

УДК 629.7.036.34

А.И. КОВАЛЕНКО, А.В. ШПИЛЕВОЙ, В.М. СВЕТЛОВ

Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», Украина

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ С РАЗНЫМ ТЕМПОМ

Проведен анализ результатов специальных испытаний двухконтурного турбореактивного двигателя. Показаны некоторые особенности процессов приемистости двигателя при работе с существующей системой автоматического управления. Выработаны предложения по изменению системы управления с целью повышения устойчивости двигателя.

проектирование, регулирование, переходные процессы, закон подачи топлива

При проектировании ГТД в первую очередь внимание уделяется параметрам двигателя, указанным в техническом задании на двигатель, как правило, в расчетных точках крейсерского и взлетного режимов. В крейсерском режиме, кроме совместной работы в области высокой эффективности, к узлам предъявляются требования по устойчивой работе, прочности, весовым и другим характеристикам. На взлетном режиме, как наиболее нагруженном и определяющем безопасность полета, приоритет отдается удовлетворению характеристик прочности и надежности. Кроме того, в процессе проектирования и, позднее, производства, на конструктивные параметры двигателя (а значит и на его газодинамические характеристики) накладываются условия, определяемые особенностями технологических процессов изготовления элементов конструкции, а также изменения и уточнения по результатам предварительных испытаний отдельных узлов и деталей. Зачастую эти требования являются противоречивыми, и выполнение их возможно только при поиске компромисса методом последовательных приближений. Кроме того, основная часть проектировочных расчетов производится с использованием математических моделей установившихся равновесных режимов, а динамические параметры двигателя оцениваются приближенными методами.

Задание всех режимов работы двигателя в зависимости от эксплуатационных условий производит-

ся с помощью системы автоматического управления (САУ), к которой также предъявляются различные требования: по прочности, весу, скорости исполнения, точности, надежности и другие.

Кроме обеспечения установившихся режимов, САУ должна обеспечивать также надежную и устойчивую работу двигателя на переходных режимах (приемистости, встречной приемистости, сбросе газа, а также режимах, возникающих при работе различных систем - защиты от попмажа, восстановления режима работы и др. Трудности при выполнении этих требований состоят в том, что на этапе проектирования САУ динамические характеристики проектируемого ГТД определяются расчетным путем с большим количеством приближений и допущений. Поэтому для процесса доводки САУ предусматриваются доводочные регулировки, позволяющие компенсировать разницу между расчетной динамической моделью двигателя и его действительными динамическими характеристиками. Кроме того, доводочные регулировки позволяют без доработки агрегатов расширить их возможности и удовлетворить требования заказчика при их изменении. В некоторых случаях предусмотренного диапазона доводочных регулировок не достаточно, и требуются изменения конструктивных параметров агрегатов. После успешного прохождения всего объема испытаний на основании экспериментальных проверок уточняется техническое задание на САУ.

Объект исследования: – двухвальный ТРДД со смещением и с постоянной площадью выходного устройства - оснащен ЭСУ типа FADEC, управление может осуществляться с помощью одного из двух (основного или дублирующего) законов управления. Также имеется резервная (аварийная, двухрежимная: "пониженный" и "повышенный" режимы) гидромеханическая САУ.

Компрессор высокого давления двигателя регулируется поворотными входным и направляющими аппаратами (НА) первых ступеней. Изменение угла установки НА линейно зависит от угла установки входного НА.

При работе двигателя на основном законе основной САУ режим работы обеспечивается поддержанием заданной приведенной частоты вращения ротора низкого давления (НД), положение регулируемых направляющих аппаратов (РНА) задается в зависимости от частоты вращения ротора высокого давления (ВД). При работе двигателя на альтернативном (дублирующем) законе основной САУ режим работы обеспечивается поддержанием заданной степени повышения давления в компрессоре, положение РНА задается в зависимости от степени повышения давления в компрессоре.

Эксплуатационные регулировки позволяют добиться идентичности параметров двигателя при его работе на основном и альтернативном (дублирующем) законах основной САУ в одинаковых полетных условиях. При работе двигателя на резервной (гидромеханической) САУ режим работы обеспечивается непосредственно поддержанием расхода топлива в камеру сгорания, положение РНА задается в зависимости от степени повышения давления в компрессоре, как и при работе на альтернативном законе основной САУ.

Закон управления положением РНА предварительно определен по результатам испытаний компрессора в составе газогенератора и представляет собой зависимость углов установки от приведенной частоты вращения КВД для основного закона и углов установки от степени повышения давления в КВД для альтернативного закона. Далее, для про-

сто, приводятся зависимости только для регулируемого входного направляющего аппарата (РВНА). На небольших режимах работы угол установки РВНА отрицательный и постоянный. По мере увеличения режима работы величина угла установки РВНА увеличивается, пересекая нулевое значение в расчетной точке.

Поскольку штатный замер температуры и давления на входе в КВД отсутствует, то в составе двигателя управление РНА ведется по приведенной ко входу в двигатель частоте вращения ротора ВД (основной закон) (рис. 1) или по степени повышения давления в двигателе (дублирующий закон) (рис. 2).

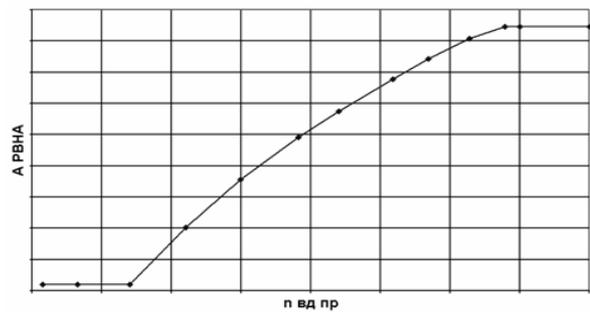


Рис. 1. Управление РНА – основной закон

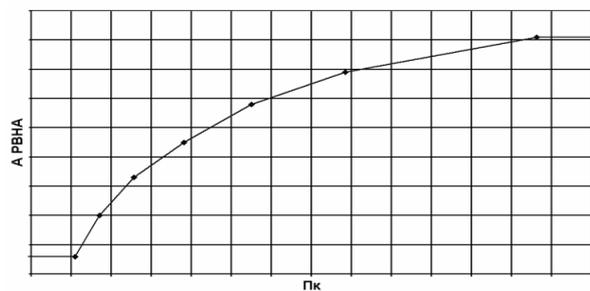


Рис. 2. Управление РНА – дублирующий закон

Для проведения специальных испытаний по проверке работы двигателя при переходных процессах (приемистостях и сбросах газа) двигатель был пре-парирован по тракту. Законы подачи топлива при приемистости при работе на обоих законах основной САУ были определены по результатам предварительных испытаний и удовлетворяют всем предъявляемым требованиям.

На одном из этапов специальных испытаний была осуществлена имитация аварийной ситуации: переход с режима "земной малый газ" (ЗМГ) основной САУ на режим "пониженный" резервной с ис-

ходными настройками САУ. Последующая обработка результатов испытаний показала, что во время этого переходного процесса наблюдались: повышенный уровень вибраций, значительное снижение запасов газодинамической устойчивости КВД, значительная разница в угле установки РНА во время указанного переходного процесса (рис. 3) и повышенная температура за турбиной НД (рис. 4) по сравнению с приемистостями, осуществленными на этом же двигателе при работе на основной САУ.

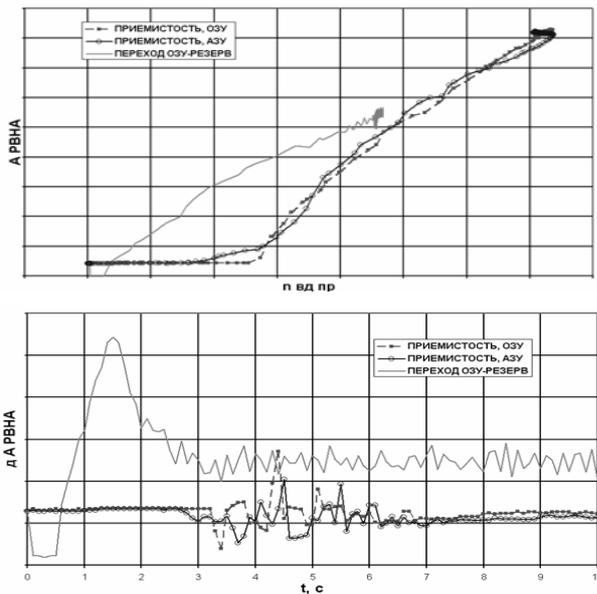


Рис. 3. Угол установки РНА

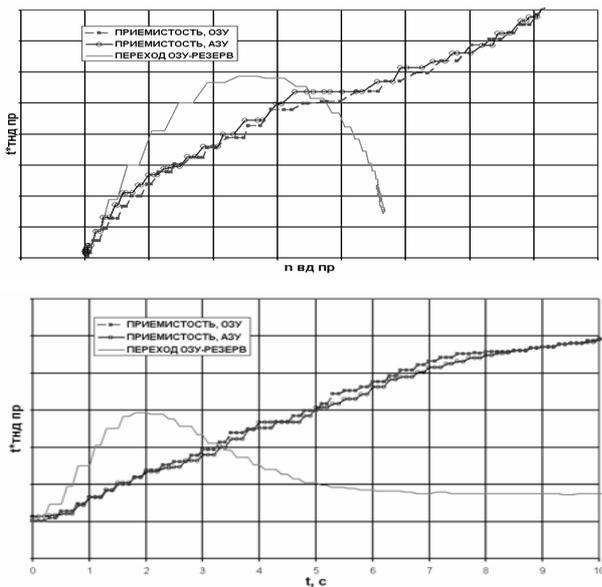


Рис. 4. Температура за турбиной НД

Анализ изменения других параметров показал, что при указанном переходе степень повышения

давления в КВД возрастает интенсивнее, чем при приемистостях на основном законе управления. Это является причиной не только снижения запасов устойчивости КВД (линия совместных работ турбины и компрессора приближается к границе устойчивой работы) (рис. 5), но и повышенных углов установки РНА КВД по сравнению с приемистостями на основных законах основной САУ (рис. 3).

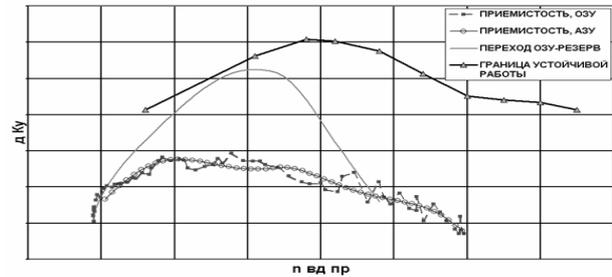


Рис. 5. Анализ устойчивости КВД

Повышенные углы установки РНА опасны работой в области, где возможно возникновение автоколебаний характера "срывной флаттер". Зарегистрированные повышенные вибрации могли быть следствием кратковременной работы в этой области, поэтому основной целью исследовательской работы было ликвидировать повышенные углы РНА. Рассматривались следующие варианты решения задачи:

а) изменение закона управления РНА при работе на резервной САУ. В силу особенностей САУ зависимость РВНА КВД от степени повышения давления единая для установившихся и переходных режимов и корректировка характеристики для приемистости ухудшила бы работу КВД на установившихся режимах.

б) введение для таких темпов приемистости отдельного закона управления РНА. Это потребует введения дополнительной функции, что вызовет изменения, требующие повторного проведения комплекса испытаний - дополнительных временных и материальных затрат.

Таким образом, напрямую решить проблему изменением закона управления РНА не удастся. В связи с этим рассмотрен вариант изменения градиента подачи топлива в основную камеру сгорания при переходе с режима ЗМГ основной САУ на "пони-

женный" резервной. Повышение давления за компрессором вызвано большим градиентом подачи топлива при указанном переходе (рис. 6).

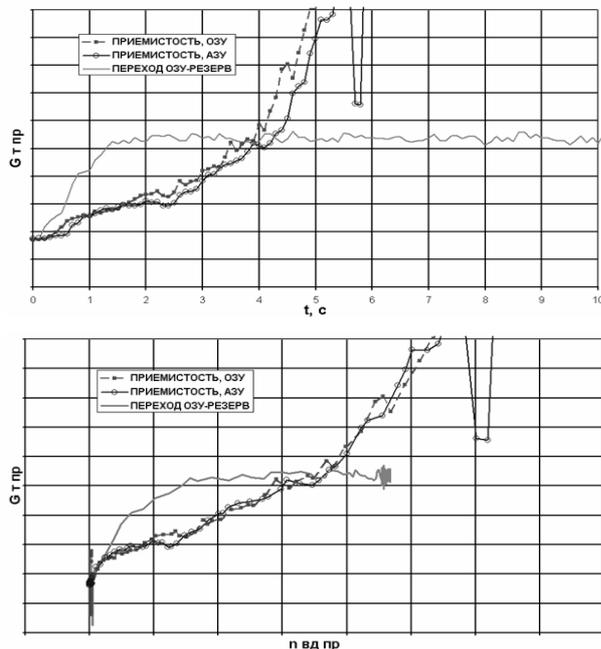


Рис. 6. Анализ давления за компрессором

По сравнению с приемистостями, выполненными при работе основной САУ, переход ЗМГ - "пониженный" происходил при темпах подачи топлива, почти в три раза больших. Особенности рассматриваемой САУ является то, что при работе резервной САУ все приемистости проводятся с единым градиентом вне зависимости от того, какая из приемистостей выполняется - аварийный переход на резервную САУ или приемистость с режима "пониженный" на "повышенный". Таким образом, изменение закона подачи топлива для удовлетворительного перехода с режима ЗМГ основной САУ на резервную повлияет на характеристики резервной САУ. Для анализа последствий снижения градиента расхода топлива рассмотрено несколько ситуаций:

а) аварийный переход двигателя с режима ЗМГ основной САУ на режим "пониженный" резервной в условиях полета $H_p=0$;

б) аварийный переход двигателя с режима "полетный малый газ" (ПМГ) основной САУ на режим "пониженный" резервной в условиях полета $H_p > 0$;

в) переход двигателя с режима "пониженный" на режим "повышенный" резервной САУ в условиях полета $H_p=0$;

г) переход двигателя с режима "пониженный" на режим "повышенный" резервной САУ в условиях полета $H_p > 0$.

В случае а) переход будет выполняться медленнее, чем исходный, однако на безопасность полетов это не повлияет, потому что отказ основной САУ в этих условиях приведет к прекращению выполнения полетного задания до восстановления полной работоспособности двигателя. Кроме того, переход произойдет с гораздо меньшей вероятностью потери газодинамической устойчивости. В случае б) переход будет выполняться примерно с таким же темпом, с которым обеспечивается обычная приемистость, поскольку ПМГ выше, чем ЗМГ, а режим "пониженный" остается без изменений. Так как обычные приемистости проверены предварительно стендовыми и летными испытаниями, то опасность потери газодинамической устойчивости отсутствует. Случай в) аналогичен а), с той разницей, что он практически невероятен. В случае г) переход будет происходить с темпом, близким к темпу обычной приемистости, и при этом вероятность снижения газодинамической устойчивости будет невелика.

Исходный закон подачи топлива в основную камеру сгорания не удовлетворяет требованиям по газодинамической устойчивости КВД, вызывает опасность появления автоколебаний и большой заброс температуры при приемистостях вследствие особенностей изготовленной САУ. Рассмотрены различные способы решения обнаруженных проблем, принят наиболее оптимальный из них - изменение закона градиента расхода топлива в основную камеру сгорания, проведен анализ последствий внедрения нового закона на различных этапах выполнения полетного задания.

Поступила в редакцию 17.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Епифанов С.В. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.