

УДК 629.734.7

АСЛАНЯН А.Е., провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, професор

БЕЛЬСЬКА О.А., доцент, кандидат технічних наук, Національний авіаційний університет,

СИНТЕЗ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Запропонована система неперервного контролю параметрів лінійної динамічної моделі широкого класу енергетичних об'єктів. Ця система, як джерело первинної інформації про поточний технічний стан, є основною складовою частиною автоматизованої системи керування технічним станом енергетичних об'єктів.

Ключові слова: лінійна динамічна модель, енергетичні об'єкти, система неперервного контролю параметрів, автоматизованої системи керування технічним станом.

Використання стратегії технічного обслуговування за станом широкого кола енергетичних об'єктів (таких як газотурбінні двигуни літаків та суден, газотурбінні установки (ГТУ) компресорних станцій, ГТУ пересувних електростанцій та інше) вимагає неперервного контролю визначальних параметрів, що характеризують їх поточний технічний стан.

Існуючі стратегії і програми технічного обслуговування динамічних об'єктів за станом умовно можна розділити на три групи:

- з контролем рівня надійності об'єкта експлуатації;
- з контролем параметрів об'єкта експлуатації;
- комбіновані.

Силові газотурбінні агрегати, що наразі знаходяться в експлуатації, є, з одного боку, об'єктами експлуатації з високою функціональною значимістю, але, в той же час, мають недостатній ступінь резервування, а також невисокий рівень експлуатаційної технологічності та контролепридатності. Тому для них доцільне застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, при якій передбачається динамічний контроль параметрів, що визначають фактичний поточний технічний стан кожного окремого об'єкта експлуатації.

Під динамічним контролем будемо розуміти сукупність дій, що спрямовані на визначення поточного технічного стану об'єкта або його окремого вузла за результатами вимірювання параметрів з високою діагностичною цінністю, які суттєво змінюються у часі. Динамічний контроль використовується для оцінки поточного технічного стану інерційних об'єктів на відміну від статичного контролю, що використовується для оцінки технічного стану безінерційних об'єктів, або ж таких інерційних об'єктів, час перехідних процесів в яких є значно менший ніж час, що відводиться на сам контроль.

Вибір параметрів, що підлягають динамічному контролю, як правило, неоднозначний, але вимоги до вибору носять загальний характер, згідно з яким вимірювані параметри повинні мати: прийнятні точність і стабільність показань у часі; володіти найбільшою серед інших параметрів діагностичною цінністю; ґрунтуватися на штатних вимірюваннях; забезпечувати простоту і зручність експлуатації вимірювальних засобів, що використовуються. Наприклад, для силових ГТУ, за рівнем діагностичної цінності вимірювані функціональні параметри умовно можуть бути розділені на дві групи. До першої групи з більшою питомою вагою відносяться температура перед турбіною і за турбіною, тиск за компресором, частоти обертання (висока точність і стабільність вимірювань у часі); температура та тиск масла в системі змащення; параметри вібрації вала. До другої групи вимірюваних параметрів з меншою питомою вагою можна віднести всі інші вимірювані параметри: температура на виході камери згоряння; тиск на виході турбіни; температура в порожнині колеса турбіни; температура на виході компресора; витрата палива. Але, як свідчить досвід експлуатації енергетичних об'єктів, сумарний вплив несправностей, що в них виникають, на визначальні функціональні параметри суттєво нижче рівня відхилень, які викликані зміною режиму роботи та зміною зовнішніх умов експлуатації. Для зменшення впливу зміни режимів та випадкових змін зовнішніх умов функціонування об'єкта зазвичай використовуються комплексні діагностичні параметри. Наприклад, в роботі [1], в якості таких діагностичних параметрів обрані відхилення вимірюваних функціональних параметрів (як їх фізичних значень, так і приведених до стандартних атмосферних умов) від номінальних величин, що відповідають справному стану ГТУ. Ці відхилення мають характер як високочастотних, так і низькочастотних коливань відносно номінальних значень, що обумовлено наступним: наявністю похибок вимірювання параметрів ГТУ та похибок моделювання номінальних режимів, наявністю випадкових змін зовнішніх умов функціонування ГТУ та інше.

Слід зазначити також, що будь-який динамічний об'єкт технічного обслуговування в першу чергу є об'єктом автоматичного регулювання, що використовується за своїм функціональним призначенням і характеризується сукупністю вхідних (регулюючих) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))^T$, сукупністю вихідних (регульованих) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_r(t))^T$, а також сукупністю спостережуваних (вимірюваних) параметрів, що утворюють вектор $\mathbf{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T$, $m \leq r < n$. При цьому основна задача системи автоматичного регулювання – забезпечення номінальних (штатних) режимів функціонування об'єкта технічного обслуговування.

З аналізу теоретичних та експериментальних досліджень відомо, що в більшості випадків в якості математичної моделі енергетичного об'єкта (котел, турбіна, насос, дизель та інше) може бути вибрана система звичайних нелінійних диференціальних

та алгебраїчних рівнянь виду

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad (1)$$

Відомо, що при побудові систем автоматичного регулювання за принципом від'ємного зворотного зв'язку, традиційно, починаючи з робіт О.М. Ляпунова, використовуються лінійні динамічні моделі об'єктів регулювання, що пояснюється малістю відхилень значень вихідних функціональних параметрів від їх номінальних значень, а саме це і дозволяє використовувати метод лінеаризації. В роботі [2] в якості параметрів, що характеризують технічний стан об'єкта технічного обслуговування, запропоновано розглядати параметри його лінійної динамічної моделі (коефіцієнти підсилення, сталі часу), тобто параметри лінійних рівнянь (як диференціальних так і алгебраїчних), що записані у відхиленнях від номінальних режимів та в безрозмірній формі. Ці параметри характеризують технічний стан справного об'єкта і, водночас, є нечутливими до випадкових змін зовнішніх умов та режимів функціонування. Для об'єктів, що експлуатуються за методом технічної експлуатації до передвідмовного стану, набір визначальних параметрів і допуски на них указуються розроблювачем виробу. Тому, при побудові лінійної динамічної моделі об'єкта варто керуватися наступним правилом: лінійна динамічна модель об'єкта повинна зв'язувати функціональні параметри об'єкта технічного обслуговування, що мають найбільшу діагностичну цінність, а параметри лінійної динамічної моделі повинні бути взаємооднозначно пов'язані з визначальними параметрами, що призначені розроблювачем виробу. У цьому випадку параметри лінійної динамічної моделі цілком характеризують технічний стан об'єкта, а зміна цих параметрів у часі характеризує процес "старіння" об'єкта технічного обслуговування. Неперервний контроль визначальних параметрів у такому разі здійснюється в результаті неперервного контролю й ідентифікації параметрів лінійної динамічної моделі, що дозволяє забезпечити зворотний зв'язок у контурі керування технічним станом об'єкта. Неперервність контролю визначальних параметрів гарантує обсяг інформації про технічний стан об'єкта, що виключає можливість раптових відмов. Для поступових відмов можуть бути розроблені спеціальні методи їхнього прогнозування, основною задачею яких є своєчасне виявлення передвідмовного стану об'єкта. При цьому процес зміни відповідних параметрів, що характеризують технічний стан об'єкта, як правило, має монотонний характер. Слід зазначити, що при прогнозуванні зазвичай користуються не моделями систем, а адаптивними моделями прогнозування визначальних параметрів, здатними реагувати на зміни технічного стану об'єкта технічного обслуговування. Принципи побудови системи динамічного контролю параметрів, що характеризують технічний стан, і адаптивних моделей прогнозування цих параметрів є універсальними для широкого класу динамічних об'єктів, а лінійна динамічна модель об'єкта технічного обслуговування, що задовольняє сформульованим вище вимогам, створюється для кожного об'єкта індивідуально.

Зрозуміло, що параметри лінійної динамічної моделі не підлягають безпосередньому вимірюванню, а тому для їх неперервного контролю необхідно синтезувати адаптивну систему, яка буде здійснювати моніторинг у реальному часі.

У загальному випадку лінійна динамічна модель енергетичного об'єкта, що відповідає системі рівнянь (1), є системою нестационарних лінійних рівнянь, як диференціальних, так і алгебраїчних, яка записана у відхиленнях та в безрозмірній формі, і має вигляд:

$$\frac{dx}{dt} + A(t)x(t) = B(t)u(t), \quad (2)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t). \quad (3)$$

Рівняння (2) – це рівняння руху, а рівняння (3) – це рівняння спостереження.

Нехай t_0 – час початку діагностування. Для кожного $t > t_0$ за формулою Коші маємо

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, t_0)\Phi^{-1}(\tau, t_0)B(\tau)u(\tau)d\tau,$$

де $\Phi(t, t_0)$ – нормована матриця Коші, стовпчики якої - це r лінійно незалежних розв'язків однорідної системи диференціальних рівнянь, що відповідає системі диференціальних рівнянь (2), при чому $\Phi(t_0, t_0) = E$, де E – одинична матриця, а $x(t_0)$ – вектор початкових умов, який, у загальному випадку, не дорівнює нулю.

Для вектора спостережуваних параметрів $y(t)$ при кожному $t > t_0$ маємо

$$y(t) = C(t)\Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t C(t)\Phi(t, t_0)\Phi^{-1}(\tau, t_0)B(\tau)u(\tau)d\tau + D(t)u(t).$$

Позначимо

$$y_0(t) = y(t) - C(t)\Phi(t, t_0)x(t_0).$$

Тоді

$$y_0(t) = \int_{t_0}^t C(t)\Phi(t, t_0)\Phi^{-1}(\tau, t_0)B(\tau)u(\tau)d\tau + D(t)u(t), \quad (4)$$

тобто при кожному фіксованому $t > t_0$ та справному стані енергетичного об'єкта множина усіх можливих реалізацій вектора $y_0(t)$ утворює, у загальному випадку, m – вимірну гіперплощину у n – вимірному евклідовому просторі ($m < n$).

З іншого боку, при кожному фіксованому $t > t_0$ співвідношення (4) визначає лінійний неперервний оператор A_t , причому областю значень цього оператора є m – вимірна гіперплощина в n – вимірному евклідовому просторі. Як відомо [3], для

кожного лінійного неперервного оператора A_t існує спряжений оператор A_t^* , а відповідно, при умові, що добуток $A_t^*A_t$ є взаємнооднозначним оператором, може бути визначений оператор

$$P_t = E - A_t (A_t^*A_t)^{-1} A_t^*,$$

де E – одиничний оператор, що діє в n – вимірному евклідовому просторі.

Легко бачити, що оператор P_t задовольняє наступному співвідношенню

$$P_t^2 = P_t^* = P_t,$$

а це свідчить про те, що оператор P_t при кожному фіксованому t є оператором ортогонального проектування, що діє в n – вимірному евклідовому просторі. Тому, якщо скоригований вектор спостережуваних параметрів $y_0(t)$ у деякий фіксований момент $t > t_0$ не буде належати гіперплощині справних станів динамічного об'єкта, тобто

$$y_0^\perp(t) = P_t y_0(t) - y_{0pr}(t) \neq 0, \quad (5)$$

де $y_{0pr}(t)$ – це проекція вектора $y_0(t)$ на m – вимірну гіперплощину справних станів динамічного об'єкта, то реальний поточний технічний стан об'єкта не відповідає лінійній динамічній моделі справного об'єкта і необхідно виконувати ідентифікацію параметрів лінійної динамічної моделі, що буде відповідати його новому поточному технічному стану. Таким чином, лінійна динамічна модель буде «старіти» синхронно зі зміною реального технічного стану динамічного об'єкта. Зазначимо, що умова (5) – є достатньою (а на практиці і необхідною) умовою невідповідності параметрів лінійної динамічної моделі поточному технічному стану динамічного об'єкта.

Структурна схема системи динамічного контролю параметрів, що характеризують технічний стан енергетичного об'єкта, представлена на рис. 1.

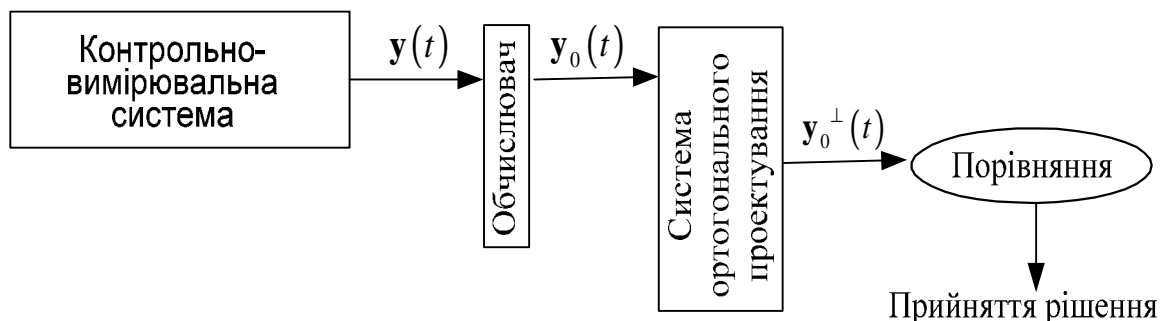


Рис. 1. Структурна схема системи динамічного контролю параметрів лінійної динамічної моделі

У випадку, коли рівняння (2) - (3) є стаціонарними, а саме мають вигляд

$$\begin{cases} \mathbf{T} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \mathbf{x}(t) = \mathbf{K}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{K}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}_2\mathbf{u}(t) \end{cases}, \quad (6)$$

де \mathbf{T} – невироджена матриця узагальнених сталих часу, розміру $r \times r$, а матриці \mathbf{K} , \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 – матриці коефіцієнтів підсилення, розмірів $r \times m$, $n \times r$, $n \times m$ відповідно, нормована матриця Коші $\Phi(t, t_0)$ легко може бути знайдена, а саме

$$\Phi(t, t_0) = e^{-\mathbf{T}^{-1}(t-t_0)},$$

що дозволяє одержати матрицю передаточних функцій $\mathbf{H}(p)$ системи проектування, яка наведена на рис. 1:

$$\mathbf{H}(p) = \mathbf{E} - (\mathbf{K}_1(\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2) \left[\mathbf{K}^T (\mathbf{T}^T p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K}_1^T \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \right. \\ \left. + \mathbf{K}^T (\mathbf{T}^T p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K}_1^T \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_2^T \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2^T \mathbf{K}_2 \right]^{-1} (\mathbf{K}^T (\mathbf{T}^T p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K}_1^T + \mathbf{K}_2^T), \quad (7)$$

де \mathbf{E} - це n – вимірна одинична матриця.

При цьому на вхід системи проектування з виходу обчислювача буде подаватися скоригований вектор спостережуваних параметрів

$$\mathbf{y}_0(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{K}_1 e^{-\mathbf{T}^{-1}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0).$$

Якщо матриці лінійної динамічної моделі \mathbf{T} , \mathbf{K} , \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 , що входять до системи рівнянь (6), ідеально відповідають поточному технічному стану динамічного об'єкта, то для будь-якого $t > t_0$

$$\mathbf{y}_0^\perp(t) \equiv 0. \quad (8)$$

Порушення ж цієї тотожності у деякий момент часу $t_1 > t_0$ свідчить про те, що деякі параметри лінійної динамічної моделі об'єкта не відповідають його реальному технічному стану в цей момент часу і підлягають корекції.

Істотною перевагою запропонованої схеми є те, що висновок про адекватність моделі поточному технічному стану об'єкта можна зробити при повній відсутності інформації про вхідні параметри і, тим більше, без будь-яких тестових впливів на об'єкт. Зазначимо, що метод ортогонального проектування дозволяє не тільки контролювати параметри лінійної динамічної моделі, що характеризують поточний технічний стан динамічного об'єкта, але й є придатним для визначення рядка (рядків) матриці передавальних функцій лінійної динамічної моделі енергетичного об'єкта

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{K}_1 (\mathbf{T}p + \mathbf{E})^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{K}_2, \quad (9)$$

який містить параметри, що не відповідають поточному технічному стану. Ця процедура також може бути здійснена при повній відсутності інформації відносно

вектора $\mathbf{u}(t)$ [2].

Слід зазначити, що наведена система динамічного контролю є системою сигнального діагностування, що функціонує в реальному часі. Адаптація параметрів лінійної динамічної моделі до поточного технічного стану енергетичного об'єкта відбувається лише після того, як в деякий момент часу t_1 вперше спостерігається нерівність $\mathbf{y}_0^\perp(t_1) \neq 0$. Ідентифікація нових значень параметрів лінійної динамічної моделі може бути виконана одним із відомих методів параметричної ідентифікації [4], при цьому елементи матриці сталих часу \mathbf{T} можуть бути визначені внаслідок аналізу перехідних процесів, а елементи матриць \mathbf{K} , \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 – внаслідок аналізу як перехідних, так і усталених режимів. Після ідентифікації нових значень параметрів лінійної динамічної моделі об'єкта матриця передавальних функцій системи проектування також адаптується до нового технічного стану об'єкта, внаслідок чого виконання тотожності $\mathbf{y}_0^\perp(t) \equiv 0$ поновиться і буде виконуватися до деякого моменту $t_2 > t_1$, у який будемо мати $\mathbf{y}_0^\perp(t_2) \neq 0$. В момент часу t_2 процедура адаптації системи безперервного моніторингу до нового технічного стану енергетичного об'єкта повторюється. Таким чином, синтезована система динамічного контролю параметрів лінійної динамічної моделі енергетичного об'єкта адаптується до його поточного технічного стану і «старіє» синхронно з ним.

Параметри лінійної динамічної моделі, що визначаються під час ідентифікації в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n , надходять до бази даних інтегральної інформаційно-обчислювальної системи, в якій на основі одержаної первинної інформації здійснюється оцінка поточного технічного стану енергетичного об'єкта та прогнозування технічного стану на середньострокову та довгострокову перспективи з метою своєчасного виявлення передвідмовного стану об'єкта, що контролюється. Таким чином, контур керування технічним станом динамічного об'єкта стає замкнутим, а це дає змогу перейти до стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів.

Проілюструємо одержані теоретичні результати на прикладі одновального турбореактивного двигуна (ТРД) з нерегульованим соплом. Лінійна динамічна модель для одновального ТРД наведена в [5] та має вигляд

$$\begin{cases} (0.5p + 1)X_n = 0.333X_{G_T} \\ (0.5p + 1)X_{T_3} = (0.333p + 0.370)X_{G_T} \\ (0.5p + 1)X_{T_4} = (0.293p + 0.06)X_{G_T} \end{cases}$$

де X_{G_T} – витрата палива (регулюючий параметр), X_n – частота обертання ротору двигуна, X_{T_3} – температура газу перед турбіною, X_{T_4} – температура газу за турбіною, X_n , X_{T_3} , X_{T_4} – спостережувані параметри.

Позначимо $u(t)=X_{G_T}$, $y_0(t)=(y_1(t), y_2(t), y_3(t))^T = (X_n, X_{T_3}, X_{T_4})^T$ – скоригований вектор спостережуваних параметрів. Тоді, відповідно до співвідношення (9)

$$W(p) = \begin{pmatrix} w_1(p) \\ w_2(p) \\ w_3(p) \end{pmatrix} = K_1(Tp + E)^{-1}K + K_2,$$

де $K_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.889 \\ -1.580 \end{pmatrix}$, $K_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.666 \\ 0.586 \end{pmatrix}$, $K = (0.333)$, $T = (0.5)$.

Відповідно до співвідношення (7) матриця передавальних функцій системи ортогонального проектування $H(p)$ має вигляд:

$$H(p) = \begin{pmatrix} \frac{0.197p^2 + 0.281p + 0.141}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.111p + 0.123}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.098p + 0.020}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \\ \frac{0.111p + 0.123}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.086p^2 + 0.035p + 0.115}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.098p^2 + 0.128p + 0.022}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \\ \frac{0.098p + 0.020}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.098p^2 + 0.128p + 0.022}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.111p^2 + 0.246p + 0.248}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \end{pmatrix}.$$

Подальше моделювання будемо виконувати в програмному середовищі MATLAB.

Припустимо, що на виході обчислювача спостерігається вектор

$$y_0(t) = (y_{01}(t), y_{02}(t), y_{03}(t))^T.$$

На рис.2 наведено три варіанти графіків координат вектора $y_0(t)$.

На виході системи ортогонального проектування спостерігаємо вектор $y_0^\perp(t)$, відповідні графіки координат якого наведено на рис. 3.

На рис.3 (варіант *a*), кожна координата вектора $y_0^\perp(t)$ відхиляється від нульового значення не більше ніж на $\varepsilon = 6 \times 10^{-4}$, що знаходиться в межах прийнятої похибки обчислень $\delta = 10^{-3}$, тому, в цьому випадку, слід вважати $y_0^\perp(t) \equiv 0$, тобто не має підстав вважати, що параметри лінійної динамічної моделі не відповідають поточному технічному стану ТРД.

Максимальне відхилення першої координати вектора $y_0^\perp(t)$ на рис.3 (варіант *b*) дорівнює $\varepsilon = 8 \times 10^{-2}$, що суттєво перевищує прийняту похибку обчислень $\delta = 10^{-3}$, тому відхилення координат вектора $y_0^\perp(t)$ від нуля є наслідком того, що деякі параметри лінійної динамічної моделі не відповідають поточному технічному стану ТРД. Враховуючи те, що по закінченню перехідного процесу $y_0^\perp(t)$ наближається до нульового значення можна зробити висновок, що ідентифікації

підлягає стала часу T . В результаті ідентифікації отримаємо нове значення сталої часу $T = 0.6c$ (попереднє значення $T = 0.5c$).

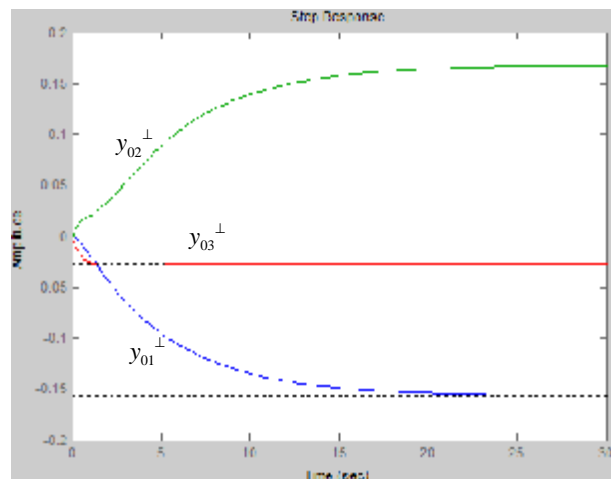
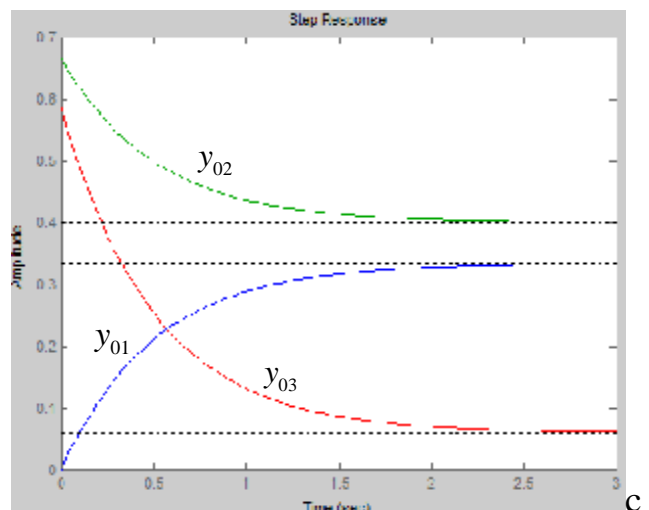
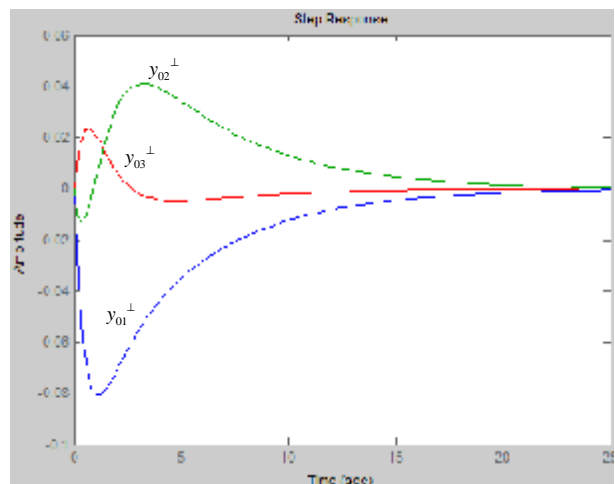
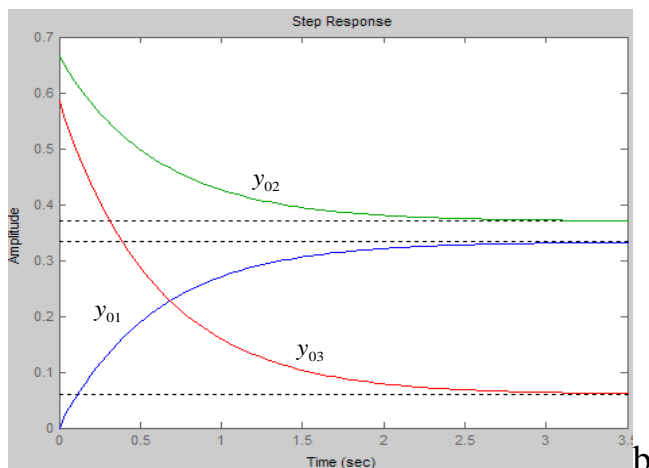
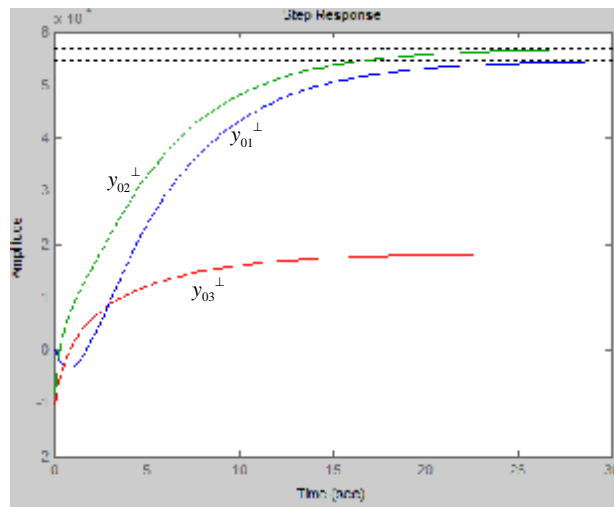
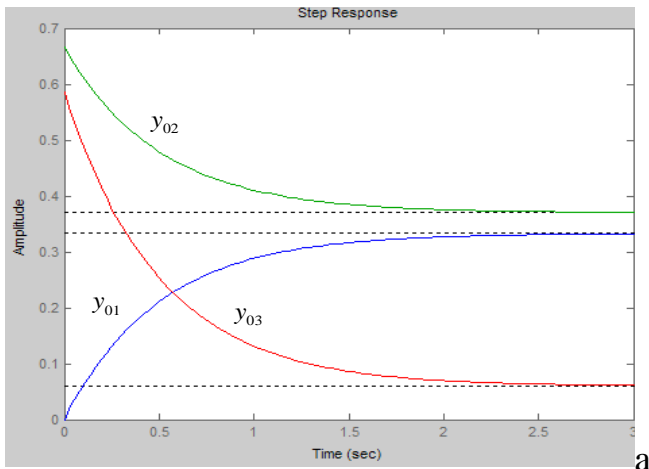


Рис. 2. Варіанти вектора спостереження

Рис. 3. Варіанти результатів обробки вектора спостереження

Максимальне відхилення другої координати вектора $y_0^\perp(t)$ на рис.3 (варіант c) дорівнює $\varepsilon = 16.5 \times 10^{-2}$, що також суттєво перевищує прийнятну похибку обчислень

$\delta = 10^{-3}$, тому це відхилення є також наслідком невідповідності деяких параметрів лінійної динамічної моделі поточному технічному стану ТРД, при цьому по закінченню перехідних процесів устанавлюються сталі ненульові значення координат вектора $y_0^\perp(t)$, що свідчить про необхідність корекції деяких елементів матриць коефіцієнтів підсилення. Використовуючи процедуру знаходження рядка матриці передавальних функцій, що містить елементи, параметри яких не відповідають поточному технічному стану об'єкта [2], визначаємо що корекції підлягає другий елемент матриці K_2 . По результатам ідентифікації маємо нове значення $k_{22} = 0.696$ (попереднє значення $k_{22} = 0.666$).

ВИСНОВКИ

1. Синтезована система динамічного контролю параметрів, що характеризують технічний стан енергетичного об'єкта, яка є головним елементом загальної інтегральної інформаційно-обчислювальної системи автоматизованого керування його технічним станом.

2. Використання в якості характеристики поточного технічного стану об'єкта сукупності параметрів його лінійної динамічної моделі обґрунтовано для широкого класу енергетичних об'єктів, система керування яких працює в режимі стабілізації.

3. Істотною перевагою запропонованої системи динамічного контролю є те, що висновок про адекватність визначальних параметрів поточному технічному стану об'єкта можна зробити при повній відсутності інформації про вхідні параметри і, тим більше, без будь-яких тестових впливів на об'єкт.

4. Після виявлення елемента матриці передаточних функцій лінійної динамічної моделі енергетичного об'єкта, що не відповідає його поточному технічному стану, нові значення параметрів цієї передаточної функції знаходяться одним з відомих методів параметричної ідентифікації.

5. Відмінною особливістю запропонованого підходу, який дозволяє реалізувати синтезовану систему динамічного контролю параметрів, є те, що при технічному обслуговуванні об'єкта можна використовувати як комбіновану стратегію технічного обслуговування за наробітком з прогнозуванням передвідмовного стану, так і стратегію технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, без залучення складних систем як вбудованого, так і зовнішнього контролю в умовах штатного функціонування та відсутності статистичних даних по достатній кількості однотипних об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лобода И.И., Горячий А.А. Диагностический анализ отклонений контролируемых параметров ГТУ от нормы // Вестник двигателестроения № 2/2005. – С. 161-168.

2. Асланян А.Е., Бельська О.А. Забезпечення практичної безвідмовності функціонування газотурбінного двигуна при його експлуатації за технічним станом / Збірник наукових праць ДНДІ авіації. – К.: ДНДІ авіації, 2008. – Вип. 4(11). – С. 133-140.
3. Треногин В.А. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1980. – 495 с.
4. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В.Г. Августинovich, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев и др. Под ред. В.Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1984. – 200с.
5. Шевяков А. А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1970. – 548с.

Надійшла до редакції 31.10.2011