

І. НЕВЛЮДОВ, М. СТАРОДУБЦЕВ, Г. МАКАРЕНКО, М. БІЛОУСОВ, С. ШИБАНОВ, Ю. РАМАЛ

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ У ЗАСОБАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У системах автоматизованого управління технологічними процесами широко використовуються технічні засоби автоматизації (датчики, перетворювачі, підсилювачі тощо), які мають технічні дефекти, що виникають під час їх виготовлення, і є однією з основних причин відмов. У роботі встановлено можливість використання законів нерівноважної термодинаміки як основи для визначення зв'язку між контрольованими параметрами технічних засобів автоматизації та параметрами відтворюваного середовища. Це дало змогу побудувати детерміновану модель процесів розвитку виробничих дефектів і зрештою визначити напрями зміни та коректування технологічних процесів виробництва засобів автоматизації. Розроблено метод реалізації гарантованого прогнозу зміни параметрів технічних засобів автоматизації на основі розв'язання рівняння еволюції із застосуванням алгоритмів оптимальної фільтрації, що і є **предметом дослідження**. **Метою роботи** є підвищення якості та надійності технічних засобів автоматизації завдяки вдосконаленню моніторингу дефектів, що виникають у виробництві приладів, функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації. У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз наявних підходів до проблеми виробничих дефектів і методів їх виявлення та визначення мети дослідження; моделювання процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану засобів автоматизації; розроблення методу ухвалення рішення на основі гарантованого прогнозування технічного стану засобів автоматизації. **Методологія** проведення роботи ґрунтується на методах термодинамічного опису кінетики процесів (під час розроблення моделі процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану) й оцінювання та прогнозування на основі алгоритмів оптимальної фільтрації (під час розроблення методу ухвалення рішення на основі гарантованого прогнозування технічного стану). **Результати роботи**: модель процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану засобів автоматизації, і метод ухвалення рішень на основі гарантованого прогнозування технічного стану засобів автоматизації. **Висновки**. У статті встановлено можливість використання законів нерівноважної термодинаміки для визначення зв'язку між контрольованими параметрами технічних засобів автоматизації та відтворюваного середовища й побудови детермінованої термодинамічної моделі процесів розвитку виробничих дефектів. Запропоновано рівняння еволюції технічного стану засобів автоматизації, ґрунтоване на детермінованій кінетичній моделі процесів, що відбуваються в багатоконпонентному середовищі, і модель спостереження, яка бере до уваги помилки, викликані нестабільністю зовнішніх впливів, і похибки вимірювань. Запропоновано метод реалізації гарантованого прогнозу зміни параметрів засобів автоматизації на основі розв'язання рівняння еволюції з використанням алгоритмів оптимальної фільтрації, які застосовуються в розв'язанні задач оцінювання та прогнозування.

Ключові слова: засоби автоматизації; виробничі дефекти; середовище; термодинамічна модель; гарантоване прогнозування.

Вступ

Практика експлуатації засобів автоматизації (ЗА) показує, що розвиток дефектів, які виникають у процесі виготовлення приладів, є однією з основних причин відмов. Нині існує значна кількість методів і способів, що дають змогу виявляти виробничі дефекти, однак можливості цих методів обмежені [1–5]. Операції контролю та випробувань, що передбачають сучасні технологічні процеси, не можуть дати цілковитої гарантії відсутності зазначених дефектів у виробництві приладів, функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації.

У зв'язку з цим виникає завдання моніторингу технічного стану ЗА, що оцінюється за допомогою контролю параметрів, які змінюються з часом. Отримана в цьому разі інформація відтворює

розвиток виробничих дефектів. Упровадження моніторингу в структуру технологічного процесу виготовлення ЗА дає змогу підвищити ефективність виявлення виробничих дефектів, зменшити ймовірність відмов або оцінити гарантії їх відсутності, що забезпечить необхідну зміну та коректування технологічних процесів виробництва ЗА. Удосконалення методу відтворення інформації забезпечить можливість спостереження зміни технічного стану ЗА. Адекватні моделі процесу розвитку виробничих дефектів ЗА дають змогу приймати рішення про гарантоване прогнозування параметричних відмов [6–9].

Отже, моделювання та відтворення процесів розвитку виробничих дефектів ЗА для прогнозування параметричних відмов, зміни й коректування технологічних процесів виробництва приладів,

функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації є актуальними питаннями.

1. Кінетична модель розвитку виробничих дефектів ЗА

Найважливішою характеристикою будь-якого процесу є його швидкість. Дифузія та хімічні реакції можуть бути основою визначення швидкості та, отже, опису кінетики аналізованих процесів.

Статистична фізика [10, 11] пояснює кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, які містить це середовище. Мікроскопічний стан ансамблю повністю задається канонічними змінними (X).

З макроскопічного погляду стан речовини визначається дуже обмеженою кількістю параметрів, достатніх для макроскопічної характеристики середовища. Задання цих параметрів, що вимірюються в макроскопічному дослідженні, визначає макроскопічний стан середовища. Макроскопічні параметри, зокрема об'єм ПР, є функціями канонічних змінних

$V_k(X)$, крім того, $k = 1, 2, \dots, n$, де $n \ll N$.

З огляду на макроскопічні вимірювання можна зробити лише статистичні судження про значення мікроскопічних змінних X . Отже, система, що задається макроскопічно, подається за допомогою завдання щільності ймовірності змінних $\omega(X, t)$. Ця фазова щільність ймовірності називається іноді фазовим розподілом ймовірностей, або інакше – фазовим розподілом.

Знаючи $\omega(X, t)$, можна обчислити статистичне середнє значення $V(X)$ згідно з формулою

$$V = \int_{(X)} V(X) \omega(X, t) dX, \quad (1)$$

а також середнє квадратичне відхилення:

$$\Delta V = \sqrt{\overline{(V - \bar{V})^2}}, \quad (2)$$

що проявляється як флуктуація ділянки ПР, яка спостерігається.

Апарат статистичної механіки Гіббса уможливило виведення загальних співвідношень, що пов'язують середні значення, дисперсії та квадратичні кореляції узагальнених координат з їх середніми значеннями за наявності додаткових сил, що діють на ці координати. Якщо величина $V(x)$ є функцією лише координат,

її можна подати як деяку нову узагальнену координату $q(X)$. Під величиною a можна розуміти додаткову зовнішню силу, що діє в напрямку узагальненої координати q . Останнє означає, що гамільтонова функція системи має такий вигляд:

$$H(X, a) = H_0(X) + aq(X). \quad (3)$$

Справді, у цьому разі, відповідно до рівнянь Гамільтона

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial H_0}{\partial q} - a = A_0 - a, \quad (4)$$

тобто на систему, крім сили $A_0 = -\partial H_0 / \partial q$, діє додаткова $-a$, отримуємо

$$\overline{(q - \bar{q})^2} = -kT \frac{\partial \bar{q}}{\partial a}. \quad (5)$$

Використання основних положень теорії Гіббса дає змогу обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, які діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна зробити висновок про ієрархічний характер флуктуацій, що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів.

Швидкість процесу перетворення речовини доцільно оцінювати зміною об'єму ПР чи НР за одиницю часу.

На основі термодинамічного підходу [12, 13] запропоновано та використано рівняння для опису кінетики значної кількості реакцій, що відбуваються в багатокомпонентному середовищі:

$$dV/dt = -K \prod_i V_i^r, \quad (6)$$

де показник r – сумарний порядок реакції, він може дорівнювати нулю, бути цілим чи дробовим числом. Для адекватного опису процесів пропонується обмежуватися порядками 0, 1, 2. Константа швидкості K є одним із основних параметрів процесу, визначаючи, власне, час релаксації, і тому називається постійною релаксації.

Для нашого дослідження прийняті такі гіпотези:

- двокомпонентний склад середовища;
- залежність швидкості протікання процесу від об'єму НР ($W_0 - V$), де W_0 – початковий об'єм НР, а V – об'єм ПР;
- правило пропорційності між кількістю речовини та її концентрацією в процесі розподілу за об'ємом середовища, тоді аналізований об'єм ПР

і НР можна сприймати як концентрацію компонентів, що беруть участь у реакціях;

– припущення про те, що під час протікання реакцій термодинамічні коефіцієнти також можуть залежати від стану середовища, відтворюючи ймовірність використання рівняння Онзагера для нелінійних процесів [14, 15].

Тоді рівняння процесу можна подати в такому вигляді:

$$-dV/dt = K(W_0 - V)^r = f(V), \quad (7)$$

де показник r – порядок реакції; він може дорівнювати нулю або одиниці для лінійної та двом для нелінійної моделі. Розв'язання цього рівняння може бути використане для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму ПР.

Аналіз даних підтверджує можливість використання рівняння (7) для виділених механізмів процесів розвитку виробничих дефектів, так для:

– дифузії за умови D , пропорційному концентрації НР $(W_0 - V)$, $r = 2$; у разі постійного D можна прийняти $r = 1$ або $r = 0$;

– різних видів корозії, зважаючи на залежності енергії активації та постійні реакції від концентрації НР $r = 2$; для лінійного опису $r = 0$ або $r = 1$;

– випаровування матеріалу $r = 0$.

Для реакції нульового порядку використовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K. \quad (8)$$

Після інтегрування маємо рівняння реакції

$$V = Kt. \quad (9)$$

Зміна $\Delta V = \delta x^i \delta x^j$, що спостерігається на інтервалі спостереження δt , може бути використана для обчислення постійної релаксації K . Звідси постійна релаксації

$$K = \frac{\delta x^i \delta x^j}{\delta t}. \quad (10)$$

Для відтворення кінетики процесу для першого порядку реакції застосовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K(W_0 - V). \quad (11)$$

Після інтегрування отримуємо

$$V = W_0(1 - e^{-Kt}). \quad (12)$$

У цьому разі постійна релаксації

$$K = \frac{\ln(W)_0 - \ln(W_0 - \delta x^i \delta x^j)}{\delta t}. \quad (13)$$

За умови порядку реакції, що дорівнює двом, використовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K(W_0 - V)^2. \quad (14)$$

Після інтегрування рівняння реакції має вигляд

$$V = W_0 = \frac{W_0}{V + Kt W_0}. \quad (15)$$

У цьому разі постійна релаксації

$$K = \frac{1}{W_0 - \delta x^i \delta x^j} - \frac{1}{W_0}. \quad (16)$$

Отже, статистична фізика дає змогу пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, які містять це середовище, а макроскопічний стан ансамблю та його зміна відтворюють поведінку об'єму ПР. Використання основних положень теорії Гіббса допомагає обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, що діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна дійти висновку про ієрархічний характер флуктуацій, що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів. Знайдено еволюційне диференційне рівняння, яке дає опис реакцій, що відбуваються в спостережуваному середовищі, та використовується для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму елементарної ділянки ПР.

2. Розроблення методу прогнозування випадкового складника моделі розвитку виробничих дефектів ЗА

Для відтворення флуктуацій, з огляду на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна впроваджувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, можна скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації.

Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, що розглядається, є нелінійність еволюційних рівнянь.

Пропонується лінеаризація задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції $f(V)$ до ряду Тейлора. Як опорна траєкторія, досить близька до істинної, використовується розв'язок $V_{on}(t)$ диференціальних рівнянь для різного порядку реакцій, тоді оцінюванню та передбаченню підлягає випадкова адитивна поправка Z до детермінованого V_{on} , яке є розв'язком диференціальних рівнянь і для істинної траєкторії $V(t)$, що характеризує процес розвитку виробничих дефектів

$$V(t) = V_{on}(t) + Z(t). \quad (17)$$

Методи оцінювання поправки передбачають знання закону її розподілу. Випадкові процеси зміни параметрів ЗА вважають нормально розподіленими. Справедливість гіпотези про нормальний розподіл параметрів підтверджується багаторічними дослідженнями в теорії точності та експериментальними результатами про виробничі (технологічні) відхилення параметрів, за якими накопичено найбільший фактичний матеріал. Технологічний розкид параметрів визначає розподіл випадкового процесу дрейфу параметрів у початковий час (у перерізі $t=0$). Для монотонних процесів тип початкового розподілу в першому наближенні зберігається і для будь-яких інших часових перерізів. Використання гауссівських випадкових процесів певною мірою виправдане ще й тим, що нормальний закон розподілу містить максимум ентропії порівняно з будь-яким безперервним розподілом із тією самою дисперсією. Отже, заміна деякого розподілу на нормальний не спричинить завищення оцінок.

Остаточна форма рівняння еволюції

$$\frac{dV_{on}}{dt} + \frac{dz}{dt} = f(V_{on}) + \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (18)$$

де $f(V_{on})$ – ліва частина диференціальних рівнянь, відповідає система рівнянь

$$dV_{on}/dt = f(V_{on}), \quad (19)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (20)$$

у термінах завдання оцінювання та прогнозування перетворюється на систему рівнянь для змінних стану

$$dz_1/dt = z_2, \quad z_1 = z, \quad (21)$$

$$dz_2/dt = w(t), \quad z_2 = \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (22)$$

та спостереження

$$g(t) = z_1(t) + v(t). \quad (23)$$

Тут $w(t)$ – нормальний білий шум з нульовим середнім значенням $\text{cov}\{\omega(t), \omega(\tau)\} = \Psi_{\omega}(t) \delta_D(t-\tau)$, де $\delta_D(t-\tau)$ – дельта-функція Дірака; природа процесу $w(t)$ обумовлена флуктуаціями параметрів нерівноважних середовищ, що відповідають основним положенням нерівноважної термодинаміки; $v(t)$ – процес, викликаний похибками спостереження; $z_1(t), z_2(t)$ – змінні станів. Природа процесу $w(t)$ зумовлена флуктуаціями параметрів нерівноважних середовищ, які відповідають основним положенням статистичної фізики, що дає змогу обґрунтувати поведінку ансамблю мікрочастинок, які визначають термодинамічні параметри середовища, у якому вони містяться. Як наслідок такої поведінки можна побачити теплові шуми, броунівський рух та інші подібні явища.

У розглянутій задачі шум визначає ймовірнісну розмитість меж НР, зумовлену флуктуаціями її розмірів, що мають випадковий характер. Тут так само спостерігається аналогія з реальним середовищем, що містить ансамблі мікрочастинок, розподілених за енергіями, наприклад, канонічний розподіл Гіббса для ізотермічної системи, розподіл Максвелла – Больцмана як наслідок цього розподілу для ідеального газу, що дає змогу дати "механічне" трактування.

Оскільки початкове значення $V_{on} = 0$, то в межах лінійного наближення

$$\frac{df(V_{on})}{dV} = \frac{df[V_{on}(\delta t_p)]}{V_{on}(\delta t_p)}. \quad (24)$$

Модель процесу еволюції у векторній формі

$$\dot{Z}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t), \quad (25)$$

де $Z(t)$ – вектор стану процесу, (9) матиме перехідну матрицю

$$\Phi(t_2, t_1) = \exp\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (t_2 - t_1) \right\} = \begin{bmatrix} 1 & t_2 - t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

де t_1, t_2 – час спостереження та час прогнозування відповідно.

Тоді алгоритм оцінювання $Z(t_2)$ за відомої оцінки $Z(t_1)$ матиме вигляд

$$Z(t_2) = \begin{bmatrix} 1 & t_2 - t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Z(t_1), \quad (27)$$

де t_1, t_2 – час спостереження та час прогнозування відповідно.

Дисперсія поправки визначатиметься виразом

$$d_{11}(t_2) = d_{11}(t_1) + 2(t_2 - t_1)d_{12}(t_1) + (t_2 - t_1)^2 d_{22}(t_1) + \frac{(t_2 - t_1)^3}{3} \Psi_{\omega}, \quad (28)$$

де d_{11}, d_{12}, d_{22} – елементи коваріаційної матриці поправки, що оцінюється в момент t_1 .

Реальні оцінки поправки та коваріаційної матриці в момент t_1 , що відповідає початку процесу, можуть бути зроблені тільки після набору статистичних показників щодо відхилення реальної траєкторії від тієї, що розраховувалася на основі обраної детермінованої моделі та похідних від цих відхилень за часом. Оцінками природно обираються відповідні математичні очікування. З огляду на дискретний характер відліків часу вимірювання параметрів значення цих величин у момент t_n визначатимуться такими виразами:

$$Z_1(t_n) = M_n(\Delta V), \quad (29)$$

$$d_{11}(t_n) = M_n \left[M_n(\Delta V) - \Delta V \right]^2, \quad (30)$$

$$d_{12}(t_n) = M_n \left\{ \left[M_n(\Delta V) - \Delta V \right] \left[M_n \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) - \frac{\Delta V}{\Delta t} \right] \right\}, \quad (31)$$

$$d_{22}(t_n) = M_n \left[M_n(\Delta V / \Delta t) - \Delta V / \Delta t \right]^2. \quad (32)$$

Алгоритм оцінювання змінної Ψ_{ω} , що має сенс взаємно кореляційної функції

$$\Psi_{\omega} = K_n \left[\left(\frac{\Delta^2 V}{\Delta t^2} \right) \right] \quad (33)$$

похідної швидкості зміни поправки, може бути побудований, якщо прийняти за інтервал кореляції середнє значення інтервалів відліків часу вимірювань, а також рівність нулю математичного очікування похідної, що впливає з (32).

Вираз (33) визначає початок застосування статистики, тобто те мінімальне значення n , коли можливе оцінювання випадкового складника процесу з метою гарантованого прогнозування, очевидно $n > 4$.

Отже, оскільки у виразі (28) $t_2 - t_1 = \delta t_p$, випадкова адитивна поправка до детермінованого значення V_{on} визначатиметься виразом

$$Z(\delta t_p) = \left(\delta t_p \frac{df[V_{on}(\delta t_p)]}{V_{on}(\delta t_p)} + 1 \right) M_n(\Delta V). \quad (34)$$

Знання математичного очікування та дисперсії уможливило параметричну оцінку нормального закону розподілу випадкової величини. На основі отриманої функції щільності розподілу $\omega(z)$ можна

оцінити ймовірність P помилки прогнозування або, навпаки, інтервал Δ_z помилки за умови заданої ймовірності знаходження помилки в цьому інтервалі, використовуючи цю ймовірність як гарантію рішення про технічний стан ЗА, а також вираз

$$P(-\Delta_z < z < +\Delta_z) = \int_{-\Delta_z}^{+\Delta_z} \omega(z) dz. \quad (35)$$

Відсутність інформації про порядок реакції приводить до задачі вибору на основі спостережень. Критерієм вибору може бути максимальне значення помилок, що спостерігаються $\max_n \Delta V$. На основі інтервального оцінювання математичного очікування помилок та того, що $\max_n \Delta V$ розташовується на межі отриманого інтервалу, для однакових умов вибору для всіх моделей, що характеризуються достовірністю оцінок

$$\max_n \Delta V = M_n(\Delta V) + \frac{d_{11}(n)}{\sqrt{n}}. \quad (36)$$

Розв'язання задачі вибору передбачає обчислення максимального значення помилок для кожного порядку реакції та вибір такого порядку, що забезпечує мінімальне значення помилок, які обчислюються з використанням виразу (33).

Отже, для відтворення флуктуацій, зважаючи на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна використовувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, пропонується скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації. Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, є нелінійність еволюційних рівнянь. Запропоновано лінеаризацію задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції до ряду Тейлора. Подальше оцінювання та прогнозування випадкової адитивної поправки до детермінованого розв'язання еволюційних диференціальних рівнянь дає змогу отримати модель процесу розвитку виробничих дефектів ЗА, що бере до уваги випадкову компоненту в процесі відтворення та прийняття гарантованого рішення в прогнозуванні зміни параметрів.

Висновки

Під час відтворення процесів розвитку виробничих дефектів необхідно зважати на еволюційний та флуктуаційний характер процесів. Релаксаційний характер великомасштабних еволюційних і флуктуаційних процесів зумовлений властивостями нерівноважних станів фізичних систем. Експоненційна форма функцій зміни термодинамічних параметрів означає інваріантність у певних межах типу та змісту ЗА, умов її взаємодії із середовищем, виду та масштабу аналізованих процесів. За часом релаксації еволюційні процеси, що спостерігаються у виробництві та технічному обслуговуванні ЗА, і відповідні їм моделі мають відношення до витрачання ресурсу та зміни фізичної структури ЗА.

Статистична фізика дає змогу пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, що містить це середовище, а макроскопічний стан ансамблю та його зміна відтворюють поведінку об'єму ПР. Використання основних положень теорії Гіббса допомагає обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, що діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна дійти висновку про ієрархічний характер флуктуацій,

що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів. Знайдено еволюційне диференційне рівняння, що описує реакції, які відбуваються в спостережуваному середовищі, і застосовується для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму елементарної ділянки ПР.

Для відтворення флуктуацій, зважаючи на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна впроваджувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, пропонується скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації. Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, є нелінійність еволюційних рівнянь. Запропоновано лінеаризацію задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції до ряду Тейлора. Подальше оцінювання та прогнозування випадкової адитивної поправки до детермінованого розв'язання еволюційних диференційних рівнянь дає змогу отримати модель процесу розвитку виробничих дефектів ЗА, що бере до уваги випадкову компоненту під час відтворення та прийняття гарантованого рішення в прогнозуванні зміни параметрів.

Список літератури

1. Nevlyudov I., Andrusevich A., Starodubcev N., Vlasenkov D. Modeling the technical resource of electronic components of automation equipment. *International independent scientific journal*. 2021. № 30. P. 61–65. URL: https://www.iis-journal.com/wp-content/uploads/2024/03/IISJ_30.pdf
2. Андрусевич А.О., Моспан Д.В., Стародубцев М.Г., Невлюдова В.В. Термодинамічна модель процесів розвитку виробничих дефектів радіоелектронних засобів. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. 2014. № 4 (28). С. 113–119. URL: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2014_4_113.pdf
3. Жарикова І.В., Невлюдов І.Ш., Андрусевич А.О., Аллахверанов Р.Ю. Методологія моделювання процесу витрачання ресурсу РЕЗ в рамках моніторингу його життєвого циклу. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 3 (39). С. 84–87. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/journal/soivt/2014/3>
4. Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Pankratov V.A., Kazantsev A.M., Lvov K.V. Methods for Failures Forecasting of Complex Radio Electronic Systems. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2020. p. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9166098>
5. Заярнюк П.М. Підвищення ефективності оцінювання надійності радіоелектронної апаратури з урахуванням особливостей дрейфів параметрів і статистики відмов: дис. канд. техн. наук. Львів., 2017. 164 с. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/e4dd7f7b-56ef-4f04-b600-8a6165c393d7>
6. Nevlyudov I., Andrusevich A., Starodubtsev N., Demska N., Vzhesnievskiy M. Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle. *Innovative integrated computer systems in strategic project management: collective monograph*. 2022. ed. by I. Linde, Riga. P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.30837/mmp.2022.139>

7. Solyonyj S., Rysin A., Voropaev I., Solenaya O., & Sozdateleva M. Automated Product Life-Cycle Control System. In *Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore. 2022. P. 437–449. DOI: https://10.1007/978-981-16-2814-6_38
8. Невлюдов І.Ш., Филипенко О.І., Андрусевич А.О., Стародубцев М.Г. Підтримка життєвого циклу у виробничій інженерії: монографія. Криворізький коледж НАУ. 2019. 252 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/9541>
9. Starodubtsev N.H., Fomovskiy F.V., Nevliudova V.V., Malaia Y.A., Demaskaia N.P. Matematychnе modeliuвання vyboru informatyvnykh oznak dlia analizu stanu protsesiv zhyttievoho tsykladu radioelektronnykh zasobiv. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2017. 1 (1). P. 82–89. URL: <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/issue/view/1>
10. Мартинюк В.В., Жагловська О.М. Статистична фізика. ВНТУ, 2014. 281 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c8c237c1-33aa-4b63-8336-7f38f0822b54/content>
11. Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Основи теоретичної фізики. Вища школа, 2011. 430 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000006233>
12. Ткачук Р.А., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю. Основи технології радіоелектронних апаратів. Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, 2017. 336 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21401>
13. Губар В. Г., Адаменко І. О. Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури. КІП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 221 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d4d5ff7d-6f3b-4a42-ada0-7b5da2cc6a7e/content>
14. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка: 2-ге вид., випр. Техніка, 2006. 320 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/9ffea81b-1f6d-4de0-ace2-e731999dfabf>
15. Герасимов О.І. Фізика складних нерівноважних систем та процесів: монографія. Одеський державний екологічний університет, 2022. 187 с. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/11406/1/gerasymov_fisyka_sklad_nerivn_system_ta_protseviv-monogr_2022.pdf

References

1. Nevlyudov, I., Andrusevich, A., Starodubcev, N., Vlasenkov, D. (2021), "Modeling the technical resource of electronic components of automation equipment", *International independent scientific journal*, № 30, P. 61–65. available at: https://www.iis-journal.com/wp-content/uploads/2024/03/IISJ_30.pdf
2. Andrusevich, A.O., Mospan, D.V., Starodubcev, M.G., Nevlyudova, V.V. (2014), "Thermodynamic model of processes of development of production defects of radio electronic means" ["Termodynamichna model protsesiv rozvytku vyrobnychkh defektiv radioelektronnykh zasobiv"], *Electromechanical and energy saving systems*, № 4 (28), P. 113–119. available at: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2014_4_113.pdf
3. Zharikova, I.V., Nevlyudov, I.Sh., Andrusevich, A.O., Allakhveranov, R.U. (2014), "Methodology for modeling the process of spending the RES resource as part of monitoring its life cycle" ["Metodolohiia modeliuвання protsesu vytrachannia resursu REZ v ramkakh monitorynhu yoho zhyttievoho tsykladu"], *Weapons systems and military equipment*, № 3 (39), P. 84–87. available at: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/journal/soivt/2014/3>
4. Timoshenko, A.V., Perlov, A.Yu., Pankratov, V.A., Kazantsev, A.M., Lvov, K.V. (2020), "Methods for Failures Forecasting of Complex Radio Electronic Systems", *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. P. 1–4. available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9166098>
5. Zaiarniuk, P.M. (2017), "Improving the efficiency of assessing the reliability of electronic equipment, taking into account the features of parameter drift and failure statistics" ["Pidvyshchennia efektyvnosti otsiniuvannia nadiinosti radioelektronnoi aparatury z urakhuvanniam osoblyvostei dreifiv parametriv i statystyky vidmov"]: *dys. kand. tekhn. nauk, Lviv*, 164 p. available at: <https://ena.lpnu.ua/items/e4dd7f7b-56ef-4f04-b600-8a6165c393d7>
6. Nevlyudov, I., Andrusevich, A., Starodubtsev, N., Demaska, N., Vzhesnievskiy, M. (2022), "Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle", *Innovative integrated computer systems in strategic project management: collective monograph*, ed. by I. Linde, Riga, P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.30837/mmp.2022.139>
7. Solyonyj, S., Rysin, A., Voropaev, I., Solenaya, O., & Sozdateleva, M. (2022), "Automated Product Life-Cycle Control System", *Electromechanics and Robotics*, Springer, Singapore, P. 437–449. DOI: https://10.1007/978-981-16-2814-6_38
8. Nevlyudov, I.Sh., Fylypenko, O.I., Andrusevich, A.O., Starodubcev, M.G. (2019), "Life Cycle Support in Manufacturing Engineering" ["Pidtrymka zhyttievoho tsykladu u vyrobnychii inzhenerii"]: *monohrafiia*, Kryvorizkyi koledzh NAU, 252 p. available at: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/9541>
9. Starodubtsev, N.H., Fomovskiy, F.V., Nevliudova, V.V., Malaia, Y.A., Demaskaia, N.P. (2017), "Mathematical modeling of the choice of informative features for the analysis of the state of the processes of the life cycle of radio-electronic

- means" ["Matematychnе modeliuвання vyboru informatyvnykh oznak dlia analizu stanu protsesiv zhyttievoho tsykladu radioelektronnykh zasobiv"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 1 (1), P. 82–89. available at: <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/issue/view/1>
10. Martyniuk, V.V., Zhahlovska, O.M. (2014), "Statistical physics" ["Statystychna fizyka"], VNTU, 281 p. available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c8c237c1-33aa-4b63-8336-7f38f0822b54/content>
 11. Venher, Y.F., Hryban, V.M., Melnychuk, O.V. (2011), "Fundamentals of theoretical physics" ["Osnovy teoretychnoi fizyky"], Vyshcha shkola, 430 p. available at: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000006233>
 12. Tkachuk, R.A., Dozorskyi, V.H., Dediv, L.Ie., Dediv, I.Iu. (2017), "Fundamentals of the technology of electronic devices" ["Osnovy tekhnolohii radioelektronnykh aparativ"], Ternopilskiyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet im. Ivana Puliuia, 336 p. available at: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21401>
 13. Hubar, V. H., Adamenko, I. O. (2020), "Fizico-theoretical fundamentals of designing electronic equipment" ["Fizyko-teoretychni osnovy proiektuvannya radioelektronnoi aparatury"], KPI im. Ihoria Sikorskoho, 221 p. available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d4d5ff7d-6f3b-4a42-ada0-7b5da2cc6a7e/content>
 14. Buliandra, O.F. (2006), "Technical thermodynamics" ["Tekhnichna termodynamika"], Tekhnika, 320 p. available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/9ffea81b-1f6d-4de0-ace2-e731999dfabf>
 15. Herasymov, O.I. (2022), "Physics of complex non-equilibrium systems and processes" ["Fizyka skladnykh nerivnovazhnykh system ta protsesiv"]: *monohrafiia*, Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet, 187 p. available at: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/11406/1/gerasymov_fizyka_sklad_nerivn_system_ta_protseiv-monogr_2022.pdf

Надійшла (Received) 05.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Стародубцев Микола Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>

Макаренко Геннадій Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: hennadii.makarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9840-1219>

Білоусов Матвій Юрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: matvii.bilousov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-1020-500X>

Шибанов Сергій Вікторович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: serhii.shybanov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7143-0388>

Рамал Юсіфов – Android-розробник, NIX Solutions, Харків, Україна; e-mail: ramalyus.kyros@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3536-2087>

Nevliudov Igor – Doctor of Science (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Starodubcev Nikolaj – PhD (Engineering Science), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics Department, Kharkiv, Ukraine.

Makarenko Hennadii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Bilousov Matvii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Shybanov Serhii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Ramal Yusifov – Android developer, NIX Solutions, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE PROCESS OF DEVELOPMENT OF MANUFACTURING DEFECTS IN AUTOMATION MEANS

In automated process control systems, automation equipment (sensors, converters, amplifiers, etc.) with technical defects arising during their manufacture, which are one of the main causes of failures, is widely used. The paper establishes the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics as the basis for determining the relationship between the controlled parameters of automation equipment and the parameters of the displayed medium, which made it possible to build a deterministic model of the development of production defects and, ultimately, determine the directions for changing and adjusting the technological processes of production of automation equipment. A method has been developed for implementing a guaranteed forecast of changes in the parameters of automation equipment based on solving the evolution equation using optimal filtering algorithms, which is the **subject** of research. The **purpose** of the work is to improve the quality and reliability of automation equipment by improving the monitoring of defects arising in the production of instruments, functional units and sensors of automation equipment. The article solves the following **problems**: analysis of existing approaches to the problem of manufacturing defects and methods for their detection and setting a research task; modeling of the process of development of production defects causing changes in the technical condition of automation equipment; development of a decision-making method based on guaranteed prediction of the technical state of automation equipment. The **methodology** of work is based on the methods of thermodynamic description of the kinetics of processes (when developing a model of the process of development of production defects that cause a change in technical condition) and methods of assessment and forecasting based on optimal filtering algorithms (when developing a decision-making method based on guaranteed foresight of technical condition). The **results** of the work include a model of the process of development of manufacturing defects that cause a change in the technical condition of automation equipment, and a decision-making method based on a guaranteed forecast of the technical condition of automation equipment. **Conclusions.** The paper establishes the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between the controlled parameters of automation equipment and the displayed medium, and to build a deterministic thermodynamic model of the development of production defects. Disclosed is an equation of evolution of technical state of automation equipment based on a deterministic kinetic model of processes occurring in a multicomponent medium, and an observation model which takes into account errors caused by instability of external effects and measurement errors. Disclosed is a method of implementing a guaranteed forecast of change in parameters of automation equipment based on solving the evolution equation using optimal filtering algorithms, which are used to solve estimation and prediction problems.

Keywords: automation tools; manufacturing defects; environment; thermodynamic model; guaranteed prediction.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С., Білоусов М. Ю., Шибанов С. В., Рамал Ю. Розроблення моделі процесу розвитку виробничих дефектів у засобах автоматизації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.048>

Nevliudov, I., Starodubcev, N., Makarenko, H., Bilousov, M., Shybanov, S., Ramal, Y. (2024), "Development of a model of the process of development of manufacturing defects in automation means", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.048>