

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТВВД И ПОСТРОЕНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКВИВАЛЕНТНОГО УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА НА СТЕНДЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Погорелов Г.И., Кривошеев И.А., Годованюк А.Г., Данилин О.Е., Бадамшин Б.И.

ФГУП УНПП «Молния», г.Уфа

Уфимский государственный авиационный технический университет

*There was shown method of linear interpolation propfan's multidimensional characteristic using for modeling turbopropfan jet in a total range of flight conditions and approach to equivalent specific fuel consumption optimization subsystem construction in automatic control system structure for reduction of environmental tests and maintenance costs. The offered methods considers requirements to mathematical models for the seminatural modelling stand - simplicity, ensuring of sufficient accuracy of result and work, functioning engine's mathematical model in a mode of real time.*

Проблема топливной эффективности и вытекающие отсюда проблемы экономичности и экологичности являются актуальными для современных летательных аппаратов. Предлагается метод оптимизации эквивалентного удельного расхода топлива турбовинтовентиляторного двигателя (ТВВД).

Математическая модель (ММ) ТВВД используется на стенде полунатурного моделирования (СПМ), позволяющем проводить полную проверку всех функциональных характеристик разрабатываемых систем управления авиационных двигателей с замкнутыми каналами. Полунатурные исследования при высокой информативности намного экономичнее, чем испытания реального объекта, поэтому они составляют основную часть отработки двигателя, САУ и других его систем посредством имитации их поведения во всех возможных режимах эксплуатации.

Реализованная математическая модель ТВВД – кусочно-линейная динамическая. В базовой математической модели моделирование возможных режимов работы двигателя для всех условий полета производится по уравнениям вида:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{X}} &= f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U}), \\ \bar{Y} &= \varphi(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U});\end{aligned}$$

где  $\bar{X} = [n_1, \dots, n_i]$  – вектор переменных состояния;  $\bar{V} = [M, H, N_{п.у.}, N_{отб} \dots]$  – вектор управляющих и внешних воздействий;

$\bar{U} = [G_{топл.}, \alpha_{н.а.}, G_{отб}, F_{р.с.}, \dots]$  – вектор управления;  $f, \varphi$  – нелинейные операторы;  $\bar{Y}$  – вектор отклонений параметров объекта, не связанных с динамическими факторами.

Модели гидромеханической части (ГМЧ) автоматики двигателя – линейные с учетом существенных нелинейностей в виде нелинейных звеньев.

При моделировании работы ТВВД на СПМ также учитывается многомерная аэродинамическая характеристика (АДХ) винтовентилятора (ВВ). ММ ВВ используется для определения тяговых характеристик ВВ при различных углах установки лопастей, скоростях и высотах полета, мощности свободной турбины, а также на различных режимах работы (режимы прямой тяги, режим реверс).

Модель сервопривода лопастей ВВ также носит нелинейный характер; моделирование процессов флюгерования (перевод лопастей в положение минимального сопротивления полету), «расфлюгерования» (вывод из флюгерного положения) и «затяжеления» (увеличения угла установки лопасти системой управления ВВ) ВВ сведены к изменению углов установки лопастей с постоянной скоростью по наличию дискретных команд.

Реализованные ММ двигателя, ГМЧ, сервопривода лопастей ВВ и ВВ, с использованием предложенного метода интерпо-

ляции характеристики соосного ВВ, устойчиво работают в режиме реального времени. После реализации многомерной характеристики ВВ по предложенной методике ММ ВВ стабильно работает при любых возмущениях (изменение  $M$  и высоты полета, подачи топлива) при шаге  $1...10$  мс; частоты вращения ВВ выходят на статические режимы должным образом по завершению любых неустановившихся режимов.

Снижение расхода топлива достигается за счет оптимизации программы регулирования частот вращения винтов ВВ и за счет изменения углов установки направляющего аппарата (НА) компрессора низкого (КНД) и высокого давления (КВД). Используется двухэтапный метод оптимизации с применением интеллектуальных методов управления.

На первом этапе алгоритм оптимизации работает с математической моделью ТВВД. В качестве алгоритма оптимизации на первом этапе используется метод генетических алгоритмов (ГА). На втором этапе оптимизации используется нейронная сеть (НС). В результате работы первого этапа оптимизации формируется обучающая выборка, содержащая значения частот вращения винтов винтовентилятора и углов установки НА для различных условий полета – число  $M$  полета, высота полета, заданная тяга, при которых достигается минимальный эквивалентный удельный расход топлива  $C_3$ . По этим данным производится обучение нейросетевой модели подсистемы оптимизации.

Целевая функция задачи оптимизации удельного расхода топлива ТВВД задана в следующем виде:

$$C_3 = f(n_{ПВ}, n_{ЗВ}, \alpha_{НД}, \alpha_{ВД})$$

при  $P = \text{const}, \Delta K_y < 20\%$ ,

где  $n_{ПВ}$  – частота вращения переднего винта,  $n_{ЗВ}$  – частота вращения заднего винта,  $\alpha_{НД}$  – угол установки ВНА КНД,  $\alpha_{ВД}$  – угол установки ВНА КВД,  $P$  – тяга двигателя,  $\Delta K_y$  – коэффициент запаса устойчивости компрессора. Значение  $\Delta K_y$  должно быть меньше 20%, так как это предельная величина запаса устойчивости компрессора для двигателей транспортной авиации.

В процессе анализа работы имитационной модели совместно с подсистемой оптимизации, реализующей метод ГА, получен характер изменения эквивалентного удельного расхода топлива ТВВД  $C_3$  при различных значениях частот  $n_{ПВ}$  и  $n_{ЗВ}$  для крейсерского режима полета ( $H=11$  км,  $M_{П}=0,7$ ). Зависимость показала, что с изменением углов установки лопастей винтов ВВ, а, следовательно, изменение частот вращения как переднего, так и заднего винтов приводит к снижению как абсолютного, так и эквивалентного удельного расхода топлива ТВВД. При анализе характера изменения эквивалентного удельного расхода топлива  $C_3$  в зависимости от изменения частот вращения винтов видно, что наименьший расход топлива при постоянной тяге получается при увеличении частоты вращения переднего и заднего винтов ВВ относительно штатных настроек.

Минимальный эквивалентный удельный расход топлива составил  $0,2096$  кг/(кВт·ч), что на 5,5 % ниже номинального расхода топлива при штатных настройках частот вращения винтов ВВ.

При исследовании влияния углов направляющих аппаратов рассматривается крейсерский режим высота полета  $H=11$  км,  $M_{П}=0,7$ , мощность свободной турбины  $N_{ст} = \text{const}$ . В этом случае минимальный допустимый эквивалентный удельный расход топлива составляет  $C_3 = 0,218$  кг/(кВт·ч). Относительная экономия эквивалентного удельного расхода топлива по сравнению со штатным режимом ( $C_3 = 0,231$  кг/(кВт·ч),  $\alpha_{НД} = 0^\circ$ ) составляет 5,4 %.

Таким образом, по результатам моделирования было установлено, что используя предложенную методику интерполяции многомерных АДХ ВВ и предложенный метод оптимизации, за счет частот вращения винтов ВВ достигается снижение удельного расхода топлива на 5,5%, а за счет ВНА КНД достигается снижение удельного расхода топлива на 5,4% по сравнению со штатными установками для крейсерского режима полета.