиков. Усилительные устройства. Стабилизирующие устройства САУ. Преобразующие устройства. Регулирующие органы САУ ГТД. Временные регуляторы как отдельные блоки регуляторов систем автоматического управления ГТД.

Механизмы управления настройки элементов регуляторов.

Литература: [1, с. 226-269] , [2, с. 10-15].

Методические указания

Прежде чем приступить к изучению устройства и работы САУ современных АГТСУ воздушных судов ГА, необходимо рассмотреть основные элементы этих систем, разобраться в их назначении и работе при изменении внутренних параметров системы или окружающих условий.

Начинать следует с изучения влияния элементов СПДТ (системы питания двигателей топливом), а в частности топливных насосов и форсунок на процесс регулирования АД. Следует изучить характеристики этих элементов, устройство, оптимальные условия работы, влияние на расход топлива через систему на подогрев топлива и т.д.

Наибольшее распространение в САУ ГТД имеют различные клапаны. При изучении этой темы необходимо рассмотреть такие клапаны как перепускной (ограничение предельного давления), дифференциальный (клапан перепада давлений), распределительный, запорный (обратный), постоянного и минимального давлений.

При рассмотрении чувствительности элементов регуляторов следует обратить внимание на работу и сравнительные характеристики механических, гидромеханических, гидравлических и электрических чувствительных элементов частоты вращения датчиков давления, перепада и, особенно, отношения давлений, а также чувствительных элементов датчиков температуры.

Далее следует перейти к изучению усилительных устройств, уделив особое внимание гидравлическим усилителям, получившим наибольшее распространение в САУ современных АГТСУ. В этом разделе темы следует рассмотреть золотниковые усилительные устройства, усилительные устройства с управляющим элементом типа "сопло - заслонка" и струйные гидроусилители.

С целью повышения устойчивости и быстродействия САУ в них применяются различные стабилизирующие и корректирующие устройства. Необходимо разобраться в способах улучшения динамических характеристик САУ и их влиянии на характеристики системы.

В ряде случаев, особенно в многомерных САУ с несколькими регулируемыми параметрами, появляется необходимость в совершении определенных действий по совместному управлению двигателя с помощью нескольких входных параметров. При этом большое значение приобретают такие преобразующие устройства, как суммирующие и множительные механизмы, а также функциональные преобразователи.

Особое внимание при изучении настоящей темы следует обратить на такие важнейшие элементы САУ ГТД, как регулирующие органы и временные регуляторы. Основными регулирующими органами ГТД являются регулирующие органы подачи топлива (наклонная шайба плунжерного насоса, дроссельная игла, дроссельный кран), а в некоторых двигателях и площади выходного сечения сопла. Из временных регуляторов надо обязательно разобраться в работе гидрозамедлителей, автоматов приемистости и запуска, без которых практически не обходится ни одна САУ ГТД.

Завершить изучение темы рекомендуется рассмотрением механизма настройки и управления регуляторов.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные элементы, входящие в состав гидромеханических систем автоматического управления.
2. Особенности регулирования расхода топлива через двигатель при использовании различных типов топливных насосов.
3. Приведите примеры использования различных типов клапанов.
4. Нарисуйте схему и объясните работу клапана постоянного давления. Назначение клапана ПД.
5. Какой элемент САУ обеспечивает устойчивую работу ГТД на режиме малого газа при повышении высоты полета?
6. Назначение стабилизирующих и корректирующих устройств. Нарисуйте структурную схему САУ с использованием этих устройств.
7. Какие усилительные устройства применяются в гидромеханических САУ?
8. Нарисуйте схему регуляторов частоты вращения при центробежном, механическом и гидравлическом чувствительных элементах.
9. Классификация управляющих элементов усилительных устройств типа "сопло-заслонка".
10. Дайте сравнительную характеристику применяемым регулирующим органам расхода топлива в САУ АГТД.
11. Охарактеризуйте применяемые механизмы управления и настройки элементов регуляторов.

Тема 5. Системы управления частотой вращения ротора ГТД

Системы ручного управления частотой вращения ротора ГТД. Области их применения. Функциональные и принципиальные схемы систем ручного

управления с регуляторами постоянной подачи топлива. Эксплуатационные свойства таких систем.

Автоматические системы управления частотой вращения роторов ГТД. Назначение систем, эксплуатационные и метрологические требования к ним. Применяемые регуляторы: типы, сравнительная оценка, характеристики.

АС управления частотой вращения роторов серийных ГТД с регуляторами, имеющими различные корректирующие устройства.

Статистические и динамические характеристики АС, способы их измерения и отладки. Характерные неисправности систем управления и их влияние на безопасность полетов. Мероприятия по повышению надежности и долговечности систем управления частотой вращения ротора ГТД.

Литература: [1, с. 246-255], [4, с. 55-79]

Методические указания

Рекомендуется вначале рассмотреть работу систем ручного управления частотой вращения ротора ГТД с регуляторами постоянной подачи топлива. При этом необходимо уяснить различия в схемах таких регуляторов при работе с клапаном постоянного давления и клапаном постоянного перепада давлений на дроссельной игле (дроссельном клапане).

При изучении автоматических систем управления частотой вращения рекомендуется вначале уяснить признаки классификации регуляторов частоты вращения, оценить достоинства и недостатки различных регуляторов частоты вращения, целесообразные области их применения.

Завершить изучение регуляторов частоты вращения необходимо уяснением причин возможной неустойчивости системы, включающей указанный регулятор, на пониженных частотах вращения.

Вопросы для самопроверки

1. Какие эксплуатационные требования предъявляются к САУ частоты вращения роторов авиационных ГТД?

2. Почему возникает необходимость в разделении всего диапазона эксплуатационных частот вращения на два поддиапазона: поддиапазон ручного управления частотой вращения и поддиапазон автоматического управления?

3. Дайте сравнительную оценку САУ частотой вращения с регуляторами следующих типов: прямого действия, непрямого действия простейшей схемы, непрямого действия с жесткой обратной связью, непрямого действия с гибкой обратной связью.

4. Пользуясь принципиальной схемой САУ одного из ТРДД или ТВД гражданской авиации, составьте структурную схему его регулятора частоты вращения.

5. Изобразите настроечную характеристику регулятора постоянной подачи топлива прямого действия.

Тема 6. Система управления степенью повышения (понижения) давления

Обоснование необходимости применения систем повышения (понижения) давления в авиационных ГТД. Пневматические датчики отношения давлений; принципиальное устройство, характеристики, области существования возможных режимов, настройка (регулирование) датчика. Пневматический редуктор.

Системы управления степенью повышения давлений в компрессоре авиационного ГТД. Функциональные и принципиальные схемы систем. Регулятор степени повышения давлений в компрессоре. Принципиальная схема, работа, достоинства и недостатки.

Система автоматического управления степенью понижения давлений в турбине: назначение, возможные программы регулирования, регулирующие факторы. Регулятор степени понижения давлений в турбине: принципиальная схема, работа, достоинства и недостатки.

Литература: [1. с. 264-269].

Методические указания

Одним из возможных регулируемых параметров в САУ авиационных ГТД является отношение давлений, т.е. степень повышения или понижения давлений в некоторых точках регулируемого объекта. Основой датчиков повышения (понижения) давления является пневматический редуктор. Необходимо разобраться в принципиальной схеме, устройстве и рабочих характеристиках пневматического редуктора.

Степень повышения давления воздуха в компрессоре авиационного ГТД является одним из наиболее информативных параметров рабочего процесса, по которому можно судить о режиме работы двигателей. Кроме того, этот параметр наиболее полно характеризует устойчивость работы компрессора. Поэтому при изучении данной темы надо обратить особое внимание на устройство и работу датчиков степени повышения давлений в компрессоре.

Завершить изучение данной темы рекомендуется рассмотрением датчиков степени понижения давления в турбине АГТД, особенностей их устройства, программы регулирования и регулирующих факторов в САУ с такими датчиками.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы достоинства программы регулирования ГТД, обеспечивающей стабилизацию степени повышения давлений в компрессоре?

2. Укажите возможные области работы пневматического редуктора.

3. Вычертите структурную схему САУ степени повышения давления и поясните принцип ее работы.

4. Нарисуйте принципиальную схему датчика повышения давления в компрессоре.

Тема 7. Системы управления температурой газа

Назначение систем управления температурой газа, эксплуатационные и метрологические требования к ним, области применения. Функциональные и принципиальные схемы систем управления температурой газа.

Совместная работа систем управления частотой вращения и температурой газа. Практическая реализация систем управления температурой газа, их сравнительный анализ, оценка эксплуатационных свойств и регулировка. Характерные неисправности и их влияние на безопасность полетов.

Литература: [1, с. 71-276] , [4, с.79-94].

Методические указания

Стремление к высоким значениям удельных тяг и мощностей, к уменьшению массы и размеров, а также к повышению эффективности ведет к непрерывному росту у современных авиационных ГТД температуры газа перед турбиной. Одной из важнейших систем высокотемпературных ГТД является система управления температурой газа перед турбиной. При изучении этой темы необходимо, прежде всего четко уяснить возрастание роли САУ температурой газа современных авиационных двигателей.

Далее следует рассмотреть принципы управления температурой газа с применением замкнутых и разомкнутых систем. При этом особое внимание обратите на структурные схемы систем управления, получивших наиболее широкое распространение в САУ современных ИД.

В авиационных двигателях с регулируемой площадью выходного сечения сопла применяется программа с одновременным регулированием частоты вращения ротора и температуры газов перед турбиной. Рекомендуется подробно разобраться в совместной работе двух систем управления: частоты вращения и температуры газа.

Завершить работу над учебным материалом темы следует изучением различий между регуляторами и ограничителями температуры газа.

Вопросы для самопроверки

1. Назначение САУ температурой газа перед турбиной ГТД.
2. По каким признакам и на какие типы классифицируются регуляторы температуры газа?
3. Требования к САУ температурой газа.
4. Чем отличается ограничитель температуры газа от всережимного регулятора?
5. Поясните принцип работы САУ температурой газа. Перечислите основные элементы, их назначение и принцип действия данной САУ.

Тема 8. Автоматизация процессов приемистости и запуска авиационных ГТД

Необходимость автоматизации процессов приемистости и запуска. Обоснование оптимальных программ приемистости и запуска авиационных ГТД. Основные элементы САУ, обеспечивающие выполнение этих программ, принципиальные схемы и особенности их работы.

Системы автоматизации процессов приемистости и запуска, эксплуатационные и метрологические требования к ним, основные принципы построения. Автоматы приемистости и запуска, их классификация и особенности работы. Функциональные и принципиальные схемы автоматов приемистости различных типов. Характерные неисправности и их влияние на безопасность полетов.

Литература: [1, с. 254-260], [5, с. 228-234, с.249-251].

Методические указания

Задача управления авиационными двигателями в процессе запуска и приемистости состоит из двух частей: разработки оптимальной программы управления и создания специальных регуляторов или автоматов, способных осуществить такое изменение регулирующих факторов, чтобы параметры двигателя изменялись по возможности близко к оптимальному закону. При этом очень важно уметь представить рабочую линию двигателя на характеристике компрессора и объяснить допустимые границы изменения параметров.

Далее необходимо рассмотреть схемы и работу САУ запуска и приемистости, основными элементами которых являются специальные регуляторы или автоматы. Особое внимание рекомендуется обратить на принципы действия автоматов приемистости (АП), работающих по внутренним параметрам. Кроме того, надо ознакомиться также с временными автоматами приемистости, включая гидрозамедлители.

Далее следует изучить работу и устройство топливных автоматов запуска ТАЗ различных типов, их достоинства и недостатки. Особое внимание при этом следует уделить ТАЗ, регулирующему подачу топлива по давлению воздуха за компрессором. Обратите внимание на эксплуатационные регулировки, предусмотренные в существующих АП и ТАЗ.

Вопросы для самопроверки

1. Покажите на характеристике компрессора ГТД линию рабочих режимов, зоны разгона и торможения ротора, линии ограничения работы двигателя при приемистости, а также оптимальный закон изменения параметров двигателя на разгоне.

2. Обоснуйте оптимальный закон изменения параметров двигателя при запуске.

3. Нарисуйте моментную диаграмму запуска и покажите, от чего зависит время запуска.
4. Что такое приемистость и оптимальный закон приемистости?
5. Назначение автоматов приемистости и запуска.
6. Перечислите существующие типы АП и ТАЗ, отметьте их достоинства и недостатки.
7. Поясните смысл "холодного" и "горячего" зависания частоты вращения ротора ГТД при запуске.
8. Составьте функциональную схему АП и ТАЗ одного из современных двигателей ВС ГА.

Тема 9. Автоматические системы осевых компрессоров

Характеристики компрессора, влияние расчетной степени повышения давления на положение рабочей линии, обоснование необходимости механизации компрессора.

Задачи автоматизации осевых компрессоров, принцип работы АС осевых компрессоров и требования к ним. АС управления перепуском воздуха и поворотными лопатками. Законы управления, функциональные и принципиальные схемы, статические и динамические свойства, эксплуатационная оценка.

Пример исполнения систем управления механизацией компрессоров, примеры их работы и отладка в эксплуатации. Характерные неисправности и их влияние на безопасность полетов.

Литература: [1, с. 178-284], [4, с. 91-110].

Методические указания

Положение рабочей линии ГТД на характеристике компрессора определяется его расчетными параметрами, принятой программой управления, а также условиями эксплуатации. С целью повышения устойчивости и эффективности работы двигателей на нерасчетных режимах компрессоры всех современных ГТД выполняются со специальной механизацией, обеспечивающей регулирование расхода воздуха и измерение углов установки спрямляющих аппаратов. Управление этой механизацией осуществляется с помощью отдельной автоматической системы. Эта система является комплексной, состоящей из нескольких самостоятельных САУ, число которых соответствует количеству управляемых элементов.

Особое внимание при изучении темы следует уделить рассмотрению работы противоположных АС: систем управления клапанами перепуска и узлами установки спрямляющих аппаратов. Необходимо разобраться в особенностях исполнения гистерезисных устройств некоторых противоположных САУ существующих двигателей.

Необходимо также четко знать, почему приведенную частоту вращения и степень повышения давления предпочтительно применять в качестве

задающего параметра в САУ осевых компрессоров по сравнению с физической частотой вращения.

Завершить изучение темы рекомендуется рассмотрением работы и устройства противопомпажных САУ конкретных двигателей ГА.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите САУ осевых компрессоров. Объясните их назначение и порядок работы.
2. Объясните необходимость гистерезиса в срабатывании противоположных автоматов.
3. К каким последствиям может привести отказ в работе или неправильная настройка противопомпажных автоматических устройств.
4. Изобразите структурную схему противопомпажных автоматов, работающих по разомкнутой схеме.
5. Изобразите графически гистерезис в срабатывании противопомпажных агрегатов (искусственный и естественный).
6. Составьте структурную схему системы автоматического управления углом установки направляющих лопаток осевого компрессора.
7. Приведите пример значений параметров некоторых конкретных двигателей при срабатывании противопомпажных САУ.

Тема 10. Автоматические ограничители неуправляемых величин

Автоматические системы ограничения неуправляемых параметров современных АГТСУ. Назначение ограничителей и их роль в обеспечении надежности работы авиационных силовых установок и безопасности полетов, эксплуатационные и метрологические требования к ограничителям. Классификация ограничителей. Применение ограничителей в разомкнутых и замкнутых САУ.

Практическая реализация ограничителей на серийных ГТД, их эксплуатационные характеристики и отладка.

Литература: [4, с. 138-152].

Методические указания

Для предотвращения возможности превышения предельных по условиям прочности или газодинамической устойчивости значений неуправляемых величин рабочего процесса на современных авиационных ГТД устанавливаются специальные автоматические ограничители, облегчающие работу экипажа при управлении силовой установкой, повышающие надежность ее работы и безопасность полета. К основным ограничителям, применяемым на современных ГТД, относятся: ограничители частоты вращения одного из каскадов двигателя, температуры газов перед (за) турбиной, давления воздуха за компрессором, степени повышения давления в компрессоре, минимального давления и расхода топлива и др.

Изучая настоящую тему, необходимо обратить внимание на особенности применения ограничителей при замкнутой и разомкнутой САУ. Рассмотрите также особенности их функциональных схем, уясните достоинства и недостатки работы ограничителей при использовании различных САУ.

Завершить изучение темы следует рассмотрением работы и особенностей конструкции ограничителей некоторых конкретных авиационных ГТД.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните необходимость применения ограничителей неуправляемых параметров в современных авиационных ГТД.
2. Какие параметры называются ограничиваемыми?
3. Замкнутые и незамкнутые ограничители. В чем состоит различие между ними? Каковы их достоинства и недостатки?
4. Вычертите функциональные схемы замкнутых и незамкнутых ограничителей параметров.
5. Классификация ограничителей. Перечислите основные ограничители, применяемые в авиационных ГТД.

Тема 11. Системы управления устройствами реверсирования тяги авиационных ГТД

Назначение реверса тяги в силовых установках самолетов ГА, классификация и особенности работы различных типов устройств реверсирования тяги. Ограничения, накладываемые на режим работы ГТД при использовании реверсивного устройства. Требования, предъявляемые к устройствам реверсирования тяги.

Системы автоматического управления реверсом тяги в авиационных ГТД; состав, функциональные схемы, устройство и работа отдельных элементов, предъявляемые требования. Практическая реализация систем управления, устройства реверсирования тяги на ГТД, их эксплуатационные и эргономические характеристики, охрана труда при их эксплуатации.

Литература: [10, с. 76-109].

Методические указания

При изучении этой темы необходимо предварительно вспомнить основные сведения о реверсивных устройствах авиационных ГТД: назначения, классификации, работа и основные требования к ним. Выполнение этих требований в значительной мере определяется системой управления. Поэтому далее следует особое внимание обратить на работу систем управления реверсивными устройствами авиационных ГТД.

Рекомендуется отдельно рассмотреть такие вопросы как: сигнализация и блокировки в системах управления реверсивными устройствами различных

типов, требования к системам управления, их структурные и функциональные схемы.

Завершить изучение данной темы следует сравнительным анализом систем управления реверсивных устройств современных авиационных двигателей, обращая при этом внимание на их эксплуатационные, эргономические требования и вопросы охраны труда при их эксплуатации.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое реверсивное устройство? Каково его назначение и основные характеристики?
2. Какие требования предъявляются к реверсивным устройствам?
3. Какие требования предъявляются к системам управления реверсивных устройств авиационных ГТД?
4. В чем суть блокировки системы управления реверсивным устройством и системы управления режимами работы двигателя?
5. Изобразите функциональную схему системы управления одного из рассмотренных Вами двигателей.

Тема 12. Управление отдельными системами и устройствами авиационных силовых установок

Система управления воздушным винтом ТВД. Устройства защиты двигателей от появления отрицательной тяги.

Управление температурой масла. Назначение системы, требования, структура и принципиальные схемы.

Особенности управления силовыми установками сверхзвуковых пассажирских самолетов. Принципы построения систем управления сверхзвуковых входных устройств, функциональные системы. Системы автоматического управления площадью критического и выходного сечений сопел СПС.

Системы регулирования форсированного режима в газотурбинных авиационных двигателях прямой реакции (ТРДФ, ТРДДФ).

Системы формирования сигналов для задания режимов работы силовой установки.

Литература: [1, с. 270-273, 280-285] , [4, с. 157-221].

Методические указания

Кроме рассмотренных выше САУ авиационных ГТД, в состав современных АГТСУ входит еще ряд систем управления, которые не являются определяющими с точки зрения безопасности и надежности работы силовой установки, либо встречаются не во всех, а лишь некоторых типах авиационных силовых установок. К таким системам управления можно отнести системы управления воздушным винтом, входным и выходным устройствами силовых установок СПС, форсажной камерой, температурой масла в системе смазки двигателя и др.

Рекомендуется коротко ознакомиться со всеми перечисленными выше системами управления, обращая особое внимание на те двигатели и их системы, которые наибольшим образом соответствуют профессиональному интересу студента.

Закончить изучение настоящей темы следует рассмотрением САУ таких двигателей, как АИ-24, Д-30КУ и НК-144.

Тема 13. Электронные цифровые и аналоговые САУ авиационных ГТД

Обоснование необходимости совершенствования существующих гидромеханических САУ ГТД и перехода к электронным автоматическим системам управления. Общие принципы построения электронных систем управления. Принципы действия систем регулирования диагностирования аналоговых и цифровых САУ. Согласующие устройства электронных САУ. Устройства отображения информации, бортовая ЭВМ и ее программное обеспечение для эффективной работы электронных САУ.

Роль гидромеханических элементов в САУ с бортовой ЭВМ.

Литература: [1, с. 285-305].

Методические указания

Усложнение законов регулирования авиационных ГТД, а также повышение требований к статической и динамической точности процессов их управления вызвало необходимость перехода от обычных гидромеханических САУ к электронным системам управления. Причем, если первоначально электронные устройства управления использовались только для выполнения отдельных функций (ограничение температуры газов, частоты вращения роторов, управление механизацией компрессора и т.д.), то теперь стали применяться комплексные электронные регуляторы, выполняющие все функции управления силовой установкой.

В первых электронных САУ использовались аналоговые вычислительные устройства, не требующие принципиального преобразования сигналов, поступающих от датчиков. К слабым сторонам таких электронных САУ можно отнести их недостаточную точность и надежность, а также трудность перенастройки на другие программы регулирования, ограничения и условия эксплуатации. В современных и перспективных авиационных ГТД с целью обеспечения их наибольшей эффективности и надежности эксплуатации на нерасчетных режимах и в различных окружающих условиях все шире стали применяться электронные цифровые САУ. Основным принципиальным отличием, характеризующим работу электронной цифровой системы автоматического регулирования по сравнению с непрерывной аналоговой, является наличие в такой системе специального преобразователя непрерывных сигналов в дискретные сигналы в виде цифрового кода.

Далее при изучении этой темы следует разобраться в особенностях функциональных схем электронных систем управления и принципах их действия. Особое внимание следует обратить на роль гидромеханических элементов в САУ с бортовым, электронным регулятором двигателя (РЭД).

Вопросы для самопроверки

1. Обоснуйте необходимость применения электронных систем управления современных авиационных ГТД.
2. Нарисуйте структурные схемы электронных САУ с аналоговыми и цифровыми вычислительными устройствами.
3. В чем принцип дискретизации непрерывных сигналов датчиков при применении в системах управления цифровых ЭВМ?
4. Назначение согласующих устройств в электронных системах управления.
5. Какова роль гидромеханических элементов при использовании на двигателе в качестве основной электронной САУ.

6. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ И ИХ СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторные занятия - одна из основных форм учебной деятельности в системе обучения специалистов специальности 160901.

Лабораторные занятия проводятся в соответствии с рабочей программой дисциплины "Системы автоматического управления авиационных ГТД", учебным планом специальности и требованиями квалификационной характеристики инженера-механика по эксплуатации самолетов и двигателей ГА.

К выполнению лабораторных работ в период зачетно-экзаменационной сессии студенты заочного факультета должны заранее подготовиться, изучив соответствующие темы дисциплин, описания всех лабораторных работ, выполнить контрольную работу.

Контроль готовности к выполнению лабораторной работы проводится перед каждым занятием. Контроль проводится в виде индивидуальной беседы, по результатам которой дается допуск к выполнению работы.

При изучении дисциплины "САУ авиационных ГТД" предусмотрено проведение следующих лабораторных работ:

ЛБ.6.1. Элементная база гидромеханических САУ авиационных ГТД.

ЛБ.6.2. Изучение работы, функциональной и принципиальной схем изодромных регуляторов (на примере изодромного регулятора двигателя Д-30КУ),

ЛБ.6.3. Система автоматического управления двигателя АИ-25.

ЛБ.6.4. Система автоматического управления двухконтурного турбореактивного двигателя Д-30КУ.

Лабораторные занятия имеют целью углубление знаний, полученных в результате теоретического изучения материала, и получение практических умений по анализу САУ ГТД, установлению возможных причин их отказов и неисправностей, а также формулированию требований проведения отладки автоматических систем управления ГТД.

7. ЗАДАНИЕ 1. Расчет автомата приемистости двухвального (двухроторного) ТРДЦ

Основной целью выполнения первого контрольного задания является приобретение практических навыков в расчете одного из важнейших элементов САУ - автомата приемистости (АП). При выполнении данного контрольного задания каждый студент должен для двухвального ТРДЦ:

- рассчитать и построить динамическую характеристику двигателя;
- нанести на характеристику двигателя существующие ограничения;
- построить линию потребных расходов топлива для обеспечения оптимальной приемистости двигателя;
- рассчитать и построить линию оптимальной приемистости;
- построить линию располагаемых расходов топлива при работе автомата приемистости (АП);
- рассчитать и построить линию реальной приемистости рассматриваемого двухвального ТРДЦ;
- провести анализ полученных результатов.

Расчет АП выполняется по исходным данным, выбираемым студентом по шифру студенческого билета из табл. 1.

При выполнении данного задания контрольной работы вначале следует обосновать необходимость применения АП в системах автоматического управления авиационных ГТД, а затем привести описание применяемых типов АП и сравнить их основные характеристики.

Графики, которые требуется построить в процессе выполнения данного задания, должны вычерчиваться на отдельных листах миллиметровой бумаги формата А4. Выбираемый масштаб при построении графиков должен позволять производить измерения всех величин на графиках с достаточной точностью.

Необходимые теоретические сведения и конкретные рекомендации по выполнению расчета процесса оптимальной приемистости для задания, выбранного в соответствии с номером зачетной книжки студента, изложены в следующем разделе настоящего пособия.

Таблица 1

Исходные данные для расчета автомата приемистости

Последняя цифра зачетки	0	1	2	3	4
Общий расход воздуха через двигатель – G_b , Кг/с	42	80	125	163	200
Ускорение ротора ВД $UN_{вд}$, (об/мин)/с	2000	3200	1000	920	845
Относит, значение ном-та инерции ротора - J	0,76	1,15	1,45	1.50	3,75

Продолжение табл. 1

Суммарная степень повышения давления воздуха в компрессоре - π_k	10	12	14	16	18
Степень повышения давления воздуха в компрессоре низк. давления - $\pi_{кнд}$	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9
Степень двухконтурности двигателя - m	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Последняя цифра суммы двух последних цифр шифра	6	7	8	9	0
Коэффициент температуры K_t	1,12	1,13	1,34	1,15	1,06
Давление топлива перед форсунками (P_t) $_{max}$, МПа	4,7	5,2	5,7	6,2	4,5
Последняя цифра зачетки	5	6	7	8	9
Общий расход воздуха через двигатель - G_b кг/с	245	290	350	395	460
Ускорение ротора ВД $UN_{вд}$ (об/мин)/с	845	760	670	610	520
Относит. значение мом-та инерции ротора - J	1,80	1,95	2,15	2,40	2,85
Предпоследняя цифра зачетки	4	3	2	1	0
Суммарная степень повышения давления воздуха в компрессоре - π_k	20	22	24	26	28
Степень повышения давления воздуха в компрессоре низк. давления - $\pi_{кнд}$	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9
Степень двухконтурности двигателя - m	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
Последняя цифра суммы двух последних цифр шифра	1	2	3	4	5
Коэффициент температуры K_t	1,07	1,08	1,09	1,1	1,11
Давление топлива перед форсунками (P_t) $_{max}$, МПа	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0

7.1. Пояснения к выполнению ЗАДАНИЯ 1

Как известно, в авиационных ГТД область допустимой работы и процесс оптимальной приемистости формируются линиями ограничения работы отдельных элементов двигателя: компрессора, камеры сгорания и турбины. На начальном этапе приемистость авиационных ГТД обычно формируется линией ограничения работы двигателя по устойчивости процесса горения топлива в камере сгорания (КС). Однако в связи с малой продолжительностью этого этапа в общем процессе приемистости двигателя и для упрощения расчетов в настоящей контрольной работе ограничения по устойчивости КС не учитываются.

7.2. Построение динамической характеристики и линий ограничения работы двигателя

Одной из важнейших характеристик любого газотурбинного авиационного двигателя является его динамическая характеристика. Она служит теоретической основой расчета неустановившихся режимов работы ГТД и, в частности, его приемистости. Динамическая характеристика определяет зависимость потребного расхода топлива G_t от частоты N и скорости изменения частоты вращения UN . В относительных координатах общий вид функциональной зависимости динамической характеристики двухвального ТРДД может быть представлен в виде:

$$\overline{GT} = f(\overline{N}_{ВД}, \overline{UN}_{ВД}); \quad (1)$$

где $\overline{GT} = (GT)_{OT} = GI / (G_T)_{\max}$; $\overline{N}_{ВД} = (N_{ВД})_{OT} = NI / (N_{ВД})_{\max}$;

$$\overline{UN}_{ВД} = (UN_{ВД})_{OT} = (UN_{ВД})I / (UN_{ВД})_{\max}$$

Реальная динамическая характеристика двигателя может быть получена только в результате уточненного его расчета с использованием общей системы уравнений, характеризующей работу данного двигателя.

Приближенные динамические характеристики двухвального ТРДД при работе на установившихся ($UN_{ВД} = 0$) и неустановившихся ($UN_{ВД} > 0$) режимах могут быть описаны с помощью следующей эмпирической зависимости:

$$\overline{GT} = 0.25 + 0.33\overline{UN}_{ВД} - 0.75\overline{N}_{ВД} + 1.5\overline{N}_{ВД}^2 \quad (2)$$

Расчет динамических характеристик следует проводить при изменении ($N_{ВД}$) в диапазоне от 0 до 1,2 через 0,2 и изменением ($UN_{ВД}$) в диапазоне от 0, 4 до 1,2 также через 0,2. Полученные результаты расчетов динамических характеристик двигателя целесообразно свести в общую таблицу и построить по ним графики для различных значений ($UN_{ВД}$). Графики должны строиться на миллиметровой бумаге формата А4.

6.3. Построение линий ограничения работы двигателя

Как было указано выше, в авиационных ГТД существует ряд ограничений на допустимую область их работы, основными из которых являются ограничения по максимально допустимой температуре газов перед турбиной ($T_{г}$) перед и по устойчивости работы компрессора. Только что проведенный расчет динамических характеристик двигателя выполнялся при произвольном изменении $N_{вд}$, $(UN)_{вд}$ и Gt . Далее на построенную динамическую характеристику двигателя

$$\overline{GT} = f(\overline{N}_{ВД}, \overline{UN}_{ВД})$$

следует нанести ограничения по максимально допустимой температуре газов перед турбиной при приемистости и минимально допустимому запасу газодинамической устойчивости компрессора:

а. Линия ограничения режимов (т.е. $N_{вд}$ и $UN_{вд}$) по максимально допустимой температуре газов перед турбиной при приемистости ($T_{г}$) перед описывается следующей эмпирической зависимостью:

$$\overline{GT} = 1.4 * KT(\overline{N}_{ВД} - 0.37)^{0.5}, \quad (3)$$

где KT - температурный коэффициент, показывающий, во сколько раз (на сколько) допустимая температура газа перед турбиной в процессе приемистости может быть выше максимально допустимой температуры газа перед турбиной на установившихся режимах.

б. Линия ограничения режимов по минимальному запасу газодинамической устойчивости компрессора:

$$\overline{GT} = 0.45 + 3.95(\overline{N}_{ВД} - 0.45)^2, \quad (4).$$

Полученные ограничения по уравнениям (3) и (4) наносятся на график с динамическими характеристиками, отсекая области, где работа двигателя в процессе приемистости недопустима.

7.4. Расчет процесса оптимальной приемистости

Как следует из определения, весь процесс приемистости двигателя продолжается от момента его работы на режиме малого газа $N_{мг}$ до выхода на максимальный режим работы N_{max} , что соответствует относительному значению $(N_{вд})_{от} = 1$. Относительную частоту вращения ротора ВД на режиме малого газа можно найти с помощью выражения:

$$(\overline{N}_{ВД})_{МГ} = 0.43 = 0.032m - (\pi_{кн} - 0.5\pi_{кн}^2) / 47.3 \quad (5)$$

где m - степень двухконтурности двигателя.

7.5. Определение физической частоты вращения ротора ВД

Для определения физической частоты вращения ротора высокого давления двухвального ТРДД на максимальном режиме при стандартных атмосферных условиях можно воспользоваться зависимостью:

$$(\overline{N}_{ВД})_{МАХ} = 68.7 * 10^3 * [(m + 1)(\pi_{кн}^*)^{0.85} / GB^{1.3}]^{0.5} * [1 + (1.2 * \pi_{кн} - \pi_{кн}^{0.5}) / 18.6]. \quad (6)$$

После определения $(N_{ВД})_{\max}$ необходимо найти физические значения $(N_{ВД})$ во всех характерных точках процесса приемистости.

Наиболее простым методом дальнейшего расчета процесса является метод, основанный на разбивке времени приемистости T пр на небольшие интервалы Δt , в течение которых ускорение ротора высокого давления $UN_{ВД}$ можно считать постоянным. Чем меньше этот интервал, тем точнее расчет. При выполнении данного контрольного задания рекомендуемая величина шага $\Delta t = 0,5..1,0$ с. Необходимо, чтобы весь процесс приемистости был разбит не менее чем на 15-20 интервалов.

По кривой оптимальной приемистости, нанесенной на динамические характеристики двигателя, находим значения $(Gt)_{от}, (N_{ВД})_{от}$ и $(UN_{ВД})$ в точках 1 и 2.

Точка 1, соответствующая установившейся работе двигателя на режиме малого газа, характеризуется параметрами:

$$t = t_1; \overline{GT} = \overline{GT}_1; \overline{N_{ВД}} = \overline{N_{ВД1}} = \overline{N_{МГ}}; \overline{UN_{ВД}} = \overline{UN_{ВД1}} = 0;$$

Переход двигателя на режим, соответствующий точке 2 кривой оптимальной приемистости происходит внезапно при $t = t_1$ в результате ступенчатого повышения подачи топлива в камеру сгорания и роста температуры газов перед турбиной. При этом предполагается, что частота вращения ротора двигателя еще не успела измениться, однако расход топлива Gt и ускорение ротора $UN_{ВД}$ увеличились до предельных значений, определяемых допустимой температурой газов $(T_{г*})_{\max}$ в процессе приемистости или устойчивостью компрессора $Gt = Gt_2$ и $UN_{ВД} = UN_{ВД2}$.

Исходным режимом для расчета приемистости является режим малого газа, а исходными данными для расчета служат:

$N_{ВД}$ - частота вращения ротора высокого давления на максимальном режиме;

$UN_{баз}$ - базовое значение ускорения ротора ВД при приемистости;

P_t - давление топлива перед форсунками на максимальном режиме. При определении времени приемистости двигателя за начальные параметры процесса приемистости $t = t_0 = 0$ принимаются параметры в точке 2.

Определяем абсолютные значения $N_{ВД}$ и $UN_{ВД}$ в начале первого интервала при $t = t_0 = 0$

$$\left. \begin{aligned} (N_{ВД})_{t=0} &= \overline{(N_{ВД})_1} * (N_{ВД})_{\max}; \\ (UN_{ВД})_{t=0} &= \overline{(UN_{ВД})_1} * (UN_{ВД})_{баз} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Частота вращения ротора в момент $t_1 = t_0 + \Delta t$, т. е. в конце первого интервала находится в предположении, что ускорение ротора $UN_{ВД}$ в течение всего первого интервала постоянно и равно его значению в начале интервала $(UN_{ВД})_{t=0}$

$$(N_{ВД})_{t_1} = (N_{ВД})_{t=0} * (N_{ВД})_{\max}; \quad (8)$$

По найденной в конце первого интервала частоте вращения ротора ВД сначала вычисляем ее относительное значение $(N_{вд})_{от}$ при $t=t_1$, а затем, используя линию оптимальной приемистости, нанесенную на динамические характеристики двигателя, определяем относительное ускорение $(UN_{вд})_{t_1}$ и относительный расход топлива $(G_t)_{от}$ t_1 , соответствующие моменту времени $t=t_1$.

Далее процесс вычислений проводится для второго, третьего и всех последующих интервалов времени t_2, t_3, \dots, t_n до тех пор, пока частота вращения ротора высокого давления $N_{вд}$ не достигает максимального значения в точке 5. При этом продолжительность последнего (n -го) интервала должна выбираться такой, чтобы в конце этапа приемистости получить

$$N_{вд} = (N_{вд})_{\max} \text{ или } N_{вд} = 1$$

Общее время приемистости $T_{пр}$, т. е. время раскрутки ротора от $N_{мг}$ до N_{\max} , будет равно суммарной продолжительности всех " n " интервалов, т. е.

$$T_{пр} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (9)$$

На рис.1 приведена типовая тарировочная характеристика коллектора двухканальных топливных форсунок, которые наиболее часто применяются в современных авиационных ГТД.

По характеристике коллектора топливных форсунок определяем относительное давление топлива перед форсунками $(P_t)_{от}$ в каждый момент времени t_i .

Абсолютное значение давления топлива перед форсунками находится по формуле:

$$(P_t)_i = \overline{(P_t)}_i * (P_t)_{\max} \quad (10)$$

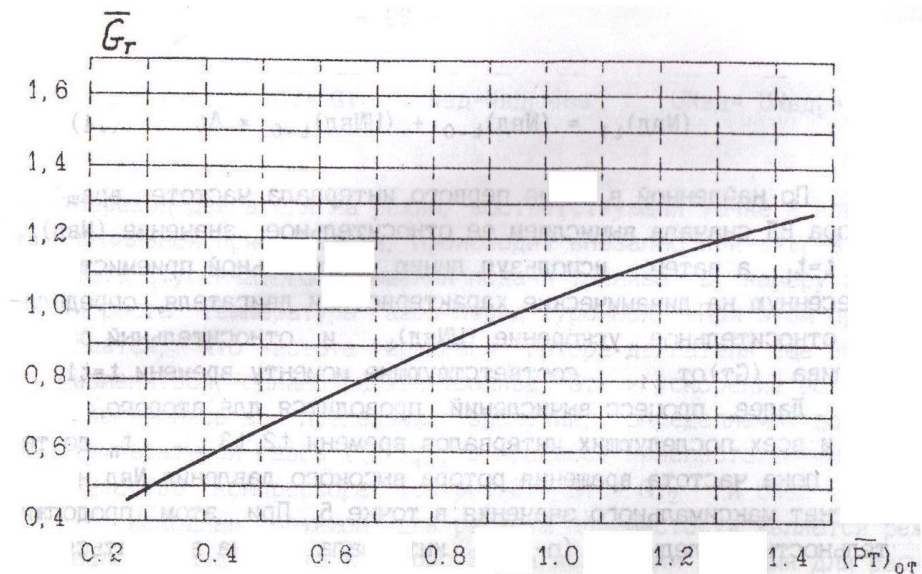


Рис 1. Характеристика коллектора топливных форсунок

Результаты проведенных расчетов удобно свести в единую таблицу, пример оформления которой показан в табл.2.

Таблица 2

t, с	(Nвд)от	Nвд	(UNвд)от	UNвд	(GT)от	(PT)от	PT
Размерность	-	об/мин		об/мин			МПа
t0							
t1= t0+Δt							
.....							
.....							
tn= tn-1+Δt							

Для проведения дальнейшего анализа работы двигателя необходимо построить графики изменения давления топлива РТ и частоты вращения ротора высокого давления Nвд от времени в процессе оптимальной приемистости: $PT = f(t)$ и $Nвд = f(t)$. Примерный вид этих графиков показан на рис.2 и 4.

7.6. Выбор программы работы автомата приемистости

Изменение потребных давления РТ и расхода топлива GT перед форсунками по времени (t) для обеспечения оптимальной приемистости обычно имеет сложный характер (например, рис.2) и не может быть реализовано существующими гидромеханическими регуляторами.

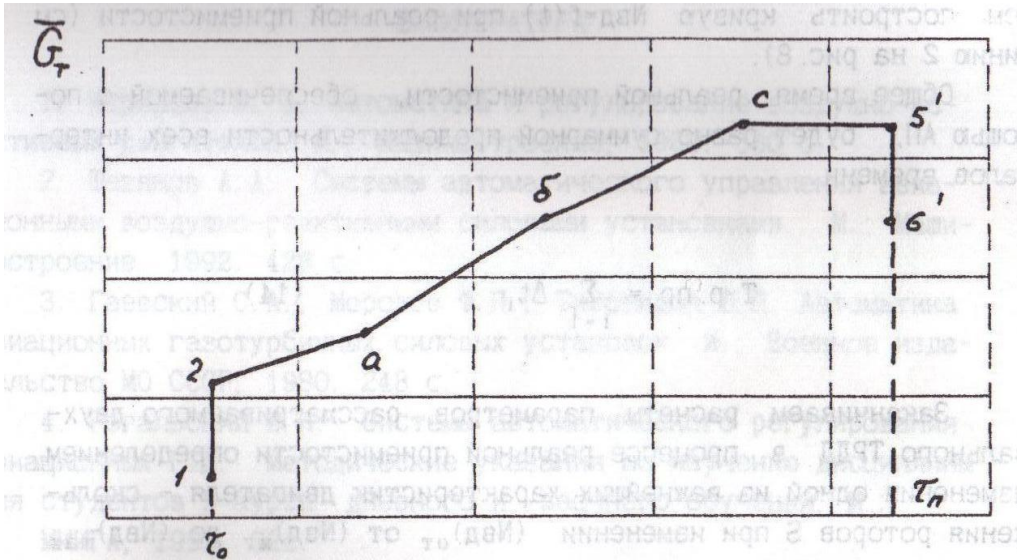


Рис.2. Изменение давления топлива перед форсунками при оптимальной (1-2-4-5-6) и при реальной(1-2-a-b-c-5'-6')приемистости

Реальная программа работы ЛА, т. е. изменение давления топлива перед форсунками Рт, будет всегда отличаться от оптимальной, однако наша задача сделать это отличие наименьшим. При выборе программы следует иметь в виду следующее:

- АП обеспечивает начальный скачок давления топлива (процесс 1-2), две скорости изменения P_T в процессе приемистости, возможность ограничения $P_T = \text{const}$, а также резкое падение P_T практически при $n = \text{const}$ (процесс 5-6).

- Величина начального скачка давления топлива должна быть такой же, как при оптимальной приемистости.

- Ломаная линия изменения P_T с помощью АЛ (2-а-б-с) должна по возможности ближе совпадать с кривой оптимальной приемистости. Точка 5' определяется временем реальной приемистости $T_{пр}$, которое будет найдено дальше.

Падение P_T в конце процесса приемистости при $N_{вд}=1$ (процесс 5'-6') определяется сокращением подачи топлива в двигатель с целью перехода от ускоренного движения ротора с $UN_{вд}$ в точке 5 на установившийся режим работы с $UN_{вд} = 0$ (точка 6').

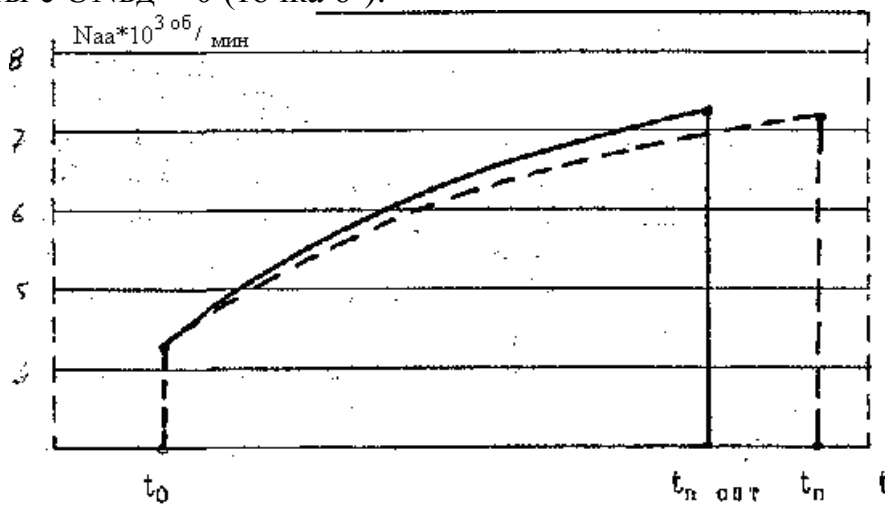


Рис 3

Внимание: На протяжении всего процесса приемистости давление топлива P_T , обеспечиваемого АП при любом значении частоты вращения $N_{вд}$, не может превышать $N_{вд}$ при оптимальном процессе приемистости двигателя и аналогичной частоте вращения. Программу работы АП (линия 1-2-а-б-с-5'-6) следует нанести на уже построенную характеристику оптимальной приемистости (рис.3) с учетом изложенных выше требований. При этом положение точек 5 и 6 пока окончательно не определено.

7.7. Расчет времени реальной приемистости

Используя характеристику коллектора топливных форсунок (рис.2), следует перестроить программу работы АП, т. е. преобразовать зависимость $P_T = f(t)$ в зависимость $GT = f(t)$. При этом надо иметь в виду, что

$$P(t) = P(t)_{от} = P(t) / P(t_{max}) \quad (11)$$

где $P(1)_{max}$ - давление топлива перед форсунками на максимальном режиме работы двигателя.

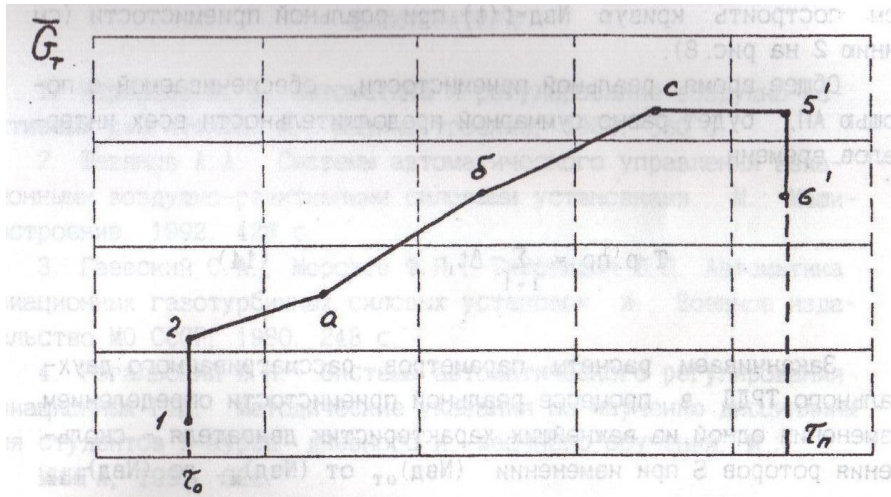


Рис.4.

Пример зависимости изменения Gt от времени t при реальной приемистости двигателя

Примерный характер протекания зависимости $Gt = f(t)$ при реальной приемистости двигателя, обеспечиваемой с помощью АП, показан на рис. 4.

Разбиваем процессы реальной приемистости двигателя 2-а, а-б, б-с и с-5' на 3...4 интервала каждый, причем таким образом, чтобы значения t_a и t_b были расчетными моментами времени. Конец последнего интервала $t_5 > t_n$ выбирается из условия, что в этот момент частота вращения ротора ВД достигает максимального значения $(N_{ВД})_{\max}$.

В каждый из принятых моментов времени t_i основные параметры процесса реальной приемистости $(Gt)_{от}$, P_t , $(P_t)_{от}$, $N_{ВД}$, $(N_{ВД})_{от}$, $UN_{ВД}$ и $(UN_{ВД})_{от}$ рассчитываются по тем же зависимостям, что и в случае оптимальной приемистости:

- по формулам (10)... (12);
- по построенной динамической характеристике двигателя;
- по графикам на рис. 1...4.

Результаты расчета процесса реальной приемистости, обеспечиваемого с помощью АП системы автоматического управления двигателя, необходимо свести в таблицу.

По результатам проведенных расчетов следует сначала уточнить положение точек 5' и б' на рис.3 (график $P_t = f(t)$), а затем построить кривую $N_{ВД} = f(t)$ при реальной приемистости.

Общее время реальной приемистости, обеспечиваемой с помощью АП, будет равно суммарной продолжительности всех интервалов времени

$$T_{p.np} = \sum_{i=1} \Delta t_i \quad (12)$$

Заканчиваем расчеты параметров рассматриваемого двухвального ТРДД в процессе реальной приемистости определением изменения одной из важнейших характеристик двигателя - скольжения роторов S при изменении $(N_{ВД})_{от}$ от $(N_{ВД})_{a_1}$ до $(N_{ВД})_{\max}$

$$S = S_{\max} * (N_{ВД})_{от} / \{0.14 + 0.86(N_{ВД})_{от}^{2+j^{0.5}}\}^{0.4} * (N_{ВД})_{от}^{0.6}$$

$$\text{где } S_{\max} = \frac{(N_{ВД})_{\max}}{(N_{НД})_{\max}} = 0.65[\pi *_{КНД}]^{0.42}[m + 1]^{0.5}.$$

Если при расчете S брать такие же значения $N_{вд}$, как и при оценке реальной приемистости (t_n), то результаты расчетов S можно внести в полученную таблицу дополнительным столбцом.

Затем следует построить графики изменения скольжения роторов рассматриваемого двигателя в процессе реальной приемистости:

$$S=f(N_{вдот}) \text{ и } S=f(t_1).$$