

УДК 621.5

С.Д. ЗЕМЛЯКОВ, В.М. СУХАНОВ

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, Москва, Россия***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ТРАНСМИССИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА***

Введена в рассмотрение математическая модель нежесткой трансмиссии многовального турбовинтового двигателя. Выявлена возможность декомпозиция полной модели трансмиссии на ряд независимых подсистем, удобных для осуществления синтеза системы векторного мониторинга технического состояния многокомпонентной трансмиссии.

ТВД, многокомпонентная упругая трансмиссия, математическая модель, мониторинг**Введение и постановка задачи**

Текущее наблюдение за техническим состоянием силовых трансмиссий турбовинтовых двигателей (ТВД) и принятие мер, предупреждающих возникновение аварийной ситуации в полете, является важной частью работы общей системы мониторинга ТВД в целом. В рассматривавшихся ранее задачах, например в [1], авторами использовалась простейшая модель одновального ТВД с единственным контролируемым параметром – углом упругого скручивания нежесткого вала. При этом отмечалось, что на последующих этапах исследования проблемы создания системы контроля, диагностики и защиты роторной части ТВД должна использоваться более полная модель нежесткой трансмиссии многовального двигателя, учитывающая целый комплекс параметров, влияющих на безопасность и долговечность нормального функционирования этого сложного во всех отношениях агрегата.

Исходную схему трансмиссии (рис.1), при решении указанных задач можно упростить, исключив из рассмотрения ротор турбины высокого давления, не контактирующий непосредственно с элементами валопровода ротора СТ. Как механическая система,

такая структура состоит из трех валов, в определенных точках которых размещены сосредоточенные инерционные массы. Вал ротора турбины низкого давления (ТНД), с расположенными вблизи концевых подшипниковых опор дисками компрессора и турбины, принимается жестким так же, как и вал винта, соединенный с валом СТ редукторной связью. Вал ротора СТ считается упругим, т.е. подверженным возникновению в нем изгибных и крутильных колебаний. На правом, опертом на подшипниковую опору, конце вала напрессован диск свободной турбины. Левый (также опертый) конец вала посредством редукторной связи соединен с валом винта. К лопаткам диска СТ приложены силы газового потока, которые создают крутящий момент M_T , передаваемый трансмиссией к винту, нагруженному моментом сопротивления внешней среды M_B . Учитывается конечная жесткость масляной пленки c_m в зазорах опор вращения валов. Продольные (осевые) смещения валов относительно опор и самого корпуса двигателя относительно фюзеляжа считаются отсутствующими.

Исходной задачей, предшествующей задаче формирования методики расширенного (векторного) оценивания технического состояния роторной группы многовального ТВД (рис. 1), в данной работе

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

является разработка модели, 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).

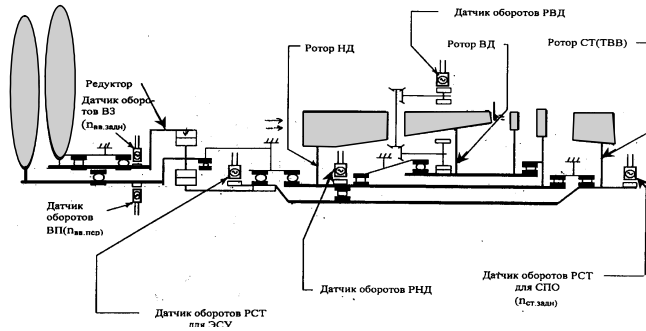


Рис. 1. Схема пятивальной трансмиссии ТВД

1. Опорные системы и обобщенные координаты многокомпонентной трансмиссии

При выводе математической модели упрощенной трансмиссии ТВД траекторное перемещение самолета в горизонтальной плоскости будем полагать равномерным и прямолинейным. Тогда оставшаяся часть его движения представляет собой вращение относительно центра масс C и определяется проекциями вектора угловой скорости $\Omega = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ на оси связанной системы координат, которые для рассматриваемого режима можно считать почти совпадающими с соответствующими осями инерциальной системы $CX_c Y_c Z_c$ (рис. 2).

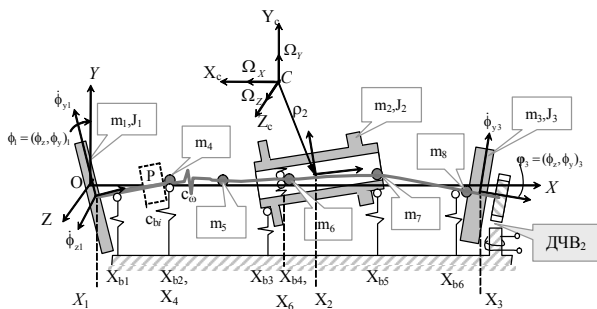


Рис. 2. Конфигурация упругой трансмиссии ТВД с ДЧВ

Введем дополнительную, связанную с самолетом систему координат $OXYZ$, удобную для определения положения материальных тел, образующих многокомпонентную трансмиссию ТВД (рис. 2). На основании упрощенной структуры трансмиссии, введем в рассмотрение идеализированную расчетную модель, представляющую собой совокупность заданным образом размещенных в пространстве трех инерционных тел 1-3 (рис. 2).

Эти тела, механические параметры которых определены их массами m_k и главными моментами инерции $J_k = (J_x^k, J_y^k, J_z^k)$, $k = \overline{1,3}$ – суть оставленные в рассмотрении элементы трансмиссии пятивального ТВД: 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 . В качестве упрощенной модели упругого вала с распределенной массой введем, как это принято при изучении колебаний вращающихся валов [2], дискретную идеализированную модель вала СТ, получаемую путем выделения двух участков, заключенных между тремя подшипниковыми опорами вала СТ. В свою очередь, эти участки делятся пополам и массы каждого из участков, разделенные на две равные части, в виде сосредоточенных масс $m_4 \div m_8$, размещаются на границах участков, как это показано на рис. 2. Точечную массу m_8 отнесем к массе m_3 . В принятой идеализации реальный вал СТ заменяется несущим сосредоточенные массы невесомым упругим стержнем, совершающим вращательно-колебательные движения в пространстве осевой полости ротора ТНД. Податливость вала СТ на круче-

ние обозначена через c_ω и условно определена как крутильная жесткость упругой редукторной связи, включенной между жестким валом винтов и передним концом вала турбины. Введенные на рис. 2 упругие опоры учитывают конечную жесткость c_m масляной пленки в зазорах подшипниковых опор валов, допускающих малые радиальные смещения оси вала в местах установки опор.

Положения оставленных в рассмотрении материальных тел трансмиссии в системе осей $OXYZ$, определим с помощью конечного числа обобщенных координат $q_k = (y, z, \phi_y, \phi_z, \alpha)_k$, $k = \overline{1,7}$, причем для всех точечных масс $m_k|_{k=\overline{4,7}}$, формообразующих упругий вал СТ, следует принять $(\phi_y, \phi_z, \alpha)_{k=\overline{4,7}} \equiv 0$. При этом y_k, z_k , ($k = \overline{1,7}$) определяют координаты упругих смещений центров масс инерционных тел и сосредоточенных масс вала СТ в связанной системе осей $OXYZ$; координаты ϕ_{zk}, ϕ_{yk} , ($k = \overline{1,3}$) определяют угловые отклонения соответствующих тел и считаются положительными, если вектора $\dot{\phi}_{zk}, \dot{\phi}_{yk}$ совпадают с положительными направлениями соответствующих координатных осей; координаты α_k , ($k = \overline{1,3}$) (и их скорости $\dot{\alpha}_k$) определяют вращение тел трансмиссии относительно продольной оси OX . При составлении уравнений Лагранжа все обобщенные координаты $q_k = (y, z, \phi_y, \phi_z, \alpha)_k$, $k = \overline{1,7}$ (за исключением α_k , которые можно рассматривать как циклические) можно считать малыми величинами так, что $\sin \phi_k = \phi_k$, $\cos \phi_k = 1$.

2. Кинетическая энергия трансмиссии

В предположении, что $\Omega_X \ll \dot{\alpha}_k$, $k = \overline{1,3}$, кинетическая энергия абсолютного (относительно инерциальных осей $SX_cY_cZ_c$) движения системы тел

введенной модели ТВД может быть представлена в виде:

$$2T = \sum_{k=1}^3 [J_x^k \dot{\alpha}_k^2 + J_{y,z}^k ((\dot{\phi}_y + \Omega_Y)^2 + (\dot{\phi}_z + \Omega_Z)^2)] + \sum_{k=1}^7 m_k [(\dot{y}_k + \rho_Z^k \Omega_X + \rho_X^k \Omega_Z)^2 + (\dot{z}_k + \rho_X^k \Omega_Y + \rho_Y^k \Omega_X)^2], \quad (1)$$

где через $J_{y,z}^k$ обозначены равновеликие моменты инерции ($J_y^k = J_z^k$) соответствующих тел вращения трансмиссии относительно их поперечных осей. $\rho_{X,Y,Z}^k$ – проекция радиуса-вектора, соединяющего центр масс k -го тела с полюсом S на соответствующие оси связанной системы координат $SX_cY_cZ_c$. Компоненты $\rho_{X,Y,Z}^k \approx const$ и $\Omega_{X,Y,Z} = \Omega_{X,Y,Z}(t)$ можно рассматривать как параметры влияния переносного движения ЛА на динамику упругой трансмиссии ТВД.

Необходимость учета эксцентриситета e^i какого-либо из тел вращения ($i \in k = 1 \div 3$) трансмиссии заставляет ввести понятные уравнения связи [2]: $[y_c = y - e \cos \alpha, z_c = z - e \sin \alpha]_i$, где y_c^i, z_c^i – координаты центра масс i -го тела (в системе $OXYZ$), смещенного относительно оси его вращения на величину эксцентриситета e^i . Очевидно: $[\dot{y}_c = \dot{y} + e \dot{\alpha} \sin \alpha, \dot{z}_c = \dot{z} - e \dot{\alpha} \cos \alpha]_i$. Учет этих соотношений в выражении кинетической энергии для соответствующего тела, вычисленной по теореме Кенига, дает уравнение вида

$$2T_i = [J_x \dot{\alpha}^2 + J_{y,z} ((\dot{\phi}_y + \Omega_Y)^2 + (\dot{\phi}_z + \Omega_Z)^2)]_i + m_i \{ (\dot{y} + \rho_Z \Omega_X + \rho_X \Omega_Z)^2 + (\dot{z} + \rho_X \Omega_Y + \rho_Z \Omega_X)^2 + e^2 \dot{\alpha}^2 + 2e \dot{\alpha} [(\dot{y} + \rho_Z \Omega_X + \rho_X \Omega_Z) \cos \alpha - (\dot{z} + \rho_X \Omega_Y + \rho_Y \Omega_X) \sin \alpha] \}_i.$$

Индекс $i = \overline{1,7}$, стоящий за скобками в правой части выражения, устанавливает необходимость его присвоения всем элементам внутри скобок

за исключением угловых скоростей переносного движения.

3. Потенциальная энергия упругой трансмиссии

Потенциальная энергия системы равна сумме энергий деформаций упругих опор, сжатия масляной пленки, изгибных и крутильных деформаций вала СТ. Обозначим: $X_{bi}, i = \overline{1,6}$ – расстояния последовательно расположенных вдоль оси ОХ подшипниковых опор от начала отсчета О (включая межвальную опору ротора СТ, положение которой задано точкой X_{b4}); $X_k, k = \overline{1,7}$ – аналогичные параметры центров инерции и точечных масс материальных тел трансмиссии. При этом в силу принятой идеализации вала СТ положения некоторых сосредоточенных масс совпадают с координатами опор. В частности, $X_4 = X_{b2}$, $X_6 = X_{b4}$.

Потенциальная энергия сжатия масляной пленки в зазоре i -й подшипниковой опоры (за исключением межвальной) записывается в виде

$$\Pi_i = 0,5c_{mi}(y_{bi}^2 + z_{bi}^2), \quad i = \overline{1,6}, \quad i \neq 4, \quad (2)$$

где y_{bi}, z_{bi} – величины деформационного сжатия пленки в зазоре; $c_{mi} = ES_i h_i^{-1}$ – податливость масляной пленки (E – модуль упругости смазки при сжатии, S – площадь контакта, h_i – величина зазора). Переменные y_{bi}, z_{bi} связаны с обобщенными координатами следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} y_{b1} &= y_1 - (X_1 - X_{b1})\phi_{z1}, & z_{b1} &= z_1 - (X_1 - X_{b1})\phi_{y1}, \\ y_{b2} &= y_1 + (X_{b2} - X_1)\phi_{z1}, & z_{b2} &= z_1 + (X_{b2} - X_1)\phi_{y1}; \\ y_{b3} &= y_2 - (X_2 - X_{b3})\phi_{z2}, & z_{b3} &= z_2 - (X_2 - X_{b3})\phi_{y2}, \\ y_{b5} &= y_2 + (X_{b5} - X_2)\phi_{z2}, & z_{b5} &= z_2 + (X_{b5} - X_2)\phi_{y2}; \\ y_{b6} &= y_3 - (X_3 - X_{b6})\phi_{z3}, & z_{b6} &= z_3 - (X_3 - X_{b6})\phi_{y3}. \end{aligned}$$

Потенциальная энергия сжатия масляной пленки в межвальном подшипнике зависит не только от отклонения упругого вала СТ от оси ОХ, но и от величины поджатия пленки со стороны ротора ТНД,

т.е. от положения тела 2, имеющего собственные степени свободы в системе осей ОХYZ. С учетом сказанного и понятной из рис. 2 геометрии относительных положений упругого вала СТ и осей тела 2 величина потенциальной энергии в межвальной опоре может быть определена в следующем виде:

$$\Pi_4 = 0,5c_{m4}\{[y_2 + y_6 + (X_2 - X_{b4})\phi_{z2}]^2 + [z_2 + z_6 + (X_2 - X_{b4})\phi_{y2}]^2\}. \quad (3)$$

Величина потенциальной энергии упругого скручивания вала СТ, обусловленного действием моментов турбины и винтов, приложенных к противоположным концам вала, определяется выражением

$$\Pi_{kp} = 0,5c_{\omega}(\alpha_3 - \alpha_p)^2, \quad (4)$$

где c_{ω} – крутильная жесткость; $\alpha_p = \alpha_p(i_p \alpha_1)$ – угловая координата вращения левого конца вала СТ, связанного посредством редукторной связи (i_p) с вектором вращения $\alpha_1 = (\alpha_{11}, \alpha_{12})$ винтовой группы. Конкретный вид функции $\alpha_p(i_p \alpha_1)$ зависит от типа применяемого редуктора и числа винтов в группе.

Потенциальная энергия изгибных деформаций упругого вала СТ, представленного идеализированной моделью в виде невесомого упругого стержня, имеющего постоянную изгибную жесткость c_u и нагруженного в выбранных точках сосредоточенными массами $m_4, \dots, m_7, (m_8 + m_3)$, определяется в виде

$$\Pi_{uzg} = 0,5c_u \sum_{k=4}^8 (y_k^2 + z_k^2). \quad (6)$$

3. Обобщенные силы

В рассматриваемом режиме равномерного горизонтального полета самолета в качестве внешних сил, действующих на материальные тела трансмиссии, будем учитывать силы веса $P_k = m_k g, k = \overline{1,8}$,

а также вращающие моменты турбины низкого давления $M_{\alpha 2} \equiv M_{TH}$, свободной турбины $M_{\alpha 3} \equiv M_{TC}$ и моменты от сил сопротивления на винтах $M_{\alpha i} \equiv M_{Bi}$, $i = 1, 2$ и на лопатках компрессора ТНД M_{KH} . Обобщенные силы вычисляются известным образом как коэффициенты при дифференциалах обобщенных координат в выражении элементарной работы всех активных сил, действующих на систему на виртуальных перемещениях точек их приложения: $\delta A_i = Q_i \delta q_i$.

4. Уравнения упрощенной многокомпонентной упругой трансмиссии ТВД

Используя известный формализм составления уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \quad L = T - \Pi,$$

в конечном счете получим следующую систему уравнений движения введенной модели многовальной упругой трансмиссии, где для удобства понимания по какой из обобщенных координат получено данное уравнение слева от него введена условная «подсказка» вида $\langle \partial L / \partial q_i \rangle \rightarrow$:

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_1 \rangle \rightarrow m_1 [(\ddot{y}_1 + \rho_{Z1} \dot{\Omega}_X + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Z) - \\ - e_1 (\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1)] + \\ + c_{b1,2} [2y_1 - (2X_1 - X_{b1} - X_{b2}) \phi_{z1}] = mg, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где $c_{b1,2} = c_{b1} = c_{b2}$;

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_1 \rangle \rightarrow m_1 [(\ddot{z}_1 + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) - \\ - e_1 (\ddot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \cos \alpha_1)] + \\ + c_{b1,2} [2z_1 - (2X_1 - X_{b1} - X_{b2}) \phi_{y1}] = 0; \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\alpha}_1 \rangle \rightarrow (J_{x1} + m_1 e_1^2) \ddot{\alpha}_1 + m_1 e_1 \{(\ddot{y}_1 + \rho_{Z1} \dot{\Omega}_X + \\ + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Z) \cos \alpha_1 - (\ddot{z}_1 + \rho_{X1} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) \sin \alpha_1 - \\ - 2\dot{\alpha}_1 [(\dot{y}_1 + \rho_{Z1} \Omega_X + \rho_{X1} \Omega_Z) \sin \alpha_1 + (\dot{z}_1 + \rho_{X1} \Omega_Y + \\ + \rho_{Y1} \Omega_X) \cos \alpha_1]\} - c_{\omega} \dot{\alpha}_1 (\alpha_3 - \dot{\alpha}_p \alpha_1) = -M_{\alpha 1}; \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{y1} \rangle \rightarrow J_{y,z1} (\ddot{\phi}_{y1} + \ddot{\Omega}_Y) + c_{m1,2} \{[(X_1 - X_{b1})^2 + \\ + (X_{b2} - X_1)^2] \phi_{y1} - (2X_1 - X_{b2} - X_{b1}) z_1\} = 0; \end{aligned} \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{z1} \rangle \rightarrow J_{y,z1} (\ddot{\phi}_{z1} + \ddot{\Omega}_Z) + \\ + c_{m1,2} \{[(X_1 - X_{b1})^2 + \\ + (X_{b2} - X_1)^2] \phi_{z1} - \\ - (2X_1 - X_{b2} - X_{b1}) y_1\} = 0; \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_2 \rangle \rightarrow m_2 [(\ddot{y}_2 + \rho_{Z2} \dot{\Omega}_X + \rho_{X2} \dot{\Omega}_Z) - \\ - e_2 (\ddot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 - \dot{\alpha}_2^2 \sin \alpha_2)] + \\ + c_{m3,5} [2y_2 - (2X_2 - X_{b3} - \\ - X_{b5}) \phi_{z2}] = m_2 g, \quad c_{m3} = c_{m5} = c_{m3,5}; \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_2 \rangle \rightarrow m_2 [(\ddot{z}_2 + \rho_{X2} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y2} \dot{\Omega}_X) - \\ - e_2 (\ddot{\alpha}_2 \sin \alpha_2 - \dot{\alpha}_2^2 \cos \alpha_2)] + c_{m3,5} [2z_2 - \\ - (2X_2 - X_{b3} - X_{b5}) \phi_{y2}] = 0; \end{aligned} \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\alpha}_2 \rangle \rightarrow (J_{x2} + m_2 e_2^2) \ddot{\alpha}_2 + \\ + m_2 e_2 \{(\ddot{y}_2 + \rho_{Z2} \dot{\Omega}_X + \rho_{X2} \dot{\Omega}_Z) \cos \alpha_2 - \\ - (\ddot{z}_2 + \rho_{X2} \dot{\Omega}_Y + \rho_{Y1} \dot{\Omega}_X) \sin \alpha_2 - \\ - 2\dot{\alpha}_2 [(\dot{y}_2 + \rho_{Z2} \Omega_X + \rho_{X2} \Omega_Z) \sin \alpha_2 + \\ + (\dot{z}_2 + \rho_{X2} \Omega_Y + \rho_{Y2} \Omega_X) \cos \alpha_2]\} = M_{T2} - M_{K2}; \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{y2} \rangle \rightarrow J_{y,z2} (\ddot{\phi}_{y2} + \ddot{\Omega}_Y) + \\ + \{c_{b3,5} [(X_2 - X_{b3})^2 + (X_{b5} - X_2)^2] + \\ + c_{b4} (X_2 - X_{b4})^2\} \phi_{y2} + \end{aligned} \quad (7.9)$$

$$\begin{aligned} + [c_{b4} (X_2 - X_{b4}) - c_{m3,5} (2X_2 - X_{b5} - X_{b3})] z_2 + \\ + c_{b4} (X_2 - X_{b4}) z_6 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{z2} \rangle \rightarrow J_{y,z1} (\ddot{\phi}_{z2} + \ddot{\Omega}_Z) + \\ + \{c_{m3,5} [(X_2 - X_{b3})^2 + (X_{b5} - X_2)^2] + \\ + c_{m4} (X_2 - X_{b4})^2\} \phi_{z2} + [c_{m4} (X_2 - X_{b4}) - \end{aligned} \quad (7.10)$$

$$\begin{aligned} - c_{m3,5} (2X_2 - X_{b5} - X_{b3})] y_2 + \\ + c_{m4} (X_2 - X_{b4}) y_6 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_3 \rangle \rightarrow m_3 [(\ddot{y}_3 + \rho_{Z3} \dot{\Omega}_X + \rho_{X3} \dot{\Omega}_Z) - \\ - e_3 (\ddot{\alpha}_3 \cos \alpha_3 - \dot{\alpha}_3^2 \sin \alpha_3)] + \\ + c_{m6} [y_3 - (X_3 - X_{b6}) \phi_{z3}] = m_3 g; \end{aligned} \quad (7.11)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_3 \rangle \rightarrow & m_3[(\ddot{z}_3 + \rho_{X3}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y3}\dot{\Omega}_X) - \\ & - e_3(\ddot{\alpha}_3 \sin \alpha_3 - \dot{\alpha}_3^2 \cos \alpha_3)] + \\ & + c_{m6}[z_3 - (X_3 - X_{b6})\phi_{y3}] = 0; \end{aligned} \quad (7.12)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\alpha}_3 \rangle \rightarrow & (J_{x3} + m_3 e_3^2)\ddot{\alpha}_3 + m_3 e_3 \{(\ddot{y}_3 + \\ & + \rho_{Z3}\dot{\Omega}_X + \rho_{X3}\dot{\Omega}_Z)\cos \alpha_3 - \\ & - (\ddot{z}_3 + \rho_{X3}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y3}\dot{\Omega}_X)\sin \alpha_3 - \\ & - 2\dot{\alpha}_3[(\dot{y}_3 + \rho_{Z3}\Omega_X + \rho_{X3}\Omega_Z)\sin \alpha_3 + (\dot{z}_3 + \\ & + \rho_{X3}\Omega_Y + \rho_{Y3}\Omega_X)\cos \alpha_3]\} + c_{\omega}(\alpha_3 - i_p \alpha_1) = M_{T3}; \end{aligned} \quad (7.13)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{y3} \rangle \rightarrow & J_{y,z3}(\ddot{\phi}_{y3} + \dot{\Omega}_Y) + \\ & + c_{m6}[(X_3 - X_{b6})^2 \phi_{y3} - (X_3 - X_{b6})z_3] = 0; \end{aligned} \quad (7.14)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{\phi}_{z3} \rangle \rightarrow & J_{y,z3}(\ddot{\phi}_{z3} + \dot{\Omega}_z) + \\ & + c_{m6}[(X_3 - X_{b6})^2 \phi_{z3} - (X_3 - X_{b6})y_3] = 0; \end{aligned} \quad (7.15)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_4 \rangle \rightarrow & m_4(\ddot{y}_4 + \rho_{Z4}\dot{\Omega}_X + \rho_{X4}\dot{\Omega}_Z) + \\ & + (c_{m2} + c_u)y_4 = m_4 g; \end{aligned} \quad (7.16)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_4 \rangle \rightarrow & m_4(\ddot{z}_4 + \rho_{X4}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y4}\dot{\Omega}_X) + \\ & + (c_{m2} + c_u)z_4 = 0; \end{aligned} \quad (7.17)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_5 \rangle \rightarrow & m_5(\ddot{y}_5 + \rho_{Z5}\dot{\Omega}_X + \rho_{X5}\dot{\Omega}_Z) + \\ & + c_u y_5 = m_5 g; \end{aligned} \quad (7.18)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_5 \rangle \rightarrow & m_5(\ddot{z}_5 + \rho_{X5}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y5}\dot{\Omega}_X) + \\ & + c_u z_5 = 0; \end{aligned} \quad (7.19)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_6 \rangle \rightarrow & m_6(\ddot{y}_6 + \rho_{Z6}\dot{\Omega}_X + \rho_{X6}\dot{\Omega}_Z) + \\ & + (c_{m4} + c_u)y_6 = m_6 g; \end{aligned} \quad (7.20)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_6 \rangle \rightarrow & m_6(\ddot{z}_6 + \rho_{X6}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y6}\dot{\Omega}_X) + \\ & + (c_{m4} + c_u)z_6 = 0; \end{aligned} \quad (7.21)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{y}_7 \rangle \rightarrow & m_7(\ddot{y}_7 + \rho_{Z7}\dot{\Omega}_X + \rho_{X7}\dot{\Omega}_Z) + \\ & + c_u y_7 = m_7 g; \end{aligned} \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned} \langle \partial L / \partial \dot{z}_7 \rangle \rightarrow & m_7(\ddot{z}_7 + \rho_{X7}\dot{\Omega}_Y + \rho_{Y7}\dot{\Omega}_X) + \\ & + c_u z_7 = 0. \end{aligned} \quad (7.23)$$

Видно, что полученная система уравнений, описывающая движение упругой многокомпонентной

трансмиссии ТВД, декомпозируется на ряд независимых подсистем, например (7.1) – (7.5), (7.6) – (7.10), (7.11) – (7.15).

Координаты последней из указанных подсистем в силу конструктивных особенностей установки индукторной шестерни ДЧВ-2 на валу СТ (рис. 2) влияют на геометрию пространства воздушного зазора датчика оборотов и тем самым изменяют структуру его выходного сигнала, внося искажения, содержащие информацию о параметрах колебательных процессов упругой трансмиссии.

Заключение

Декомпозированные подсистемы многокомпонентной трансмиссии могут использоваться в первом приближении в качестве автономных моделей для расчета параметров упругих колебаний отдельных узлов трансмиссии и для построения систем наблюдения и оценивания координат движения, содержащих информацию о техническом состоянии объекта наблюдения.

Литература

1. Алгебраический и адаптивный подходы к задаче идентификации крутящего момента свободной турбины ТВД / В.Ю. Рутковский, С.В. Елифанов, С.Д. Земляков, В.М. Суханов, В.М. Глумов // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 31. Двигатели и энергоустановки. – С. 197-201.
2. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 344 с.

Поступила в редакцию 11.06.2006

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