

ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СООСНОГО ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА НА РЕЖИМАХ РЕВЕРСА ТЯГИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ

Г.Г. Куликов, д-р техн. наук, В.Ю. Арьков, д-р техн. наук, О.Д. Лянцев, канд. техн. наук,

В.С. Фатилов, канд. техн. наук,

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа,

В.И. Хилько, канд. техн. наук, НПП «Аэросила», г. Ступино, Россия,

В.П. Ищук, Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова, г. Киев, Украина

Одной из важных эксплуатационных характеристик современных турбовинтовентиляторных двигателей (ТВВД) самолетов транспортной авиации является возможность обеспечения короткого пробега после посадки путем реверсирования тяги винтовентиляторов. На мощных ТВВД применяются, в основном, соосные винтовентиляторы (ВВ) с приводом от свободной турбины через дифференциальный редуктор, так как они имеют больший К.П.Д. и лучшие массо-габаритные характеристики, чем одиночный винт, при отсутствии реактивного и гироскопического моментов. Как известно [1], реверс тяги одиночных и соосных ВВ производится путем перевода лопастей на отрицательные углы до механического упора либо через нулевое, либо через флюгерное положение в зависимости от конструктивного исполнения ВВ, после чего потребная отрицательная тяга обеспечивается увеличением мощности турбины ВВ.

При первом способе обеспечивается существенно меньший диапазон углов установки, что проще конструктивно, но при этом требуется обеспечить безопасное для ВВ и его турбины прохождение лопасти через положение «нулевого» потребления мощности (угол установки лопасти $\varphi = 0$) без превышения заброса частот вращения ВВ и его турбины выше допустимых значений. В этом случае приходится скорость перевода лопастей делать очень большой и в момент перевода уменьшать мощность двигателя.

Во втором способе (при переводе лопастей через флюгерное положение) такого процесса не происходит, но он сложнее в конструктивном выполнении

ВВ, так как требует существенно большего диапазона изменения углов установки лопасти. Возможен также третий способ, когда переводу в реверсное положение подвергается только один из рядов ВВ

Способ реверса ВВ определяется конструкцией ВВ на стадии его проектирования. Будем рассматривать первый способ как наиболее распространенный.

Так как максимальные угол и скорость сервопривода лопастей определяются на стадии его проектирования, как правило, только из конструктивных соображений, то получение требуемых характеристик реверса на выполненном ВВ возлагается на алгоритмические решения системы управления. При этом, как показывает опыт, для получения максимального значения отрицательной тяги при заданных ограничениях на угол и скорость перекадки, система управления соосным ВВ на режимах реверса должна обеспечить выполнение следующих функций:

- прохождение режима «нулевого» потребления мощности с максимальной скоростью;
- поддержание заданных значений частот вращения в пределах допустимых;
- поддержание положения лопастей обоих или одного винта на реверсном упоре (или вблизи его в зависимости от выбора способа управления и управляющих воздействий);
- согласование (выравнивание) частот вращения переднего и заднего ВВ.

В процессах выбора требуемых характеристик сервопривода, синтеза и анализа алгоритмов управления ВВ на режимах реверса необходим инструмента-

рий качественного и количественного анализа траекторий движения рабочих точек ВВ относительно заданных ограничений. Такой формой анализа и представления результатов исследований может служить «динамическая характеристика» винтовентилятора (соосного и одиночного) по аналогии с динамической характеристикой ГТД [5].

Рассмотрим метод построения динамической характеристики на примере моделирования винтовой части ТВВД. Соосный винтовентилятор (рис. 1.) представляет собой материальную систему, имеющую в своем составе дифференциальный редуктор с двумя степенями свободы.

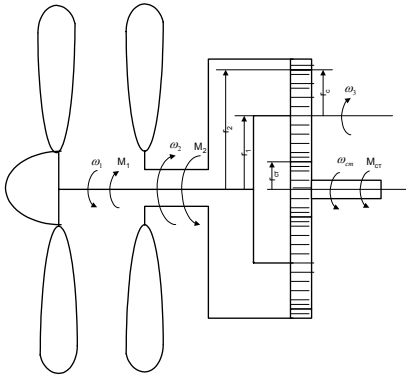


Рис. 1. Схема соосного винтовентилятора

Динамика данной системы может быть описана следующими уравнениями [2]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_{cm} &= \dot{\omega}_1 i_1 + \dot{\omega}_2 i_2; \\ I_1 \dot{\omega}_1 &= (M_{cm} - I_{cm} \dot{\omega}_{cm}) i_1 - M_1; \\ I_2 \dot{\omega}_2 &= (M_{cm} - I_{cm} \dot{\omega}_{cm}) i_2 - M_2;\end{aligned}\quad (1)$$

В результате решения системы (1), считая известными моменты переднего и заднего винтов и свободной турбины M_1, M_2, M_{ct} , получим ускорения частот вращения переднего и заднего ВВ, а также свободной турбины:

$$\begin{aligned}\dot{n}_1 &= K_{10} M_{cm} - K_{11} M_1 + K_{12} M_2; \\ \dot{n}_2 &= K_{20} M_{cm} + K_{21} M_1 - K_{22} M_2; \\ \dot{n}_{cm} &= \dot{n}_1 i_1 + \dot{n}_2 i_2;\end{aligned}\quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}K_{10} &= I_2 i_1 / m; K_{11} = (I_2 + I_{cm} i_2^2) / m; \\ K_{12} &= I_{cm} i_1 i_2 / m; K_{21} = K_{12}; K_{20} = I_1 i_2 / m; K_{22} = (I_1 + I_{cm} i_1^2) / m; \\ m &= 2\pi(I_1 I_2 + I_{cm} I_2 i_1^2 + I_1 I_{cm} i_2^2);\end{aligned}$$

I_{ct} – суммарный момент инерции свободной турбины и колеса СТ;

I_1 – суммарный момент инерции переднего винта с приводом – водилом 1 и сателлитами 3;

I_2 – суммарный момент инерции заднего винта с приводом-колесом 2;

$$i_1 = 1 + \frac{r_2}{r_{cm}}; \text{ - передаточное отношение редуктора}$$

по цепи «свободная турбина – винт передний»;

$$i_2 = \frac{r_2}{r_{cm}} \text{ - передаточное отношение редуктора по}$$

цепи «свободная турбина – винт задний»

$$\omega = 2\pi n; \dot{\omega} = 2\pi \dot{n} \text{ угловые скорости и ускорения.}$$

Для статических режимов ВВ:

$$\begin{aligned}n_{cm} &= n_1 i_1 + n_2 i_2; \\ M_{cm} i_1 - M_1 &= 0; \\ M_{cm} i_2 - M_2 &= 0;\end{aligned}\quad (3)$$

При постоянной мощности свободной турбины

$$N_{cm} = M_{cm} n_{cm} / 716.2 = const;$$

учитывая, что

$$M_1 = \rho \beta_1 (\varphi_1, \frac{V_n}{n_1 D}) n_1^2 D^5 \quad M_2 = \rho \beta_2 (\varphi_2, \frac{V_n}{n_2 D}) n_2^2 D^5$$

уравнения статики можно записать в следующем виде

$$\rho \beta_1 (\varphi_1, \frac{V_n}{n_1 D}) n_1^3 (1 + \frac{n_2 i_2}{n_1 i_1}) D^5 = const; \quad (4)$$

$$\rho \beta_2 (\varphi_2, \frac{V_n}{n_2 D}) n_2^3 (1 + \frac{n_1 i_1}{n_2 i_2}) D^5 = const; \quad (5)$$

Из выражений (4), (5) следует, что, задавая постоянные значения мощности на турбине ВВ и скорости самолета, можно получить семейство линий установившихся режимов переднего и заднего винтовентиляторов во всей области значений углов и частот вращения. Их можно представить графически в координатах: частота вращения (абсцисса) и угол установки лопасти (ордината) (рис. 2). Линии установившихся режимов рассчитываются с фиксированными углами лопастей обоих винтов в пределах значений «разношаговости» $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, располагаемых аэродинамических характеристик винтов.

По аналогии с динамической характеристикой ГТД [4] с использованием уравнений (2), (4), (5) можно построить «динамическую характеристику» соосного ВВ. Она строится отдельно для переднего и заднего ВВ (возможно совмещение) и может быть получена расчетным и экспериментальным путем (при наличии в конструкции ВВ датчиков угла лопасти), так как в ней используются только измеряемые параметры. На ней наносятся кроме сетки линий равных значений суммарной мощности и тяги ВВ, а также сетки кривых равных значений ускорений переднего и заднего ВВ. Последние рассчитываются по уравнениям 2 при задании одинаковых отклонений от установившегося режима при $\varphi_1 = \varphi_2$ для всего требуемого диапазона установившихся режимов по углу установки лопасти, включая режим реверса.

Кроме того, на динамическую характеристику ВВ целесообразно нанести также линию минимальной мощности турбины винтовентилятора в данных условиях (например, при сбросе расхода топлива до минимального значения). Очевидно, что в каждой точке указанной плоскости параметров определяется значение любого из участвующих параметров ВВ. На динамической характеристике соосного ВВ строятся линии ограничений по минимальным и максимальным значениям частот вращения, углов установки, мощности турбины винта (возможно нанесение нескольких промежуточных значений) для условий посадки. В отличие от традиционного представления характеристик реверсных винтов [1] в виде сетки зависимостей коэффициентов мощности и тяги ВВ от относительной поступи, динамическая характеристика ВВ более наглядна, кроме того, она использует непосредственно измеряемые параметры и может быть легко идентифицирована.

«Статическая часть» ДХ позволяет для разных условий посадки по режиму работы двигателя и скорости полета выполнить анализ располагаемых возможностей двигательной установки с использованием реверса тяги ВВ.

На рис. 2 представлена динамическая характеристика одного из соосных ВВ (передний ВВ) при отно-

сительной мощности на свободной турбине $N_{cm}/N_{cm\ max} = const$ с нанесенными линиями равных значений ускорений, отрицательной тяги (на режиме реверса) и ограничения по минимальной мощности турбины винта для скорости перед включением реверса (в точке касания) 150 км/ч..

В зоне малых положительных и отрицательных значений углов установки лопастей $\varphi = (+3^\circ \dots +4^\circ) \dots (-4^\circ \dots -5^\circ)$ переднего ВВ и заднего ВВ могут быть только динамические режимы, здесь ВВ как объект управления статически неустойчив. Наиболее эффективным средством безопасного прохождения этой зоны при включении реверса является увеличение скорости перекладки лопастей до момента входа в область установившихся режимов; ее величина может быть определена по динамической характеристике еще на стадии проектирования сервопривода.

Область установившихся режимов реверса показана на рис. 3 пунктиром. Она ограничивается справа - максимальной частотой вращения ВВ, сверху и слева - нижней границей зоны статической неустойчивости, снизу - максимальным значением отрицательных углов. На рис. 3 приведены траектории движения рабочих точек переднего и заднего винтов при включении реверса с режима, определяемого промежуточными упорами лопастей (т. 1 для переднего и т. 2 для заднего ВВ) с разными скоростями (5 и 10 град/с) перекладки.

Из рис. 3 видно, что при меньшем из значений скорости траектории движения переднего и заднего ВВ не попадают в область статических режимов реверса и не могут быть стабилизированы системой управления, а при скорости 10 град/с режимы реверса траектории входят в указанную область, что обеспечивает возможность как стабилизации, так и согласования частот вращения переднего и заднего ВВ. На участках от точки а для переднего и b для заднего ВВ рабочие точки (без воздействия системы управления) перемещаются по направлениям, указанным на рис.3 стрелками, каждая к своему статическому режиму (т.с для переднего и т. d для заднего ВВ).

При последующем уменьшении скорости самолета (до нулевой) в обратном направлении к т. f для переднего и т. е для заднего ВВ. Таким образом, представление процессов на динамической характеристике ВВ позволяет динамическое рассмотрение процессов системы управления шагом ВВ будет иметь возможность согласования и обеспечения равенства частот вращения ВВ только при условии попадания траекторий движения рабочих точек ВВ в отмеченную пунктиром область на рис. 3.

Кроме того, из рассмотрения взаимного расположения линий установившихся режимов переднего и заднего ВВ на динамической характеристике можно определить диапазон одинаковых частот для обоих винтов. Он определяется величиной взаимного перекрытия статических линий переднего и заднего ВВ, соответствующих данной скорости самолета. При нулевой скорости движения самолета этот диапазон

значителен и составит в нашем случае от т. f до максимально допустимого значения, то есть около 140 об/мин. При скорости 150 км/ч он равен нулю, а при падении скорости в процессе торможения самолета увеличивается.

Таким образом, динамическая характеристика является средством наглядного представления свойств винтовентилятора (одиночного и соосного) как объекта управления и может использоваться при проектировании и доводке систем управления винтовентилятором ВВ на режимах реверса.

Таким образом, в работе предложен способ построения динамической характеристики соосного винтовентилятора на основе обобщения современных методов упрощенного моделирования динамических свойств газотурбинного двигателя как объекта управления.

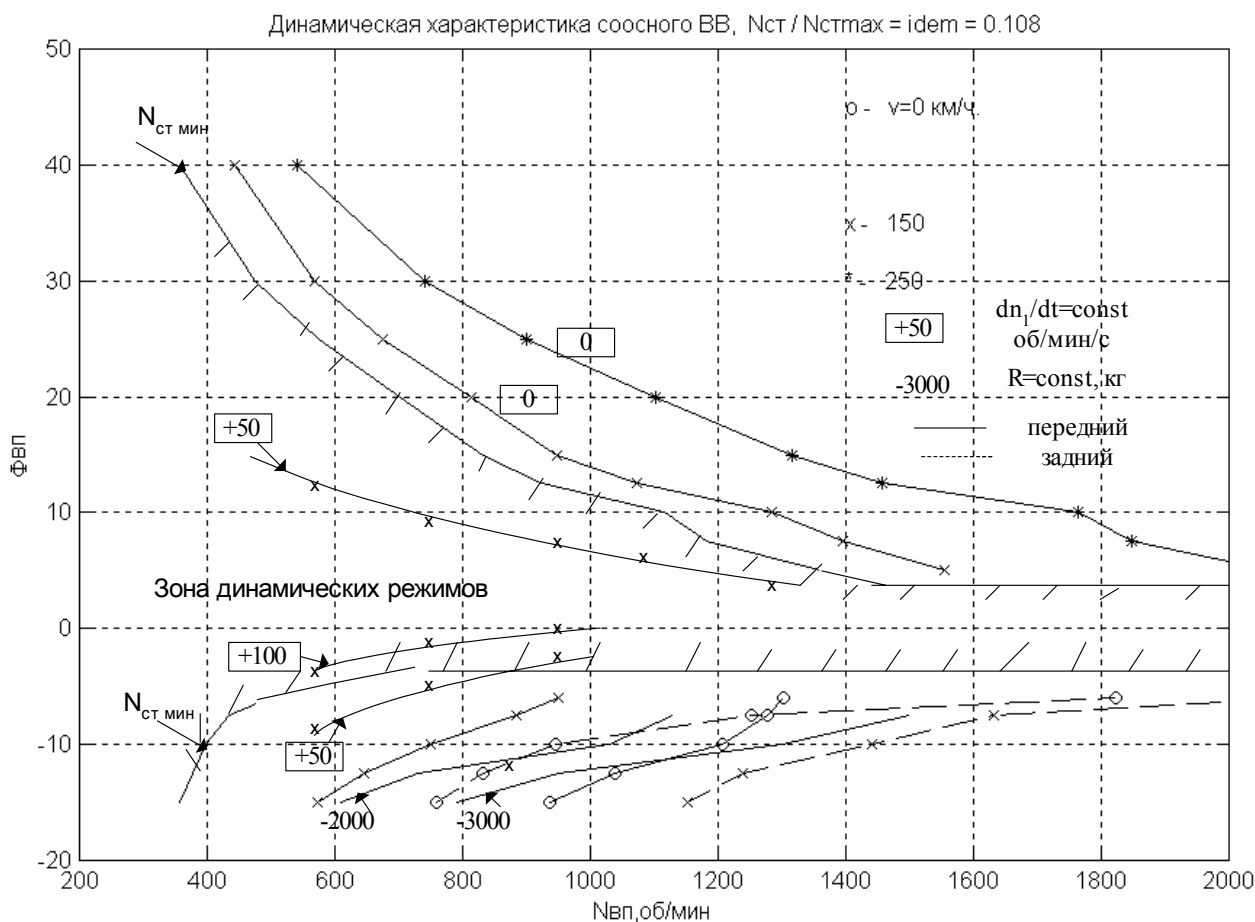


Рис. 2. Динамическая характеристика соосного винтовентилятора на режимах посадки

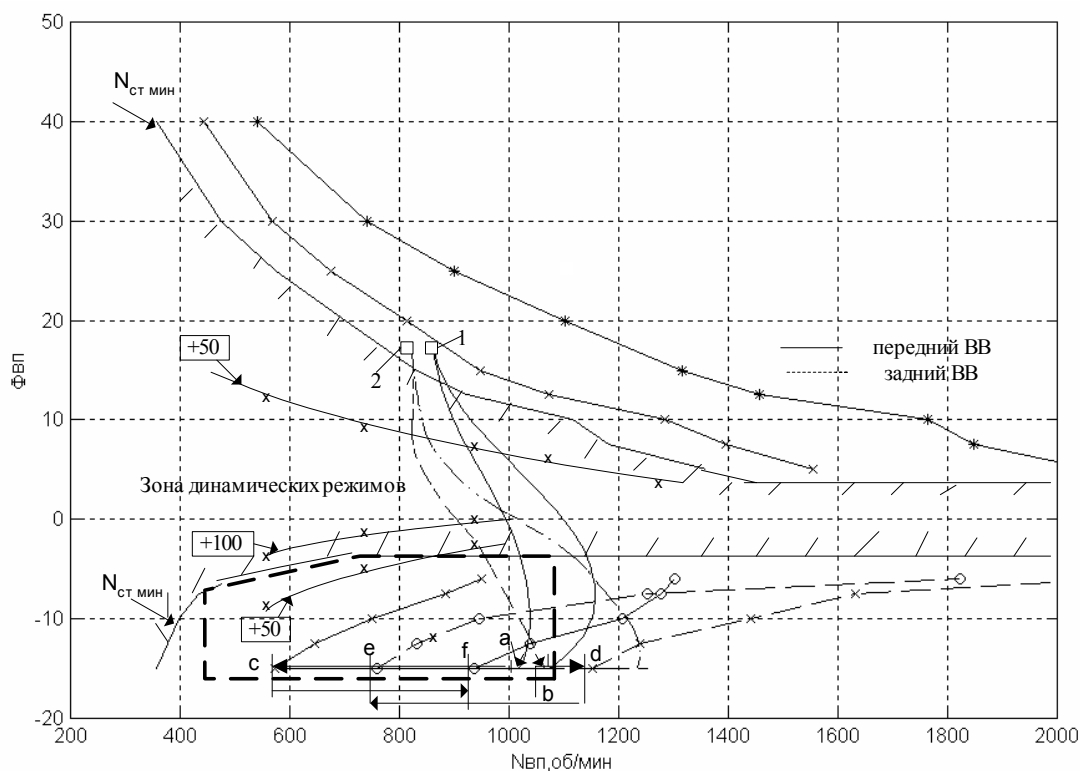


Рис. 3. Траектории движения рабочих точек соосного ВВ на режиме реверса

Предлагаемая динамическая характеристика винтовентилятора охватывает все основные режимы работы силовой установки (прямая и обратная тяга). Модель включает статические и динамические режимы работы объекта, что позволяет исследовать характеристики винта, сервопривода и регулятора, а также анализировать результаты имитационного моделирования.

Такие графические модели позволяют оперативно проводить синтез и анализ систем автоматического управления, а также систем контроля состояния и диагностики отказов.

Работа поддержана грантом Европейской Комиссии INTAS-2000-757.

Литература

1. Казанджан П.К., Кузнецов А.В. Турбовинтовые двигатели (рабочий процесс и характеристики). М.: Воениздат, 1961.- 170 с.
2. Дедеш В.Т. Динамика регулирования числа оборотов ТВД с дифференциальным редуктором и

раздельными регуляторами оборотов без акселерометров.- Жуковский: ЛИИ, 1957.- Вып 76. (Тр. ЛИИ).

3. Куликов Г.Г. Принципы построения цифровых систем управления ГТД. Математические модели, используемые в САПР двигателей и двигательной автоматики. В кн.: Черкасов Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей.- М.: Машиностроение, 1988.- С. 285-307, 323-343.

4. Куликов Г.Г. Динамические модели авиационных газотурбинных двигателей для создания и эксплуатации систем управления // Вестник УГАТУ.- 2000.- № 2.- С. 157-165.

Поступила в редакцию 27.06.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Б.И. Кузнецов, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков; канд. техн. наук, доц. С.И. Суховой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.