

УДК 621.05

В.Ю. РУТКОВСКИЙ¹, С.Д. ЗЕМЛЯКОВ¹, В.М. ГЛУМОВ¹, С.В. ЕПИФАНОВ²¹*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*²*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина***ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ,
ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ОБРЫВУ ВАЛА ТРАНСМИССИИ ТВД***

Рассматривается задача выявления информативных признаков начала деформации вала свободной турбины ТВД, предшествующей ее обрыву. Источником информации являются сигналы двух, установленных на противоположных концах упругого вала, штатных датчиков частоты вращения. С помощью этих датчиков вычисляется текущее значение угла скручивания вала, скорость его изменения во времени и при отклонении этих величин от нормальных значений, определяемых текущим режимом работы ТВД, принимается решение по аварийному отключению двигателя.

трансмиссия, обрыв вала, информативный признак, угол скручивания, адаптация, эталонная модель

Введение

В работе [1] был рассмотрен адаптивный подход к оценке текущего значения угла скручивания вала свободной турбины (СТ) ТВД, основанный на использовании двух штатных сигналов датчика частоты вращения (ДЧВ), установленных на противоположных концах упругого вала СТ. Одновременно этот подход дает и оценку скорости изменения угла скручивания.

В настоящей работе предлагаются три информативных признака, предшествующих обрыву вала СТ. Два из них основаны на превышении наблюдаемых величин некоторых предельных значений, допустимых при нормальной работе двигателя. Более желательно не дожидаться выхода оцениваемых величин за их максимально допустимые значения, а еще раньше уловить момент нарушения нормальной работы вала СТ. Третий признак, позволяющий выявить начальную стадию пластической деформации в материале вала, основан на использовании эталонной модели, воспроизводящей динамику нормальной работы вала.

В работе приведены некоторые результаты исследования быстродействия алгоритмов отключения ТВД на основе каждого из трех признаков. Кроме

того, снято введенное в [1] предположение о допустимости замены звена чистого запаздывания инерционным звеном первого порядка, что привело к изменению методики синтеза адаптивного алгоритма оценивания угла скручивания.

1. Постановка задачи

Рассмотрим упрощенную схему трансмиссии одновального ТВД с дифференциальным редуктором и двумя соосными винтами [2], представленную на рис. 1. Введенные здесь обозначения полностью совпадают с обозначениями, принятыми в [1].

При $c_\omega = \infty$ математическая модель рассматриваемой трансмиссии принимается в виде [2]:

$$\begin{aligned} J_{B1} \dot{\bar{\omega}}_{B1} &= i_1 (M_T - J_T \dot{\bar{\omega}}_T) - M_{B1}; \\ J_{B2} \dot{\bar{\omega}}_{B2} &= i_1 (M_T - J_T \dot{\bar{\omega}}_T) - M_{B2}; \\ \bar{\omega}_T &= i_1 \bar{\omega}_{B1} + i_2 \bar{\omega}_{B2}, \end{aligned} \quad (1)$$

в случае $c_\omega \neq \infty$, $\beta = 0$ в виде [3]:

$$\begin{aligned} J_{B1} \dot{\omega}_{B1} &= i_1 c_\omega \delta \alpha - M_{B1}; \\ J_{B2} \dot{\omega}_{B2} &= i_2 c_\omega \delta \alpha - M_{B2}; \\ J_T (i_1 \dot{\omega}_{B1} + i_2 \dot{\omega}_{B2} + \ddot{\delta} \alpha) + c_\omega \delta \alpha &= M_T; \\ \omega_{T1} = i_1 \omega_{B1} + i_2 \omega_{B2}; \delta \alpha &= \alpha_{T2} - \alpha_{T1}, \end{aligned} \quad (2)$$

* Работа выполнена при поддержке ИНТАС (Проект № 2000-757) и РФФИ (Проект № 03-01-00062)

где α_{T1}, α_{T2} – угловые положения сечений соответственно переднего и заднего концов вала СТ; $\delta\alpha$ – угол скручивания.

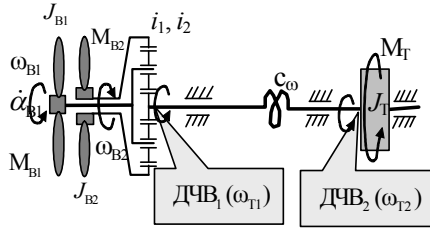


Рис. 1. Идеализованная схема упругой трансмиссии ТВД

Предполагается, что моменты винтов M_{B1} и M_{B2} представляют собой сумму двух составляющих [3]:

$$M_{Bi} = \bar{M}_{Bi} + \tilde{M}_{Bi}, \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

где $\bar{M}_{Bi} = \bar{k}_{Bi} \Phi_{Bi} \bar{\omega}_{Bi}^2$; $\tilde{M}_{Bi} = \tilde{k}_{Bi} \Phi_{Bi} \tilde{\omega}_{Bi}^2$; Φ_{Bi} – углы установки лопастей соответствующих винтов.

Выходные сигналы датчиков частоты вращения ДЧВ₁ и ДЧВ₂ имеют вид:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= k_w z_u \bar{\omega}_T \sin(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0 - z_u \delta\alpha) + \xi_{u1}(t); \\ u_2(t) &= k_w z_u \bar{\omega}_T \sin(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0) + \xi_{u2}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где z_u – число полюсов индуктора ДЧВ; ψ_0 – некоторое постоянное значение сдвига фазы, одинаковое для обоих сигналов; k_w – коэффициент пропорциональности по амплитуде сигналов;

$$\xi_{ui}(t) = \xi_i(t) + U_{\bar{\omega}} \sin \tilde{\omega}_T t, \quad (i = 1, 2). \quad (5)$$

В (5) составляющие $\xi_i(t)$ ($i = 1, 2$) – помехи измерения; $U_{\bar{\omega}} \sin \tilde{\omega}_T t$ – вибрационные шумы, $\omega_T = \bar{\omega}_T + \tilde{\omega}_T$.

Предположим, что величина и скорость изменения расхода топлива $G = G(t)$ ограничены, т.е.

$$\begin{aligned} G(t) &\leq G_{\max}, \quad G_{\max} = \text{const} > 0; \\ \left| \frac{dG(t)}{dt} \right|_{\max} &\leq g, \quad g = \text{const} > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Обороты винтов стабилизируются с помощью углов установки лопастей, а динамикой этого процесса в первом приближении можно пренебречь.

Ставится задача: с помощью сигналов ДЧВ₁ и ДЧВ₂ сформировать информативные признаки мо-

мента аварийного отключения двигателя в случае начала пластической деформации материала вала СТ.

2. Идентификация текущих значений угла скручивания вала и скорости его изменения для свободной турбины

Как и в [1], будем считать, что $u_1(t)$ в (4) – это результат прохождения сигнала $u_2(t)$ через звено чистого запаздывания, т.е. $U_1(s) = e^{-s\tau} U_2(s)$, где $U_1(s), U_2(s)$ – преобразования Лапласа соответственно для сигналов $u_1(t), u_2(t)$; τ – время запаздывания; s – оператор Лапласа. Тогда запишем

$$\begin{aligned} u_1(t) &= k_w z_u \bar{\omega}_T \sin(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0 - z_u \bar{\omega}_T \tau); \\ u_2(t) &= k_w z_u \bar{\omega}_T \sin(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0). \end{aligned} \quad (7)$$

В (7) временно введено условие: $\xi_{u1}(t) = 0, \xi_{u2}(t) = 0$. Очевидно, если величина τ известна, то

$$\delta\alpha = \bar{\omega}_T \tau. \quad (8)$$

Поставим задачу оценки текущего значения τ в (7) и, следовательно, текущего значения $\delta\alpha$ в (4). Для решения воспользуемся адаптивным подходом с эталонной моделью с привлечением градиентного метода синтеза алгоритмов адаптации [4].

В качестве эталонной модели примем звено чистого запаздывания с изменяемой величиной запаздывания τ . Если на вход эталонной модели подать сигнал $u_2(t)$, то на выходе получим сигнал вида

$$u_M(t) = k_w z_u \bar{\omega}_T \sin(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0 - z_u \bar{\omega}_T \tau). \quad (9)$$

При $\tau \neq \tau$ между $u_M(t)$ и $u_1(t)$ имеем разность

$$\varepsilon(t) = u_M(t) - u_1(t), \quad (10)$$

которая обнуляется, если за счет изменения τ добиться равенства $\tau \equiv \tau$. В этом случае величину $\delta\alpha$, вместо (8), можно найти из соотношения $\delta\alpha = \bar{\omega}_T \tau$.

В соответствии с градиентным методом [4] формируется функция $I = \varepsilon^2(t)$, а алгоритм адаптации находится из соотношения $dr/dt = -\lambda(\partial I/\partial r)$, где $\lambda = \text{const}$. Отсюда, с учетом (10), получим искомый адаптивный алгоритм в виде

$$\frac{dr}{dt} = \rho \varepsilon(t) u_M^*(t), \quad (11)$$

где $\rho = 2\lambda z_u \bar{\omega}_T$ и

$$u_M^*(t) = k_w (z_u \bar{\omega}_T)^2 \cos(z_u \bar{\omega}_T t + \psi_0 - z_u \bar{\omega}_T r). \quad (12)$$

Для реализации алгоритма (11) необходимо сформировать функцию $u_M^*(t)$ (12). Эта задача решается подачей сигнала $u_M(t)$ (9) на звено чистого запаздывания.

Полученное решение задачи оценки текущего значения угла скручивания $\hat{\delta\alpha} = \hat{\delta\alpha}(t)$ и скорости его изменения $\hat{\delta\dot{\alpha}} = \hat{\delta\dot{\alpha}}(t)$ представлено на рис. 2 в виде структурной схемы. Здесь обозначено: АА – алгоритм адаптации (11), УМН – умножители; $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – входные воздействия устройства адаптации (УА), определяемые равенствами (7); $\hat{\omega}_T$ – оценка частоты вращения СТ, определяемая равенством (1) и соответствующим ДЧВ для измерения $\bar{\omega}_T$.

На рис. 3 представлена упрощенная математическая модель ТВД на участке от точки ввода сигнала на изменение подачи топлива G до точки получения оценок текущих значений $\hat{\delta\alpha}(t)$ и $\hat{\delta\dot{\alpha}}(t)$. Здесь апериодическое звено с параметрами k_g и τ_g приближенно описывает динамическую связь между сигналом подачи топлива G от дроссельной ручки и моментом турбины M_T ; блок ТВГ определяет динамику турбовинтовой группы, описываемой уравнениями (1) – (3); блок ДЧВ воспроизводит сигналы датчиков частоты вращения (4); устройство адаптации УА представлено на рис. 2.

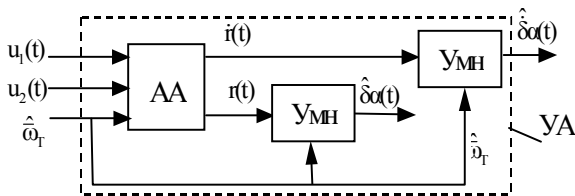


Рис. 2. Структура адаптивного устройства оценки угла скручивания вала

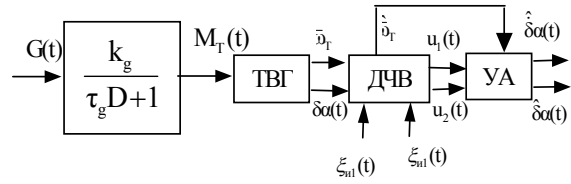


Рис. 3. Структура модели движения участка ТВД

На рис. 4 представлены осциллограммы, иллюстрирующие работу устройства адаптации с алгоритмом функционирования (11) с учетом помех измерения и вибрационных шумов $\xi_{u1}(t)$ и $\xi_{u2}(t)$, входящих в состав сигналов ДЧВ (4). В данном случае сигнал $G(t)$ изменялся по закону

$$G(t) = G_0(1 + 0,3 \sin(t - 0,5)), \quad G_0 = \text{const.}$$

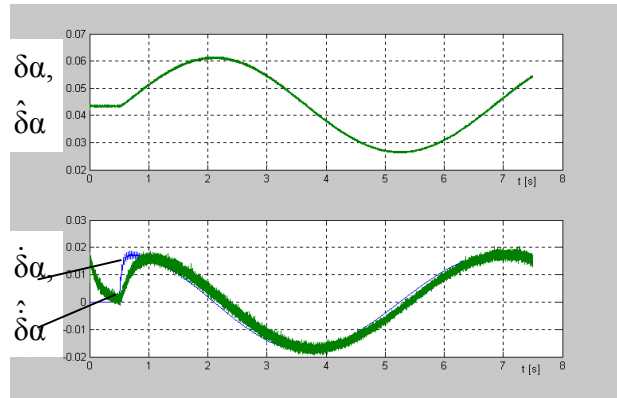


Рис. 4. Осциллограммы работы устройства адаптации

Из осциллограммы (рис. 4) видно, что оценки $\hat{\delta\alpha}(t)$ и $\hat{\delta\dot{\alpha}}(t)$ с достаточной степенью точности следят за реальными изменениями $\delta\alpha(t)$ и $\delta\dot{\alpha}(t)$.

3. О трех информативных признаках отключения ТВД

Учитывая описанную выше возможность получения оценок текущих значений угла скручивания вала и скорости его изменения, рассмотрим три признака аварийного отключения:

- по выходу оценки $\hat{\delta\alpha}(t)$ за предельно допустимое значение реального угла скручивания $\delta\alpha_{\max}$;
- по выходу оценки $\hat{\delta\dot{\alpha}}(t)$ за предельно допустимое значение реальной скорости изменения угла скручивания $\delta\dot{\alpha}_{\max}$ при нормальной работе СТ;

– по выходу за пределы заданных границ отклонений текущих оценок $\hat{\delta}\alpha(t)$ и $\hat{\delta}\dot{\alpha}(t)$ от тех же модельных величин $\delta\alpha_M(t)$ и $\dot{\delta}\alpha_M(t)$.

3.1. Выход оценки угла скручивания вала СТ за предельно допустимое значение

Рассматриваемый признак очевиден: если значение $\hat{\delta}\alpha(t)$ выходит за предельно допустимое значение реального угла скручивания при нормальной работе СТ $\delta\alpha_{\max}$

$$\hat{\delta}\alpha(t) \geq \delta\alpha_{\max} + \Delta\alpha_{\Pi}, \quad (13)$$

где $\Delta\alpha_{\Pi}$ – некоторое значение, учитывающее погрешности, то при достижении равенства в соотношении (13) подается сигнал на отключение двигателя.

В данном случае необходимо решить вопрос о выборе величин $\delta\alpha_{\max}$ и $\Delta\alpha_{\Pi}$. Для этого рассмотрим (2) и, предполагая работу систем стабилизации оборотов винтов идеальной, т.е. $\dot{\omega}_{B1} = 0, \dot{\omega}_{B2} = 0$, запишем интересующее нас уравнение

$$J_T \ddot{\delta}\alpha + c_{\omega} \dot{\delta}\alpha = M_T. \quad (14)$$

Из (6), с учетом связи $M_T(t)$ и $G(t)$ в виде

$$\tau_g \dot{M}_T(t) + M_T(t) = k_g G(t), \quad (15)$$

получим неравенства $M_T(t) \leq M_{T \max}, M_{T \max} = k_g G_{\max}$, и из (14) неравенства вида $\delta\alpha \leq \delta\alpha_{\max}, \delta\alpha_{\max} = k_g G_{\max} c_{\omega}^{-1}$.

Относительно выбора $\Delta\alpha_{\Pi}$ в (13) отметим, что решение этой задачи можно получить лишь на основе учета всех возможных факторов, которые могут повлиять на ложное срабатывание момента аварийного отключения двигателя.

3.2. Выход оценки скорости изменения угла скручивания за предельно допустимую величину

Рассматриваемый признак очевиден: если значение оценки $\hat{\delta}\dot{\alpha}(t)$ выходит за допустимое значение

$$\left| \hat{\delta}\dot{\alpha}(t) \right| \geq \dot{\delta}\alpha_{\max} + \Delta\dot{\alpha}_{\Pi}, \quad (16)$$

то подается сигнал на отключение двигателя.

Значение $\dot{\delta}\alpha_{\max}$ получим, как и в предыдущем случае, из уравнения (14). Будем считать, что сигнал подачи топлива $G = G(t)$ изменяется по закону $G(t) = G_0 + g(t - t_0)$, где $G_0 = \text{const}, G_0 < G_{\max}, t_0$ – начало рассмотрения движения.

Примем $\tau_g = 0$ в (15) и получим равенство

$$M_T(t) = M_0 + k_g g(t - t_0), \quad (17)$$

где $M_0 = k_g G_0$. Из (14) с учетом (17) получим

$$\delta\alpha(t) = M_0 c_{\omega}^{-1} + k_g g c_{\omega}^{-1} (t - t_0) + A \sin[\omega(t - t_0) + \psi], \quad (18)$$

где $\omega = \sqrt{c_{\omega} J_T^{-1}}$; A и ψ определяются начальными значениями $\delta\alpha(t_0)$ и $\dot{\delta}\alpha(t_0)$. Из (18) следует

$$\dot{\delta}\alpha(t) = k_g g c_{\omega}^{-1} + A \omega \cos[\omega(t - t_0) + \psi] \quad (19)$$

Отбрасывая в (19) переменную компоненту, получим $\dot{\delta}\alpha_{\max} = k_g g c_{\omega}^{-1}$. Учитывая, что ω достаточно велико, амплитуда $A\omega$, входящая в оценку $\hat{\delta}\dot{\alpha}(t)$, существенна. Поэтому при моделировании оценка $\hat{\delta}\dot{\alpha}(t)$ пропускалась через сглаживающий фильтр с постоянной времени $\tau = 0,167$. К пороговому значению $\Delta\dot{\alpha}_{\Pi}$ в (16) предъявляются те же требования, что и к $\Delta\alpha_{\Pi}$ в соотношении (13).

3.3. Аварийное отключение ТВД с использованием эталонной модели

Рассмотрим структурную схему участка ТВД, показанную на рис. 3. Поскольку динамика всех блоков, входящих в эту схему, задана соответствующими уравнениями, определяемыми для нормального режима работы ТВД, то эту схему можно реализовать с помощью бортовой вычислительной системы, получив, таким образом, некоторую динамическую эталонную модель (ДЭМ), которая в той или иной степени близка к реальной динамической модели (РДМ) рассматриваемого участка работы ТВД. На рис. 5 структурно представлены эти два блока РДМ и ДЭМ. Естественно, что на РДМ действует ряд факторов, которые не удается учесть (или

не полностью удается учесть) в ДЭМ. Эти факторы на рис. 5 условно обозначены через $f(t)$.

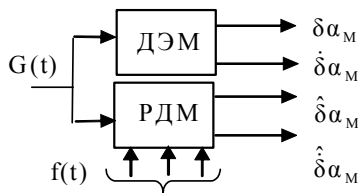


Рис. 5. Структура из двух блоков моделей

Если $f(t) \equiv 0$, то для устойчивых структур РДМ и ДЭМ через некоторое время величины

$$\varepsilon(t) = \delta\alpha_M(t) - \hat{\delta}\alpha_M(t), \quad \dot{\varepsilon}(t) = \dot{\delta}\alpha_M(t) - \dot{\hat{\delta}}\alpha_M(t)$$

становятся практически равными нулю. Однако реально $f(t) \neq 0$, поэтому величины $\varepsilon(t)$ и $\dot{\varepsilon}(t)$ не будут нулевыми. Если неучтенные факторы при нормальной работе двигателя относительно малы, то можно отыскать (например, с помощью имитатора полунатурного стенда [3]) некоторую допустимую область

$$\begin{aligned} |\varepsilon(t)| &\leq \varepsilon_{\text{доп}}; \quad \varepsilon_{\text{доп}} = \text{const} > 0; \\ |\dot{\varepsilon}(t)| &\leq \dot{\varepsilon}_{\text{доп}}; \quad \dot{\varepsilon}_{\text{доп}} = \text{const} > 0, \end{aligned} \quad (20)$$

в которой изображающая точка фазовой плоскости $\{\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)\}$ будет оставаться в процессе работы ТВД. При выходе изображающей точки за пределы допустимой области (20), т.е. при нарушении нормальной работы СТ, подается сигнал на аварийное отключение двигателя.

4. Результаты математического моделирования

На рис. 6 по результатам математического моделирования, описанного в [3], представлены графики зависимостей времени, получаемого по признакам 1 (кривая 1), 2 (кривая 2) и 3 (кривая 3) от установившегося значения реального угла скручивания при изменении c_{ω} по линейному закону вида

$$c_{\omega}(t) = c_{\omega}^0 - 1,8c_{\omega}^0(t - t^*),$$

где t^* – начальная точка уменьшения значения c_{ω} .

В (13) и (16) принято: $\Delta\alpha_{\text{п}} = 0,05\delta\alpha_{\text{max}}$, $\Delta\dot{\alpha}_{\text{п}} = 0,05\delta\dot{\alpha}_{\text{max}}$; в (20) – $\varepsilon_{\text{доп}} = 0,008$ рад; $\dot{\varepsilon}_{\text{доп}} = 0,005 \text{ с}^{-1}$.

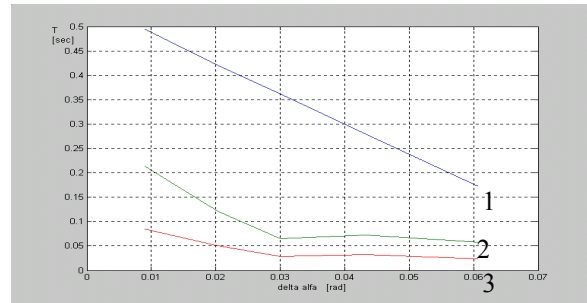


Рис. 6. Графики зависимостей $T(\delta\alpha)$

Заключение

Сравнение рассмотренных признаков, предшествующих обрыву вала трансмиссии ТВД, показало, что признак на основе эталонной модели является наиболее перспективным. Тем не менее, с точки зрения снижения вероятности ложного отключения ТВД, в дальнейшем целесообразно рассмотреть вопрос комплексного использования всех трех признаков выявления начала пластической деформации материала вала турбины двигателя.

Литература

1. Алгебраический и адаптивный подходы к задаче идентификации крутящего момента свободной турбины ТВД / В.Ю. Рутковский, С.В.Епифанов, С.Д. Земляков, В.М. Суханов, В.М. Глумов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: НАКУ ХАИ. – 2002. – Вып. 31. Двигатели и энергоустановки. – С. 197–201.
2. Шевяков А.А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1965. – 328 с.
3. Суханов В.М., Глумов В.М., Епифанов С.В., Куликов Г.Г. Исследование работоспособности алгоритмов идентификации момента свободной турбины в установившихся и переходных режимах ТВД на компьютерном имитаторе полунатурного стенда // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 2(5).
4. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н., Земляков С.Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем. – М.: Машиностроение, 1972. – 262 с.

Поступила в редакцию 12.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.И. Кузнецов, Нац. техн. ун-т «ХПИ», Харьков.