

УДК 621.452.3 : 629.8.036

С.В. БЕЗУГЛЫЙ¹, С.В. ЕПИФАНОВ¹, Е.В. ПАВЛЮК², С.И. СУХОВЕЙ¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ ВЕРТОЛЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрен контур управления частотой вращения свободной турбины вертолетной двигательной установки, 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.

вертолетная двигательная установка, свободная турбина, контур управления частотой вращения, динамические характеристики переходных процессов, возмущения, угол установки, общий шаг винта

Формулировка проблемы. Объект исследования

На установившихся режимах работы системы автоматического управления (САУ) вертолетной двигательной установки (ДУ) основным является контур управления частотой вращения свободной турбины n_{cm} . 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_{cm} , 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 вертолета могут оказаться неудовлетворительными. Их можно улучшить, если предусмотреть дифференцирующую составляющую в законе регулирования n_{cm} . Однако возможности

увеличения этой составляющей могут быть ограничены тем, что она усиливает шум датчика 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:

- получить информацию о статистических характеристиках погрешностей каналов измерения n_{cm} и φ_{ou} ;
- 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 φ_{ou} ;
- выполнить предварительный синтез САУ;
- определить и сравнить динамические свойства альтернативных вариантов САУ.

Объектом исследования данной работы являются динамические свойства САУ (рис. 1), построенной с учетом вышеназванных особенностей на базе динамической поузловой модели вертолетной ДУ с учетом крутильной жесткости трансмиссии [1, 2]. Модель разработана для двухдвигательного варианта вертолета. Однако в данной задаче для сужения области анализа принята синхронная работа САУ и двигателей, что позволяет рассматривать работу САУ одного двигателя.

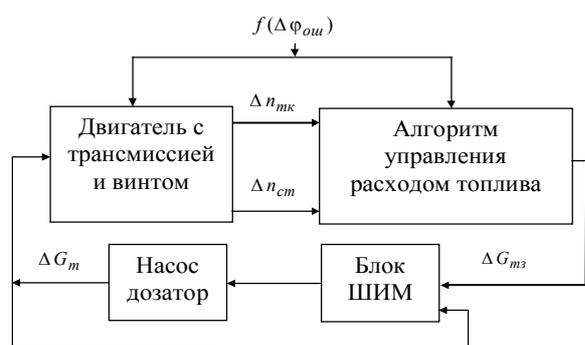


Рис. 1. Обобщенная структурная схема САУ для контура управления n_{cm}

Модель контура управления n_{cm} включает в себя алгоритм управления, математическую модель насоса-дозатора, а также алгоритм формирования сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ), управляющего работой насоса-дозатора, рассмотренные в следующем разделе.

Математическая модель контура управления

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_{mz} с внешним возмущением $\Delta \varphi_{ou}$.

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 [3]:

$$\Delta \bar{n}_{mkz} = \frac{n_{cm0}}{n_{mk0}} \left(K_n \Delta \bar{n}_{cmz} + K_u \int_0^t \Delta \bar{n}_{cmz} dt \right) + \frac{n_{cm0}}{n_{mk0}} \left(K_d \frac{d\bar{n}_{cmz}}{dt} + K_\varphi \Delta \varphi_{ou} \right). \quad (1)$$

Уравнение для задаваемого изменения расхода топлива (управляющего сигнала):

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

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;

$\Delta \bar{n}_{cmz} = -\Delta \bar{n}_{cm}$ – задающий сигнал по частоте вращения свободной турбины;

$\Delta \varphi_{ou} = \varphi_{ou} - \varphi_{ou0}$, где φ_{ou} – текущее, а φ_{ou0} – начальное значение угла установки лопастей винта;

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

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.

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:

$$S = \frac{K_{uu}}{I_m K_G} \left(K_{nu} \delta G + K_{du} \frac{d\delta G}{dt} + K_{uu} \int_0^t \delta G dt \right), \quad (6)$$

где K_{uu} – общий коэффициент пропорциональности;

K_{nu} , K_{du} , K_{uu} – 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.

Динамические свойства альтернативных вариантов САУ

Характерные условия сравнения вариантов САУ. Динамические характеристики рассматриваемых вариантов САУ исследовали при переключении лопастей винта скачком из положения, соответствующего исходному режиму работы. В первую очередь рассмотрели переходные процессы в САУ при $K_\delta = K_\phi = 0$ и изменении режима от максимального продолжительного до максимального крейсерского. На следующем этапе рассмотрены переходные характеристики САУ в предельных случаях возмущения, моделирующих ступенчатую переключку лопастей из положения на взлетном режиме в нейтральное при отличных от нуля значениях K_δ и K_ϕ .

Результаты моделирования. Анализ результатов расчетов для разных условий качественно одинаковы и поэтому далее приводим динамические характеристики САУ в стандартных атмосферных условиях на уровне земли при переключке лопастей из положения на взлетном режиме в нейтральное.

На рис. 2 – 4 представлены динамические характеристики рассматриваемого объекта в составе САУ при $K_D = K_\phi = 0$ («1»). Для сравнения там же представлена реакция разомкнутой системы («2»).

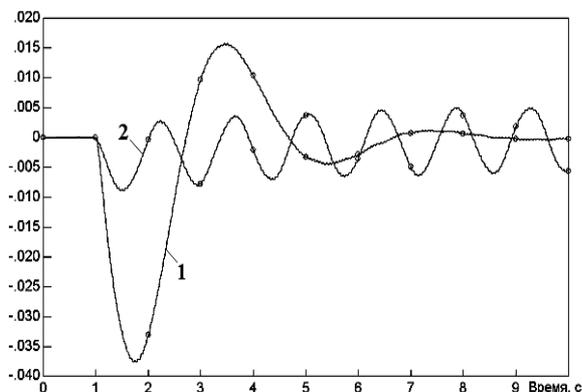


Рис. 2. Относительная колебательная составляющая частоты вращения свободной турбины

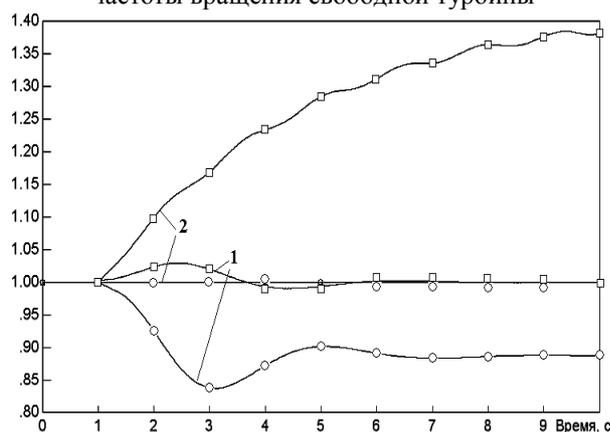


Рис. 3. Относительные частоты вращения свободной турбины «□» и турбокомпрессора «○»

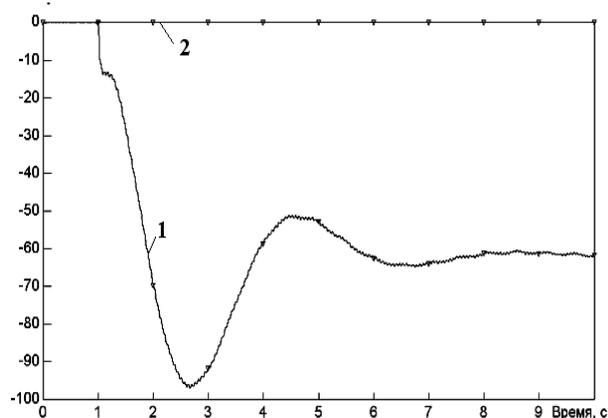


Рис. 4. Текущее изменение расхода топлива, кг/ч

Анализ полученных переходных характеристик показывает, что:

1) реакция разомкнутой САУ сопровождается возникновением незатухающих колебаний частот вращения турбин (рис.2), а также винтов;

2) предлагаемая САУ обеспечивает подавление колебательной составляющей частоты вращения и установление нового режима работы ДУ с приемлемым временем переходного процесса (см. рис.3, 4);

3) отклонения частоты вращения при сильных возмущениях превышают 3%.

Полученные результаты обуславливают необходимость улучшения качества САУ путем введения дифференцирующей составляющей по n_{ct} и (или) обратной связи по углу ϕ_{ou} в алгоритме управления расходом топлива (1), (2).

Как показали дальнейшие исследования, улучшение качества САУ путем введения дифференцирующей составляющей в закон управления существенно ограничено условиями устойчивости системы. Для исследуемого объекта область допустимых K_D узка и дифференцирующая составляющая практически не влияет на заброс n_{ct} .

Дополнительно было проведено исследование влияния коэффициентов K_n и K_u на характеристики переходных процессов. Результаты расчетов при $K_\phi = 0$ представлены на рис. 5.

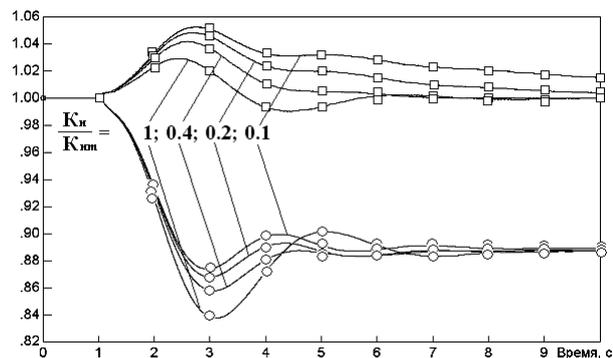


Рис. 5. Относительные частоты вращения свободной турбины «□» и турбокомпрессора «○»

Было показано, что рациональное значение коэффициента K_u определяется соотношением $K_u/K_n = 1$, поскольку его уменьшение приводит к росту времени переходного процесса, а увеличение – к возникновению периодических колебаний частоты

вращения турбокомпрессора, амплитуда которых возрастает с увеличением K'_n .

Вторым способом улучшения качества САУ является использование обратной связи по углу $\varphi_{ош}$ в законе управления. Соответствующие расчеты были выполнены для различных значений K_φ при $K_d = 0$. Результаты представлены на рис. 6.

Из анализа полученных графиков следует:

1) САУ с компенсирующим воздействием по $\varphi_{ош}$ при рациональном выборе параметров имеет переходную характеристику с положительным и отрицательным забросами по $n_{ст}$, уровни которых меньше, чем заброс в отсутствие компенсации;

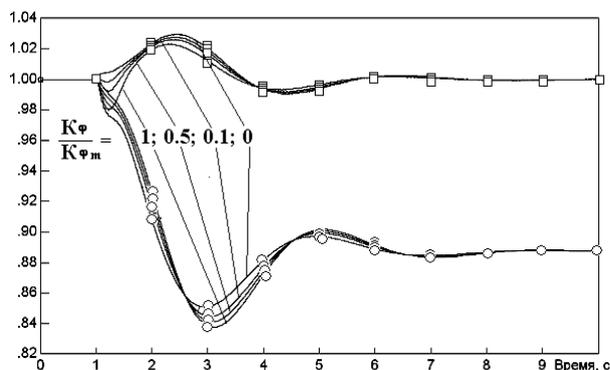


Рис. 6. Относительные частоты вращения свободной турбины «□» и турбокомпрессора «○»

2) рассматриваемое компенсирующее воздействие улучшает переходную характеристику турбокомпрессора, уменьшая величину заброса по $n_{тк}$ с ростом K_φ ;

3) возникающие на начальной стадии переходного процесса колебания расхода топлива быстро затухают и не оказывают влияния на переходный процесс в целом; указанные колебания обусловлены ступенчатым характером воздействия по $\varphi_{ош}$.

В результате анализа выбраны рациональные значения коэффициентов пропорциональности K_φ и K'_n , а также коэффициента K'_n .

Заключение

Проведенные в данной работе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При умеренных значениях возмущений общего шага винта определены рациональные значения пропорционального и интегрального коэффициентов в законе регулирования, обеспечивающие подавление колебательной составляющей и допустимый уровень заброса $n_{ст}$.

2. При предельных возмущениях $\varphi_{ош}$ уровень забросов частоты вращения свободной турбины с пропорционально-интегральным регулятором превышает допустимый.

3. Возможности улучшения качества САУ путем введения дифференцирующей составляющей существенно ограничены условием устойчивости системы.

4. Для улучшения качества САУ необходимо использовать обратную связь по $\varphi_{ош}$ в законе регулирования.

5. Использование угла установки винта в законе регулирования позволяет уменьшить заброс $n_{ст}$ 1,4 ... 1,6 раз.

Литература

1. Безуглый С.В., Епифанов С.В. Математическая модель вертолетной двигательной установки, учитывающая крутильную жесткость трансмиссии // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2005. – Вып. 4.
2. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
3. Павлюк Е.В., Епифанов С.В., Суховой С.И. Синтез контура управления частотой вращения свободной турбины вспомогательной силовой установки // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2004. – Вып. 8 (16). – С. 110 – 113.

Поступила в редакцию 25.04.2005

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