

УДК 621.452.3 : 629.8.036

С.В. БЕЗУГЛЫЙ, С.В. ЕПИФАНОВ, Т.В. КУЛИК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ
СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ¹**

Рассмотрен контур управления частотой вращения свободной турбины вертолетного авиационного двигателя, определены рациональные значения пропорционального и интегрального коэффициентов в законе управления. Доказано, что САУ с компенсирующим воздействием по углу установки винта при рациональном выборе параметров имеет переходную характеристику со знакопеременными забросами по частоте вращения турбины, уровни которых ниже, чем в исходном случае; при этом также снижается уровень заброса частоты вращения турбокомпрессора.

вертолетный авиационный двигатель, свободная турбина, контур управления частотой вращения, динамические характеристики переходных процессов, возмущения, угол установки, общий шаг винта

**1. Формулировка проблемы.
Объект работы**

На установившихся режимах работы системы автоматического управления (САУ) вертолетной двигательной установки (ДУ) с турбовальным двигателем основным является контур управления частотой вращения свободной турбины $n_{ст}$. Наиболее интенсивным внешним воздействием на этот контур является изменение углового положения лопастей (общего шага) винта $\varphi_{ош}$. Поэтому динамические свойства САУ определяются тем, что изменение $\varphi_{ош}$ влияет на загрузку винта, его частота вращения изменяется относительно медленно вследствие большого момента инерции; накопленные изменения воспринимаются регулятором $n_{ст}$, который корректирует расход топлива; затем вследствие изменения расхода топлива частота вращения винта восстанавливается, но это происходит также медленно. Очевидно с такой САУ динамические характеристики ДУ могут оказаться неудовлетворительными. Их можно улучшить, если предусмотреть дифференцирующую составляющую в законе регулирования $n_{ст}$. Однако воз-

можности увеличения этой составляющей могут быть ограничены тем, что она усиливает шум канала измерения частоты вращения.

Альтернативное направление улучшения динамических свойств САУ основано на использовании дополнительного разомкнутого контура управления, реагирующего на изменение внешнего воздействия по $\varphi_{ош}$. Разомкнутый регулятор (компенсатор) обеспечивает реагирование на воздействие немедленно после его возникновения, что может существенно улучшить динамические качества САУ.

Таким образом, на качественном уровне преимущества использования $\varphi_{ош}$ в регуляторе расхода топлива представляются очевидными.

Однако такое решение несколько усложняет систему, в частности, увеличивает количество используемых входных параметров, увеличивает объем вычислений, потребных для формирования управляющего воздействия. Поэтому решение о модификации САУ может быть принято только после количественной оценки динамических характеристик исходной и модифицированной систем. Для этого необходимо:

¹ Работа выполнена при поддержке инновационного гранта INTAS (проект № 05-100007-421)

– получить информацию о статистических характеристиках погрешностей каналов измерения n_{cm} и $\varphi_{ои}$;

– дополнить математическую модель двигателя динамической моделью, учитывающей крутильную жесткость вертолетной трансмиссии и присоединенный момент инерции винта;

– выбрать характерные режимы для сравнения вариантов САУ;

– сформировать алгоритм согласования работы регулятора n_{cm} и компенсатора изменения $\varphi_{ои}$;

– выполнить предварительный синтез САУ;

– определить и сравнить динамические свойства альтернативных вариантов САУ;

– выбрать оптимальный вариант.

Объектом данной работы является математическая модель САУ (рис. 1), построенная с учетом вышеназванных особенностей на базе динамической поузловой модели вертолетной ДУ, учитывающей крутильную жесткость трансмиссии [1]. В данной модели принята синхронная работа двигателей в составе САУ, что позволяет рассматривать работу САУ одного двигателя.

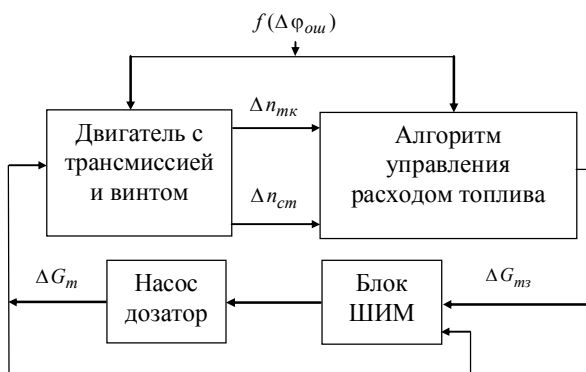


Рис. 1. Обобщенная структурная схема САУ для контура управления n_{cm}

Модель контура управления n_{cm} включает в себя алгоритм управления (раздел 2.1), математическую модель насоса-дозатора (раздел 2.2), а также алгоритм формирования сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ), управляющего работой насоса-дозатора (разд. 2.3).

2. Математическая модель контура управления

2.1. Алгоритм управления расходом топлива.

Алгоритм формирования управляющего сигнала по расходу топлива представляет собой систему уравнений, связывающих между собой отклонения частот вращения турбокомпрессора Δn_{mk} , свободной турбины Δn_{cm} и задаваемого расхода топлива ΔG_{m3} с внешним возмущением $\Delta \varphi_{ои}$. Для улучшения структуры алгоритма и облегчения введения в него дополнительных контуров, таких как, например, $dn_{mk}/dt = f(n_{mk})$, в контур управления n_{cm} введена дополнительная обратная связь по n_{mk} .

Уравнение для задаваемого отклонения относительной частоты вращения турбокомпрессора [2]:

$$\Delta \bar{n}_{mk3} = \frac{n_{cm0}}{n_{mk0}} \left(K_n \Delta \bar{n}_{cm3} + K_u \int_0^t \Delta \bar{n}_{cm3} dt \right) + \frac{n_{cm0}}{n_{mk0}} \left(K_\delta \frac{d\bar{n}_{cm3}}{dt} + K_\varphi \Delta \varphi_{ои} \right). \quad (1)$$

Уравнение для задаваемого изменения расхода топлива (управляющего сигнала):

$$\Delta G_{m3} = K_n n_{mk0} (\Delta \bar{n}_{mk3} - \Delta \bar{n}_{mk}), \quad (2)$$

где символы: «0» – значение величины на исходном установившемся режиме; «з» – задаваемое значение; «д» – действительное (текущее) значение; «Δ» – отклонение величины от номинального значения;

$$\bar{n}_{mk} = n_{mk} / n_{mk0}; \bar{n}_{cm} = n_{cm} / n_{cm0} -$$

относительные частоты вращения;

$$\Delta \bar{n}_{cm3} = -\Delta \bar{n}_{cm} -$$

задающий сигнал по частоте вращения свободной турбины;

$$\Delta \varphi_{ои} = \varphi_{ои} - \varphi_{ои0},$$

где $\varphi_{ои}$ – текущее, а $\varphi_{ои0}$ – начальное значение угла установки лопастей винта;

$K_n, K_u, K_\delta, K_n, K_\varphi$ – постоянные коэффициенты.

2.2. Математическая модель насоса-дозатора.

Математическая модель насоса-дозатора (НД) с непосредственным приводом дозирующего элемента

(ДЭ) от электромеханического преобразователя с малой электрической постоянной времени может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\frac{d^2 \Delta \alpha}{dt^2} = -\frac{K_v}{J} \frac{d\Delta \alpha}{dt} - \frac{M_{mp}}{J} \operatorname{sign}\left(\frac{d\Delta \alpha}{dt}\right) + \frac{K_i}{J} \cdot i; \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta G_m}{dt} = -\frac{1}{T_G} \Delta G_m + \frac{K_G}{T_G} \cdot \Delta \alpha, \quad (4)$$

где i – значение силы тока, причем

$$i = \begin{cases} I_m \operatorname{sign}(S), & \text{если } t_0 \leq t \leq t_0 + |S|; \\ 0, & \text{если } t_0 + |S| < t < t_0 + T_{Ш}. \end{cases} \quad (5)$$

$T_{Ш}$ – период ШИМ;

S – длительность импульса тока;

t_0 – время начала импульса ШИМ;

$\Delta \alpha$ – изменение угла поворота ДЭ, рад;

ΔG_m – действительное (текущее) изменение расхода топлива, кг/час.

Коэффициенты и постоянные величины:

J – момент инерции ДЭ,

M_{mp} – момент сухого трения,

K_i – коэффициент крутящего момента,

K_v – коэффициент вязкого трения,

K_G – коэффициент расхода,

T_G – постоянная времени регулятора перепада давления на ДЭ.

Значение ΔG_m , определяемое по уравнению (4), является выходным параметром, а разность $\delta G = \Delta G_{mз} - \Delta G_m$ служит входным сигналом для формирования закона управления НД.

2.3. Алгоритм формирования длительности импульса тока. Управление расходом топлива НД осуществляют путем изменения длительности импульса тока и его знака, при этом в алгоритме управления знак условно относят к длительности импульса S .

Уравнение для определения длительности импульса с соответствующим знаком:

$$S = \frac{K_{ш}}{I_m K_G} \left(K_{ни} \delta G + K_{ду} \frac{d\delta G}{dt} + K_{ии} \int_0^t \delta G dt \right), \quad (6)$$

где $K_{ш}$ – общий коэффициент пропорциональности;

$K_{ни}$, $K_{ду}$, $K_{ии}$ – параметрический, дифференциальный и интегральный коэффициенты соответственно.

Абсолютное значение длительности импульса, определенного по формуле (6), должно соответствовать условию:

$$S_{\min} \leq |S| \leq S_{\max}. \quad (7)$$

Если значение $|S|$ не удовлетворяет условию (7), ему присваивается предельное значение из (7) с соответствующим знаком.

Заключение

1. Разработана математическая модель контура управления частотой вращения свободной турбины вертолетного двигателя.
2. Сформулирован алгоритм управления контуром подачи топлива.
3. Разработана математическая модель насоса-дозатора с широтно-импульсной модуляцией управляющего сигнала.

Литература

1. Безуглый С.В., Епифанов С.В. Математическая модель вертолетной двигательной установки, учитывающая крутильную жесткость трансмиссии // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 217-220.
2. Павлюк Е.В., Епифанов С.В., Суховей С.И. Синтез контура управления частотой вращения свободной турбины вспомогательной силовой установки // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 8 (16). – С. 110-113.

Поступила в редакцию 25.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.С. Кулик, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.