

Баган Т.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бунь В.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лаврушкін О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ ДЛЯ СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМ АПАРАТОМ

У статті досліджено синтез алгоритму функціональної діагностики системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату з використанням спостерігачів стану.

Технологічне забезпечення якості функціонування системи управління методами виявлення і діагностики порушень полягає в контролі технічного стану системи з одночасною оцінкою параметрів. При оцінці технічного стану системи проводиться обробка спостережуваних сигналів, за результатами якої визначаються параметри, і приймається рішення про стан системи управління, класифікація і діагностика станів, оперативне відображення інформації про стан для контролю і управління. На підставі вимірів спостережуваних відгуків в режимі, що встановився або перехідному, при відомих (чи невідомих) вхідних величинах можна оцінити величини змінних, що характеризують стан процесу, і коефіцієнти моделі. Місцезнаходження порушення можна визначити точно, співвідносивши параметри моделі з фізичними особливостями процесу і використовуючи при цьому такі теоретичні закономірності, як масовий і енергетичний баланси. У міру розширення об'ємів автоматизації технологічних процесів і зростання вимог по технологічному забезпеченню якості функціонування об'єктів зростає значення контролю і діагностики. Завданнями спостереження є інформування про поточний стан процесу, повідомлення про небажані або неприпустимі відхилення в ході процесу і виконання відповідних заходів для підтримки нормальних режимів, відвертання ушкоджень або нещасних випадків.

Мета роботи полягає в створенні системи контролю та діагностуванню порушень в роботі системи керування багатокорпусним випарним апаратом, яка дозволяє вирішувати такі завдання: 1) власне виявлення, у процесі якого встановлюється сам факт появи відмови та в момент появи видається сигнал тривоги; 2) локалізації, або ідентифікації відмови. При вирішенні цього завдання визначається місце відмови, тобто елементи матриць параметрів, що змінилися внаслідок відмови; 3) Оцінювання впливу відмови на працездатність системи. Запропоновано підхід діагностування роботи системи керування з використанням спостерігачів стану. Сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі стану повного порядку. Розроблено структурну схему алгоритму діагностики відмов виконавчих механізмів. Результати проведених досліджень та імітаційне моделювання системи діагностування порушень показали, що застосування цієї системи дозволяє підвищити надійність та якість роботи системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату.

Ключові слова: багатокорпусний випарний апарат, функціональна діагностика, спостерігач стану, аналітична модель.

У міру розширення обсягів автоматизації багатокорпусних випарних апаратів та зростання вимог до надійності, безпеки та якості їх функціонування зростає значення контролю та діагностики. Завданнями спостереження є інформування про поточний стан процесу, повідомлення про

небажані або неприпустимі відхилення в ході процесу та виконання відповідних заходів для підтримання нормальних режимів, запобігання пошкодженням або нещасним випадкам. При цьому виділяється кілька видів контролю: 1) контроль обмежень: безпосередньо вимірювані величини

піддаються перевірці з виходу межі допустимих значень і видаються сигнали тривоги; 2) автоматичний захист: при небезпечних станах процесу система контролю обмежень автоматично запроваджує заходи для переведення процесу у нормальний стан; 3) контроль з діагнозом помилок: за змінними величинами розраховуються ознаки, виробляються симптоми, проводиться діагностика та виробляються рішення щодо запобігання виниклому порушенню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За висновками останніх досліджень та публікацій для вирішення вищеперелічених задач пропонується використання наступних спостерігачів лінійних систем [1]:

1. Спостерігач з використанням прогнозу на один крок уперед (спостерігач Льюенбергера).

2. Спостерігач, який уточнює в наступний момент часу.

3. Спостерігач із узагальненою структурою.

Спостерігачі, які уточнюють в наступний момент часу мають вигляд [2]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= (F - LCF)\hat{x}(k) + (G - LCG)u(k) + L_1y(k+1) + L_2y(k) \\ e(k) &= x(k) - \hat{x}(k) \\ e(k+1) &= (F - LCF)e(k) + (E - LCE)d(k) \end{aligned} \right\} (1)$$

Спостерігачі з узагальненою структурою мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= (F - L_1CF - L_2C)\hat{x}(k) + (G - L_1CG)u(k) + L_1y(k+1) + L_2y(k) \\ e(k) &= x(k) - \hat{x}(k) \\ e(k+1) &= (F - L_1CF - L_2C)e(k) + (E - L_1CE)d(k) \end{aligned} \right\} (2)$$

Аналіз літературних джерел показав, що максимальна надійність може бути отримана з використанням спостерігачів повного порядку [3].

Синтез алгоритму функціональної діагностики відмов функціонування виконавчого механізму

Так як синтез спостерігача Льюенбергера повного порядку для невідомого входу неможливий, були сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі повного порядку типу (1) та (2). Так спостерігач повного порядку для невідомого входу (1) може бути синтезований за таких умов:

а) $p \geq q$;

б) $\text{rank } C = p, \text{rank } E = \text{rank } CE = q$;

в) четвірка $(C, F, E - PE)$ має стійкі інваріантні нулі.

Спостерігач повного порядку для невідомого (2) входу може бути синтезований за таких умов:

а) $p \geq q$;

б) $\text{rank } C = p, \text{rank } E = \text{rank } CE = q$;

в) четвірка $(C, F - LCF)$ детектується, де L є рішенням рівняння:

$$E - LCE = 0.$$

Рівняння динаміки для i -го спостерігача має вигляд

$$\hat{x}^i(k+1) = (F - L_1^iCF - L_2^iC)\hat{x}^i(k) + (G^i - L_1^iCG^i)u^i(k) + L_1^iy(k+1) + L_2^iy(k), \quad (3)$$

$$\text{де } G^i = [g_1 \dots g_{i-1} g_{i+1} \dots g_m], \quad (4)$$

$$u^i(k) = [u_1(k) \dots u_{i-1}(k) u_{i+1}(k) \dots u_m(k)]^T, \quad (5)$$

де $u^i(k)$ – сигнал управління, сформований регулятором $\bar{u}_j(k) = u_j(k) + a_j(k)$, а $a_j(k)$ залежить від типу відмови.

Динаміка помилки визначається рівнянням:

$$e^i(k+1) = (F - L_1^iCF - L_2^iC)e^i(k) + (E^i - L_1^iCE^i)d^i(k) + (G^i - L_1^iCG^i)a^i(k), \quad (6)$$

$$\text{де } e^i(k) = x(k) - \hat{x}^i(k), \quad (7)$$

$$E^i = [g_i E], \quad (8)$$

$$a^i(k) = [a_1(k) \dots a_{i-1}(k) a_{i+1}(k) \dots a_m(k)]^T, \quad (9)$$

$$d^i(k) = [\bar{u}_1(k)d_1(k) \dots d_q(k)]^T. \quad (10)$$

Динаміка помилки (6) не пов'язана з $di(k)$, якщо:

$$E^i - L_1^iCE^i = 0, \quad (11)$$

і L_1^i , що задовольняє (11) може бути знайдена тоді, коли:

$$p \geq q + 1; \quad (12)$$

$$\text{rank } C = p, \text{rank } E^i = \text{rank } CE^i = q + 1. \quad (13)$$

Якщо умови (12) та (13) виконуються, то L_1^i може бути знайдена шляхом використання декомпозиції сингулярного значення. Якщо пара $(C, L_1^i F - CF)$ детектується, то як другий крок L_2^i може бути знайдена так,

щоб $(F L_1^i - CF - L_2^i C)$ була стійкою матрицею, що забезпечує задовільні перехідні процеси. Вектор сигналу розходження, що формується за допомогою i -го спостерігача, є різницею між виходом реальної системи та виходом, який оцінюється за допомогою i -го спостерігача:

$$\bar{e}^i = y(k) - C\hat{x}^i(k) \quad (14)$$

Рівняння (3.85) описує всі типи відмов виконавчих механізмів. Наприклад, якщо $v_i = g_i$, де g_i – i -тий стовпець матриці G і $a_i = -u_i$, це означає повна відмова виконавчого механізму, якщо $v_i = g_i$ і $a_i = \text{const}$, то моделюється відмова типу зміщення, якщо $v_i = g_i$ і $a_i = k_i - u_i$, моделюється поломка тяги при постійному значенні k_i .

Передбачається, що в даний час можлива поява не більше однієї відмови. Для виявлення відмови виконавчого механізму необхідно синтезувати банк m спостерігачів для невідомого входу, у яких

i -й керуючих вхід $u_i(k)$ розглядається як невідомий вхід на додаток до невідомих входів $d_i(k), \dots, d_n(k)$ для i -го спостерігача [4].

Структурна схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчого механізму наведена на рис. 1.

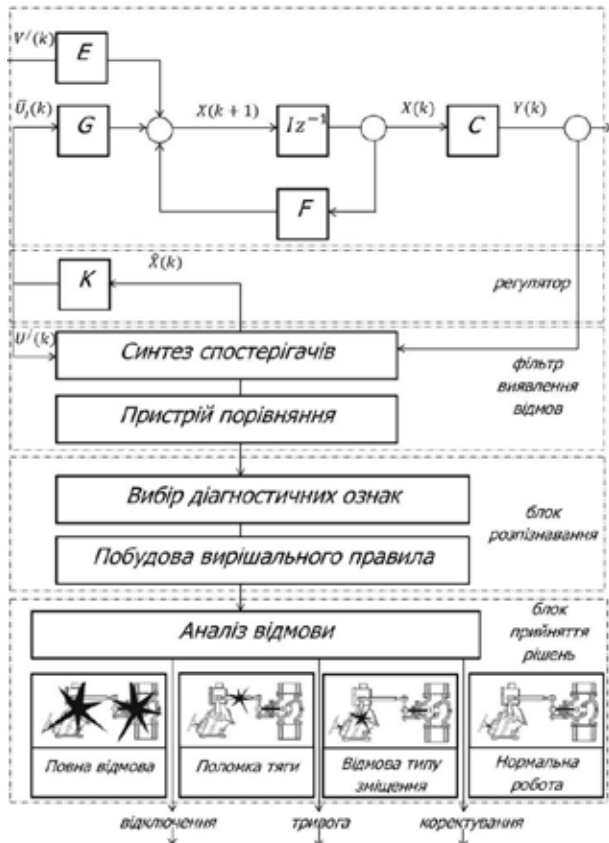


Рис. 1. Структурна схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчого механізму

Дослідження алгоритму розпізнавання порушень у системі управління багатокорпусним випарним апаратом (рис. 2).

Відповідно до схеми початковий розчин, що характеризується витратою F_0 та концентрацією C_0 надходить у перший корпус для випарювання. Випарювання здійснюється за рахунок нагрівання парою при температурі T_1 . Другий розчин F_1 , що залишився в першому корпусі, характеризується конденсацією C_1 , температурою T_1 подається в другий корпус. Випарювання у другому корпусі здійснюється при зменшеному тиску за допомогою вторинної пари, що утворюється у першому корпусі. Концентрація, що отримується при цьому розчину становить C_2 . Нехай також W_1 та W_2 – втрати в обох апаратах.

Тоді, якщо врахувати матеріальний, елементарний та тепловий баланси для обох корпусів,

а також лінеаризацію отриманих рівнянь в околиці встановленого режиму, отримаємо систему рівнянь п'ятого порядку:

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= Fx(k) + Gu(k) + Ed(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

в якому вектори стану x управління u , виходу y та обурення d визначаються таким чином:

$$x = [W_1 C_1 T_1 W_2 C_2],$$

$$u = [F_1 F_2 T_3],$$

$$d = [F_0 C_0],$$

а матриці A, G, C, E мають вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.0013 & 0 & 0 \\ 0 & 0.98 & 0.0005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.562 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0014 & 1 & 0 \\ 0 & 0.046 & 0.0021 & 0 & 0.97 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & -0.00033 \\ 0 & 0 & 0.00013 \\ 0 & 0 & 0.619 \\ 0.458 & -0.5 & -0.00035 \\ -0.295 & 0 & 0.00055 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0.5025 \\ 0.031 & -0.066 \\ 0 & -2.744 \\ 0 & -0.0027 \\ 0.0007 & -0.0057 \end{bmatrix}.$$

Тоді рівняння спостерігачів повного порядку мають наступний вигляд:

$$\hat{x}^i(k+1) = (F - L_1^i C F - L_2^i C) \hat{x}^i(k) +$$

$$+ (G^i - \hat{L}_1^i C G^i) u^i(k) + L_1^i y(k+1) + L_2^i y(k),$$

для $i=1, 2, 3$.

Відповідно (11) динаміка помилки не пов'язана з $d^i(k)$, якщо:

$$E^i - L_1^i C E = 0.$$

Матриці L_1^i отримаємо за допомогою сингулярного розкладання матриці E^i [5]. Матриці L_2^i отримаємо шляхом вирішення рівняння Ріккати [6]:

$$(F - L_1^i C F) P + P (F - L_1^i C F) + Q - P C^T R^{-1} C P = 0;$$

$$L_2^i = P C^T R^{-1}, i=1,2,3.$$

$$Q = 0.1 I_5, R = I_5.$$

Для простоти невід'ємний критерій якості може бути пов'язаний із i -м спостерігачем:

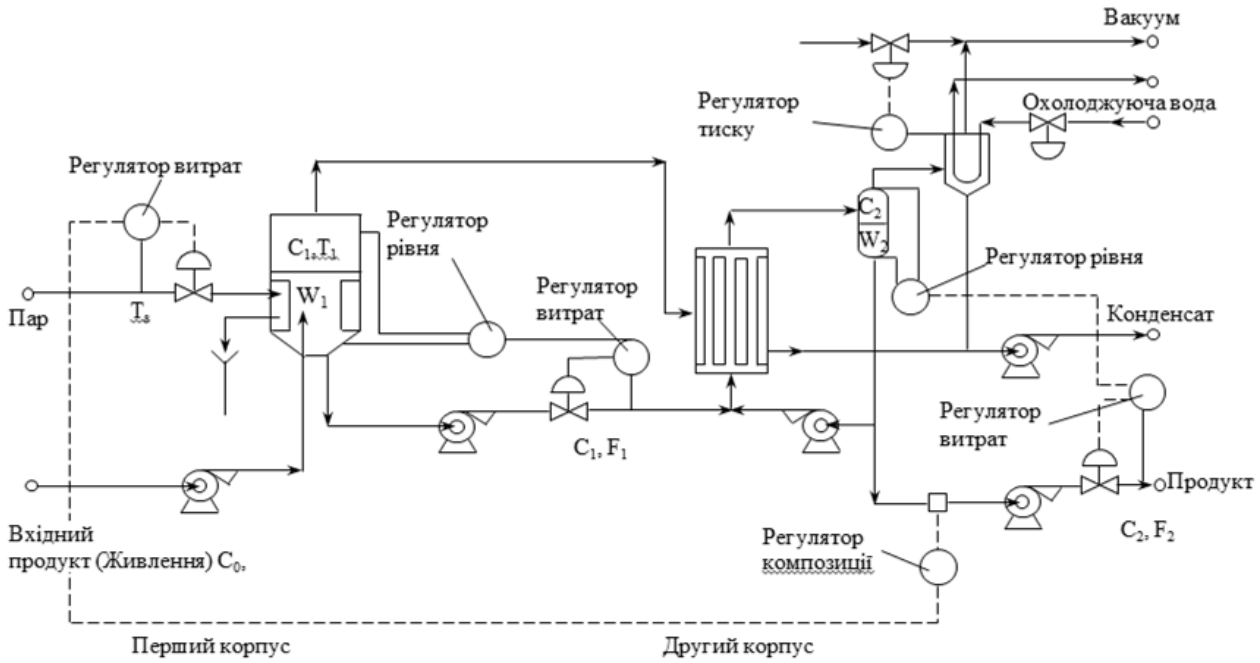


Рис. 2. Схема багатокорпусного випарного апарату

$$S^i(k) = |e_1^i| + |e_2^i| + |e_3^i| + |e_4^i| + |e_5^i|, \quad (16)$$

Якщо відмовив i -й виконавчий механізм і відповідний вектор випадок $v_i = g_i$, динаміка помилки i -го спостерігача, не змінюється з відмовою, так як

$$E^i - L_j^i C E^i = 0$$

i помилка буде близька до нуля в стані. Отже, сигнал розходження $S_i(k)$ також дорівнює нулю. З іншого боку, динаміка помилки j -го спостерігача, $j \neq i$ у випадку (якщо $g_j - L_j^j C g_j = 0$) залежить від сигналу $a_i(k)$, який залежить від типу відмови.

Таким чином сигнали розходження $S_i(k)$, $j \neq i$, для $j=1, \dots, m$ у загальному випадку відхиляються від нуля і від сигналу розходження, який близький до нуля, і виконавчий механізм, що відмовив, може бути ізольований.

Моделювання різних видів відмов функціонування виконавчих механізмів

Схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчих механізмів створена в середовищі MatLAB за допомогою пакету Simulink наведена на рис. 3.

Проведено імітаційне моделювання наступних варіантів функціонування системи керування випарним апаратом:

Варіант 1- Моделювання роботи системи керування без відмов.

Варіант 2 – Моделювання повної відмови виконавчого механізму.

Варіант 3 – Моделювання роботи системи з відмовою типу «Зміщення».

Варіант 4 – Моделювання роботи системи з відмовою типу «Поломка тяги».

Варіант 5 – Моделювання роботи системи керування з багатьма відмовами.

Для прикладу детальніше розглянемо Варіант-4 – Моделювання роботи системи діагностики з відмовою типу «Пошкодження тяги».

Проаналізуємо графіки сумарних помилок $S^1(k)$, $S^2(k)$, $S^3(k)$ та графіки передбачуваних помилок по X ($x-x1$, $x-x2$, $x-x3$) рис. 4 – 7.

Як видно з графіків сумарної помилки, сумарна помилка для першого виконавчого механізму прагне нуля, тоді як інших виконавчих – відмінна від нуля. Ймовірна помилка по X прагне до нуля саме для першого виконавчого механізму. З усього вищесказаного робимо висновок, що відмовив саме перший виконавчий механізм і його можна ізольовати. Аналогічну картину отримуємо при виборі відмови другого та третього виконавчого механізму.

Висновки. В статті досліджено синтез алгоритму функціональної діагностики системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату з використанням спостерігачів стану. Створена імітаційна модель системи контролю та діагностуванню порушень в роботі системи керування багатокорпусним випарним апаратом. Сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі стану повного

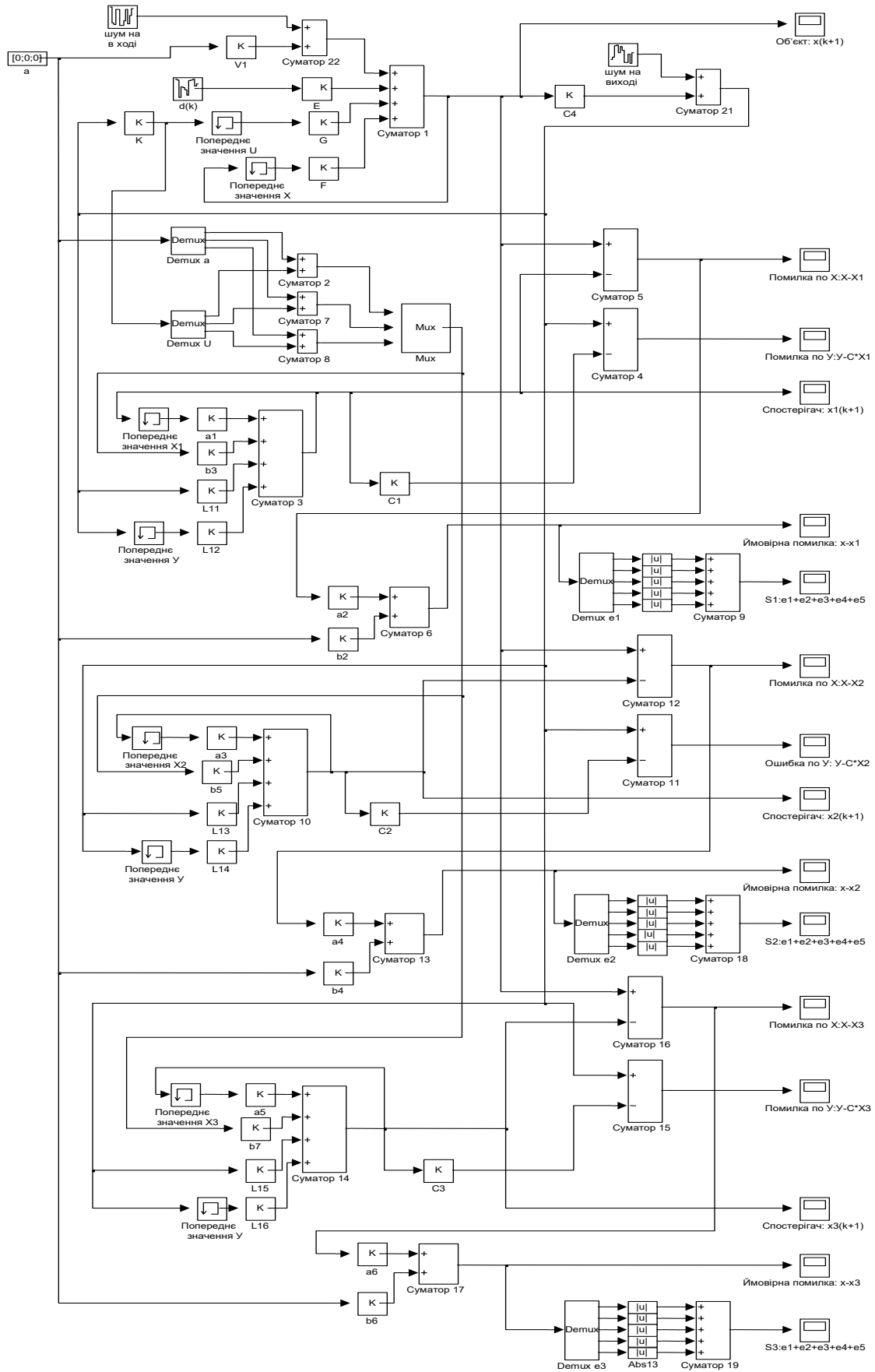


Рис. 3. Схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчих механізмів

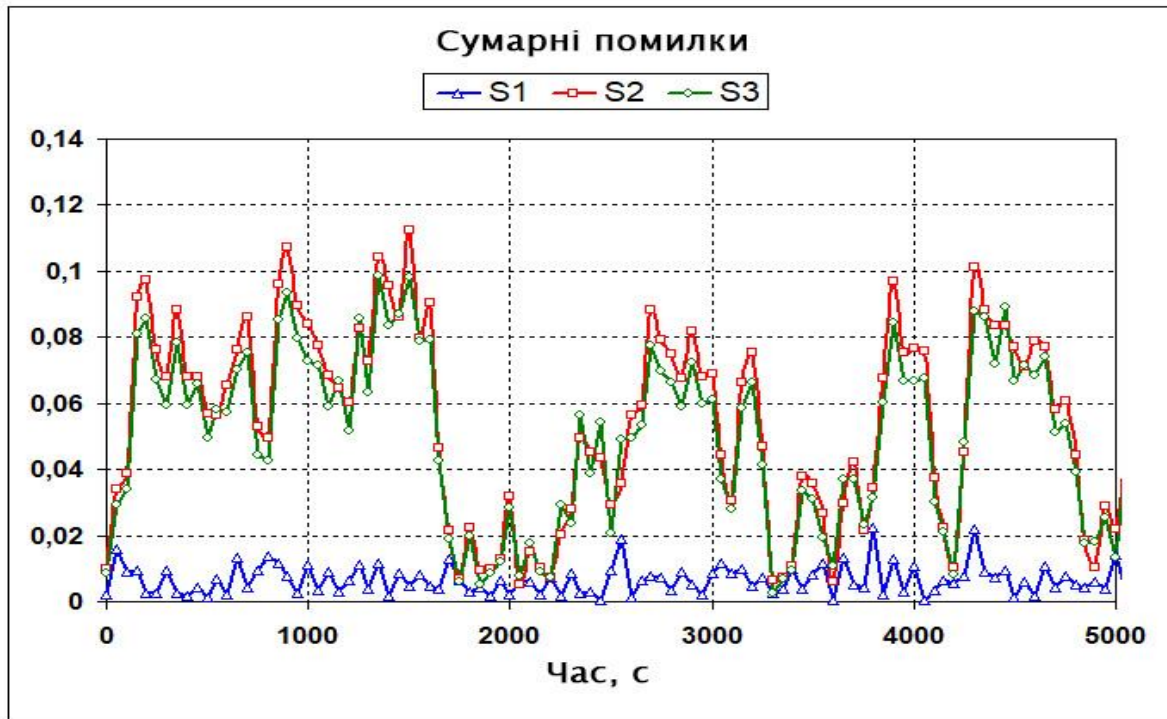
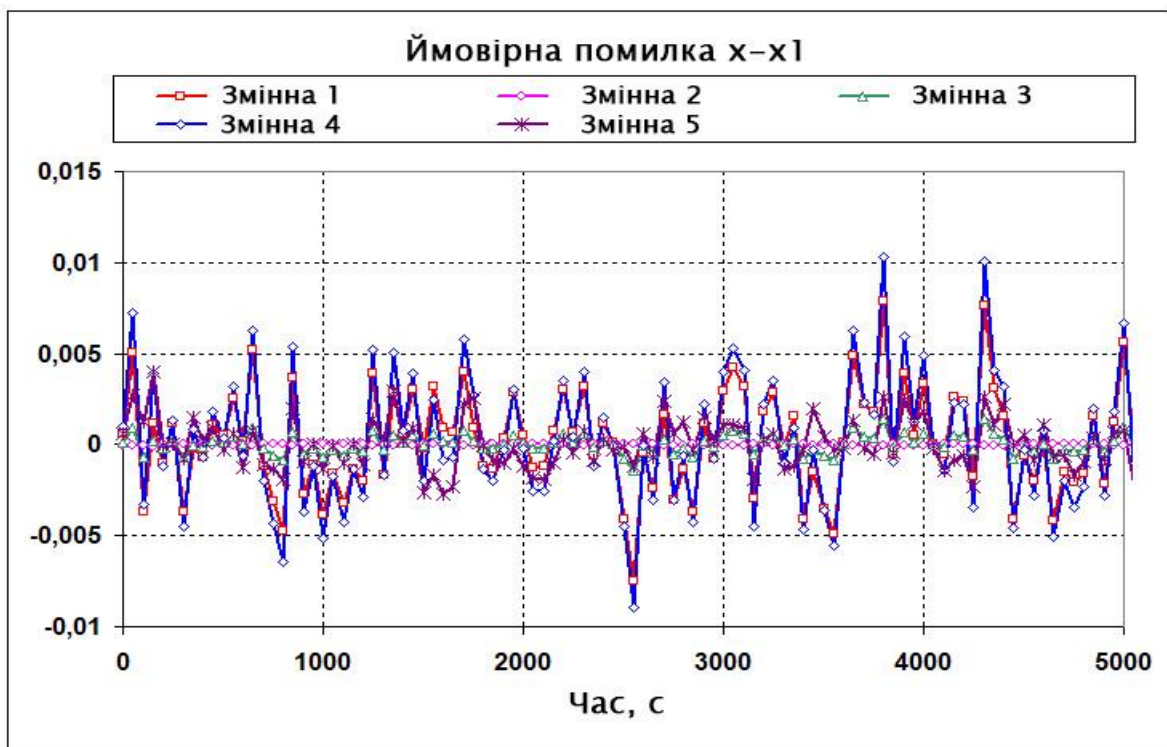


Рис. 4. Сумарні помилки

Рис. 5. Ймовірна помилка $x-x_1$

порядку. Розроблено структурну схему алгоритму діагностики відмов виконавчих механізмів. Результати проведених досліджень та імітаційне моделювання системи діагностування порушень

показали, що застосування цієї системи дозволяє підвищити надійність та якість роботи системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату.

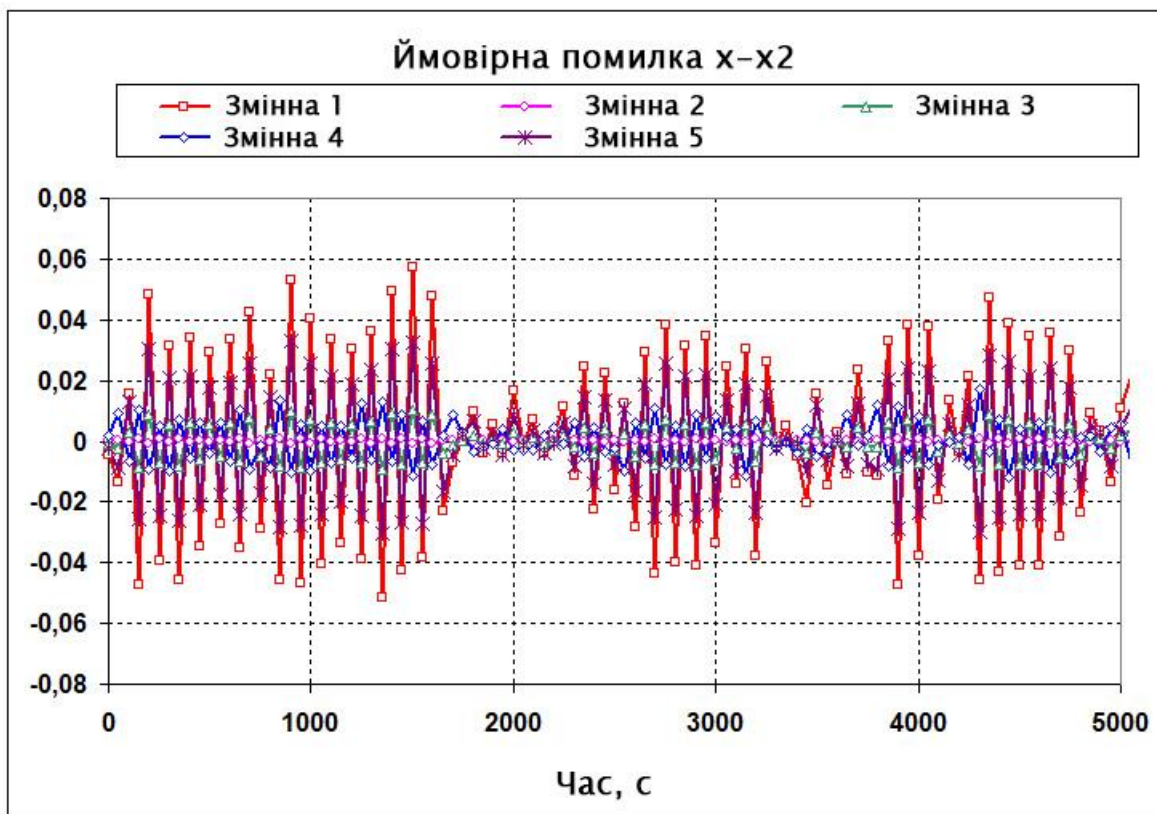


Рис. 6. Ймовірна помилка $x-x_2$

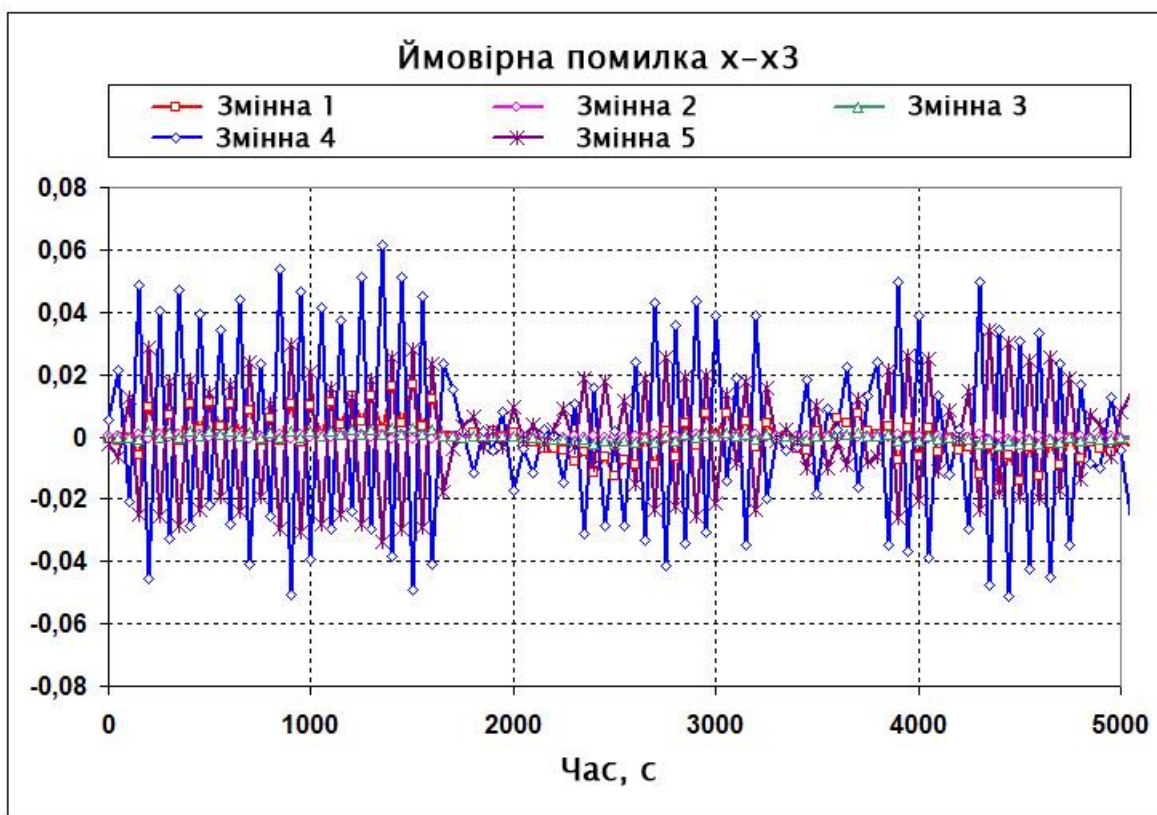


Рис. 7. Ймовірна помилка $x-x_3$

Список літератури:

1. Golnaraghi F., Kuo B.C. Automatic Control Systems (10th Edition). New York: McGraw-Hill Education: 2017. 1160 p.
2. Ogata K. Modern Control Engineering (5th Edition). Boston: Prentice Hall. 2010. 905 p.
3. Dorf R.C. and R.H. Bishop. Modern Control Systems (13th Edition). Boston: Pearson. 2016. 1106 p.
4. Boun V., Bahan T., Herasymenko L. About one approach for choosing performance indices of functioning of human-machine systems. *Актуальные научные исследования в современном мире*. Переяслав. 2019. № 11 (55). С. 50-53.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит. 2004. 560 с.
6. Самойленко А.М., Перестюк М.О., Парасюк І.О. Диференціальні рівняння: Підручник. К.: Либідь. 2003. 600 с.

Bahan T.H., Boun V.P., Lavrushkin O.V. USE OF STATUS OBSERVERS FOR SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF EVAPORATOR CONTROL SYSTEM

The synthesis of the algorithm of functional diagnostics of the system of automatic control of the multihull evaporator with the use of state observers is investigated in the article. Technological quality assurance of the control system of methods of detection and diagnosis of violations is based on monitoring the technical condition of the system with simultaneous assessment of parameters. When assessing the technical condition of the system, the observed signals are processed, the results of which determine the parameters, and a decision is made on the state of the control system, classification and diagnosis of states, operational display of information on the state of control and management. Based on the measurements of the observed responses in the steady-state or transient mode at known (or unknown) input values, it is possible to estimate the values of the variables characterizing the state of the process and the coefficients of the model. The location of the violation can be determined accurately by correlating the parameters of the model with the physical characteristics of the process and using such theoretical laws as mass and energy balance. As the scope of automation of technological processes expands and the requirements for technological assurance of the quality of operation of facilities increase, the importance of control and diagnostics increases. The objectives of the monitoring are to inform about the current state of the process, to report undesirable or unacceptable deviations during the process and to take appropriate measures to maintain normal regimes, prevent damage or accidents. The purpose of the work is to create a control system and diagnose violations in the control system of the multi-body evaporator, which allows to solve the following tasks: 1) self-detection, which establishes the fact of failure and an alarm; 2) localization or identification of the failure. When solving this problem, the place of failure is determined, that is elements of matrices of parameters changed because of failure; 3) Assessment of the impact of failure on the efficiency of the system. An approach to diagnosing the operation of the control system using observers is proposed. The conditions under which observers of the state of complete order can be synthesized are formulated. The structural scheme of the algorithm of diagnostics of failures of executive mechanisms is developed. The results of research and simulation of the system for diagnosing disorders have shown that the use of this system can improve the reliability and quality of the automatic control system of the multi-body evaporator.

Key words: multihull evaporator, functional diagnostics, status observer, analytical model.