

УДК 629.735

**Е. А. КОНОНЫХИН***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ТВаД НА ЭТАПЕ ПРИЕМИСТОСТИ

*Исследована эффективность совместного управления расходом топлива и угловым положением направляющих аппаратов компрессора газогенератора на режимах приемистости ТВаД. Проведена оптимизация законов управления РНА с использованием различных алгоритмов, в том числе генетических. Оценка качества работы регуляторов производилась при их взаимодействии с нелинейной поузловой динамической моделью двигателя, содержащей модель исполнительных устройств. Для оценки результатов моделирования и оптимизации создано специальное программное обеспечение, имеющее оконный интерфейс и инструменты для задания условий и визуализации результатов расчетов.*

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, нелинейная поузловая динамическая модель двигателя.

### Введение

Улучшение характеристик силовых установок (СУ) с ГТД можно достигнуть путем перехода к интегрированному управлению СУ. Например, в работе [1] было предложено улучшить качество управления двигателем на этапе приемистости за счет использования 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 регулирования параметров (например, запаса устойчивости компрессора  $\Delta K_y$  и температуры газа перед турбиной  $T_g$ , в которых регулируемые параметры рассчитываются с использованием модели).

В данной работе исследовалась задача оптимизации процесса приемистости двигателя при многофакторном управлении двигателем путем подбора оптимальной программы подачи топлива и поворота РНА.

В качестве объекта управления был выбран турбовальный двигатель со свободной турбиной и однокаскадным газогенератором. Программы подачи топлива и поворота РНА подбирались для приемистости двигателя. Поскольку в отличие от сброса двигателя (для которого оптимальным являетсякрытие РНА быстрее базового закона регулирования [3]) для этапа приемистости оптимальная программа управления РНА имеет неявный характер. В

рамках данной работы моделировался этап приемистости, вызванный резким увеличением мощности, отбираемой от свободной турбины. Задачей оптимизации было уменьшение провала частоты вращения свободной турбины (вызванной изменением отбираемой мощности) при минимальном провале коэффициента запаса устойчивости (вызванного приемистостью двигателя).

### Программное обеспечение для анализа взаимодействия различных регуляторов с нелинейной поузловой динамической моделью двигателя

Во время синтеза САУ возник ряд технических задач. Например, было необходимо обеспечить задание граничных условий расчета и реализовать алгоритмы оптимизации законов регулирования. Также было необходимо организовать взаимодействие алгоритмов регулятора (создаваемых на языке программирования С) с алгоритмами поузловой динамической модели двигателя и исполнительных устройств (язык программирования Fortran) и алгоритмами поиска оптимальных законов регулирования (язык программирования С#). С этой целью было разработано специальное программное обеспечение, имеющее оконный интерфейс (рис. 1).

Данное программное обеспечение имеет ряд функций для анализа взаимодействия регулятора с объектом управления. Также в нем были реализованы средства для проведения оптимизации методом градиентного спуска, перебора и генетические алгоритмы оптимизации.

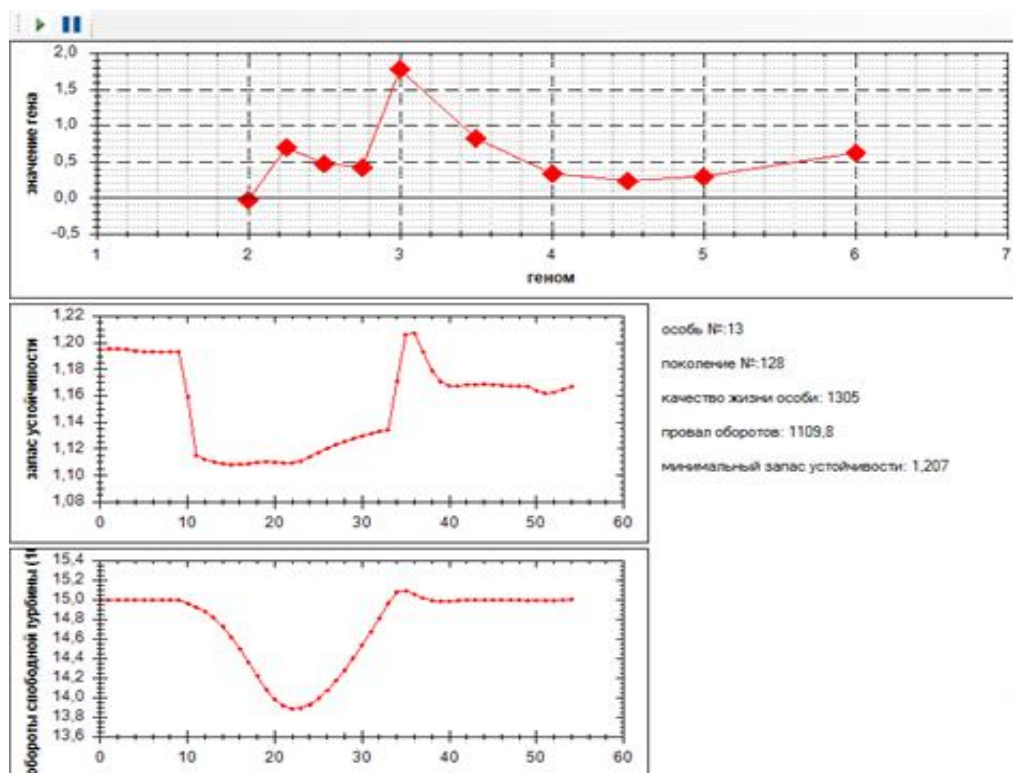


Рис. 1. Центральное окно программы во время работы генетического алгоритма

### Типы расчетов

Для сравнения в данной работе представлены результаты моделирования четырех систем. Каждая из систем направлена на поддержание основного закона регулирования  $n_{CT} = \text{const}$ . Для моделирования использовалась поузловая динамическая модель двигателя, взаимодействующая с моделью исполнительных устройств и электронной САУ. Рассматривалась приёмистость двигателя, вызванная провалом частоты вращения свободной турбины в результате приложения нагрузки.

Система 1. Исходная САУ составленная согласно техническому заданию на данный двигатель. В алгоритмах данной системы управления использовался ПИ регулятор для поддержания основного закона  $n_{CT} = \text{const}$  и стандартные ограничители приемистости: по производной угловой частоты вращения турбокомпрессора и температуре газа за турбиной. Переключение закона регулирования осуществлялось по минимальной пропорциональной компоненте. Угол поворота РНА был задан как функция от приведенной частоты вращения.

Система 2. Ограничитель по производной в контуре управления расходом топлива был заменен на ограничение по коэффициенту запаса устойчивости компрессора, для чего в структуру программы управления была включена быстросчётная модель узлов двигателя [4] (ограничитель по температуре

газа оставлен без изменения). Угол поворота РНА был задан как функция от приведенной частоты вращения.

Как будет показано далее данный контур САУ позволяет достаточно точно поддерживать запас устойчивости компрессора в заданных пределах. Данная система взята за эталонную при сравнении двух следующих систем, так как в этих системах основной ограничитель приемистости - по коэффициенту запаса устойчивости компрессора.

Система 3. В данной системе, также как и в системе 2, основной ограничитель приемистости в контуре управления расходом топлива - по коэффициенту запаса устойчивости компрессора (ограничитель по температуре газа оставлен без изменения). Минимальный коэффициент запаса устойчивости был задан в виде фиксированного значения. Для данной системы решалась задача оптимизации по подбору оптимального отклонения РНА на *фиксированный угол* на этапе приемистости от базовой программы регулирования. Критерием оптимизации являлся минимальный провал угловой частоты вращения свободной турбины, подбор осуществлялся методом перебора.

Система 4. Для данной системы решалась задача определения оптимального закона управления РНА и подачи топлива в произвольной форме. Закон задавался во временной области. Варьируемыми параметрами системы были функции управления

РНА и расхода топлива, заданные во временной области. Для задания каждой из функций использовались по 10 точек, с различным шагом по времени.

Для оценки качества переходного процесса использовалась целевая функция:

$$a \cdot \Delta K_{y \text{ изм}} + b \cdot \Delta n_{CT \text{ max}}$$

где  $\Delta K_{y \text{ изм}}$  - минимальное значение запаса устойчивости, получаемое в переходном процессе,  $\Delta n_{CT \text{ max}}$  - величина провала оборотов свободной турбины. В случае выхода температуры газа за допустимые пределы, целевой функции присваивалось большое отрицательное значение. Величина забросов целевой функцией не учитывались, так как они имели относительно небольшие значения.

Для оптимизации использовался генетический алгоритм поиска (реализованный на языке програм-

мирования C#). В процессе оптимизации было задействовано 1000 поколений, каждое из которых содержало 300 экземпляров временных функций управления РНА и расходом топлива. После расчета для всех экземпляров текущего поколения переходных процессов в двигателе (расчёт проводился для временного участка длиной 7с) производился синтез генов следующего поколения с коэффициентом скрещивания 80% и коэффициентом мутации 5 % (рис. 2).

### Результаты моделирования

В результате моделирования для вышеперечисленных систем были получены переходные процессы. На рисунках 3 и 4 изображены графики переходных процессов для частоты вращения свободной турбины и коэффициента запаса устойчивости.

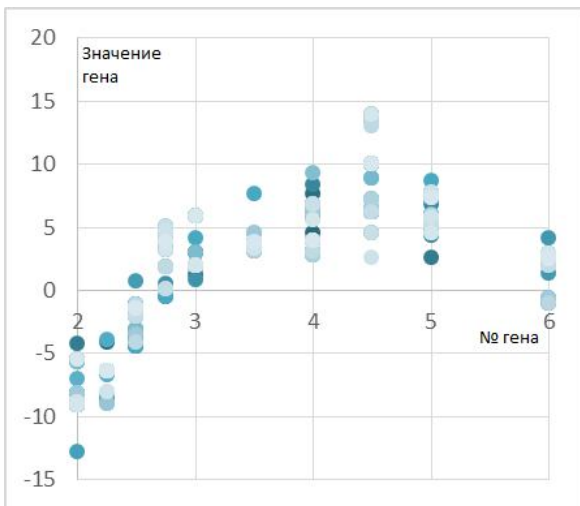


Рис. 2. Временные функции управления РНА для разных экземпляров, полученные в результате расчета генетическим алгоритмом

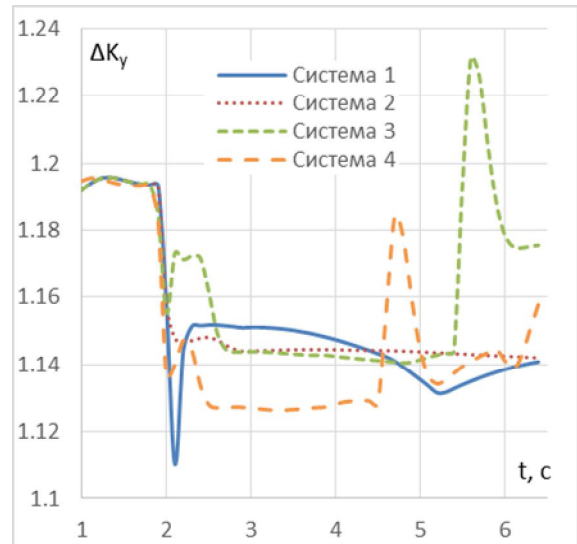


Рис. 4. Значение коэффициента запаса устойчивости

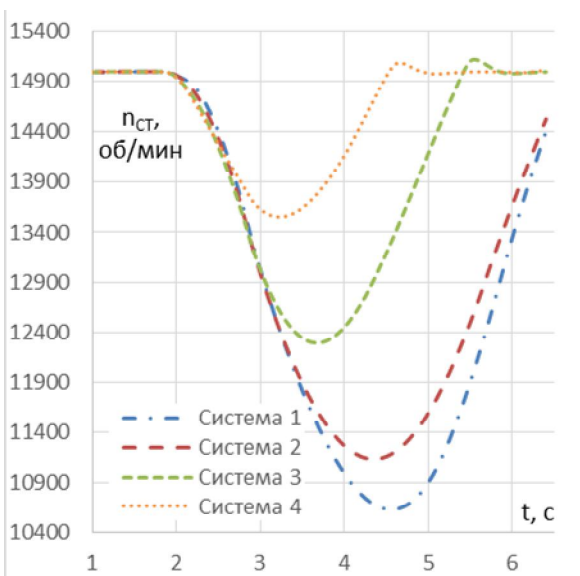


Рис. 3. Значение угловой частоты вращения свободной турбины

Сравнение результатов моделирования показало, что применение ограничителей по неизмеримым параметрам (коэффициенту запаса устойчивости) улучшает качество управления на этапе приемистости. Данное улучшение обеспечено тем, что траектория движения рабочей точки на характеристике компрессора для системы с ограничителем по  $\Delta K_y$  проходит равноудаленно от границы помпажа во всех условиях эксплуатации, в отличие от системы с ограничителем по  $dn_{TK}/dt$ .

Положительный эффект оказало запаздывание в открытии РНА на фиксированный угол по отношению к базовой программе регулирования (рис. 3-5). Наиболее эффективной оказалась программа управления РНА прикрывающая РНА в начале процесса приёмистости, а затем открывающая РНА в зоне высоких частот вращения турбокомпрессора (рис. 3-5).

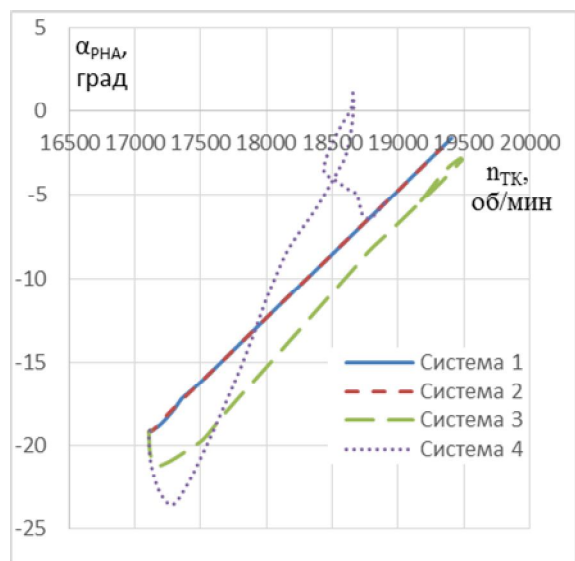


Рис. 5. Зависимость углового положения РНА от приведенной частоты вращения турбокомпрессора

### Заключение

В данной работе исследована возможность использования в управлении авиационным ГТД различных законов управления РНА. Выполнен анализ

процесса взаимодействия программ управления с моделью объекта управления. Результаты моделирования показали уменьшение времени приёмности. Наиболее эффективной оказалась программа управления РНА прикрывающая РНА в начале процесса приёмности, а затем открывающая РНА в зоне высоких частот вращения турбокомпрессора.

### 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 по неизмеряемым параметрам с использованием бортовой математической модели двигателя [Текст]* / Ф. Д. Гольберг, О. С. Гуревич, А. А. Петухов // *Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями. Тр. ЦИАМ №1346* ; под ред. О. С. Гуревича. – М. : Торус пресс, 2010. – С. 90–96.
3. Епифанов, С. В. *Синтез и анализ перспективной САУ ГТД [Текст]* / С. В. Епифанов, Е. А. Кононыхин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 10 (107). – С. 82 – 86.
4. Дружинин, Л. Н. *Аппроксимация характеристик компрессоров аналитическими функциями двух переменных [Текст]* / Л. Н. Дружинин, Л. И. Швец. – М. : ЦИАМ, 1977. – 240 с.

Поступила в редакцию 3.04.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

**Рецензент:** канд. техн. наук, первый заместитель Главного конструктора-директора Е. В. Павлюк, ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", Харьков, Украина.

### ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ ТВАД НА ЕТАПІ ПРИЄМНОСТІ

*Є. О. Кононихін*

Досліджено ефективність спільного керування витратою палива і кутовим положенням напрямних апаратів компресора газогенератора на режимах приемности ТВАД. Проведено оптимізацію законів керування РНА з використанням різних алгоритмів, в тому числі генетичних. Оцінка якості роботи регуляторів проводилася при їх взаємодії з нелінійною повузловою динамічною моделлю двигуна, що містить модель виконавчих пристроїв. Для оцінки результатів моделювання та оптимізації створено спеціальне програмне забезпечення, що має віконний інтерфейс та інструменти для завдання умов і візуалізації результатів розрахунків.

**Ключові слова:** генетичний алгоритм, нелінійна повузлова динамічна модель двигуна.

### OPTIMIZATION OF TURBOSHAFT CONTROL ALGORITHMS FOR ACCELERATIONS

*I. O. Kononykhin*

The paper addresses the problem of joint control of fuel flow and angular position of guide vanes of TShE compressor during accelerations. Control laws of movable GV were optimized using different technics, including genetic algorithms. The control efficiency was estimated basing the simulation. To simulate engine response, authors used nonlinear dynamic model of the engine that also comprises models of actuators. To assess the simulation results and perform the optimization authors used the selfmade software.

**Key words:** genetic algorithm, nonlinear dynamic engine model.

**Кононыхин Евгений Александрович** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей и энергоустановок факультета авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kjek@ya.ru.