

УДК 621.5

**В.Ю. РУТКОВСКИЙ<sup>1</sup>, В.М. СУХАНОВ<sup>1</sup>, С.В. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина*

## ЗАДАЧА СОГЛАСОВАНИЯ ЛАГРАНЖЕВОЙ МОДЕЛИ УПРУГОЙ ТРАНСМИССИИ ТВД С МОДЕЛЯМИ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ОБОРОТОВ И МОМЕНТОВ ВИНТОВ<sup>1</sup>

Рассмотрены вопросы формирования математических моделей датчика частоты вращения (ДЧВ) с учетом крутильных колебаний контролируемого вала трансмиссии и моментов на соосных винтах турбовинтового двигателя (ТВД), воспринимающих указанный тип колебаний вала через дифференциальную редукторную связь. Предложена новая форма описания динамики упругой трансмиссии ТВД, полученная эквивалентным преобразованием известной Лагранжевой модели [1], которая позволила объединить все множество элементов трансмиссии и измерители в единую модель, удобную для решения различных задач исследования динамики упругих трансмиссий ТВД, задач контроля их технического состояния и управления данным классом объектов.

**трансмиссии ТВД, свободная турбина, крутильные колебания, согласование моделей**

### Введение

Решение задачи идентификации момента свободной турбины (СТ) многовального турбовинтового двигателя на основе дополнительной обработки непрерывных сигналов двух штатных ДЧВ, установленных на противоположных концах упругого вала [1], является не до конца обоснованным по причине отсутствия достоверных моделей как структуры сигналов датчика, контролирующего вращение вала, подверженного крутильным колебаниям, так и модели моментов винтов, которые не только вращаются, но и через редукторную связь воспринимают колебания вала свободной турбины.

### 1. Постановка задачи

Известные уравнения трансмиссии многовального ТВД с дифференциальным редуктором и двумя соосными винтами имеют вид [2]:

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

где надсимвольная черта указывает, что соответствующая координата или момент принадлежат уравнениям, описывающим динамику жесткой трансмиссии, т.е. такой трансмиссии, вал СТ которой предполагается абсолютно жестким;  $\bar{\omega}_T = \dot{\bar{\alpha}}_T$  – угловая скорость вращения ротора свободной турбины;  $\bar{\omega}_{Bk} = \dot{\bar{\alpha}}_{Bk}$ , ( $k=1,2$ ) – угловая скорость вращения  $k$ -го винта;  $J_T$  – момент инерции ротора СТ;  $J_{Bk}$  – моменты инерции переднего ( $k=1$ ) и заднего ( $k=2$ ) винтов;  $i_k$  – коэффициенты дифференциального редуктора;  $M_T$  – крутящий момент, развиваемый давлением газов, поступающих на лопатки СТ;  $\bar{M}_{Bk}(\varphi_{Bk}, \bar{\omega}_{Bk})$  – моменты винтов;  $\varphi_{Bk}$  – угол установки лопастей винта.

Система контроля и управления оборотами двигателя предусматривает наличие датчиков частоты вращения вала СТ. В качестве таких датчиков используются индукционные N-преобразователи [3], выходной сигнал которых имеет вид периодической функции:

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

$$u_{\omega}(\bar{\omega}_T) = U(\bar{\omega}_T) \sin n\bar{\omega}_T t, \quad (2)$$

где  $U(\bar{\omega}_T) = U_{\omega} = k_{\phi} n \bar{\omega}_T$ ,  $k_{\phi} = 2w\tilde{\Phi}_m$ ;

$n$  – число полюсов индукторной шестерни ДЧВ;

$w$  – число витков катушки;

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

Динамика трансмиссии ТВД при учете крутильной нежесткости вала свободной турбины, идеализированная схема которой представлена на рис. 1,

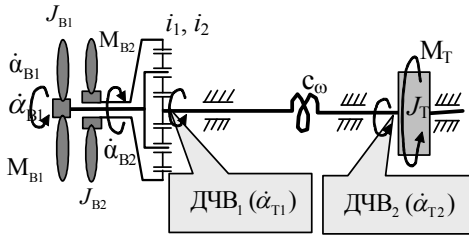


Рис. 1. Идеализированная схема упругой трансмиссии ТВД с дифференциальным редуктором и с двумя датчиками частоты вращения вала

с учетом дифференциальной редукторной связи упругого вала СТ с винтами  $\dot{\alpha}_{T1} = i_1 \dot{\alpha}_{B1} + i_2 \dot{\alpha}_{B2}$  ( $\alpha_{T1}$  – координата вращения переднего конца вала СТ, связанного с ведущей шестерней редуктора) описывается полученной в [1] моделью в форме уравнений Лагранжа 2-го рода:

$$\begin{aligned} J_T p^2 \alpha_{T2} + (c_{\omega} + \beta p)(\alpha_{T2} - \alpha_{T1}) &= M_T, \quad p = d/dt, \\ J_{B1} p^2 \alpha_{B1} - i_1 (c_{\omega} + \beta p)(\alpha_{T2} - \alpha_{T1}) &= -M_{B1}, \\ J_{B2} p^2 i_2^{-1} (\alpha_{T1} - i_1 \alpha_{B1}) - i_2 (c_{\omega} + \beta p)(\alpha_{T2} - \alpha_{T1}) &= -M_{B2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $c_{\omega}$ ,  $\beta$  – коэффициенты упругости и затухания крутильных колебаний вала СТ. Относительный сдвиг сечений двух концов упругого вала, определяемый в (3) разностью координат угловых положений указанных концов вала  $\alpha_{T1}$  и  $\alpha_{T2}$ :

$$\delta \alpha_T = \alpha_{T2} - \alpha_{T1} \quad (4)$$

является углом упругого скручивания вала СТ под действием момента турбины  $M_T$ , приложенного к заднему ( $\alpha_{T2}$ ) концу вала и моментов винтов  $M_{Bk}$ , приведенных к его переднему ( $\alpha_{T1}$ ) концу.

Особенностью функционирования индукционного датчика частоты вращения вала при наличии крутильных колебаний, вызванных его нежесткостью, является то, что в этом случае указанный датчик оборотов отчасти работает как измеритель параметров вибраций [2]. Входным сигналом такого "побочного" измерителя является угловая скорость крутильных колебаний вала СТ, которые передаются на вал индукторной шестерни датчика. Рассмотрим несколько подробнее процесс наведения дополнительной ЭДС в обмотках ДЧВ при наличии указанной вибрационной компоненты.

При ограниченной жесткости на кручение вала СТ ( $c_{\omega} \neq \infty$ ) на нестационарных режимах ( $M_T(t) \neq \text{const}$ ) возбуждаются крутильные колебания  $\dot{\alpha}_T(t)$ , аддитивно добавляющиеся к основному движению вала  $\bar{\omega}_T = \dot{\alpha}_T(t)$ . Для начала предположим, что  $\bar{\omega}_T = 0$ . Тогда крутильные колебания вала  $\dot{\alpha}_T(t)$ , воспринимаясь индукторной шестерней датчика оборотов, приведут к появлению переменной составляющей магнитного потока с частотой крутильных колебаний  $\tilde{\omega}_T$ , что вызовет наведение соответствующей ЭДС в обмотке ( $w$ ) статора:

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

где  $U(\tilde{\omega}_T) = U_{\omega} = \tilde{\omega}_T \tilde{\alpha}_{Tm} B w$  – 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).

При  $\bar{\omega}_T \neq 0$  результирующее движение вала турбины  $\dot{\alpha}_T$ , состоящее из вращения  $\dot{\alpha}_T(t)$  с частотой  $\bar{\omega}_T$  и крутильных колебаний  $\dot{\alpha}_T(t) = \tilde{\alpha}_{Tm} \tilde{\omega}_T \cos \tilde{\omega}_T t$  с частотой  $\tilde{\omega}_T$ , воспроизводится непрерывным выходом датчика оборотов в виде суммы двух периодических разночастотных сигналов:

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

Таким образом, в соответствии с принятой в виде (6) моделью ДЧВ входными координатами, формирующими выходной сигнал датчика оборотов, являются угловая скорость "жесткого" вращения вала СТ ( $\dot{\bar{\alpha}}_T(t) = \bar{\omega}_T$ ) и крутильная компонента  $\dot{\bar{\alpha}}_T(t)$  упругого вала, соответствующая месту установки индукторной шестерни ДЧВ.

Видно, что координаты моделей объекта (3) и ДЧВ (6) различны, т.е. выход  $\dot{\bar{\alpha}}_T$  объекта управления (3) не отвечает входам модели измерителя (6).

Аналогичная несогласованность, как будет показано ниже, имеет место при раскрытии моментов  $M_{Bk}$ , входящих в (3), которые по сравнению с  $\bar{M}_{Bk}$  дополнительно зависят от вибрационных колебаний винтов  $\dot{\bar{\alpha}}_{Bk}(t)$ , повторяющих крутильные колебания упругого вала СТ.

С учетом сказанного, целью данной работы является приведение Лагранжевой модели упругой трансмиссии ТВД (3) к виду, согласованному с принятой моделью (6) датчика угловой скорости вращения упругого вала СТ и моделью моментов винтов ТВД, построенной с учетом крутильных колебаний вала.

## 2. Решение задачи

Системы уравнений (1) и (3) могут быть приведены к виду [4], в котором каждое уравнение зависит только от одной переменной:

$$\begin{aligned} p k_J J_T \bar{x}_T &= (k_J J_T - 1) m_T - \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}; \\ p J_{B1} k_J \bar{x}_{B1} &= i_1 (m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - k_J J_{B1} i_1^{-1} \bar{m}_{B1}; \\ p J_{B2} k_J \bar{x}_{B2} &= i_2 (m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - k_J J_{B2} i_2^{-1} \bar{m}_{B2} \end{aligned} \quad (7)$$

– для жесткой трансмиссии и

$$\begin{aligned} p J_T (p^2 + c_\beta k_J) x_{T1} &= (k_J J_T - 1) m_T - (J_T p^2 + c_\beta) \sum_{k=1,2} m_{Bk}; \\ p J_T (p^2 + c_\beta k_J) x_{T2} &= [J_T p^2 + c_\beta (k_J J_T - 1)] m_T - c_\beta \sum_{k=1,2} m_{Bk}; \\ p J_{B1} (p^2 + c_\beta k_J) x_{B1} &= (p^2 + c_\beta k_J) J_{B1} i_1^{-1} m_{B1} - i_1 c_\beta (m_T + \sum_{k=1,2} m_{Bk}) \end{aligned} \quad (8)$$

– для упругой трансмиссии.

В (7) и (8) обозначено:  $\bar{x} \equiv \bar{\omega}_T$ ,  $\bar{x}_{B1} \equiv \bar{\omega}_{B1}$ ,  $\bar{x}_{B2} \equiv \bar{\omega}_{B2}$

и  $x_{T1} \equiv \dot{\alpha}_{T1}$ ,  $x_{T2} \equiv \dot{\alpha}_{T2}$ ,  $x_{B1} \equiv \dot{\alpha}_{B1}$ .

Уравнение для переменной  $\dot{\alpha}_{B2} \equiv x_{B2}$  в случае упругой трансмиссии получается на основе учета связи, обусловленной дифференциальным редуктором, и имеет вид

$$\begin{aligned} p J_{B2} (p^2 + c_\beta k_J) x_{B2} &= -(p^2 + c_\beta k_J) J_{B2} i_2^{-1} m_{B2} + \\ &+ i_2 c_\beta (m_T + \sum_{k=1,2} m_{Bk}). \end{aligned} \quad (9)$$

Кроме того для компактности записи в (7), (8) и (9) введены обозначения:

$$c_\beta = (\beta p + c_\omega), \quad p = d/dt;$$

$$\begin{aligned} k_J &= (J_T^{-1} + \sum_{k=1,2} i_k^2 J_{Bk}^{-1}); \quad m_T = M_T J_T^{-1}, \\ \bar{m}_{Bk} &= \bar{M}_{Bk} i_k J_{Bk}^{-1}, \quad m_{Bk} = M_{Bk} i_k J_{Bk}^{-1}, \quad k=1,2. \end{aligned} \quad (10)$$

Вполне очевидно, что любая из обобщенных координат вектора  $q = (q_j) = (\alpha_{T1}, \alpha_{T2}, \alpha_{B1})$  в уравнениях (8) (и  $\alpha_{B2}$  в (9)) в соответствии с физическим смыслом вращения тел, образующих трансмиссию с валом, дополнительно совершающим крутильные колебания, может быть представлена в виде

$$q_j = \bar{q}_j + \tilde{q}_j, \quad (11)$$

где  $\bar{q}_j$  – компоненты, определяющие угловые вращения тел трансмиссии в случае, если вал СТ был бы жестким,  $\tilde{q}_j$  – дополнительные компоненты угловых скоростей соответствующих тел, вызванные крутильными колебаниями упругого вала.

Момент турбины  $M_T$  является входной величиной, одинаковой как для модели жесткой трансмиссии (1), так и для упругой (2). Моменты на винтах в обеих моделях при этом являются различными, так как в случае упругой трансмиссии появляется дополнительная компонента момента, зависящая от крутильных колебаний вала СТ, передаваемых через редуктор винтам в виде составляющих  $\dot{\bar{\alpha}}_{Bk}$ . При этом в первом приближении будем считать справедливым

$$M_{Bk} = \bar{M}_{Bk} + \tilde{M}_{Bk}, \quad (12)$$

где моменты винтов жесткой трансмиссии  $\bar{M}_{Bk}$

определяются заимствованными из [2] формулами

$$\bar{M}_{Bk} \approx \bar{k}_{Bk} \varphi_{Bk} \bar{\omega}_{Bk}^2, \quad k=1,2. \quad (13)$$

Дополнительный момент винтов  $\tilde{M}_{Bk}$ , обусловленный упругой компонентой  $\dot{\alpha}_{Bk}$ , по аналогии с (13), определим приближенной зависимостью вида

$$\tilde{M}_{Bk} \approx \tilde{k}_{Bk} \varphi_{Bk} \dot{\alpha}_{Bk}^2, \quad \text{где } \tilde{k}_{Bk} \neq \bar{k}_{Bk}. \quad (14)$$

Учитывая инерционность вращающихся масс трансмиссии, будем пока в общем случае считать моменты винтов непрерывными, гладкими функциями времени  $\bar{M}_{Bk}(t)$ ,  $\tilde{M}_{Bk}(t)$ .

С учетом (11) системы уравнений (7) и (8) можно представить в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \bar{A}(p)\bar{x}(t) &= \bar{B}_T(p)M_T(t) + \bar{B}_B(p)\bar{M}_B(t); \\ A_1(p)x_1(t) &= B_T(p)M_T(t) + B_B(p)[\bar{M}_B(t) + \tilde{M}_B(t)], \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\bar{x}(t) = \dot{q} = (\dot{\omega}_T, \dot{\omega}_{B1}, \dot{\omega}_{B2})^T$  и  $x_1(t) = \dot{q} = (\dot{\alpha}_{T1}, \dot{\alpha}_{B1}, \dot{\alpha}_{B2})^T$  – векторы обобщенных угловых скоростей жесткой и упругой трансмиссий соответственно, ( $^T$  – знак транспонирования);

$\bar{A}(p)$  и  $A_1(p)$  – диагональные матрицы, отвечающие структуре левых частей уравнений (7), (8);

$\bar{B}(p)$  и  $B_1(p)$  – матрицы соответствующих размеров, получаемые из рассмотрения правых частей этих же уравнений.

Из (15) с учетом невырожденности диагональных матриц  $\bar{A}(p)$ ,  $A_1(p)$  следует:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \bar{A}^{-1}(p)[\bar{B}_T(p)M_T(t) + \bar{B}_B(p)\bar{M}_B(t)]; \\ x_1(t) &= A_1^{-1}(p)\{B_T(p)M_T(t) + B_B(p)[\bar{M}_B(t) + \tilde{M}_B(t)]\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Распространяя свойство (11) на векторы  $x = (\dot{q}_j)$ ,

$\bar{x} = (\bar{q}_j)$  и используя (16), определим

$$\begin{aligned} x_1(t) - \bar{x}(t) = \tilde{x}(t) &= [A_1^{-1}B_T - \bar{A}^{-1}\bar{B}_T]M_T(t) + \\ &+ [A_1^{-1}B_B - \bar{A}^{-1}\bar{B}_B]\bar{M}_B(t) + A_1^{-1}B_B\tilde{M}_B(t), \end{aligned} \quad (17)$$

откуда получим уравнение динамики колебаний отдельных элементов нежесткой трансмиссии, возникающих из-за крутильных колебаний вала СТ

$$\tilde{A}_1(p)\tilde{x}_1(t) = \tilde{C}_1(p)M_T(t) + \tilde{C}_2(p)\bar{M}_B(t) + \tilde{C}_3(p)\tilde{M}_B(t), \quad (18)$$

где  $\tilde{x}_1(t) = \dot{q} = (\dot{\alpha}_{T1}, \dot{\alpha}_{B1}, \dot{\alpha}_{B2})^T$ ,  $\tilde{A}_1(p)$ ,  $\tilde{C}_1(p)$ , ... – операторные матрицы соответствующих размеров.

В силу линейности использовавшихся преобразований можно утверждать, что уравнения "жесткого" движения ТВД и движений, обусловленных крутильными колебаниями вала СТ:

$$\bar{A}(p)\bar{x}(t) = \bar{B}_T(p)M_T(t) + \bar{B}_B(p)\bar{M}_B(t), \quad (19)$$

$$\tilde{A}_1(p)\tilde{x}(t) = \tilde{C}_1(p)M_T(t) + \tilde{C}_2(p)\bar{M}_B(t) + \tilde{C}_3(p)\tilde{M}_B(t),$$

разрешенные относительно суммарных координат  $x_j = \bar{x}_j + \tilde{x}_j$ , где  $\bar{x}_j(t)$  и  $\tilde{x}_j(t)$  – решения соответствующих уравнений системы (19), являются эквивалентными исходной (лагранжевой) системе

$$A_1(p)x_1(t) = B_T(p)M_T(t) + B_B(p)[\bar{M}_B(t) + \tilde{M}_B(t)]. \quad (20)$$

Решениями для уравнения (20) также являются переменные  $x_j(t)$ .

Аналогичным образом с учетом (8) строится доказательство для вектора  $x_1(t) = \dot{q} = (\dot{\alpha}_{T2}, \dot{\alpha}_{B1}, \dot{\alpha}_{B2})^T$ , для которого второе уравнение из (15) примет вид

$$A_2(p)x_2(t) = B_T(p)M_T(t) + B_B(p)[\bar{M}_B(t) + \tilde{M}_B(t)].$$

В конечном счете скалярная форма уравнений упругой трансмиссии ТВД, приведенная к координатам, воспринимаемым входами первого и второго датчиков частоты вращения упругого вала СТ, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} pk_J J_T \bar{x}_T &= (k_J J_T - 1)m_T - \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}, \\ pJ_T [p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{x}_{T1} &= \\ &= -p^2(J_T - k_J^{-1})(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - \\ &- (J_T p^2 + \beta p + c_\omega) \sum_{k=1,2} \tilde{m}_{Bk}, \\ pJ_T [p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{x}_{T2} &= \\ &= p^2 k_J^{-1}(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - (\beta p + c_\omega) \sum_{k=1,2} \tilde{m}_{Bk}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\tilde{x}_{T1} \equiv \dot{\alpha}_{T1}$ ,  $\tilde{x}_{T2} \equiv \dot{\alpha}_{T2}$ .

При необходимости с помощью соотношения (4) модель (21) может быть расширена добавлением уравнения динамики относительного сдвига концевых сечений упругого вала СТ, имеющего вид

$$[p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\delta\alpha_T = m_T + \sum_{k=1,2} m_{Bk}. \quad (22)$$

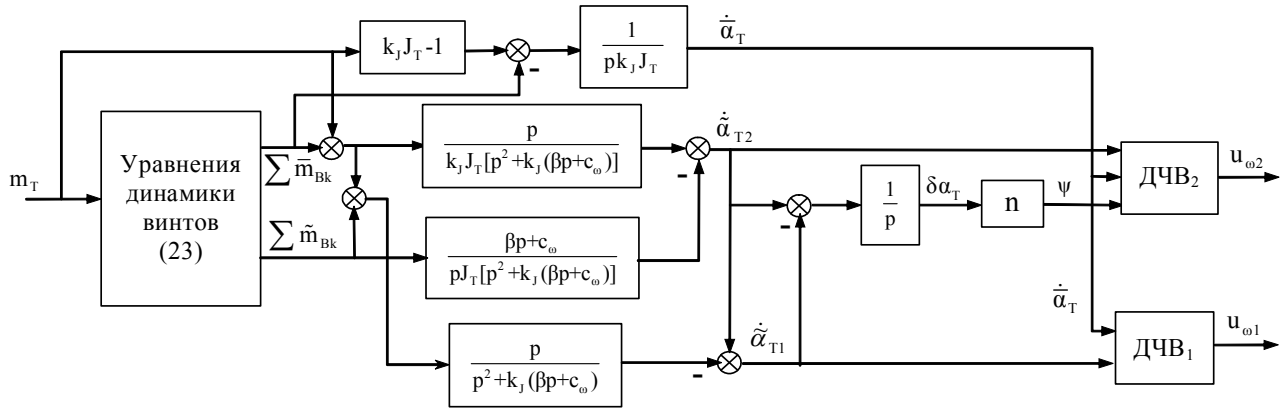


Рис. 2. Структурная схема сдвоенной МФМ упругой трансмиссии ТВД с двумя датчиками частоты вращения

Уравнения (21) и (22) должны быть дополнены содержащимися в (7) и (18) уравнениями динамики винтов:

$$pJ_{B1}k_J\bar{x}_{B1} = i_1(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - k_J\bar{M}_{B1},$$

$$pJ_{B2}k_J\bar{x}_{B2} = i_2(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) - k_J\bar{M}_{B2}, \quad (23)$$

$$\bar{M}_{Bk} \approx \bar{k}_{Bk} \varphi_{Bk} \bar{x}_{Bk}^2, \quad k=1,2;$$

$$pJ_{B1}[p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{x}_{B1} = -p^2 i_1 k_J^{-1}(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) -$$

$$-[p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{M}_{B1} + i_1(\beta p + c_\omega) \sum_{k=1,2} \tilde{m}_{Bk},$$

$$\tilde{M}_{Bk} \approx \tilde{k}_{Bk} \varphi_{Bk} \tilde{x}_{Bk}^2, \quad k=1,2,$$

$$pJ_{B2}[p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{x}_{B2} = -p^2 i_2 k_J^{-1}(m_T + \sum_{k=1,2} \bar{m}_{Bk}) -$$

$$-[p^2 + k_J(\beta p + c_\omega)]\tilde{M}_{B2} + i_2(\beta p + c_\omega) \sum_{k=1,2} \tilde{m}_{Bk},$$

которые позволяют на основании выражений (13), (14) сформировать функции  $\bar{M}_{Bk}(t)$ ,  $\tilde{M}_{Bk}(t)$ , входящие в правые части системы (21).

Уравнения (21) представляют собой сдвоенную модально-физическую модель (МФМ) [5] упругой трансмиссии ТВД, приведенную ко входам двух ДЧВ, расположенных на противоположных концах вала СТ с ограниченной крутильной жесткостью. Структурная схема МФМ, построенная в соответствии с уравнениями (4), (21) – (23), приведена на рис. 2.

### Заключение

Полученные в работе результаты полезны при решении ряда задач, связанных с исследованием вопросов динамики упругих трансмиссий ТВД и при разработке систем контроля технического состояния вала по результатам анализа непрерывных сигналов

штатных датчиков оборотов, установленных на противоположных концах подверженного крутильным колебаниям вала. Для повышения степени достоверности полученных результатов целесообразно осуществить экспериментальную проверку справедливости допущений (6), (12) и (14), принятых при формировании моделей сигналов ДЧВ и моментов на винтах ТВД с упругим валом СТ.

### Литература

1. К вопросу о мониторинге состояния трансмиссии турбовинтовых двигателей / В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, В.М. Суханов, В.М. Глумов, Г.Г. Куликов, С.В. Епифанов, А. Руано // Тр. ИПУ РАН. – 2002. – Т. 19. – С. 52 – 67.
2. Шевяков А.А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1970. – 660 с.
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 396 с.
5. Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства / В.М. Глумов, С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 12. – С. 38 – 50.

Поступила в редакцию 15.05.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.