

УДК (651. 34)

С.Г. Семенов, С.М. Глоба, Р.П. Мигущенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВИХ ТОЧОК ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТА НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Доведено актуальність питання вимірювання та неруйнівного контролю авіаційної техніки. Проведено аналіз методів неруйнівного контролю. Доведено, що отримання повної інформації та її оцінка об'єктів контролю (АТ) неможливі без застосування вдосконалених методів ідентифікації та виявлення особливих точок (коренів) динамічної системи. Показано, що дане завдання найчастіше вирішують за допомогою індексів особливих точок. Проведено дослідження індексів особливих точок на прикладі спостережуваних структурно-інформаційних портретів системи вимірювання та неруйнівного контролю.

Ключові слова: вимірювання, авіаційна техніка, ідентифікація, індекс особливих точок.

Вступ

Постановка проблеми. Вимірювання та неруйнівний контроль (ВНК) авіаційної техніки (АТ) як один з видів робіт, що забезпечують безпечну експлуатацію АТ, почав активно впроваджуватися в процеси технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) в 50-ті роки. Він знаходив все більш широке застосування в міру розвитку методів, розробки та серійного випуску засобів ВНК, а також у зв'язку з експлуатацією парку повітряних суден (ПС) за принципом допустимості пошкоджень критичних місць конструкції в умовах збільшення календарного і призначеного ресурсів і термінів служби ПС.

ВНК як складова частина системи підтримання льотної придатності ПС спирається на:

- розробників нормативно-технічної документації (НТД) з неруйнівного контролю;
- підрозділи ВНК (лабораторії, групи, ділянки), організації ТОіР, що виконують контроль авіаційної техніки засобами ВНК;
- систему навчання та атестації фахівців з неруйнівного контролю;
- розробників і виробників засобів неруйнівного контролю.

Основними методами неруйнівного контролю, застосовуваними в цивільній авіації, є візуально-оптичний, вихрострумний, магнітопорошковий, ультразвуковий (акустичний), капілярний, рентенографічний. Головна роль ВНК полягає в забезпеченні своєчасного виявлення дефектних елементів конструкції планера, двигуна, агрегатів ПС з метою виключення їх можливого руйнування в процесі подальшої експлуатації. Істотним є той факт, що в процесі проведення контролю випробовувані елементи не піддаються яким-небудь впливам, здатним привести до їх пошкодження.

У всіх країнах світу найбільша затребуваність ВНК проявляється в екстремальних ситуаціях, напри-

клад у випадку авіакатастроф, викликаних дефектами конструкції повітряних суден. У СРСР прикладом цього може служити катастрофа літака Ан-10 в 1972 р. [1] (руйнування крила), після якої всі літаки даного типу були зняті з експлуатації. Слід зазначити, що якби в процесі випробувань крила у зв'язку з продовженням ресурсу до парку літаків Ан-10 були застосовані інструментальні засоби ВНК, початковий дефект на випробувальному об'єкті був би виявлений і вжито заходів щодо доопрацювання конструкції. Крім того, всі літаки після доопрацювання могли б літати до теперішнього часу, що підтверджує експлуатація Ан-12, що має аналогічну конструкцію центроплану. Неувага до своєчасному впровадженню методів ВНК, призводить до людських трагедій і дуже великим матеріальних і моральних втрат для держави.

Аналіз літератури [1, 2] показав, що одним з найбільш поширених методів ВНК є вихрострумний. В той же час отримання даних вихрострумного контролю вимагає від фахівця високої кваліфікації і досвіду роботи з конкретним приладом. Через особливості проведення маніпуляцій і суб'єктивного сприйняття інформації може значно знижуватися точність результатів контролю. У зв'язку з цим при організації вихрострумного контролю необхідно прагнути враховувати вплив людського фактора, забезпечивши ефективність контролю за рахунок розробки та застосування результативних методів ідентифікації об'єктів контролю.

Проведені аналіз і дослідження методів ідентифікації об'єктів неруйнівного контролю показали доцільність використання фазових і спостережуваних структурно-інформаційних портретів, а також можливість отримання з їхньою допомогою певних висновків про властивості системи. Проведені дослідження показали, що отримання повної інформації та її оцінка неможливі без виявлення особливих точок (коренів) динамічної системи. Аналіз низькі робіт [3 – 7] показав, що дане завдання найчастіше вирішують за допомогою індексів особливих точок.

Основна частина

Проведені дослідження [5 – 7] показали, що в теорії математичного моделювання для розв'язання даної задачі найчастіше використовуються методи кореляційного аналізу [7], при цьому як показник відбору застосовується коефіцієнт взаємної кореляції. Розглянемо даний підхід більш докладно. Нехай досліджуваний об'єкт, описується рівнянням:

$$y(t) = f(t, I_{BX}), \quad \{y(t) = f(t, K), y(t) = f(t, K_{\Pi})\}, \quad (1)$$

де $f(\cdot)$ – функція заданого класу. Розглянемо проекцію спостережуваних структурно-інформаційних портретів $Z_i (Z_{li})$ об'єкту контролю на площині $\{y, I_{BXi}\}, \{y, k_i\}, \{y, k_{\Pi i}\}$, де $I_{BXi} \in \mathbb{N}, k_i \in \mathbb{Z}, k_{\Pi i} \in \mathbb{Z}$ – точки вхідних даних моніторингу в просторах структурно-інформаційних портретів. Отримаємо звуження відображень $Z_i : Z_i^{I_{BXi}} \subset Z_i \Big|_{I_{BXi} \in U}, Z_i : Z_i^{k_i} \subset Z_i \Big|_{k_i \in K},$

$Z_i : Z_i^{k_{\Pi i}} \subset Z_i \Big|_{k_{\Pi i} \in U}$ і траєкторії руху системи, задані як $\wp_{I_{BXi}} : I(y) \rightarrow I(I_{BXi} \in U), \wp_{k_i} : I(y) \rightarrow I(k_i \in K), \wp_{k_{\Pi i}} : I(y) \rightarrow I(k_{\Pi i} \in K_{\Pi})$. Розглянемо залежності $I_{BXi} = I_{BXi}(y), k_i = k_i(y)$ і $k_{\Pi i} = k_{\Pi i}(y)$, де $I_{BXi}(y), k_i(y), k_{\Pi i}(y)$ – проекції точок $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$ на площині $\{y, I_{BXi}\}, \{y, k_i\}, \{y, k_{\Pi i}\}$ відповідно і апроксимуємо їхніми лінійними моделями $\bar{\wp}_{I_{BXi}}, \bar{\wp}_{k_i}, \bar{\wp}_{k_{\Pi i}}$ (на основі отриманих даних додамо лінії тренду), тобто отримаємо оцінку змін змінних $I_{BXi}(y), k_i(y), k_{\Pi i}(y)$ в середньому:

$$\bar{\wp}_{I_{BXi}} : I_{BXi} = I_{BXi}(y) = a_{0,i} + a_{1,i}y, \quad (2)$$

$$\bar{\wp}_{k_i} : k_i = k_i(y) = b_{0,i} + b_{1,i}y, \quad (3)$$

$$\bar{\wp}_{k_{\Pi i}} : k_{\Pi i} = k_{\Pi i}(y) = c_{0,i} + c_{1,i}y, \quad (4)$$

де $a_{0,i}, a_{1,i}, b_{0,i}, b_{1,i}, c_{0,i}, c_{1,i}$ – деякі числа.

Знайдемо середньоквадратичне відхилення для змінних $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$:

$$\sigma_{I_{BXi}} \{ \sigma_{k_i}, \sigma_{k_{\Pi i}} \} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[I_{BXi}(t_j) \{ k_i(t_j), k_{\Pi i}(t_j) \} - M \{ I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i} \} \right]^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{I_{BXi}(y)} \{ \sigma_{k_i(y)}, \sigma_{k_{\Pi i}(y)} \} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[I_{BXi}(y_j) \{ k_i(y_j), k_{\Pi i}(y_j) \} - M \{ I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i} \} \right]^2}, \quad (6)$$

де $t_j \in J$ – дискретний момент отримання даних експерименту ($j = \overline{1, n}$); $M \{ I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i} \}$ – математичне сподівання випадкових величин $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$; $I_{BXi}(y_j)$ – оцінка математичного сподівання, отримана за допомогою моделі (2-4).

Для оцінки ступеня зв'язності змінних $I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}$ та у визначимо характеристики:

$$\varpi_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}} = \frac{a_{1,i} \{ b_{1,i}, c_{1,i} \} - 1}{1 + a_{1,i} \{ b_{1,i}, c_{1,i} \}}, \quad (7)$$

$$\kappa_{\gamma_{I_{BXi}}} = \sigma_{I_{BXi}} \{ \sigma_{k_i}, \sigma_{k_{\Pi i}} \} / \sigma_{I_{BXi}(y)} \{ \sigma_{k_i(y)}, \sigma_{k_{\Pi i}(y)} \}, \quad (8)$$

де $\varpi_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}} = \text{tg} \phi$ – кут між прямими γ_y і $\gamma_{I_{BXi}} \{ \gamma_{k_i}, \gamma_{k_{\Pi i}} \}$. Характеристика ϖ відображає вплив змінних $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$ на змінну y в (1). Величина $\kappa_{\gamma_{I_{BXi}}}$ характеризує ступінь взаємозв'язку змінних $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$ і y . Нехай $\hat{h}_{y, I_{BXi}}, \hat{h}_{y, k_i}, \hat{h}_{y, k_{\Pi i}}$ – коефіцієнти зв'язності y і $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$ відповідно:

$$\hat{h}_{y, I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}} = \text{sgn}(\varpi_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}) \kappa_{\gamma_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}},$$

де $\text{sgn}(\varpi_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}})$ – функція напрямлення:

$$\text{sgn}(\varpi_{I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}) = \begin{cases} 1, \varpi > 0 \\ -1, \varpi < 0 \end{cases}$$

Проведені дослідження [7] показали, що для будь-якого $\hat{h}_{y, I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}$ справедлива рівняння:

$$\hat{h}_{y, I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}} = g_{y, I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}, \quad (7)$$

де $g_{y, I_{BXi} \{ k_i, k_{\Pi i} \}}$ – коефіцієнт взаємної кореляції між y



Рис. 1. Приклад структурно-інформаційного портрету об'єкту ИНК АТ

та $I_{BXi}, k_i, k_{\Pi i}$.

Нехай z – векторне поле, задане на орієнтованій евклідовій площині \hat{Z} , породжене динамічною системою (2-4). У більшості практичних випадків полю z на евклідовій площині

\hat{Z} відповідає набір замкнутих кривих $Z_{\phi} (Z_{l\phi})$ (фазовий портрет) або $Z_i (Z_{li})$ (спостережуваний структурно-інформаційний портрет) (рис. 1). Тоді індексом можна назвати поділену на 2π варіацію поля z вздовж кривих $Z_{\phi} \langle Z_{l\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$. Якщо позначити,

через $D \subseteq \hat{Z}$ область площини \hat{Z} з координатами (x_1, x_2) і \hat{S} – як коло на площині \hat{Z} , при цьому задали відображення області $\hat{D} = D/D_0$ на окружність \hat{S} :

$$Z_{\phi} : \hat{D} \rightarrow \hat{S}, Z_{\phi}(X) = \frac{F(X)}{\|F(X)\|}, \quad X \in \mathbb{R}^2,$$

$$\langle Z_{l\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle : \hat{D} \rightarrow \hat{S}, \langle Z_{l\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle(X) = \frac{F(X)}{\|F(X)\|}, \quad X \in \mathbb{R}^2,$$

де D_0 – область з особливими точками поля, $\|\bullet\|$ – евклідова норма.

Індексом орієнтованої замкнутої кривої $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle : \hat{D} \rightarrow \hat{S}$ називається інтеграл: [3, 7]

$$d\phi = d \arctg \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_2 df_1 - f_1 df_2}{f_1^2 + f_2^2}, \quad f_i(X) \in F(X)$$

по кривій $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$, поділений на 2π :

$$\text{ind} \left(Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle \right) = \oint_{Z_{\phi}} d\phi / (2\pi) \quad (\text{рис. 2}).$$



Рис. 2. Крива індексу

Таким чином, індекс пов'язаний тільки з замкнутими кривими $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$.

Виходячи з властивостей індексу кривої (незмінності індексу до проходження через особливі точки при деформації замкнутої кривої і векторного поля) зазначених у [6], можна зробити такі висновки:

1. Якщо крива $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$ складається з декількох кривих z_1, z_2, \dots , то індекс

$$\text{ind} \left(Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle \right) = \sum_i \text{ind}(z_i);$$

2. Якщо на деякій кривій $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$, що обмежує область D немає особливих точок, а в області D є кінцева кількість особливих точок, то індекс кривої $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$ дорівнює сумі індексів особливих точок поля, що лежать всередині;

3. Якщо індекс кривої $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$ відмінний від нуля, то всередині області D, обмеженої кривою $Z_{\phi} \langle Z_{1\phi}, Z_i, Z_{li} \rangle$ є хоча б одна особлива точка.

Висновки

В статті доведено актуальність питання вимірювання та неруйнівного контролю авіаційної техніки.

Доведено, що отримання повної інформації та її оцінка об'єктів контроль (АТ) неможливі без застосування вдосконалених методів ідентифікації та виявлення особливих точок (коренів) динамічної системи. Показано, що дане завдання найчастіше вирішують за допомогою індексів особливих точок.

Проведено дослідження індексів особливих точок на прикладі спостережуваних структурно-інформаційних портретів системи ВНК.

Список літератури

1. Агеев В. *Неразрушающий контроль становится определяющим при эксплуатации стареющего парка ВС и новой авиатехники по техническому состоянию* [Электронный ресурс] / В. Агеев. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ato.ru/content/nerazrushtayushchiy-kontrol>.
2. ГОСТ Р 55253-2012 *Воздушный транспорт. Контроль неразрушающий авиационной техники. Требования к применению, организации и проведению работ* [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293782/4293782130.htm>.
3. Карабутов Н.Н. *Адаптивная идентификация систем: Информационный синтез* / Н.Н. Карабутов. – М.: КомКнига, 2006. – 384 с.
4. Карабутов Н.Н. *Структурная идентификация систем: анализ динамических структур* / Н.Н. Карабутов. – М.: МГИУ, 2008. – 160 с.
5. Семенов С.Г. *Структурно-функциональный анализ современных информационных систем с разработкой комплексного показателя эффективности их функционирования* / С.Г. Семенов // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 2 (92). – С. 145-150.
6. Семенов С.Г. *Динамическая модель информационной системы на основе наблюдаемого структурно-информационного портрета* / С.Г. Семенов, В.В. Давыдов // Вісник ННТУ «ХПІ». – Х., 2011. – № 36. – С. 156-163.
7. Семенов С.Г. *Структурно-информационный портрет информационной системы в условиях неопределенности на примере Dos-атаки* / С.Г. Семенов // Радіотехніка. – Х.: ХНУРЕ, 2011. – № 166. – С. 99-106.

Надійшла до редколегії 22.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.О. Можасєв, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЫХ ТОЧЕК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

С.Г. Семенов, С.М. Глоба, Р.П. Мигушченко

Доказана актуальность вопроса измерения и неразрушающего контроля авиационной техники. Проведен анализ методов неразрушающего контроля. Доказано, что получение полной информации и ее оценка объектов контроля невозможны без применения усовершенствованных методов идентификации и выявления особых точек (корней) динамической системы. Показано, что данную задачу чаще всего решают с помощью индексов особых точек. Проведено исследование индексов особых точек на примере наблюдаемых структурно-информационных портретов системы измерения и неразрушающего контроля.

Ключевые слова: измерение, авиационная техника, идентификация, индекс особых точек.

IDENTIFICATION OF SPECIFIC POINTS IN THE MEASUREMENT AND NDT AIRCRAFT

S.G. Semenov, S.M. Globa, R.P. Mygushchenko

The urgency of the issue of measurement and non-destructive testing of aircraft. The analysis methods for non-destructive testing. It is proved that the receipt of the complete information and its evaluation of control objects is impossible without the use of improved methods for the identification and detection of singular points (roots) of the dynamic system. It is shown that this problem often solved by indices of singular points. A study of indices of singular points on the example of the observed structural and information portraits of measurement and non-destructive testing.

Keywords: measurement, aviation technology, identification, index of singular points.