

УДК 621.5

В.М. ГЛУМОВ, С.Д. ЗЕМЛЯКОВ, В.Ю. РУТКОВСКИЙ, В.М. СУХАНОВ

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

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ ВАЛА ТВД С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА¹

Рассмотрена возможность повышения точности определения угла скручивания вала свободной турбины ТВД (и, как следствие, передаваемого валом момента турбины) при высоком уровне помех на основе введения узкополосного адаптивного фильтра. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов оценивания угла скручивания вала на установившихся и переходных режимах работы ТВД.

упругая трансмиссия ТВД, оценивание, адаптивный фильтр

Введение и постановка задачи

В [1] показано, что улучшенный адаптивный алгоритм оценивания угла скручивания вала при наличии помех типа белого шума ($\sigma = 5 \div 10\%$ от амплитуды выходных сигналов $U_{\bar{x}}$) и при угле скручивания $\delta\alpha_T \geq 0,2^\circ$ обеспечивает точность порядка 2%. Алгебраический алгоритм дает точность на порядок меньшую. Следует учитывать, что для многих типов двигателей дисперсия шума может быть значительно выше, что существенно снижает точность оценивания. Кроме того, в выходных сигналах датчиков частоты вращения (ДЧВ) присутствуют другие типы помех, вызываемых крутильными колебаниями вала и вибрациями из-за эксцентриситета вращающихся масс двигателя, что в итоге приводит к существенному снижению точности оценивания. В связи с этим понятна актуальность задачи повышения точности оценивания угла скручивания за счет снижения уровня помех в составе полезного сигнала методами фильтрации. При этом неконтролируемое изменение параметров шума из-за деградации различных элементов трансмиссии в процессе эксплуатации двигателя требует применения методов адаптивной фильтрации.

1. Адаптивный алгоритм определения угла скручивания вала**на основе системы с моделью**

Принимая адаптивный подход к определению угла скручивания вала в качестве основного при рассмотрении вопросов повышения точности системы оценивания, коротко остановимся на принципиальных моментах формирования адаптивного алгоритма оценивания на основе градиентного метода синтеза [2].

В качестве эталонной модели принимается звено чистого запаздывания с изменяемой величиной τ . Если на вход такой эталонной модели подать сигнал $u_{\omega} = U_{\omega} \sin n\bar{\omega}_T t$, то на выходе получим сигнал вида

$$u_M(t) = U_{\omega} \cos(n\bar{\omega}_T t - n\bar{\omega}_T \tau). \quad (1)$$

При $r \neq \tau$ между сигналами $u_M(t)$ и $u_{\omega}(t)$ возникает рассогласование, определяемое разностью

$$\varepsilon(t) = u_M(t) - u_{\omega}(t), \quad (2)$$

которая обнуляется, если за счет изменения τ добиться равенства $r = \tau$. В этом случае угол скручивания вала $\delta\alpha_T$, можно найти из соотношения $\delta\alpha_T = \bar{\omega}_T r$. В соответствии с градиентным методом

[2] формируется функция $J = \varepsilon^2(t)$, и алгоритм адаптации находится из соотношения $\frac{dr}{dt} = -\lambda \frac{dy}{dr}$,

где $\lambda = const > 0$. Отсюда, с учетом (2) искомый адаптивный алгоритм получается в виде

$$\frac{dr}{dt} = \rho \varepsilon(t) u_M^*(t), \quad (3)$$

где $\rho = 2\lambda n \bar{\omega}_T$ и $u_M^*(t) = U_{\bar{x}} \cos(n\bar{\omega}_T t - n\bar{\omega}_T r)$.

Реализация сигнала $u_M^*(t)$ решается подачей сигнала (1) $u_M(t)$ на звено чистого запаздывания.

2. Синтез адаптивного фильтра для выделения полезного сигнала

Учитывая, что полезная информация, используемая для оценивания угла скручивания, содержится в высокочастотном сигнале $u_\omega = U_{\bar{\omega}} \sin n\bar{\omega}_T t$ ($\omega_u = n\bar{\omega}_T$ – несущая частота датчика), то для повышения точности оценивания целесообразно применять узкополосные фильтры. По указанным выше причинам фильтры должны быть адаптивными.

Так как ω_u является измеряемой величиной, то контур адаптации целесообразно строить по разомкнутому циклу. Уравнение адаптивного узкополосного фильтра может быть записано в виде

$$\ddot{u}_\phi + 2\zeta_\phi \omega_u(t) \dot{u}_\phi + \omega_u^2(t) u_\phi = 2\zeta_\phi \omega_u(t) \dot{u}_\omega, \quad (4)$$

где u_ϕ – выход фильтра; u_ω – выход датчика частоты вращения; $\zeta_\phi \ll 1$ – параметр фильтра, определяющий "остроту" пика амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра на частоте $\omega_u(t)$, которая является настраиваемой величиной в типичном для нее диапазоне $\omega_u(t) = 600 \div 1000 \text{ c}^{-1}$.

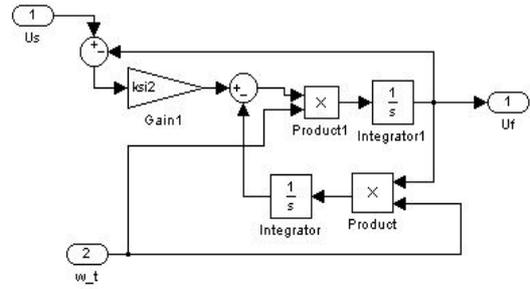
АЧХ узкополосного фильтра с настраиваемой резонансной частотой определяется выражением

$$A(\omega, t) = \frac{2\zeta_\phi \omega_u(t) \omega}{\sqrt{(\omega_u^2(t) - \omega^2)^2 + 4\zeta_\phi^2 \omega_u^2(t) \omega^2}}. \quad (5)$$

Схема реализации в среде Matlab-Simulink адаптивного узкополосного фильтра приведена на рис. 1.

Здесь на первый вход подается сигнал $u_\omega \ll U_s$ на второй $\omega_u \ll w_t$. $u_\phi \ll U_f$ – выходной сигнал фильтра.

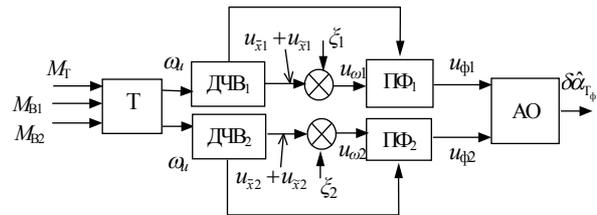
Рис. 1. Схема адаптивного узкополосного фильтра



3. Метод решения и исследование динамики системы оценивания угла скручивания вала

Задача повышения точности оценивания угла скручивания вала изучалась с помощью цифрового моделирования. Блок-схема моделирования приведена на рис. 2, где обозначено: Т – трансмиссия, АО – алгоритм оценивания, ПФ – узкополосные фильтры на выходах ДЧВ.

Рис. 2. Блок-схема оценивания угла скручивания вала трансмиссии



Исследование динамики проводилось при шумах типа дискретных, нормально распределенных величин с нулевыми средними величинами и среднеквадратическими отклонениями $\sigma = (0,1 \div 2,0)$. Рассматривались стационарные и нестационарные ($M_T, n_T = Var$) режимы работы ТВД, на которых осуществлялось высокоточное оценивание параметра $\delta \hat{\alpha}_{T\phi}$ с использованием узкополосного адаптивного фильтра ($\zeta_\phi = 0,03$).

Функционирование фильтра при переменной частоте вращения вала $\omega_T(t) = \omega_u(t) n^{-1}$ иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 3.

На вход фильтра которого поступает сигнал $u_\omega = 5,2 \sin \omega_u t + 0,2 \sin \bar{\omega}_T t + \xi$, где $\bar{\omega}_T = 150 \text{ c}^{-1}$ – частота крутильных колебаний. Шум ξ имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,84$.

Несущая частота с момента $t = 0,005$ с увеличивается по линейному закону.

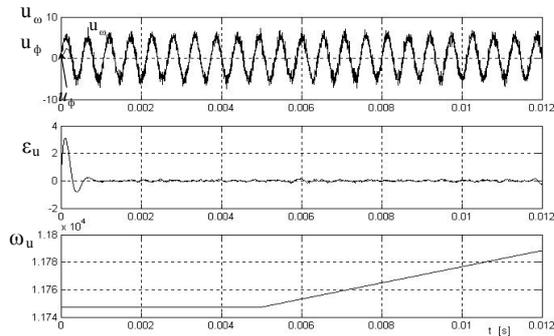


Рис. 3. Динамика работы полосового фильтра при переменной частоте ω_u сигнала u_x

Как видно из осциллограммы, спустя $\Delta t = 0,001$ с (начальное значение $u_{\phi 0} = 0$), выход фильтра u_{ϕ} практически безошибочно ($\epsilon_u = u_{\omega} - u_{\phi} \approx 0$) воспроизводит входной сигнал $u_{\omega} = 5,2 \sin \omega_u t$, что говорит о несущественности запаздывания фильтра. Изменение частоты практически не влияет на качество его функционирования, что объясняется адап-

режимам; "Former Cw" – блок, воспроизводящий изменение коэффициента жесткости вала на кручение c_{ω} , используемого для оценки состояния вала; "Dynamic GTD" – блок, воспроизводящий уравнения движения упругой трансмиссии; ДЧВ1, ДЧВ2 – блоки формирования выходных сигналов датчиков; Random 1, Random 2 – блоки формирования помех ξ_1, ξ_2 ; polos-filtr 1, polos-filtr 2 – адаптивные узкополосные фильтры; АО 1, АО 2 – блоки адаптивного и алгебраического алгоритмов оценивания фазового сдвига сигналов ДЧВ.

При оценивании координаты $\delta\alpha_T$ использовался описанный в разделе 1 улучшенный адаптивный алгоритм [3].

Исследовалось влияние параметра ζ_{ϕ} на точность оценивания при различных уровнях помех на установившихся и переходных режимах ТВД.

Результаты опорного моделирования процессов оценивания координаты $\delta\alpha_T$ при отсутствии помех

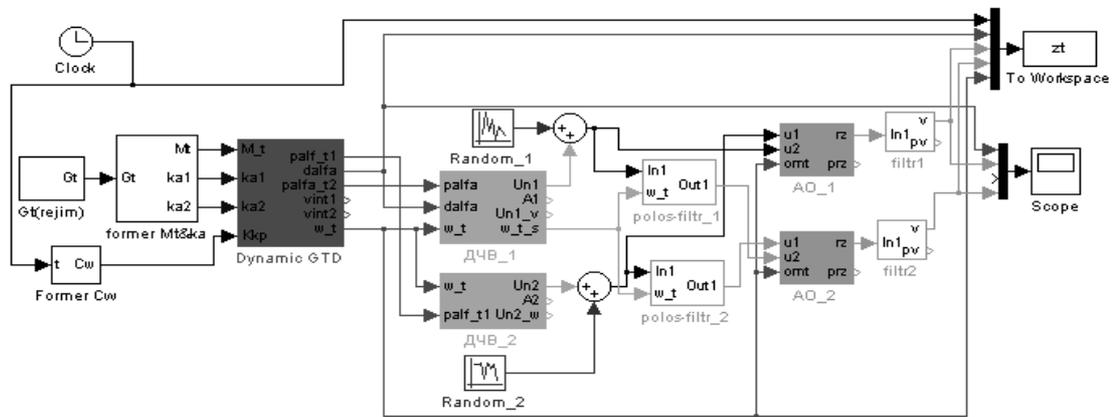


Рис. 4. Блок-схема моделирования системы оценивания угла скручивания вала с учетом адаптивного узкополосного фильтра

тивными свойствами процесса перестройки настраиваемого коэффициента фильтра.

Схема моделирования системы оценивания угла скручивания вала с учетом адаптивного узкополосного фильтра приведена на рис. 4. Здесь обозначено: "former Mt&ka" – формирователь моментов свободной турбины M_T и моментов винтов M_{Bk} ; Gt (regim) – блок, воспроизводящий расход топлива по

($\xi_1, \xi_2 = 0$) показали, что ошибка оценивания для установившегося режима практически равна нулю. На переходных режимах работы ТВД, характеризующихся нарастанием $\delta\alpha_T$ со скоростью $\delta\dot{\alpha}_T \approx 0,2^\circ/\text{с}$, соответствующей предельно допустимой скорости увеличения крутящего момента турбины, инерционность фильтра вызывает появление установившейся ошибки ($\epsilon \approx 0,06^\circ$).

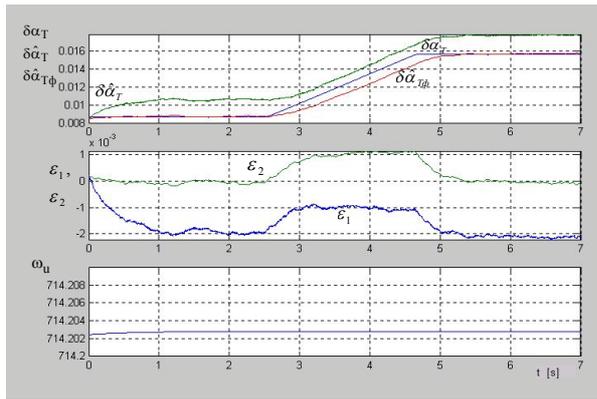


Рис. 5. Результаты оценивания при $\sigma=0,63$; $\zeta_\phi=0,01$

На рис. 5 представлены осциллограммы процесса оценивания при тех же условиях, что и в предыдущем случае, но в выходных сигналах датчиков присутствуют нормально распределенные помехи с нулевыми средними значениями и среднеквадратическими отклонениями $\sigma = 0,63$. Видно, что без использования фильтра в установившемся режиме ошибка оценивания составляет $\varepsilon_1 \approx 0,11^\circ$.

Наличие фильтра снижает ошибку оценивания до $|\varepsilon_2| < 0,0057^\circ$ т.е. практически до нуля. Точность оценивания на переходном режиме ($\delta\dot{\alpha}_T \approx 0,2^\circ/\text{с}$) не ухудшается по сравнению с результатами, опорного моделирования.

На осциллограммах рис. 5 и далее использованы обозначения: $\delta\alpha_T$ – угол скручивания вала; $\delta\hat{\alpha}_T$ – оценка угла скручивания вала в схеме без фильтра; $\delta\hat{\alpha}_{T\phi}$ – оценка угла скручивания вала при наличии адаптивного узкополосного фильтра; $\varepsilon_1 = \delta\alpha_T - \delta\hat{\alpha}_T$, $\varepsilon_2 = \delta\alpha_T - \delta\hat{\alpha}_{T\phi}$ – ошибки оценивания.

Результаты оценивания угла скручивания вала при возрастании интенсивности шума ($\sigma = 0,84$, $\sigma = 1,73$) показали, что без фильтра ошибка ε_1 при $\delta\alpha_T = \text{const}$ увеличилась почти вдвое ($|\varepsilon_1|_{\max} = 0,2^\circ$), что составило 43%, т.е. система оценивания без фильтра при таком уровне помех становится неработоспособной.

Использование адаптивного фильтра восстанавливают работоспособность системы оценивания, причем ошибки ε_2 достаточно мало отличаются от случая $\sigma = 0,63$. При шуме, близком к амплитуде полезного сигнала ($\sigma = 0,33 U_{\bar{x}}$) точность оценивания значительно ухудшается ($|\varepsilon_2|_{\max} \approx 0,02^\circ$, что составляет 5% $\delta\alpha_T$) даже при наличии фильтра. Без фильтра алгоритм оценивания становится неустойчивым.

Пример влияния параметра фильтра ζ_ϕ на точность оценки угла скручивания иллюстрирует осциллограмма, показанная на рис. 6.

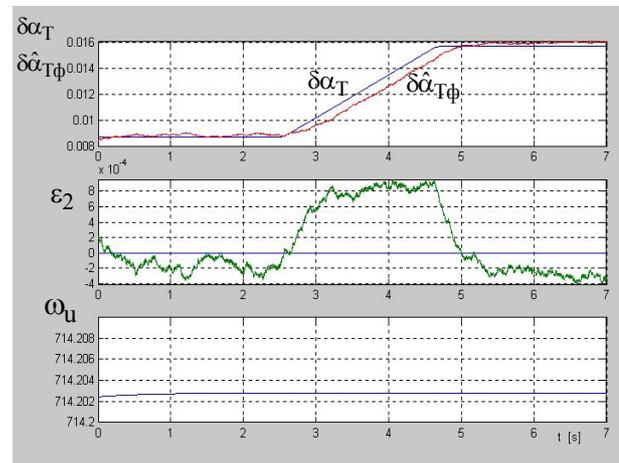


Рис. 6. Результаты оценивания при $\sigma = 0,84$; $\zeta_\phi = 0,5$

При моделировании параметры шумов и системы оценивания оставлены теми же, что и в предыдущем опыте (рис. 5). При увеличении коэффициента затухания фильтра до значения $\zeta_\phi = 0,5$ его полоса пропускания становится излишне широкой и ошибка ε_2 значительно возрастает. Это следует из анализа процесса оценивания, представленного на рис. 6. Видно, что при $\delta\alpha_T = \text{const}$ имеет место ошибка $|\varepsilon_2|_{\max} \approx 0,022^\circ$, т.е. примерно 2 ÷ 5% от текущего значения величины $\delta\alpha_T$.

Исследование результатов моделирования процессов оценивания при других значениях параметра

фильтра $\delta\alpha_T$ показало, что оптимальное решение задачи фильтрации обеспечивается при $\zeta_\phi \approx 0,02 \div 0,03$.

Точность оценивания на переходных режимах определяется влиянием изменения скорости нарастания угла скручивания вала, зависящего от градиента увеличения передаваемого валом момента турбины \dot{M}_T . Этот эффект иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 7. Здесь при увеличении \dot{M}_T по сравнению с опорным значением в 1,8 раза ($\delta\dot{\alpha}_T \approx 0,4 \text{ }^\circ/\text{с}$) динамическая ошибка выросла практически в 2 раза, ($\varepsilon_2 \approx 0,11^\circ$).

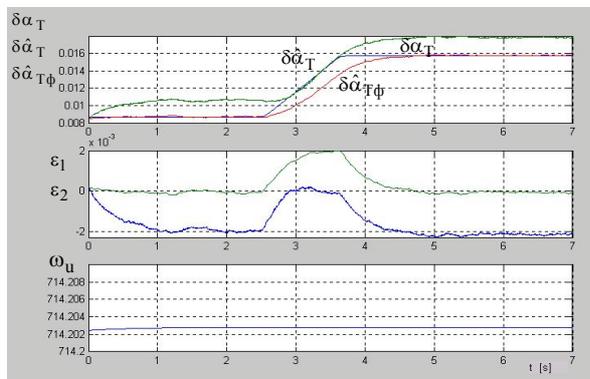


Рис. 7. Результаты оценивания при повышенной скорости нарастания угла $\delta\alpha_T$, $\sigma = 0,63$; $\zeta_\phi = 0,01$

На рис. 8 приведен процесс оценивания при переменной частоте вращения вала свободной турбины с учетом шума $\sigma = 0,84$, ($\zeta_\phi = 0,05$). Видно, что ошибка оценивания даже при наличии в системе адаптивного узкополосного фильтра, существенно увеличилась ($|\varepsilon_2|_{\max} \approx 0,011^\circ$) по сравнению со случаем $\omega_u = const$. В большей степени это связано с увеличенным значением коэффициента затухания фильтра ($\zeta_\phi = 0,05$), хотя может объясняться и тем, что при высоком уровне помех ($\sigma = 0,84$) градиентный алгоритм оценивания угла скручивания работает нестабильно.

Тем не менее, при таких помехах система оценивания, не использующая фильтра, становится вообще неработоспособной.

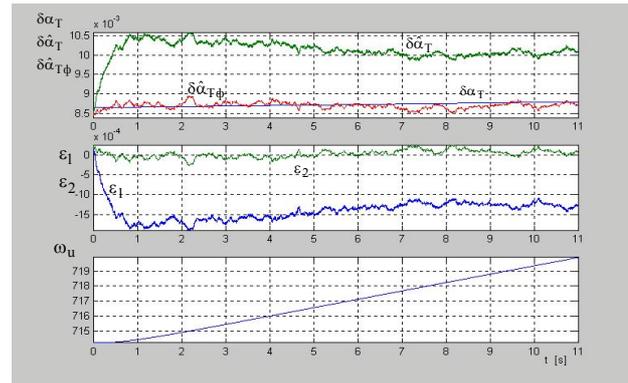


Рис. 8. Результаты оценивания при $\sigma = 0,84$; $\zeta_\phi = 0,05$ и переменной частоте вращения вала n_T

Заключение

Предложенный в работе адаптивный узкополосный фильтр при $\zeta_\phi = 0,01 \div 0,03$ значительно снижает ошибки даже при очень высоком уровне помех, обеспечивая точность оценивания порядка одного процента от текущего значения $\delta\alpha_T$.

Литература

1. Суханов В.М., Глузов 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. – С. 177 – 183.
2. Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И.Н., Земляков С. Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем. – М.: Машиностроение, 1972.
3. Рутковский В.Ю., Земляков С.Д., Глузов В.М., Епифанов С.В. Информативные признаки, предшествующие обрыву вала трансмиссии ТВД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 7/15. – С. 174 – 178.

Поступила в редакцию 6.06.2005

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