УДК 629.735.036.001.57

В.В.Якименко

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТУРБОГВИНТОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЯВНОЇ МОДЕЛІ

Розглянуто питання математичного моделювання перспективних турбогвинтових двигунів з метою оцінки їх технічного стану за допомогою неявної діагностичної моделі. Запропоновано в загальному вигляді математичну модель справного стану для турбогвинтового двигуна з вільною турбіною та одновальним турбокомпресором на прикладі двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ.

Розробка та впровадження в експлуатацію нових турбогвинтових двигунів (ТГД), які мають значно вищий рівень контролепридатності в порівнянні з ТГД застарілих конструкцій та призначені для встановлення на літаках, оснащених сучасними бортовими засобами реєстрації параметричної інформації, дозволяють застосувати для оцінки їх технічного стану (ТС) методику, яка пройшла експлуатаційну перевірку та підтвердила свою ефективність на практиці [1,2].

Розглянутий в роботах [1,2] підхід до розробки методики діагностування відносився й до одновального ТГД. Аналогічний підхід може бути використаний як для діагностування ТГД з вільною турбіною та одновальним турбокомпресором (ТВ3-117ВМА-СБМ з літака АН-140 та ТВ7-117С з літака ИЛ-114), так і для діагностування ТГГД з вільною турбіною та двовальним турбокомпресором (Д-27М з літака АН-70).

Розглянемо питання математичного моделювання ТГД з вільною турбіною та одновальним турбокомпресором на прикладі двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ з літака АН-140.

В таблиці наведено перелік параметрів робочого процесу ТГД ТВ3-117ВМА-СБМ, які реєструються бортовими засобами літака АН-140.

Таблиця

Перелік контролюємих параметрів роботи двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ та його систем на літаку АН-140

Найменування параметра	Засоби відображення інформації			Примітки
	Покажчик	Бортовий засіб реєстрації		
		Захищений бортовий накопичувач	Експлуатаційний бортовий накопичувач	
1.Положення ВКД	+	+	+	Датчик встановлено на літаку
2. Температура газів за турбіною компресора $T_г^*$	+	+	+	
3. Частота обертання ротора турбокомпресора $n_{тк}$	+	+	+	
4. Частота обертання вільної турбіни $n_{вт}$	+	+	+	
5. Частота обертання повітряного гвинта $n_{пг}$	+	+	+	
6. Кут встановлення лопатей повітряного гвинта (ПГ)	-	+	+	

де $X_{jпр}$ - j-й приведеный до САУ параметр работи двигуна; $\eta_{ГВ}$ - критерій подібності режимів работи двигуна, який визначається за формулою (1).

Зважаючи на те, що $\eta_{ГВ}$ є функцією двох аргументів $N_{ГВпр}$ и $G_{Ппр}$, можливо записати:

$$\eta_{ГВ} = f_N(N_{ГВпр}) = \eta_{ГВN}, \quad (3)$$

$$\eta_{ГВ} = f_G(G_{Ппр}) = \eta_{ГВG}, \quad (4)$$

що для справного двигуна є рівнозначним, оскільки $\eta_{ГВN} = \eta_{ГВG}$. Однак у разі відхилення фактичного стану двигуна від справного в загальному випадку із-за порушення геометричної подібності елементів проточної частини двигуна або з інших причин, що призвели до змін ККД його вузлів та перерозподілу енергії, що вноситься поміж роторами, буде мати місце нерівність $\eta_{ГВN} \neq \eta_{ГВG}$. Тому залежності (3) та (4) також входять до складу математичної моделі справного стану двигуна.

За допомогою залежностей (3) та (4) може бути вирішена і зворотна задача, тобто:

$$N_{ГВпр} = f_N(\eta_{ГВ}), \quad (5)$$

$$G_{Ппр} = f_G(\eta_{ГВ}). \quad (6)$$

Залежності (2) – (6), які характеризують справний стан двигуна, називаються еталонними та позначаються верхнім індексом «е». На режимах, більших від режимів спрацювання механізації компресора, залежності (2) – (6) являють собою монотонні функції, які можуть бути описані поліномами n-го ступеню.

Отже, математична модель справного стану ТГД ТВ3-117ВМА-СБМ в загальному вигляді являє собою наступну множину еталонних залежностей:

$$\eta^e_{ГВN} = f(N_{ГВпр}) = a_{10} + a_{11} \cdot N_{ГВпр} + a_{12} \cdot N^2_{ГВпр} + \ldots = \sum_0^n a_{1n} \cdot N^n_{ГВпр}; \quad (7)$$

$$\eta^e_{ГВG} = f(G_{Ппр}) = a_{20} + a_{21} \cdot G_{Ппр} + a_{22} \cdot G^2_{Ппр} + \ldots = \sum_0^n a_{2n} \cdot G^n_{Ппр}; \quad (8)$$

$$N^e_{ГВпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{30} + a_{31} \cdot \eta_{ГВ} + a_{32} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{3n} \cdot \eta^n_{ГВ}; \quad (9)$$

$$G^e_{Ппр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{40} + a_{41} \cdot \eta_{ГВ} + a_{42} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{4n} \cdot \eta^n_{ГВ}; \quad (10)$$

$$P^e_{ВКМпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{50} + a_{51} \cdot \eta_{ГВ} + a_{52} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{5n} \cdot \eta^n_{ГВ}; \quad (11)$$

$$M^e_{КРпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{60} + a_{61} \cdot \eta_{ГВ} + a_{62} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{6n} \cdot \eta^n_{ГВ}; \quad (12)$$

$$n^e_{ТКпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{70} + a_{71} \cdot \eta_{ГВ} + a_{72} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{7n} \cdot \eta^n_{ГВ};$$

$$n^e_{ТКпрN} = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{70} + a_{71} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{72} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{7n} \cdot \eta^{en}_{ГВN};$$

$$n^e_{ТКпрG} = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{70} + a_{71} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{72} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{7n} \cdot \eta^{en}_{ГВG};$$

$$P^{*e}_{Кпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{80} + a_{81} \cdot \eta_{ГВ} + a_{82} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{8n} \cdot \eta^n_{ГВ}\ ; \quad (13)$$

$$P^{*e}_{КпрN} = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{80} + a_{81} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{82} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{8n} \cdot \eta^{en}_{ГВN}\ ; \quad (14)$$

$$P^{*e}_{КпрG} = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{80} + a_{81} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{82} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{8n} \cdot \eta^{en}_{ГВG}\ ; \quad (15)$$

$$\pi^{*e}_{К\Sigma} = f(\eta_{ГВ}) = a_{90} + a_{91} \cdot \eta_{ГВ} + a_{92} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{9n} \cdot \eta^n_{ГВ}\ ; \quad (16)$$

$$\pi^{*e}_{К\Sigma N} = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{90} + a_{91} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{92} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{9n} \cdot \eta^{en}_{ГВN}\ ; \quad (17)$$

$$\pi^{*e}_{К\Sigma G} = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{90} + a_{91} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{92} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{9n} \cdot \eta^{en}_{ГВG}\ ; \quad (18)$$

$$T^{*e}_{ТКпр} = f(\eta_{ГВ}) = a_{100} + a_{101} \cdot \eta_{ГВ} + a_{102} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{10n} \cdot \eta^n_{ГВ}\ ;$$

$$T^{*e}_{ТКпрN} = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{100} + a_{101} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{102} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{10n} \cdot \eta^{en}_{ГВN}\ ;$$

$$T^{*e}_{ТКпрG} = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{100} + a_{101} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{102} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{10n} \cdot \eta^{en}_{ГВG}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{\sqrt{T^*_{ТКпр}}}\right)^e = f(\eta_{ГВ}) = a_{110} + a_{111} \cdot \eta_{ГВ} + a_{112} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{11n} \cdot \eta^n_{ГВ}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{\sqrt{T^*_{ТКпр}}}\right)^e_N = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{110} + a_{111} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{112} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{11n} \cdot \eta^{en}_{ГВN}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{\sqrt{T^*_{ТКпр}}}\right)^e_G = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{110} + a_{111} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{112} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{11n} \cdot \eta^{en}_{ГВG}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{G_{Ппр}}\right)^e = f(\eta_{ГВ}) = a_{120} + a_{121} \cdot \eta_{ГВ} + a_{122} \cdot \eta^2_{ГВ} + \ldots = \sum_0^n a_{12n} \cdot \eta^n_{ГВ}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{G_{Ппр}}\right)^e_N = f(\eta^e_{ГВN}) = a_{120} + a_{121} \cdot \eta^e_{ГВN} + a_{122} \cdot \eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_0^n a_{12n} \cdot \eta^{en}_{ГВN}\ ;$$

$$\left(\frac{n_{ТКпр}}{G_{Ппр}}\right)^e_G = f(\eta^e_{ГВG}) = a_{120} + a_{121} \cdot \eta^e_{ГВG} + a_{122} \cdot \eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_0^n a_{12n} \cdot \eta^{en}_{ГВG}\ ;$$

$$\left(\frac{G_{Ппр}}{T^{*}_{ТКпр}}\right)^{e} = f(\eta_{ГВ}) = a_{130} + a_{131}\cdot\eta_{ГВ} + a_{132}\cdot\eta^{2}_{ГВ} + \ldots = \sum_{0}^{n} a_{13n}\cdot\eta^{n}_{ГВ};$$

$$\left(\frac{G_{Ппр}}{T^{*}_{ТКпр}}\right)^{e}_{N} = f(\eta^{e}_{ГВN}) = a_{130} + a_{131}\cdot\eta^{e}_{ГВN} + a_{132}\cdot\eta^{e2}_{ГВN} + \ldots = \sum_{0}^{n} a_{13n}\cdot\eta^{en}_{ГВN};$$

$$\left(\frac{G_{Ппр}}{T^{*}_{ТКпр}}\right)^{e}_{G} = f(\eta^{e}_{ГВG}) = a_{130} + a_{131}\cdot\eta^{e}_{ГВG} + a_{132}\cdot\eta^{e2}_{ГВG} + \ldots = \sum_{0}^{n} a_{13n}\cdot\eta^{en}_{ГВG}.$$

Слід зазначити, що залежності (7) та (8) в цій моделі виконують допоміжну функцію та використовуються для реалізації інших залежностей. На перший погляд, залежності (9), (11) та (12) дублюють одна одну, але, приймаючи до уваги, що значення $M_{КР}$ та $N_{ГВ}$ розраховуються за допомогою $P_{ВКМ}$ за алгоритмом, який закладено в РЕД-2000, можна припустити, що використання цих залежностей допоможе виявляти, несправності у разі появи у каналах реєстрації параметрів $M_{КР}$ та $N_{ГВ}$. З аналогічних міркувань до складу математичної моделі, окрім залежностей (13)–(15), входять також (16)–(18). Можливо припустити, що використання залежностей (13)–(15) одночасно допоможе виявляти, у разі появи, несправності у каналі реєстрації параметру $P^{*}_{ВХ}$, оскільки:

$$\pi^{*}_{К\Sigma} = \frac{P^{*}_{К}}{P^{*}_{ВХ}}.$$

Коефіцієнти $a_{130} - a_{13n}$ можуть бути обчислені за методом найменших квадратів з використанням значень параметрів висотно-швидкісних характеристик двигуна, або за параметрами, зареєстрованими під час контрольно-здавальних випробувань двигунів.

Список літератури

1. *Методическое* обеспечение автоматизированной системы диагностирования двигателей АИ-24 (АСД «Контроль – 24») / Л.П. Лозицкий, А.В. Тарасенко, В.В. Якименко и *др.*. – К.: КИИГА, 1989. – 71 с.

2. *В.В. Якименко, И.П. Твердохлеб.* Метод диагностирования ТВД в условиях АТБ // Проблемы управления техническим состоянием авиационных двигателей: Межвуз.сб.науч.тр.–К.: КИИГА, 1990. – С

3. *Руководство* по експлуатации автоматизированной системы диагностирования двигателей АИ-24 (АСД «Контроль – 24») / *Л.П. Лозицкий, А.В. Тарасенко, В.В. Якименко и др.* – К.: КИИГА, 1990. – 116 с.

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 1999 року.