

УДК 621.5

В.М. ГЛУМОВ, В.Ю. РУТКОВСКИЙ, В.М. СУХАНОВ*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, Москва, Россия***СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТРАНСМИССИЙ***

Предложена методика оценивания вектора параметров технического состояния многокомпонентных трансмиссий, основанная на фильтрации сигнала штатного датчика частоты вращения вала с использованием опорных моделей подсистем декомпозированной математической модели трансмиссии. Приведен пример реализации схемы компьютерного моделирования системы оценивания некоторых параметров многокомпонентной трансмиссии, определяющих в известной степени ее техническое состояние.

ТВД, многокомпонентная упругая трансмиссия, мониторинг, адаптивная фильтрация, оценивание**Введение и постановка задачи**

Предметом исследования является задача наблюдения за техническим состоянием многокомпонентной трансмиссии турбовинтового авиационного двигателя (ТВД), передающей момент вращения от свободной турбины (СТ) к винтовой группе, с помощью дополнительной обработки сигнала штатного датчика частоты вращения (ДЧВ) вала СТ, на задний (связанный с диском свободной турбины) конец которого, напрессована индукторная шестерня датчика. Изгибные и крутильные деформации вала, ускоряющие износ подшипниковых опор, увеличение зазора и снижение качества смазки в процессе эксплуатации двигателя, со временем приводят к ухудшению характеристик передачи и в пределе могут привести к аварийной ситуации, заключающейся в обрыве вала турбины. Понятно, что при исследовании проблемы создания системы контроля, диагностики и защиты роторной части ТВД должна использоваться более полная модель многовального двигателя, например, Д-27 [1], позволяющая учитывать более широкий круг параметров, влияющих на безопасность и долговечность нор-

мального функционирования силовой трансмиссии двигателя.

В данной работе, на основе введенной в [2] модели упругой многокомпонентной трансмиссии, в достаточной степени учитывающей специфические свойства рассматриваемого класса систем (такие, например, как изгибные колебания вала, эксцентриситет ротора, упругость опоры и податливость масляной пленки, износ подшипниковых опор), разрабатывается методика оценивания группы жизненно важных параметров трансмиссии, влияющих на качество и безопасность ее функционирования.

1. Модель сигналов ДЧВ, установленного в концевой части упругого вала СТ

Введем модель сигналов стандартного ДЧВ магнитоиндукционного типа, компоненты которого, выраженные через изменяющиеся во времени обобщенные координаты упругой трансмиссии, будут содержать информацию о процессах в ее отдельных подсистемах. Это позволит после фильтрации выходного сигнала ДЧВ с использованием моделей выделенных в [2] подсистем, оценить определяющие характер процесса текущие значения коэффициентов, характеризующих техническое состояние контролируемых узлов трансмиссии. Принимая во

*Работа выполнена при финансовой поддержке Отделения ЭМПИУ РАН (Пр № 18)

внимание, что штатный ДЧВ имеет единственный считывающий статорный полюс, при решении данной задачи вместо введенной в [2] пространственной схемы упругих колебаний элементов трансмиссии можно воспользоваться схемой плоских колебаний, соответствующей моментам прохождения полюса индукторной шестерни ДЧВ мимо статорного полюса, условно совпадающего с плоскостью чертежа (рис. 1).

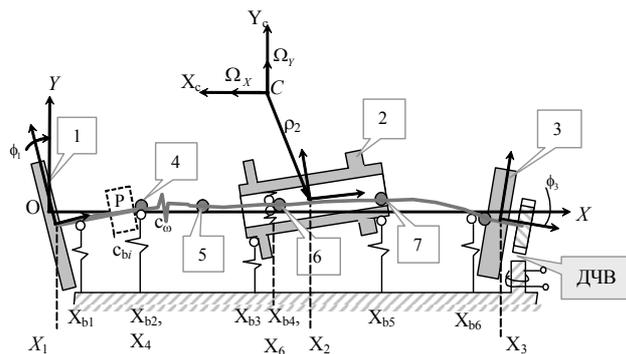


Рис. 1. Конфигурация упругой трансмиссии ТВД с ДЧВ

Рассматриваемая идеализированная модель трансмиссии содержит три инерционных тела 1-3, из которых: тело 1 – пара соосных винтов с жесткими валами и редуктором, замененные телом с эквивалентной массой и моментом инерции; тело 2 – жесткий, имеющий осевую полость, ротор турбины низкого давления; тело 3 – турбинный диск ротора СТ, связанный с винтами посредством длинного упругого вала и редуктора. Каждое из указанных тел в отдельных случаях может иметь осевую несбалансированность, характеризующуюся эксцентриситетом e_k . Реальный вал СТ заменен известным способом [3] четырьмя сосредоточенными массами, расположенными определенным образом [2] вдоль невесомого упругого стержня, совершающего вращательно-колебательные движения в осевой полости ротора ТНД. Податливость вала СТ на кручение обозначена через c_{ω} . Учитывается конечная жесткость c_{bk} масляной пленки в зазорах подшипнико-

вых опор валов, допускающих малые радиальные смещения оси вала. Положения материальных тел трансмиссии в системе осей OXY , определяется с помощью конечного числа обобщенных координат $q_k = (y, \phi_y, \alpha)_k$, $k = \overline{1,7}$. Координаты y_k при этом определяют упругие радиальные смещения инерционных тел и сосредоточенных масс вала СТ по отношению к оси OX ; координаты ϕ_k , ($k = \overline{1,3}$) определяют угловые отклонения соответствующих тел в рассматриваемой плоскости движения; координаты α_k , ($k = \overline{1,3}$) (и их скорости $\dot{\alpha}_k$) задают вращение тел трансмиссии относительно продольной оси OX .

В недеформированной и неизношенной трансмиссии выходной сигнал ДЧВ индукционного типа имеет вид периодической функции:

$$u_{\bar{\omega}}(\bar{\omega}_T) = U(\bar{\omega}_T) \sin z\bar{\omega}_T t, \quad (1)$$

где $U(\bar{\omega}_T) = U_{\bar{\omega}} = k_{\Phi} z \bar{\omega}_T$;

$\bar{\omega}_T = 2\pi n$ – угловая скорость вращения вала;

$k_{\Phi} = 2w\tilde{\Phi}_m$;

z – число полюсов индукторной шестерни ДЧВ;

w – число витков катушки;

$\tilde{\Phi}_m$ – амплитуда переменной составляющей магнитного потока.

Крутильные колебания вала, возникающие при ограниченной жесткости на кручение ($c_{\omega} \neq \infty$), как показано в [4], добавляют в (1) составляющую $u_{\bar{\omega}}(\tilde{\omega}_T) = U(\tilde{\omega}_T) \sin \tilde{\omega}_T t$, где $U(\tilde{\omega}_T) = U_{\bar{\omega}} = \tilde{\omega}_T \tilde{\alpha}_{Tm} B w$ – амплитуда ЭДС (B – индукция в зазоре), наводимой вибрационной компонентой $\tilde{\alpha}_T(t) = \tilde{\alpha}_{Tm} \sin \tilde{\omega}_T t$, ($\tilde{\alpha}_{Tm}$ – амплитуда колебаний).

Изгибные колебания вала ϕ_3 в рассматриваемом сечении установки индукторной шестерни и его упругие радиальные смещения y_3 в пределах масляного зазора подшипниковой опоры приводят к из-

менению геометрического объема воздушного зазора v_δ , что меняет его магнитное сопротивление и, следовательно, величину магнитной индукции, определяющую амплитуду сигнала (1). Используя рис. 1, нетрудно заметить, что объем воздушного зазора в момент совмещения полюсов индуктора и статора с учетом рассматриваемых двух типов упругих смещений оси вала может быть определен по формуле

$$v_\delta(t) = v_{\delta 0} + s_\delta [y_3(t) + k_v \phi_3(t)], \quad (2)$$

где $v_{\delta 0}$ – номинальный объем индукционного зазора при отсутствии деформаций;

s_δ – площадь полюсного наконечника;

$k_v < 1$ – коэффициент влияния упругого углового сдвига ϕ_3 полюса индуктора на величину изменения объема в зазоре. Величины y_3, ϕ_3 являются периодическими функциями времени, частота и амплитуда которых определяется в первом приближении на основании решения подсистемы уравнений [2]:

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_1 \rangle \rightarrow m_1 [(\dot{y}_1 + \rho_{Z1} \dot{\Omega}_X + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Z) - \\ - e_1 (\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1)] + \\ + c_{m1,2} [2y_1 - (2X_1 - X_{b1} - X_{b2}) \phi_{z1}] = mg, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $c_{m1,2} = c_{m1} = c_{m2}$;

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_1 \rangle \rightarrow m_1 [(\dot{z}_1 + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) - \\ - e_1 (\ddot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \cos \alpha_1)] + \\ + c_{m1,2} [2z_1 - (2X_1 - X_{b1} - X_{b2}) \phi_{y1}] = 0; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\alpha}_1 \rangle \rightarrow (J_{x1} + m_1 e_1^2) \ddot{\alpha}_1 + m_1 e_1 \{(\dot{y}_1 + \rho_{Z1} \dot{\Omega}_X + \\ + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Z) \cos \alpha_1 - (\dot{z}_1 + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) \sin \alpha_1 - \\ - 2\dot{\alpha}_1 [(\dot{y}_1 + \rho_{Z1} \dot{\Omega}_X + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Z) \sin \alpha_1 + (\dot{z}_1 + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Y + \\ + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) \cos \alpha_1]\} - c_{\omega p} (\alpha_3 - i_p \alpha_1) = -M_{a1}; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{y1} \rangle \rightarrow J_{y,z1} (\ddot{\phi}_{y1} + \ddot{\Omega}_Y) + c_{m1,2} \{[(X_1 - X_{b1})^2 + \\ + (X_{b2} - X_1)^2] \phi_{y1} - (2X_1 - X_{b2} - X_{b1}) z_1\} = 0; \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{z1} \rangle \rightarrow J_{y,z1} (\ddot{\phi}_{z1} + \ddot{\Omega}_Z) + c_{m1,2} \{[(X_1 - X_{b1})^2 + \\ + (X_{b2} - X_1)^2] \phi_{z1} - (2X_1 - X_{b2} - X_{b1}) y_1\} = 0; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_3 \rangle \rightarrow m_3 [(\dot{y}_3 + \rho_{Z3} \dot{\Omega}_X + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Z) - \\ - e_3 (\ddot{\alpha}_3 \cos \alpha_3 - \\ - \dot{\alpha}_3^2 \sin \alpha_3)] + c_{m6} [y_3 - (X_3 - X_{b6}) \phi_{z3}] = m_3 g; \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_3 \rangle \rightarrow m_3 [(\dot{z}_3 + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y3} \dot{\Omega}_X) - \\ - e_3 (\ddot{\alpha}_3 \sin \alpha_3 - \\ - \dot{\alpha}_3^2 \cos \alpha_3)] + c_{m6} [z_3 - (X_3 - X_{b6}) \phi_{y3}] = 0; \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\alpha}_3 \rangle \rightarrow (J_{x3} + m_3 e_3^2) \ddot{\alpha}_3 + m_3 e_3 \{(\dot{y}_3 + \rho_{Z3} \dot{\Omega}_X + \\ + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Z) \cos \alpha_3 - (\dot{z}_3 + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y3} \dot{\Omega}_X) \sin \alpha_3 - \\ - 2\dot{\alpha}_3 [(\dot{y}_3 + \rho_{Z3} \dot{\Omega}_X + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Z) \sin \alpha_3 + (\dot{z}_3 + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Y + \\ + \rho_{Y3} \dot{\Omega}_X) \cos \alpha_3]\} + c_{\omega} (\alpha_3 - i_p \alpha_1) = M_{T3}; \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{y3} \rangle \rightarrow J_{z3} (\ddot{\phi}_{y3} + \ddot{\Omega}_Y) + \\ + c_u [(X_3 - X_{b6})^2 \phi_{y3} - (X_3 - X_{b6}) z_3] = 0; \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{z3} \rangle \rightarrow J_{y3} (\ddot{\phi}_{z3} + \ddot{\Omega}_Z) + \\ + c_{m6} [(X_3 - X_{b6})^2 \phi_{z3} - (X_3 - X_{b6}) y_3] = 0, \end{aligned} \quad (3.10)$$

полученной в результате декомпозиции полной модели многокомпонентной трансмиссии (7.1-23), приведенной и разъясненной в [2].

Вытекающая из уравнений (3) периодичность изменения координат $y_3 \approx A_{y3} \sin \omega_{y3} t$ и $\phi_3 \approx A_{\phi3} \sin \omega_{\phi3} t$, где $\omega_{y3} \approx \sqrt{c_m m_3^{-1}}$, $\omega_{\phi3} \approx \sqrt{c_u J_{z3}^{-1}}$ – собственные частоты упругих колебаний по координатам y_3, ϕ_3 приводит к соответствующему изменению величины индукционного зазора (2), его геометрической проводимости и, в конечном счете, к изменению величины магнитной индукции, напрямую влияющей на амплитуды $U_{\bar{\omega}}$ и $U_{\tilde{\omega}}$ наводимых в обмотке статорного полюса ЭДС. Последнее определяет появление на выходе ДЧВ модулированного (при $\dot{\alpha}_3 = \bar{\omega}_T = const$) двухчастотным (пропорциональным функции $v_\delta(t)$) сигналом вида:

$$\begin{aligned} u_\omega(t) = k_B v_\delta(y_3(t), \phi_3(t)) U(\bar{\omega}_T) \sin z \bar{\omega}_T t + \\ + U(\tilde{\omega}_T) \sin \tilde{\omega}_T t, \end{aligned} \quad (4)$$

где k_B – коэффициент связи изменения геометрического объема зазора с величиной его магнитной проводимости.

2. Выявление некоторых дефектов трансмиссии и наблюдение за их развитием по результатам обработки сигнала ДЧВ

Из множества элементов, входящих в роторную группу ТВД, наиболее подвержены износу подшипниковые опоры вала свободной турбины. Причиной этого являются повышенные динамические нагрузки на опоры со стороны вращающегося нежесткого вала.

Процесс износа взаимодействующих поверхностей пары вращения (вал – подшипник) характеризуется постепенным увеличением зазора h , предназначенного для поддержания устойчивой масляной пленки, предотвращающей сухое трение между трущимися деталями. Можно принять, например, $h(t) = h_0 + k_h t$, (h_0 – начальный зазор, k_h – коэффициент скорости износа рабочих поверхностей пары вращения). Увеличение зазора, например в подшипниковой опоре правого конца вала СТ (рис. 1), может быть обнаружено путем наблюдения за амплитудой колебаний по координате y_3 , возрастание которой по мере увеличения $h_3(t)$ в соответствии с (2) и (4) углубляет модуляцию на частоте модулирующего сигнала ω_{y3} . Одновременно с увеличением толщины пленки $h_3(t)$ уменьшается величина ее жесткости ($c_m = ESh^{-1}$), что ведет к снижению частоты ω_{y3} радиальных колебаний вала, вызываемых упругостью масляной пленки. Следовательно, оценка величины $\Delta\omega_{y3} = \omega_{y3}^0 - \omega_{y3}(t)$ также может быть использована для диагностики величины зазора и качества смазки в подшипниковых опорах вала трансмиссии.

Аналогично, выделение и анализ огибающей компоненты изгибных колебаний вала в сечении X_3 с частотой $\omega_{\phi 3} \approx \sqrt{c_u J_{3z}^{-1}}$ сигнала (4) и последующее слежение за изменением этой частоты, вызы-

ваемым снижением жесткости c_u в процессе старения материала вала, также является информационно-содержательным компонентом в задаче контроля технического состояния трансмиссии ТВД.

В общем случае, учитывающем влияние остальных координат системы (3) на изменение геометрии индукционного зазора ДЧВ, результирующая огибающая, модулирующая сигнал (1) содержит дополнительные периодические компоненты, частоты которых определяются упругими колебаниями других элементов трансмиссии. Выделение и соответствующий анализ этих модулирующих компонент также позволяют получить полезную информацию о состоянии трансмиссии.

3. Пример реализации алгоритма оценивания параметров упругой трансмиссии в среде Matlab

Изложенные в предыдущем разделе идеи были проверены с помощью компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink. Схема моделирования системы оценивания вектора параметров, определяющих техническое состояние трансмиссии, приведена на рис. 2.

Здесь, дополнительно к уже описанному выше, в каскаде полосовых фильтров из сигнала ДЧВ (осц. 1 на рис. 3) сначала отфильтровывается несущая (5000 Гц) и на вход второго фильтра подается модулирующий сигнал (осц. 2 на рис. 3), представляющий собой сумму гармоник с частотами изгибных $\omega_{\phi 3} = 256$ Гц и радиальных упругих (в зазорах опоры) колебаний вала $\omega_{y3} = 1280$ Гц, а также дополнительную сумму менее значимых гармоник, порождаемых упругими колебаниями других элементов трансмиссии, которую можно рассматривать как шум объекта.

Третья осциллограмма на рис. 3 отображает группу сигналов:

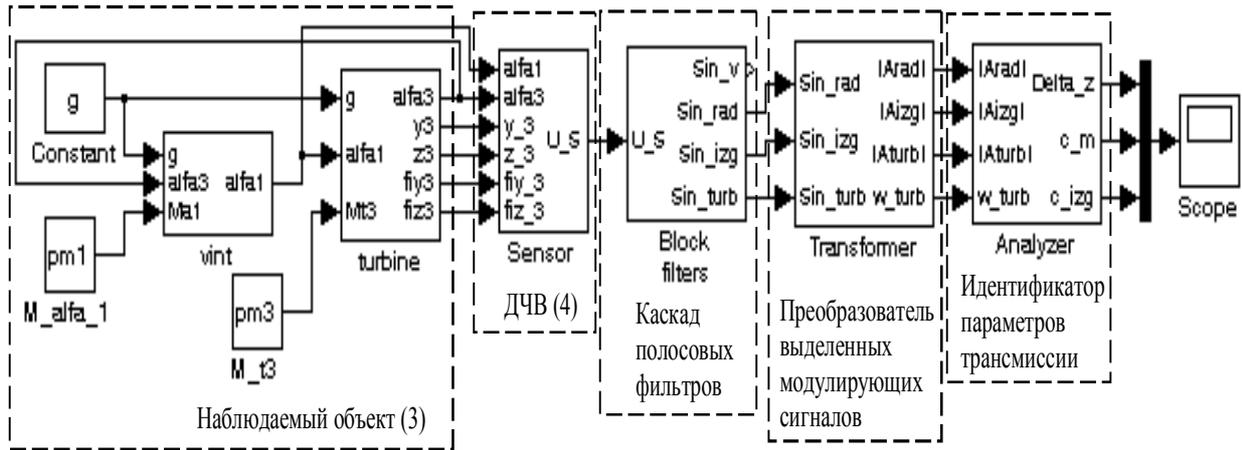


Рис. 2. Схема моделирования системы оценивания технического состояния трансмиссии по выходу ДЧВ

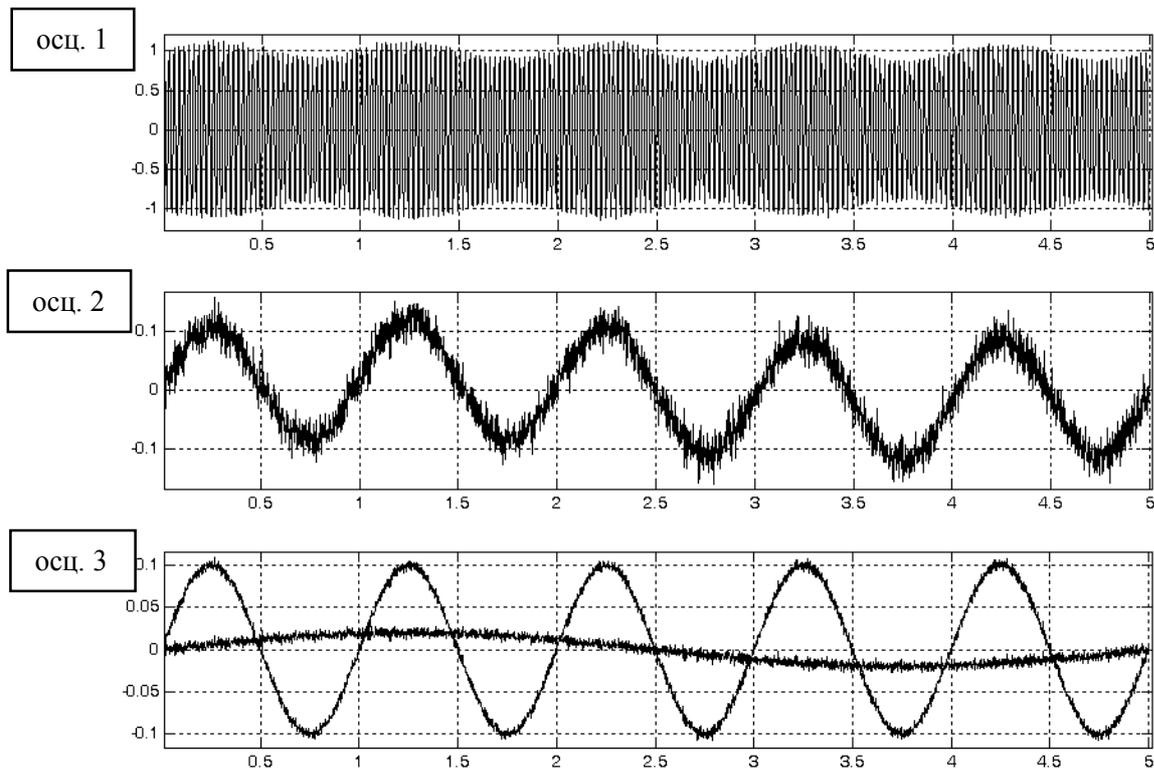


Рис. 3. Процессы обработки сигнала с выхода ДЧВ

$$u(y_3) \approx k_y A_{y3} \sin \omega_{y3} t + \xi_{y3}$$

$$\text{и } u(\phi_3) \approx k_\phi A_{\phi3} \sin \omega_{\phi3} t + \xi_{\phi3},$$

выделенных из суммарной огибающей (осц. 2) последним фильтром каскада.

Здесь ξ_{y3} и $\xi_{\phi3}$ – остаточные шумы фильтрации.

Выделенные указанным способом гармоники контролируемых модулирующих сигналов $u(y_3)$ и $u(\phi_3)$ подаются в "Transvomer" – файл-преобразователь, осуществляющий фиксацию частот ω_{y3} и $\omega_{\phi3}$ поступающих сигналов и их выпрямление ($|u(y_3)|, |u(\phi_3)|$) с целью слежения за

изменением (увеличением) амплитуд и частот контролируемых сигналов, связанным с процессами «старения» узлов трансмиссии. В последнем блоке («Analyzer»-файл) на основе использования выходных сигналов преобразователя реализуется вычисление текущих значений контролируемых параметров трансмиссии, в том числе и по следующим приближенным формулам:

$h_3(t) = k_h |u(y_3)|$, (k_h – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности);

$$c_u \approx J_{3z} \omega_{\phi 3}^2, c_m \approx m_3 \omega_{y3}^2.$$

Заключение

Предложенный в работе подход к решению задач наблюдения за вектором параметров, оказывающих влияние на техническое состояние упругой трансмиссии ТВД, может оказать существенную помощь при построении системы мониторинга и защиты многокомпонентной трансмиссии от разрушения.

Возможным направлением дальнейшего развития исследований является расширение списка контролируемых параметров трансмиссии за счет дополнительной обработки той части сигнала, которая в настоящей работе была определена как шум объекта. Целесообразна также разработка методов и алгоритмов формирования управляющих воздействий, препятствующих или минимизирующих ско-

рость развития выявляемых в процессе мониторинга дефектов многокомпонентной трансмиссии ТВД.

Литература

1. Муравченко О.Ф., Хусточка А.Н. Поэлементная математическая модель турбовинтовентиляторного двигателя Д-27 // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 6 (41). – С. 61-64.
2. Земляков С.Д., Суханов В.М. Построение математической модели многокомпонентной трансмиссии авиационного двигателя для целей мониторинга // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 4 (20). – С. 55-61.
3. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 246 с.
4. Рутковский В.Ю., В.М. Суханов, Елифанов С.В. Задача согласования лагранжевой модели упругой трансмиссии ТВД с моделями индукционного датчика оборотов и моментов винтов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 4 (12). – С. 43-47.

Поступила в редакцию 6.06.2006

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