

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ ДВУХ НОВЫХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОМЕНТА ТУРБИНЫ ТВД, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СИГНАЛЫ ШТАТНЫХ ДАТЧИКОВ ОБОРОТОВ ВАЛА¹

С.Д. Земляков, д-р техн. наук, проф., В.М. Глумов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, г. Москва, Россия;

С.В. Епифанов, д-р техн. наук, проф.,

Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского, г. Харьков, Украина

1. Введение

В работе [1] была рассмотрена одна из частных задач мониторинга двигателей, связанная с идентификацией величины момента на валу свободной турбины (СТ), передаваемого через дифференциальный редуктор к валам соосных винтов турбовинтового двигателя (ТВД). При этом в уравнениях трансмиссии учтена дополнительная степень свободы, обусловленная упругостью вала СТ на скручивание (рис. 1).

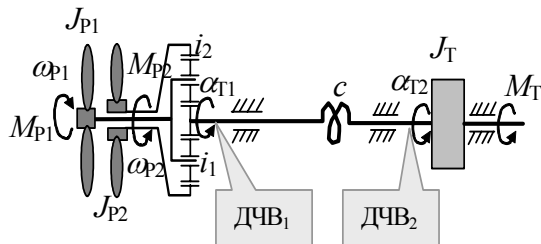


Рис. 1 Идеализированная схема упругой трансмиссии ТВД с дифференциальным редуктором

Уравнения идеализированной модели трансмиссии ТВД с упругим валом СТ принимаются в виде

$$\begin{aligned} J_T \ddot{\alpha}_{T2} + \beta \delta \dot{\alpha}_T + c_{\omega} \delta \alpha_T &= M_T, \\ J_{B1} \ddot{\alpha}_{B1} - i_1 (\beta \delta \dot{\alpha}_T + c_{\omega} \delta \alpha_T) &= -M_{B1}, \\ J_{B2} \ddot{\alpha}_{B2} - i_2 (\beta \delta \dot{\alpha}_T + c_{\omega} \delta \alpha_T) &= -M_{B2}, \\ \alpha_{T1} &= i_1 \alpha_{B1} + i_2 \alpha_{B2}, \\ \delta \alpha_T &= \alpha_{T2} - \alpha_{T1}, \quad \delta \dot{\alpha}_T = \frac{d(\delta \alpha_T)}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

Переменные, входящие в (1) определены в [1] и частично – на рис. 1. Кроме того, c_{ω} , β – коэффициенты упругости и затухания крутильных колебаний.

В приложении к задаче контроля технического состояния длинномерного вала ротора СТ можно ограни-

читься описанием динамики упругого вала следующими из (1) двумя уравнениями:

$$\begin{aligned} J_T \ddot{\alpha}_{T2} + \beta (\dot{\alpha}_{T2} - \dot{\alpha}_{T1}) + c_{\omega} (\alpha_{T2} - \alpha_{T1}) &= M_T, \\ \alpha_{T1} + [\beta (\dot{\alpha}_{T1} - \dot{\alpha}_{T2}) + c_{\omega} (\alpha_{T1} - \alpha_{T2})] \sum_{k=1}^2 i_k^2 J_{Bk}^{-1} &= - \sum_{k=1}^2 i_k J_{Bk}^{-1} M_{Bk}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение системы (2) в операторной форме ($p = d/dt$) относительно координаты сдвига $\delta \alpha_T$ имеет вид

$$\delta \alpha_T = \frac{M_T J_T^{-1} + i_1 M_{B1} J_{B1}^{-1} + i_2 M_{B2} J_{B2}^{-1}}{J_T^{-1} p^2 + (\beta p + c_{\omega})(J_T^{-1} + i_1^2 J_{B1}^{-1} + i_2^2 J_{B2}^{-1})}. \quad (3)$$

В установившемся режиме ($\dot{\alpha}_T, \dot{\alpha}_{B1}, \dot{\alpha}_{B2} = \text{const}$) справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} M_T i_1 &= M_{B1} \quad \text{и} \quad M_T i_2 = M_{B2}, \\ M_T &= c_{\omega} \delta \alpha_T. \end{aligned} \quad (4)$$

Для идентификации величины крутящего момента СТ необходимо получить оценку углового сдвига концов вала ротора СТ, что осуществляется на основе использования сигналов с выходов установленных на этих концах стандартных датчиков частоты вращения (ДЧВ) с помощью двух возможных подходов [1] к оцениванию малых фазовых сдвигов между двумя указанными сигналами с учетом шумов измерения.

В первом (алгебраическом) подходе для решения задачи использовались выходные дискретные сигналы штатных ДЧВ вала с последующей обработкой полученной информации с помощью вычислительной процедуры, включающей в себя рекуррентную фильтрацию для повышения точности оценивания в условиях действия помех. Второй (адаптивный) подход

¹ Работа выполнена при поддержке INTAS (Проект № 2000-757) и РФФИ (Проект № 03-01-00062)

связан с использованием эталонной модели (ЭМ) для оценки угла скручивания упругого вала путем сравнения двух непрерывных выходов и соответствующей подстройки модели под реальный выход объекта.

В работе рассматривается задача улучшения характеристик предложенных в [1] алгоритмов идентификации, а также приводятся результаты сопоставительного анализа работы модифицированных алгоритмов и выявление оптимальных областей их применимости.

2. Модель сигнала ДЧВ с учетом крутильных колебаний вала

Если вал, частота вращения которого измеряется индукционным датчиком, имеет ограниченную жесткость на кручение c_ω , то на нестационарных режимах вращения вала ($M_T(t) \neq \text{const}$) возбуждаются крутильные колебания $\tilde{\alpha}_T(t)$, аддитивно добавляющиеся к основному движению вала $\bar{\alpha}_T(t)$. При отсутствии вращательного движения $\bar{\omega}_T$ крутильные колебания вала $\tilde{\alpha}_T(t)$, воспринимаясь как вибрационные колебания индуктора датчика, приведут к появлению переменной составляющей магнитного потока с частотой крутильных колебаний $\tilde{\omega}_T$, что вызовет наведение соответствующей ЭДС в обмотке катушки статора:

$$u_{\tilde{\omega}}(\tilde{\omega}_T) = U(\tilde{\omega}_T) \sin \tilde{\omega}_T t, \quad (5)$$

где $U(\tilde{\omega}_T) = U_{\tilde{\omega}} = \tilde{\omega}_T \tilde{\alpha}_{Tm} Bw$ - амплитуда ЭДС, наводимой вибрационной компонентой $\tilde{\alpha}_T(t)$ с полуразмахом колебаний $\tilde{\alpha}_{Tm}$.

Результирующее движение вала турбины α_T , состоящее из вращения $\bar{\alpha}_T(t)$ с частотой $\bar{\omega}_T$ и крутильных колебаний $\tilde{\alpha}_T(t)$ с частотой вибраций $\tilde{\omega}_T$, производится ДЧВ в форме непрерывного сигнала

$$u_\omega = u_{\bar{\omega}} + u_{\tilde{\omega}} = U_{\bar{\omega}} \sin n\bar{\omega}_T t + U_{\tilde{\omega}} \sin \tilde{\omega}_T t, \quad (6)$$

где $U_{\bar{\omega}} = k_\Phi n \bar{\omega}_T$,

$$k_\Phi = 2w\tilde{\Phi}_m. \quad (6')$$

При использовании сигналов двух ДЧВ, установленных на противоположных концах вала, упругий сдвиг одного конца относительно другого на угол

кручения $\delta\alpha_T$ приводит к появлению фазового сдвига $\psi = n\delta\alpha_T$ между электрическими сигналами, индуцируемыми в обмотках ДЧВ. При этом выходные напряжения ДЧВ можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} u_1(t) &= k_W \omega_u \sin \omega_u t + \xi_{u1}(t), \\ u_2(t) &= k_W \omega_u \sin(\omega_u t + \psi) + \xi_{u2}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\omega_u = n\omega_T(t)$ - несущая частота сигналов ДЧВ,

n - число полюсов индукторной шестерни датчика,

$\xi_{uk}(t) = \xi_{\psi k}(t) + U_{\tilde{\omega}} \sin \tilde{\omega}_T t$, $k=1,2$ - помехи измерений и вибрационные шумы.

3. Алгебраический подход к определению угла скручивания упругого вала на основе сигналов двух разнесенных датчиков оборотов

В отличие от [1] рассматривается общий случай неустановившегося режима работы ТВД, в котором момент турбины и обороты вала являются функциями времени, вследствие чего в (6) $U_{\bar{\omega}} = U(t)$. Сигналы u_1^k, u_2^k , снимаемые в моменты времени t_k , $k = \overline{1, N}$, в соответствии с (7) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u_1(t_k) &= u_1^k = U(t_k) \sin \omega_u t_k + \xi_{u1}(t_k), \\ u_2(t_k) &= u_2^k = U(t_k) \sin(\omega_u t_k + \psi) + \xi_{u2}(t_k). \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначая результаты измерений в k -е моменты времени через $\bar{u}_1^k = u_1^k - \xi_{u1}$ и $\bar{u}_2^k = u_2^k - \xi_{u2}$ и вводя новую переменную $x = \cos \psi$, уравнения (8) приведем к виду

$$x^2 - 2\lambda_1^k \lambda_2^k x + (\lambda_1^k)^2 + (\lambda_2^k)^2 - 1 = 0, \quad (9)$$

$$\lambda_1^k = \bar{u}_1^k (\bar{U}_1^k)^{-1}, \quad \lambda_2^k = \bar{u}_2^k (\bar{U}_2^k)^{-1}, \quad (10)$$

где $\bar{U}_{1,2}^k$ - переменные значения амплитуд ДЧВ (в моменты $t = t_k$), вычисляемые с помощью формул (6') на основании информации ДЧВ о числе оборотов вала.

Окончательное выражение для вычисления значения фазового сдвига ψ^k между сигналами двух датчиков по любому k -му замеру, определенное как решение уравнения (9), принимает вид:

$$\psi^k = \arccos \lambda_1^k \lambda_2^k \{1 + \sqrt{[1 - (\lambda_1^k)^{-2}][1 - (\lambda_2^k)^{-2}]}\}. \quad (11)$$

Последующая статистическая обработка множества значений $\psi^k, k=\overline{1, N}$, приводящая к получению оценки на принятом интервале идентификации $T_{ид} = 0.1 \text{ с}$:

$$\hat{\psi} = N^{-1} \sum_{k=1}^N \psi^k, \quad (12)$$

совпадает с процедурой, подробно изложенной в [1].

Оценка угла скручивания вала при этом

$$\delta\hat{\alpha}_T = \hat{\psi} n^{-1} \quad (13)$$

с вычислением момента, передаваемого СТ

$$\hat{M}_T = k_{кр} \delta\hat{\alpha}_T. \quad (14)$$

4. Адаптивный подход к идентификации угла скручивания на основе двух эталонных моделей

Непрерывный аналог сигналов (7) имеет вид:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U \sin(\omega t + \psi_0) + \xi_1(t), \\ u_2(t) &= U \sin(\omega t + \psi_0 + \psi) + \xi_2(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где $U = k_{\omega} \omega_u, \omega = \omega_u, \xi_1(t) = \xi_{u1}(t)$,

$$\xi_2(t) = \xi_{u2}(t),$$

ψ_0 - фазовый сдвиг сигналов при $t = t_0$,

t_0 - начало рассмотрения сигналов (15).

В [1] приведён вывод адаптивного алгоритма оценивания угла скручивания $\delta\hat{\alpha}_T$. Сущность алгоритма оценивания заключалась в том, что наряду с сигналами $u_1(t)$, $u_2(t)$ формировался сигнал ЭМ $u_M(t)$

$$u_M(t) = U \sin(\omega t + \psi_0 + r), \quad (16)$$

где величина фазового сдвига r могла целенаправленно изменяться по некоторому закону в зависимости от доступной измерению информации. Если предположить, что момент включения ЭМ каким-то образом синхронизирован с сигналами (15), то, устраняя ошибку рассогласования между $u_2(t)$ в (15) и $u_M(t)$ в (16), надлежащим изменением величины $r = r(t)$ можно достигнуть желаемого результата $r(t) = \psi$. Такой надлежащий алгоритм изменения $r(t)$ в работе [1] был получен на основе принципа построения адаптивных систем с ЭМ и прямого метода Ляпунова.

Однако отмеченное условие синхронизации требует своего решения.

В настоящей работе предлагается задачу синхронизации сигналов датчиков (15) и ЭМ (16) исключить на основе использования двух ЭМ

$$\begin{aligned} u_{1M}(t) &= U_M \sin(\omega_M t + r_1), \\ u_{2M}(t) &= U_M \sin(\omega_M t + r_2), \end{aligned} \quad (17)$$

где r_1 изменяется с целью свести ошибку рассогласования $\varepsilon_1 = u_1(t) - u_{1M}(t)$ к нулю или минимально возможной величине, при которых можно считать равенство $r_1(t) = \psi_0$ справедливым с определённой степенью точности. Аналогично r_2 изменяется с целью сведения ошибки рассогласования $\varepsilon_2 = u_2(t) - u_{2M}(t)$ к нулю и достижению равенства $r_2(t) = \psi_0 + \psi$. В таком случае искомая величина ψ получается из равенства $\psi = r_2(t) - r_1(t)$.

Для получения алгоритмов изменения $r_1 = r_1(t)$ и $r_2 = r_2(t)$ в (17) применим, в отличие от [1], более простой и наглядный метод градиента. Поскольку метод аналогичен для настраиваемых коэффициентов r_1 и r_2 , проведём его к уравнениям

$$u(t) = U \sin(\omega t + \varphi), u_M(t) = U_M \sin(\omega t + r). \quad (18)$$

Выберем в качестве минимизируемого функционала

$$I = \varepsilon^2(t), \varepsilon(t) = u_M(t) - u(t), \quad (19)$$

и, в соответствии с методом градиента настраиваемый параметр r будем изменять по соотношению:

$$\frac{dr(t)}{dt} = -\lambda \frac{\partial I}{\partial r}. \quad (20)$$

Из (18) – (20) получим искомый алгоритм в виде

$$\frac{dr(t)}{dt} = -2\lambda \cdot U \varepsilon(t) \cos(\omega t + r). \quad (21)$$

5. Сопоставительный анализ качества функционирования предложенных алгоритмов и выявление областей их применимости

Для решения указанной в заголовке задачи в операционной среде MATLAB & Simulink был сформирован компьютерный имитатор (модуль), блок-схема которого приведена на рис. 2.

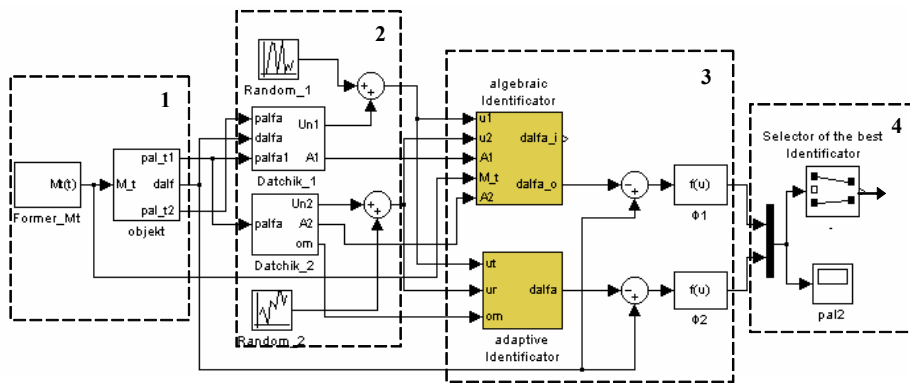


Рис. 2. Блок-схема компьютерного имитатора стэнда для решения задачи сравнения двух методов идентификации момента свободной турбины ТВД.

Модуль состоит из четырех основных частей. Первая из них отображает программную реализацию заданной уравнениями (1) модели трансмиссии ТВД, входными воздействиями для которой является момент, прикладываемый к диску СТ. Вторая часть имитирует работу двух индукционных датчиков оборотов вала свободной турбины, установленных на его противоположных концах. Здесь же моделируются помехи в канале измерений, задаваемые в виде гауссовского шума с варьируемой дисперсией. Третья часть содержит в себе две параллельно подключенные к выходу блока датчиков имитационные модели предложенных типов идентификаторов (алгебраический и адаптивный с эталонной моделью), выходы которых, сформированные в виде ошибок

$$\varepsilon_{alg} = N^{-1} \sum_{i=1}^N |\varepsilon_i| \text{ и } \varepsilon_{ad} = T^{-1} \int_0^T |\varepsilon(t)| dt,$$

определяющих среднюю точность оценивания идентифицируемого параметра, поступают далее на вход сравнивающего устройства (4-я часть), где по заранее сформулированным критериям осуществляется ранжирование выходов сравниваемых идентификаторов.

Сравнительный анализ двух рассмотренных в работе подходов к оцениванию угла скручивания упругого вала СТ осуществляется на примере модели трансмиссии ТВД, значения коэффициентов которой близки соответствующим параметрам авиационного двигателя Д-18Т [2]:

$$J_{B1} = 200 \text{ кгм}^2, J_{B2} = 150 \text{ кгм}^2, J_T = 10 \text{ кгм}^2, \\ c = 0,9 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{м/рад}, i_1 = 4, i_2 = 5.$$

В качестве номинального установившегося режима, относительно которого осуществляются вариации, необходимые для исследования динамики функционирования идентификаторов, принят режим, характеризующийся следующим набором параметров:

$$M_{T0} \approx 10^5 \text{ н} \cdot \text{м}, \omega_{CT0} \approx 840 \text{ рад/с}, M_B = k_B \alpha_B^2, k_B = 5.$$

Имитационная модель ДЧВ вала реализует уравнения (7), в которых фазовый сдвиг ψ вводится с помощью координаты угла кручения, взятой из модели объекта и преобразованной по уравнению $\psi = n\delta\alpha_T$, $n=16$.

Проведенное с помощью компьютерного имитатора исследование качества функционирования предложенных алгоритмов позволяют сделать ряд выводов:

1. Точность оценивания координаты ψ зависит от величины дисперсии шума измерения. Однако его влияние на точность при использовании адаптивного метода идентификации на порядок слабее, чем в случае алгебраического подхода.
2. Динамическая точность слежения, определяемая как запаздывание формирования оценки периодического сигнала $\psi = \psi[M_T(t+T)]$, оказалась более высокой для адаптивного алгоритма (рис. 3 а), хотя и в случае применения алгебраического подхода точ-

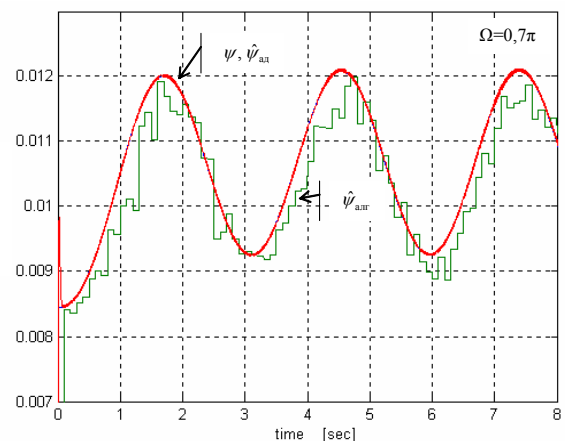


Рис. 3 а. Точность слежения за быстроменяющимся сигналом

ность слежения за периодическим сигналом в диапазоне десятикратного изменения его частот оставалась не хуже 1.5% от контролируемой величины ψ (рис. 3б)

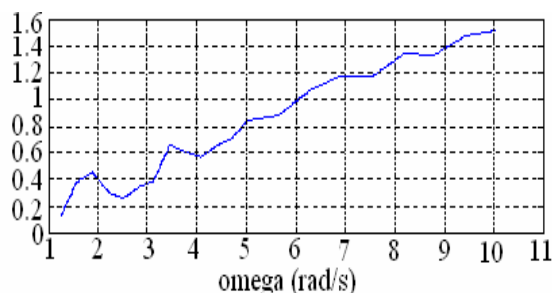
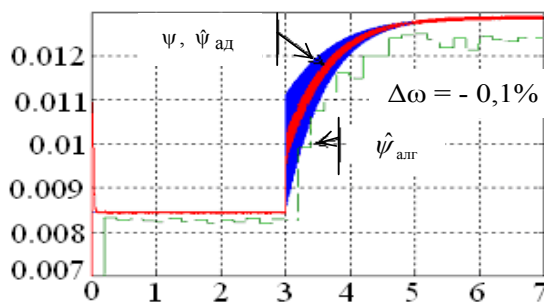


Рис. 3 б. Рост ошибки слежения алгебраического алгоритма за быстроменяющимся сигналом с увеличением частоты сигнала

3. Необходимость использования параметра $\bar{\omega}_T$ при реализации адаптивного алгоритма поставила задачу исследования влияния на точность и устойчивость обоих алгоритмов величины отклонения $\Delta\bar{\omega}_T$ используемого значения от истинного. В результате исследования была выявлена зависимость адаптивного алгоритма от неточности задания $\bar{\omega}_T$: в области относительно малых значений $\Delta\bar{\omega}_T = (0.1 \div 0.8)\% \bar{\omega}_T$ алгоритм устойчив, хотя точность оценивания снижается с ростом $\Delta\bar{\omega}_T$. При $\Delta\bar{\omega}_T > 0.85\% \bar{\omega}_T$ адаптивный алгоритм становится неустойчивым. Система оценивания с помощью алгебраического подхода достаточно груба по отношению к неточности задания $\bar{\omega}_T$.

Результаты моделирования, поясняющие сказанное в данном разделе, приведены на рис. 4.



Фазовый сдвиг сигналов

Рис. 4. Область нормальной работы обоих алгоритмов

6. Заключение

Проанализированы некоторые преимущества и недостатки двух возможных подходов к оценке крутящего момента на валу свободной турбины ТВД, основанные на использовании сигналов с выходов двух штатных ДЧВ вала, установленных на его противоположных концах.

Адаптивный метод идентификации позволяет получать более точные оценки контролируемой величины и имеет достаточно высокое быстродействие, что дает этому способу предпочтение при использовании в системе упреждающего аварийного отключения двигателя в ситуации, предшествующей обрыву вала.

Алгебраический подход представляется относительно более простым в программной реализации и обладает, по-видимому, большей грубостью по отношению к погрешностям измерения частоты вращения вала, что делает его более надежным при использовании в системе управления двигателем для задач, не требующих высокой точности текущих значений M_T .

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: Сб. науч. тр.- Харьков: ХАИ, 2002.- Вып. 31. Двигатели и энергоустановки.- С. 197-201.
2. Контроль технического состояния двигателя Д-18Т на самолете Ан-124 / Ю.М. Баландин, А.А. Белостоцкий, В.Г. Волков, С.В. Епифанов // Вопросы авиац. науки и техники. Сер. Авиационное двигателестроение. Диагностирование авиационных ГТД.- 1988.- Вып. 2 (1259).- С. 34-42. (ЦИАМ).

Поступила в редакцию 12.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.