

УДК 629.735

С.В. ЕПИФАНОВ, Е.А. КОНОНЫХИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ, Украина

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОЙ САУ ГТД

Исследована возможность управления авиационным ГТД с использованием ограничителей приемистости (сброса) по неизмеряемым параметрам. Рассмотрены конфигурации САУ с применением многомерных регуляторов. Оценка качества работы регуляторов производилась при их взаимодействии с нелинейной поузловой динамической моделью двигателя. Для оценки результатов взаимодействия объекта управления с регулятором создано специальное программное обеспечение, имеющее развитый оконный интерфейс и инструменты для задания условий и визуализации результатов расчетов. Исследована эффективность совместного управления расходом топлива и угловым положением направляющих аппаратов компрессора на режимах приемистости и сброса.

Ключевые слова: многомерный регулятор, нелинейная поузловая динамическая модель двигателя.

Введение

Улучшение характеристик силовых установок (СУ) с ГТД можно достигнуть путем перехода к интегрированному управлению СУ [1].

Одна из сторон интегрированного управления СУ состоит в осуществлении оптимального взаимодействия ее элементов между собой и с системами самолета, направленного на улучшение эффективных характеристик СУ и снижения уровней ограничений на режимы эксплуатации самолета. Например, в работе [1] было предложено управлять рабочим процессом с использованием перепусков воздуха из тракта двигателя.

Другое перспективное направление развития САУ ГТД связано с применением в структуре САУ математической модели двигателя высокого уровня – поузловой термогазодинамической модели [2]. Это позволит помимо контуров, содержащих «реальные» регуляторы (с аппаратными датчиками параметров), применять «виртуальные» контуры регу-

лирования параметров (например, запаса устойчивости компрессора ΔK_y и температуры газа перед турбиной T_T , в которых регулируемые параметры рассчитываются с использованием модели.

В данной работе исследована возможность интегрированного управления входным направляющим аппаратом (РНА) и расходом топлива через камеру сгорания на этапах приёмистости и сброса газа. Обычно (в базовой САУ) управление РНА производится независимо от управления расходом топлива, и на всех установившихся и переходных режимах работы двигателя применяется одна программа управления, представленная зависимостью углового положения РНА от приведенной частоты вращения ротора турбокомпрессора. Нами на этапе приёмистости и сброса газа применялась специальная программа управления РНА (отличная от базовой программы управления, которая используется на установившихся режимах). С этой целью в структуре САУ (рис. 1) введен перекрестный регулятор.

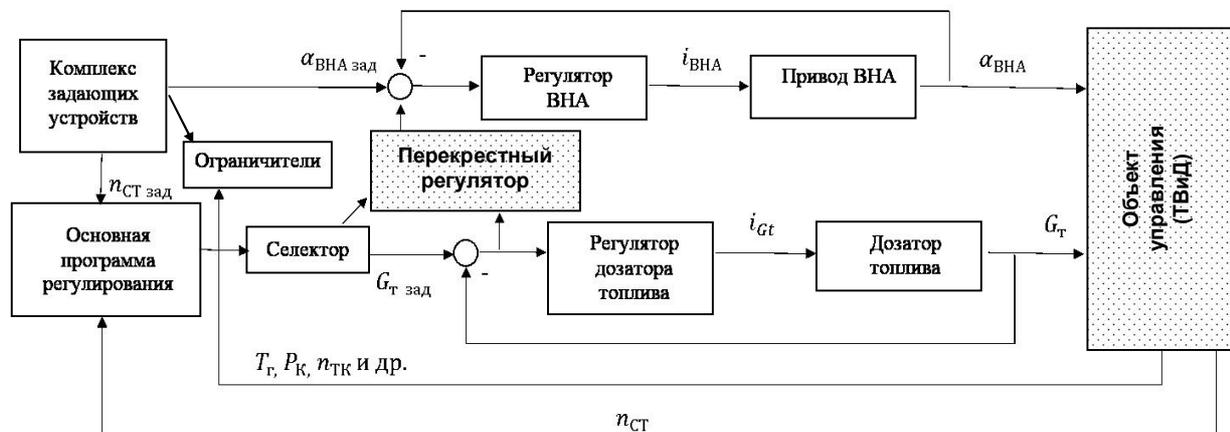


Рис. 1. Структура перспективной САУ ТВаД

Как видно из рисунка, основная программа управления данной САУ направлена на поддержание постоянной частоты вращения свободной турбины.

Отклонение РНА приводит к изменению характеристик турбокомпрессора. Так, например, если на этапе приемистости будет использоваться закон управления ограничивающий $\frac{dn_{TK}}{dt}$, то открытие РНА быстрее исходной программы регулирования приводит к падению коэффициента запаса устойчивости компрессора и увеличению расхода газа через газогенератор. Для оценки возможного положительного эффекта от применения многомерного регулятора на этапе приемистости было решено вместо ограничения $\frac{dn_{TK}}{dt}$ применять ограничение по коэффициенту запаса устойчивости компрессора (ΔK_y). В связи с использованием программы ограничения ΔK_y , возникло еще одно направление данной работы, связанное с задачами определения неизмеряемых параметров двигателя.

Управление с использованием неизмеряемых параметров

Уменьшение времени приемистости ограничивается требованиями к обеспечению устойчивости работы и предупреждению недопустимых механических и тепловых нагрузок [3]. Обычно для выполнения данных требований в системах автоматического управления силовой установки применяются ограничители параметров, которые косвенно характеризуют устойчивость работы узлов или уровень механических и тепловых нагрузок. Ограничением скорости изменения частоты вращения обеспечиваются устойчивость работы компрессора и камеры сгорания, ограничением температуры газов за камерой сгорания обеспечивают приемлемый уровень тепловых нагрузок, а ограничением частоты вращения – приемлемый уровень механических нагрузок. Например, для двигателя, рассматриваемого в данной работе, САУ должна обеспечивать ограничение ускорения ротора по закону $\left(\frac{dn_{TK}}{dt}\right)/p_{вх} = n_{TK}$ и ограничивать температуру газа за турбиной. В структуре САУ данного двигателя были также использованы ограничения минимального и максимального расхода топлива с целью предотвращения неустойчивой работы камеры сгорания.

В данной работе исследовалась возможность уменьшения времени приемистости и сброса путём

перехода от управления по ограничителям ($\frac{dn_{TK}}{dt}$ и $G_{T\text{ сбр}}$) к управлению величинами, более точно характеризующими устойчивость рабочего процесса узлов: коэффициентом запаса устойчивости компрессора и коэффициентом избытка воздуха в камере сгорания. Однако эти для определения этих величин с необходимой точностью не могут быть использованы аналитические функции от измеряемого параметра.

Поэтому было предложено определять коэффициенты запаса устойчивости и избытка воздуха в камере сгорания при помощи моделей узлов двигателя (компрессора и камеры сгорания) на основании измеряемых параметров. Модель компрессора на основании измеряемых параметров (давления на входе и выходе из компрессора, температуры воздуха на входе в двигатель, частоты вращения и углового положения РНА) определяет коэффициент запаса устойчивости и расход воздуха.

При этом модель камеры сгорания приобретает очень простой вид формулы для определения коэффициента избытка воздуха по значениям расхода газа через газогенератор и расхода топлива.

Программы управления данными параметрами были заданы следующим образом: предельное значение минимального коэффициента запаса устойчивости компрессора было задано в виде фиксированного значения, а предельное значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания – функция от расхода воздуха через газогенератор.

Алгоритм модели компрессора, используемый в структуре регулятора, должен занимать минимальный объём памяти, а расчет должен иметь минимальную вычислительную трудоемкость. Для формирования такого алгоритма был проведен анализ существующих моделей компрессоров, используемых в составе математических моделей двигателей, в результате которого выяснилось, что они непригодны для применения в САУ. Это в первую очередь вызвано тем, что положение рабочей точки на характеристике определяется в итерационном процессе. Поэтому предложен новый алгоритм поиска положения рабочей точки на характеристике компрессора, адаптированный для применения в алгоритмах управления.

Модель компрессора, используемая в данной работе, является моделью – демонстратором. Для практического применения данной модели необходимо обеспечить автоматическую адаптацию характеристики компрессора к особенностям конкретного экземпляра двигателя и к изменению характеристики в процессе эксплуатации.

Применение многомерных регуляторов

Для базовой САУ ТВАД (использующей управление приёмистостью по производной) введение перекрёстных связей между контуром управления расходом топлива и контуром управления положением РНА недопустимо. Это вызвано тем, что ограничители по производными, используемые в данном регуляторе, настроены на определённую программу поворота РНА по режимам. В случае изменения программы управления

РНА ограничители по производным перестанут адекватно оценивать состояние объекта управления, т.к. изменятся свойства объекта управления на текущем режиме.

Если в структуру САУ включена модель компрессора, учитывающая угол поворота РНА, появляется еще одна возможность для улучшения качества САУ, не оказывая при этом влияние на качество работы ограничителей – стало возможно отклонять РНА от исходной программы регулирования.

Для исследования возможности применения многомерного регулятора и усиления взаимодействия между контурами в структуру САУ была введена перекрестная связь между контуром управления расходом топлива и контуром управления РНА.

Все вышеперечисленные алгоритмы САУ (алгоритмы модели компрессора и регуляторов) были реализованы программно на языке программирования С.

Настройка регуляторов

После выбора структуры САУ проводился параметрический синтез (настройка) регуляторов, который состоял из двух этапов.

На первом этапе с использованием линейной динамической модели двигателя в частотной области определены параметры основного контура (контура управления расходом топлива), а также параметры внутренних контуров (контура стабилизации положения РНА и дозирующей иглы насоса-дозатора).

На втором этапе проводилась доводка регулятора при взаимодействии с поузловой динамической моделью двигателя.

Программное обеспечение для анализа взаимодействия регулятора с нелинейной поузловой динамической моделью двигателя

Во время синтеза САУ возник ряд технических проблем. Например, для быстросчётной модели

компрессора, используемой в структуре регулятора, необходимо подготавливать исходные данные определённого формата и качества. Необходимо было организовать взаимодействие алгоритмов регулятора (язык программирования С) с алгоритмами поузловой динамической модели двигателя (язык программирования Fortran), обеспечить задание граничных условий, а также анализ результатов моделирования. С этой целью было разработано специальное программное обеспечение, имеющее оконный интерфейс (рис. 2).

Данное программное обеспечение имеет ряд функций для анализа взаимодействия регулятора с объектом управления. Также в нем имеются средства подготовки исходных данных для модели компрессора.

В случае низкого качества исходных данных данное программное обеспечение позволяет выполнять аппроксимацию характеристики компрессора по методике ЦИАМ, согласно которой напорные ветви характеристики аппроксимируются участками двух эллипсов. После считывания характеристик они приводятся в формат, пригодный для использования в структуре регулятора. Затем можно выбрать директорию, в которую будет сохранен фрагмент исходного кода программы быстросчётной модели компрессора, адаптированный к использованию в алгоритмах регулятора.

Результаты моделирования

Сравнение результатов моделирования динамики САУ с исходным регулятором и САУ, использующей предложенные ограничители, показало существенное преимущество системы, использующей модель компрессора в структуре регулятора. Данное преимущество обеспечено тем, что траектория движения рабочей точки на характеристике компрессора для системы с ограничителем по ΔK_y проходит равноудаленно от границы помпажа, в отличие от системы с ограничителем по $\frac{dn_{TK}}{dt}$ (во всех условиях эксплуатации). Минимальное значение ΔK_y , полученное для данных систем на этапе приёмистости, одинаково.

Исследование возможности применения многомерного регулятора проводилось как на режимах приёмистости, так и при сбросе.

Наилучшие результаты получены для регулятора, использующего перекрёстные связи, при сбросе. Он обеспечивал отклонение РНА от базовой программы регулирования в сторону уменьшения расхода газа (прикрытие РНА быстрее базовой программы).

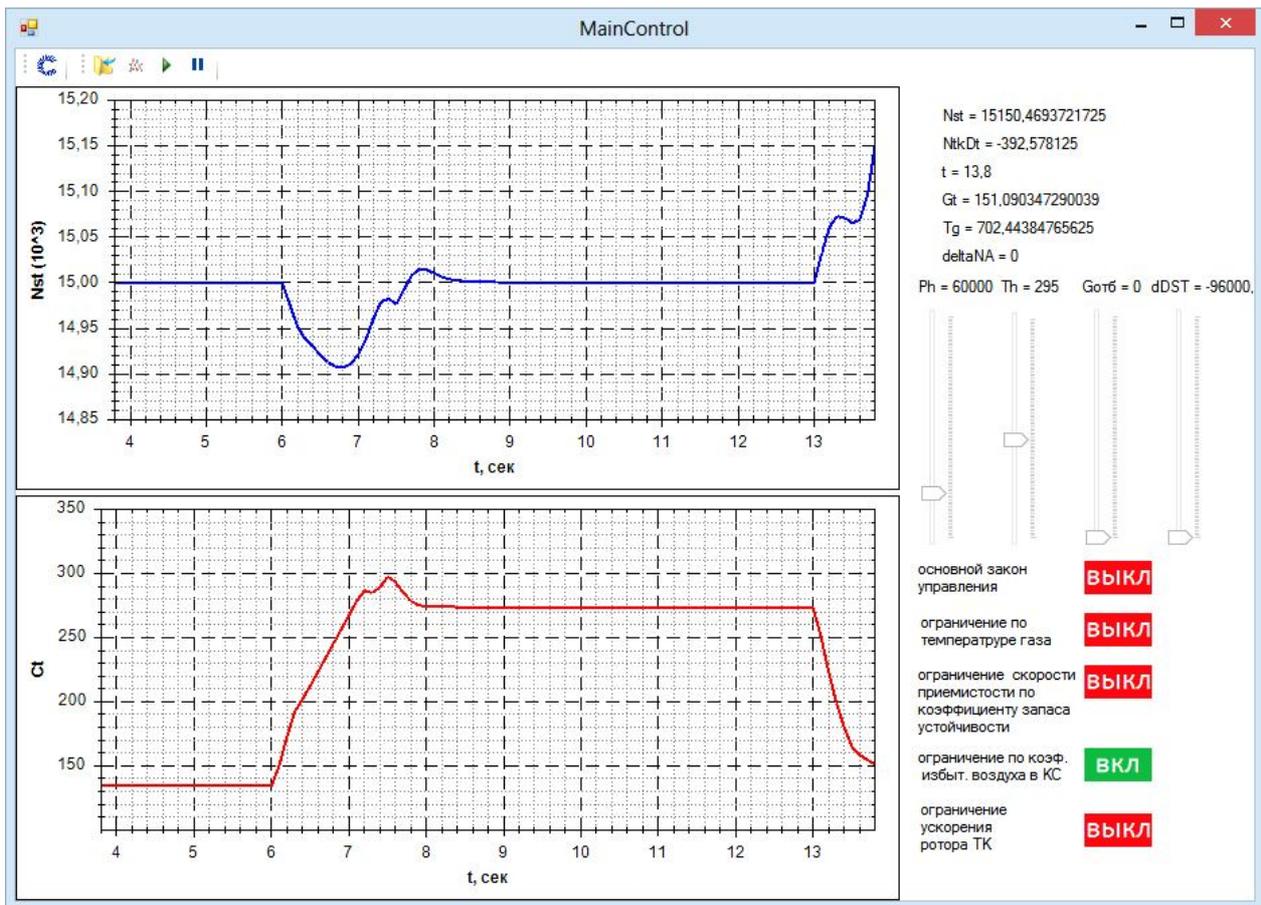


Рис. 2. Главное окно программы в режиме расчета «по заданной программе нагружения»

Улучшение динамики происходит потому, что при закрытии РНА быстрее исходной программы регулирования более интенсивно падает расход газа через газогенератор, уменьшая тем самым работу свободной турбины. Снижение расхода газа снижает также минимально необходимый расход топлива, ограничиваемый максимальным коэффициентом избытка воздуха в камере сгорания, что также положительно сказывается на скорости сброса.

Исследования взаимодействия различных вариантов многомерных регуляторов с поузловой динамической моделью двигателя не дали существенного улучшения качества приемистости.

Заключение

В данной работе исследована возможность управления авиационным ГТД при помощи многомерных регуляторов с использованием ограничителей неизмеряемых параметров. Выполнен анализ процесса взаимодействия предложенных регуляторов с моделью объекта управления. Результаты мо-

делирования продемонстрировали уменьшение времени приемистости при применении ограничителей по неизмеряемым параметрам и уменьшение времени сброса при использовании многомерных регуляторов.

Литература

1. Гуревич, О.С. *Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета [Текст] / О.С. Гуревич, Ф.Д. Гольберг, О.Д. Селиванов.* – М.: Машиностроение, 1994. – 304 с.
2. Гольберг, Ф.Д. *Методы управления газотурбинными двигателями с использованием бортовой математически модели двигателя [Текст] / Ф.Д. Гольберг, О.С. Гуревич, А.А. Петухов; под ред. О.С. Гуревича // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями.* – Тр. ЦИАМ №1346. – М.: Торус пресс, 2010. – С. 90–96.
3. Кусимов, С.Т. *Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД [Текст] / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев.* – М.: Машиностроение, 1999. – 612 с.

Поступила в редакцию 12.04.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом Б.И. Кузнецов, Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков.

СИНТЕЗ І АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНОЇ САУ ГТД

С.В. Єпіфанов, Є.О. Кононихін

Запропоновано керування авіаційним ГТД із використанням обмежувачів прийнятності (скидання), які більш точно характеризують близькість двигуна до границь стійких режимів роботи вузлів. Розглянуто конфігурації САК із застосуванням багатовимірних регуляторів. Оцінка якості роботи регуляторів проводилася при взаємодії з нелінійною повузловою динамічною моделлю двигуна. Для оцінки результатів взаємодії об'єкта управління і регулятора нами було створено спеціальне програмне забезпечення, що має розвинений віконний інтерфейс та інструменти для завдання умов розрахунку і візуалізації результатів. Досліджено ефективність спільного керування витратою палива та кутовим положенням направляючих апаратів компресора на режимах сприйнятності та скидання режиму.

Ключові слова: багатовимірний регулятор, нелінійна повузлова динамічна модель двигуна.

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF AN ADVANCED GAS TURBINE ENGINE CONTROL

S.V. Yepifanov, E.O. Kononykhin

This paper deals with advanced pickup limiters which more accurately characterize the proximity to stability limit. Configurations of ACS using multi-dimensional controllers are analysed. Assessment of the quality of the regulators was made using nonlinear dynamic model of the engine. Special software was created to evaluate the interaction of the control object with the regulator, which has window interface and tools for setting conditions and viewing calculation results.

Key words: multi-dimensional controller, nonlinear engine model.

Єпіфанов Сергей Валериевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Кононыхин Евгений Александрович – магистр кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kjek@ya.ru.