

УДК 519.6:004.93

С. Г. Антошук, д-р техн. наук, проф.; Г. Ю. Щербакова, д-р техн. наук, проф.;
Д. В. Кошутіна

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОНІКИ ПРИ ВІДБОРІ ЇХ ДЛЯ АПАРАТУРИ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ З ВЕЙВЛЕТ-ОБРОБКОЮ ТА ВРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ

У статті розглянуто методи оцінки параметрів компонентів електроніки при відборі їх для апаратури відповідального призначення. Це може бути необхідним при комплектації важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою. Для забезпечення цього під час виробництва електронних компонентів часто необхідно відібрати для таких систем надійніші. Один із важливих підходів при цьому – вибір моделі оцінки надійності та оцінка її параметрів. Значна частина таких підходів потребує удосконалення методів обробки, а саме – кластеризації. Відомі методи кластеризації, засновані на оцінюванні градієнта, є поширеними в задачах, де потрібна надійна обробка даних за наявності шуму та мультимодальності. Проте їх використання обмежується низькою стійкістю до шумів та високими обчислювальними витратами. Метою цієї роботи є розробка та дослідження методу кластеризації, що використовує вейвлет-функції для введення обмежень і забезпечує стабільну роботу в умовах шуму. Дослідження включало аналіз наявних підходів, розробку методу кластеризації з обмеженнями типу нерівностей, що отримані за рахунок вейвлет-обробки, алгоритму його реалізації та експериментальну оцінку. Запропонований метод ґрунтується на обробці із гіперболічними вейвлет-функціями та вейвлет-функціями Хаара, що дозволяють зменшити кількість оцінок значень цільової функції, скоротити обчислювальні етапи та прискорити збіжність задач з використанням кластеризації. На основі такої кластеризації удосконалено методи визначення інтенсивності відмов та параметрів DN-розподілу для оцінки надійності при відборі компонентів та процедура реалізації цих методів. Метод випробуваний на прикладі відбракування резисторів за рівнем шуму та стабільності. Підвищення швидкодії за збереження достатньої стійкості до перешкод і достовірності процедури відбракування досягається за рахунок застосування в цьому методі кластеризації з вейвлет-функціями з урахуванням обмежень. Цей результат дозволяє рекомендувати розроблений метод при відборі компонентів, призначених для апаратури відповідального призначення.

Ключові слова: апаратура відповідального призначення, кластеризація, вейвлет-перетворення, обмеження-нерівності, оптимізація, завадостійкість, надійність, експоненціальний розподіл DN-розподіл.

Вступ

Комплектація критично важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою – необхідна умова підвищення їхньої надійності. Для забезпечення цього під час виробництва електронних компонентів (ЕК) часто необхідно відібрати для таких вузлів особливо важливої апаратури надійніші ЕК. Один із важливих підходів при цьому – вибір моделі оцінки надійності та оцінка її параметрів.

Вибір надійних ЕК обмежений дією протиріч. З одного боку, вимірювань характеристик вимагає довгих у часі і дорогих вимірів. З іншого боку, в сучасних умовах наявна велика кількість підприємств дрібносерійного виробництва, для яких можливість проведення таких вимірювань обмежена економічними причинами. Часто через скорочення часу на контрольно-діагностичні операції під час вибору надійних ЕК такі операції проводять за малими вибірками даних, збільшуючи в вимірах шумову складову. Ця шумова складова даних може також зростати через нерівномірну зміну температури об'єкта чи датчиків тощо.

Водночас часто для систем відповідального призначення (систем безпеки автомобілів, медичної діагностики тощо) особливо важливими є якість виготовлення ЕК та

стабільність їх параметрів під час експлуатації [1]. Так, наприклад, важливим етапом під час виробництва систем безпеки та медичної апаратури є вибір якісних та стабільних компонентів [2, 3].

Аналіз наявних підходів показав, що часто використовуються інформаційні технології (ІТ) обробки параметрів, які потребують тривалих досліджень великих партій виробів [4, 5]. Якщо вироби випускаються малими партіями, з номенклатурою, що швидко змінюється, такий обсяг досліджень часто не можливий. Тому може знижуватися достовірність діагностування. Таким чином, актуальною є розробка ІТ-оцінки якості компонентів перед складанням складних систем, яка дозволить підвищити достовірність в умовах апіорної невизначеності через малі набори даних для дослідження та, крім того, знизити вимоги до ресурсомісткості та оперативності.

Для виявлення потенційно ненадійних виробів розроблено кілька підходів. Наприклад, тривалі та витратні виробничі випробування можна скоротити, застосовуючи ІТ-прогнозування [5].

Аналіз показав, що значна частина таких ІТ орієнтована на прогнозування значення визначального параметра конкретного виробу (часові ряди [6]). Численні технології прогнозу за багатовимірними параметрами з допомогою нейронних мереж [5] засновані на градієнтних методах і їм притаманні недоліки цих методів – чутливість до локальних екстремумів та стартової точки пошуку, у ряді випадків – значний час навчання нейронної мережі (НМ) [5]. Ці методи потребують великого обсягу досліджень [5, 6], які на виробництві із швидкою зміною номенклатури часто провести неможливо. Водночас для зазначених додатків часто достатньо визначити клас виробу, порівнявши його параметри з межами поля допуску [7]. Це дозволяє відома модель Маркова, яка також дозволяє оцінювати параметри виробів на основі порівняно невеликої кількості вимірювань.

В основі зазначених ІТ та методів обробки (кластеризації та класифікації) – оптимізація відповідних функціоналів. Аналіз показав, що при дрібносерійному виробництві цільова функція може бути з шумом та мультимодальна. У методів обробки, що ґрунтуються на оцінці градієнта, в таких умовах низька завадостійкість, вони чутливі до локальних екстремумів та початкової точки пошуку, у субґрадієнтних методів – висока похибка. Для зниження цих недоліків у роботах авторів запропоновано методи класифікації [8], кластеризації [9] та оцінки параметрів виробів [10]. Вони ґрунтуються на оцінці координати екстремуму відповідних функціоналів за допомогою вейвлет-перетворення (ВП). Аналіз показав, що вони дозволили підвищити якість кластеризації та достовірність класифікації при апіорній невизначеності діагностичних параметрів.

Для обробки даних в оцінці параметрів надійності використовують методи кластеризації. У зазначених умовах важливими є не тільки завадостійкість та зниження похибки цієї процедури, але й збільшення швидкодії, особливо у разі вибору надійних ЕК для апаратури відповідального призначення [1 – 3, 10].

ЕК поділяють на кластери за ознакою компактності параметрів за допомогою оптимізації функціоналу якості. Метод кластеризації з використанням вейвлет-перетворення (ВП), запропонований раніше, дозволяє проводити кластеризацію з низькою похибкою за високого рівня перешкод у даних та малих обсягах вибірок [9]. Однак через багатоетапну обробку за допомогою декількох вейвлет-функцій (ВФ) швидкодія цього методу не висока.

Метою роботи є удосконалення методу кластеризації з урахуванням обмежень-нерівностей для підвищення швидкодії кластеризації та зменшення кількості оцінок значень цільової функції. На основі цього методу пропонується удосконалити та дослідити процедури визначення параметрів надійності та ІТ-оцінки параметрів електронних компонентів.

Огляд літератури.

Аналіз методів визначення компонентів з браком

Найчастіше оцінюють надійність ЕК по моделі експоненціального розподілу з одним параметром – інтенсивністю відмов λ . При цьому припущення про сталість у часі підвищує похибку прогнозів надійності порівняно з розподілами з двома параметрами. Тому за допомогою експоненціального розподілу рекомендується проводити відносну оцінку надійності на етапі ескізного проектування, коли необхідно оцінити надійність різних варіантів, і на підставі аналізу вибрати елементну базу [11]. Цей підхід застосовують також, коли не суттєві явища старіння. Для цього розподілу, якщо відомо, що ЕК справний, то його майбутній стан не залежить від минулого.

Ця модель на основі інтенсивності відмов λ враховує раптові відмови, які мають випадковий характер, тоді як відмови, що виникають у результаті незворотних фізико-хімічних змін параметрів ЕК, не підпорядковуються експоненціальному закону. Тому використання експоненціальної моделі відмови у прогнозуванні надійності ЕК робить цю оцінку наближеною та призводить до значних похибок [11].

Для виявлення та видалення ЕК із дійсними та потенційними відмовами з готової партії до постачання споживачеві проводять випробування для видалення бракованих ЕК. У процесі таких випробувань під час аналізу процесів деградації, які призводять до відмов ЕК, виявлено, що вони мають випадкову природу. Так, наприклад, складні ЕК, такі, як інтегральні схеми (ІС), одночасно схильні до впливу багатьох факторів. Ці фактори, некорельовані та корельовані між собою, формують загальний процес деградації ІС. Параметри деградаційних процесів, які можуть спричинити відмову ІС, мають різну фізичну природу: пластичні та пружні деформації, втомне механічне руйнування, електролітична корозія тощо [11, 12].

Порівняльний аналіз імовірнісно-фізичних розподілів, які враховують фізичні процеси, що призводять до відмови, викладено в [13]. Виходячи з цього аналізу, оцінки надійності ІС за результатами прискорених випробувань мають похибку не більше 10%, якщо як модель відмов використовується дифузійний DN -розподіл з двома параметрами, що відповідає немонотонному марківському процесу [13, 14]. Тривалість прискорених випробувань значно менша від реальної довговічності ЕК. У зв'язку з високою надійністю ЕК ці випробування проводяться до відмови малої частини вибірки і тому супроводжуються значною похибкою. Джерелом похибки є висока дисперсія оцінки параметрів DN – розподілу, яка ще й збільшується за рахунок наявності шуму в даних про надійність (об'єктивних та суб'єктивних помилок під час їх збору та обліку).

Під час таких досліджень, наприклад, у процесі прискорених випробувань ІС на довговічність виявлено, що їхня інтенсивність відмов має бімодальний характер (перший пік характеризує відмови аномальних ІС, а другий – відмови основної частини вибірки); при цьому середній час безвідмовної роботи для цих груп ІС може відрізнятися на чотири порядки. Тому для підвищення стійкості до завад і зниження похибки оцінки параметрів надійності під час відборупотенційно ненадійних ЕК потрібно підвищити перешкодостійкість і знизити похибку поділу партії ЕК дві групи.

Аналіз методів кластеризації

Методи кластеризації, що ґрунтуються на оцінці градієнта або субградієнта цільової функції [8, 9] спрямовані на пошук її екстремуму. При цьому цільова функція часто мультимодальна, може мати поверхню з шумом [9]. Методи оптимізації з оцінкою градієнта в таких умовах відрізняються низькою стійкістю до перешкод, а з оцінкою субградієнту – досить значною похибкою оцінки екстремуму [8, 9].

В зв'язку з цим для прикладних завдань сьогодні отримали розвиток методи, спрямовані на оцінку координати екстремуму в умовах, коли можна отримати лише значення цільової функції $f(x)$ у точці x [15]. В рамках подібної тенденції та для зниження

впливу зазначених недоліків авторами було запропоновано низку методів, при реалізації оцінки напрямку руху до екстремуму, що використовують вейвлет-функції [15]. Для пошуку оптимуму в них використовується ітеративна схема:

$$c[n+1] = c[n] - \gamma[n]gr(c[n]),$$

де $c[n]$ – оцінка координати оптимуму на ітерації n ; $gr(c[n])$ – результат згортки з ВФ, «в середньому» співпадаючий з градієнтом, і близький до нуля, коли його аргумент прагне точки оптимуму; $\gamma[n]$ – крок.

Так, у методі оптимізації з використанням вейвлет-функцій [8, 9] для оцінки координати екстремуму спочатку використовується ВФ Хаара та (для уточнення) гіперболічні ВФ (ГВФ). Обробка за допомогою вейвлета Хаара підвищує стійкість до перешкод, але через асиметрію функціоналу якості оптимум відшукується з похибкою. Ця похибка знижується шляхом багаторічної обробки цього функціоналу із ГВФ [8, 9]. Тому швидкодія методу невисока.

Проте в рамках прикладної задачі, що розглядається, швидкодія повинна бути підвищена [1, 13 – 17]. Для цього запропоновано звузити область пошуку на етапі обробки за допомогою ГВФ [8, 9]. При цьому здійснюють перехід від умовно-екстремального завдання (пошуку мінімуму за наявності обмежень) до завдання безумовної мінімізації з формуванням на основі цих обмежень допоміжних функціоналів. У роботі для цього вибрано метод центрів з групи методів внутрішніх штрафних функцій – найменш чутливих до виродженого мінімуму [17, 18]. Під час реалізації методу на кожній ітерації додаються обмеження, так, щоб значення функціоналу не перевищувало значення у поточній точці. Тобто функціонал, спочатку не підпорядкований обмеженням, мінімізується всередині вузької області за обмежень $g_i(x) \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, m_1$ [17, 18].

Основні етапи кластеризації з ВФ та врахуванням обмежень

Цей метод оптимізації визначається ітеративною схемою [8, 9]:

$$c[n] = c[n-1] - \gamma[n] \sum_{m=1}^{s_\alpha} \alpha_m[n] \tilde{V}_{c\pm} Q(x[n], c[n-1], a[n-m]), \quad (1)$$

де $\sum_{m=1}^{s_\alpha} \alpha_m[n] \tilde{V}_{c\pm} Q(x[n], c[n-1], a[n-m])$ – ВП реалізації $Q(x, c)$ по c_i , $i = 1, \dots, N$; $Q(x, c)$ – функціонал вектору $c = (c_1, \dots, c_N)$, що залежить від вектору випадкових $x = (x_1, \dots, x_M)$; $c[n-1]$ – координата мінімуму; $\alpha_m[n]$, $m = 1, \dots, s_\alpha$ – компоненти вектору $\alpha[n]$, який отримано в результаті дискретизації ВФ.

У схемі (1) для оцінки напрямку пошуку використовується згортка $Q(x, c)$ з ВФ Хаара в околі, що визначається довжиною її носія N . Мінімум, знайдений на цьому етапі, може бути зміщений через асиметрію функціоналу в області пошуку. На основі координати мінімуму, яку отримано після згортки функціоналу з ВФ Хаара, за методикою, яка описана в [17], формується функціонал $Q_1(\cdot)$, який дозволяє враховувати цю координату, як обмеження:

$$Q_1(x[n], c[n], g(x[n], c_H^*[n-1])) = -\ln(Q(x[n], c[n]) - Q(x[n], c_H^*[n-1])) - \ln(g(x[n], c_H^*[n-1])), \quad (2)$$

де $Q(x[n], c[n])$ – вихідний функціонал на кроці пошуку n ; $Q(x[n], c_H^*[n-1])$ – значення функціоналу в точці мінімуму, яке отримане після згортки ВФ Хаара; $g(x[n], c_H^*[n-1]) = c_H^*[n-1] - x[n]$.

Пошук оптимуму $Q_1(\cdot)$ здійснюється далі за схемою (1). В якості базового методу під час оптимізації використано градієнтний метод [8].

На цьому етапі пошуку оптимуму обчислюється зважена сума значень $Q_1(x[n], c[n], g(x[n], c_H^*[n-1]))$ з гіперболічною функцією $\Psi(j) = \frac{1}{\alpha x}$ при початковому масштабі $\alpha = 1$. Початкова точка пошуку оптимуму цього етапу визначається на етапі

пошуку з ВФ Хаара.

В базовому методі, якщо координата мінімуму відрізняється від результату попереднього етапу не більше ніж на δ , пошук закінчується, інакше – масштаб α збільшується на 1. Таким чином, від оптимізації з допомогою ВФ Хаара, що забезпечує завадостійкість, здійснюється перехід к оптимізації з допомогою диференціатора, що забезпечує високу точність (якщо $\alpha \rightarrow \infty$, то $\frac{1}{\alpha x}$ прагне до диференціатора).

Однак через багатоетапну оцінку напрямку пошуку з гіперболічною ВФ (в методі [10] таких етапів 5 (зі збільшенням α від 1 до 5). Тобто кількість значень функціоналу в точці оцінки напрямку (наприклад до мінімуму) лишається значною та є прямо пропорційною довжині носія вейвлет-функції. За рахунок скорочення кількості етапів обробки з ГВФ і введення обмежень можна скоротити кількість обчислень та, в залежності від рівня шуму в цільовій функції, збільшити швидкодію.

На основі цього методу розроблений метод кластеризації на базі використання вейвлет-функцій з основними етапами (для двох кластерів ($r = 1,2$)).

Етап 1. Формування навчальної вибірки даних.

Етап 2. В загальному випадку – визначення числа кластерів одним з відомих методів [20].

Етап 3. Оцінка функціоналу якості $Q(\mathbf{x}, \mathbf{c})$.

Етап 4. Задаються параметри методу: δ_1 – погрішність пошуку оптимуму старту, яка визначається на етапі апріорних досліджень функціоналу якості; δ_2 – погрішність, яка задовольняє вимогам прикладної задачі; k_{max} – максимальна кількість стартів; вид ВФ; $\mathbf{c}_1[0], \mathbf{c}_2[0]$ – початкові значення координат центрів кластерів; $\gamma[1]$ – крок; a – крок дискретизації ВФ; s_1 – довжина носія ВФ першого старту (з ВФ Хаара); $k = 1$; $n = 1$.

Етап 5. Оцінюється напрям пошуку:

$WT_k(Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_1[n-1], \mathbf{c}_2[n-1]))$ для кластерів по (3), (4) на ітерації n згідно:

$$WT_k(Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}[n-1])) = \{G_{1k}, G_{2k}, \dots, G_{Nk}\}, \quad (3)$$

G_{jk} – результат обробки по j -ій змінній:

$$G_{jk} = \frac{1}{s_k} \sum_{\substack{i=-\frac{s_k}{2} \\ i \neq 0}}^{\frac{s_k}{2}} Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_j + ia) \cdot \Psi_k(i), \quad (4)$$

s_k – довжина носія ВФ на k -му старті (s_k – парне число); a – крок дискретизації ВФ; $\Psi_k(i)$ – вейвлет-функція на k -му старті; $j = 1, \dots, N$ – розмірність вектору параметрів.

Крок $\gamma[n]$ обирається відповідно рекомендаціям для пошуку оптимуму з оцінкою градієнту: $\gamma[1] = 0,4, \dots, 0,6$.

При цьому для кожного з i елементів зваженої суми (4) визначають характеристичні функції $\varepsilon_r(\mathbf{x}, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2)$, $r = 1,2$; коли $f(\mathbf{x}, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2) < 0$, то $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 0$, коли $f(\mathbf{x}, \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2) \geq 0$, то $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_2 = 1$.

Тут $f(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_1[n], \mathbf{c}_2[n]) = \|\mathbf{x}[n] - \mathbf{c}_1[n]\|^2 - \|\mathbf{x}[n] - \mathbf{c}_2[n]\|^2$.

Етап 6. Визначають координати центрів кластерів:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1[n] &= \mathbf{c}_1[n-1] - \gamma[n] WT_k(Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_1[n-1], \mathbf{c}_2[n-1])) \\ \mathbf{c}_2[n] &= \mathbf{c}_2[n-1] - \gamma[n] WT_k(Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_1[n-1], \mathbf{c}_2[n-1])) \end{aligned} \quad (5)$$

для $k \leq k_{max}$, інакше – зупинка.

Етап 7. Коли $\|\mathbf{c}_r[n] - \mathbf{c}_r[n-1]\| \leq \delta_1$, пошук на поточному старті закінчується, інакше – $n = n + 1$ і здійснюється перехід до етапу 5.

Етап 8. Коли $k > 1$ і $\mathbf{c}_{r,k}^* - \mathbf{c}_{r,k-1}^* \leq \delta_2$ – зупинка; в протилежному випадку, якщо $k < k_{max}$, то збільшується номер старту $k = k + 1$, обирається ВФ для оцінки напрямку пошуку і здійснюється перехід до етапу 5. Тут $\mathbf{c}_{r,k}^*$, $\mathbf{c}_{r,k-1}^*$ – результати пошуку для r -го кластеру

на k -му і $k-1$ старті відповідно.

Дослідження методів оптимізації та кластеризації

Під час дослідження для гіперболічної функції $\Psi(j) = \frac{1}{\alpha x}$ було прийнято $\alpha = 5$ [8].

Проведено оцінку швидкодії етапу оптимізації порівняно з базовим методом [10]. Це дослідження було проведене з використанням функції $f_2(x) = x^2$ для $x \in (-80, \dots, 80)$. Глобальний мінімум для цієї функції $f_2(x) = 0$ за $x = 0$. Довжина кроку дискретизації при пошуку оптимуму з ВФ Хаара $dx = 1$, при пошуку з гіперболічною ВФ, щоб не порушувалось прийняте в (2) обмеження, $dx = 0,01$. При відношенні сигнал/шум по амплітуді до 6,4 (завада розподілена по нормальному закону з нульовим середнім і середньоквадратичним відхиленням від 0 до 100, максимальне значення тестової функції $f_2(x) = 6400$) зростання швидкодії склало від 1,7 разу до 2,8 разів. Число значень оцінки цільової функції зменшилось від 25% до 32% (в залежності від співвідношення сигнал/шум).

На другому етапі для дослідження швидкодії пошуку було сформовано набір даних з двох груп (кластерів) по 15 точок у двовимірному просторі ознак (рис. 1а). Як видно з рис. 1а, кластери лінійно розділювачі в просторі ознак. На рис. 1б наведений функціонал $F(\cdot)$. Як указано в [8] такого роду функціонали часто зустрічаються при кластеризації. Значення функціоналу $F(\cdot)$ представляє сумарну помилку першого і другого роду при розділенні даних (рис. 1а) відрізком прямої $y = c_0 + c_1 x$. Початкове значення при пошуку кращого значення $F(c_0)c_0[1] = -80$. Значення $c_1 = 2$ не змінювалось.

При пошуку оптимуму для цього функціоналу порівняно з базовим методом з урахуванням обмежень другого роду виграш в часі більше 1,18 разів. При пошуку оптимуму були прийняті: крок дискретизації $dx = 6$ і довжина носія ВФ Хаара $N = 20$, при пошуку з гіперболічною ВФ $dx = 1$.

Дослідження методів відбору компонентів

метод визначення λ для експоненціального розподілу

Для відбору надійних електронних компонентів потрібно обрати модель оцінки надійності. Найчастіше оцінюють надійність ЕК і пристроїв на їх основі за допомогою експоненціального розподілу. З допомогою цього розподілу проводять оцінку надійності етапі ескізного проектування, коли необхідно оцінити надійність різних варіантів, і на основі аналізу обрати елементну базу [1].

Визначення інтенсивності відмов λ партії ЕК з урахуванням кластеризації пропонується проводити так.

Етап 1. Визначення параметрів ЕК. Для N об'єктів (ЕК) з набором з k параметрів визначається вектор $x_j(t) = (x_j^1(t), x_j^2(t), \dots, x_j^k(t))$. Цей вектор характеризує стан j -го об'єкту в момент часу t . Взаємне розташування множини точок $x_1(t), \dots, x_N(t)$ в k -вимірному просторі параметрів X відповідає реальному групуванню по параметрах в часі для досліджуваних об'єктів.

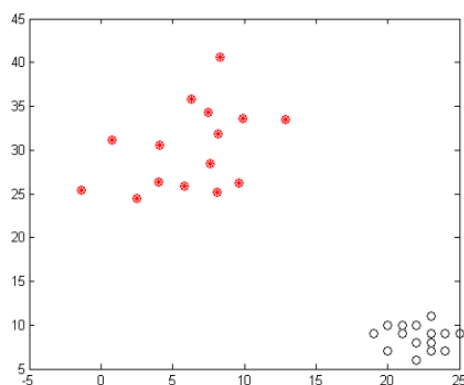
Етап 2. Для визначення структури вказаних даних проводять кластеризацію з ВФ.

З її допомогою в момент часу t_1 проводиться розділення точок у просторі X на 2 класи (кластери). Вводиться поняття центру кластеру $a_i(t)$, $i = 1, \dots, r$. В момент часу t_2 кожна точка $x_j(t_2)$ з допомогою кластеризації відноситься до того чи іншого кластеру, з отриманих на першому кроці t_1 . Далі проводиться перерахунок значень центрів кластерів $a_i(t_2)$, $i = 1, \dots, r$, і підрахунок для точок $x_j(t_2)$ відстаней до нових центрів $i = 1, \dots, r$, $j = 1, \dots, n$. Така процедура виконується для всіх m моментів часу.

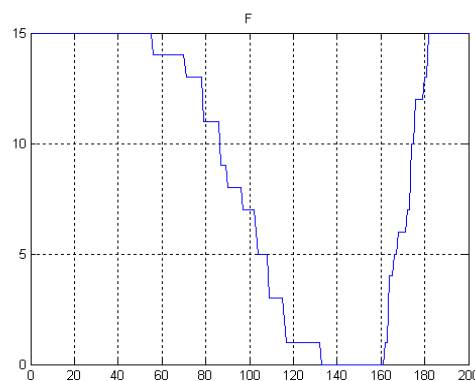
Етап 3. Для кожної з двох груп оцінюється інтенсивність відмов λ [11].

Пропонований метод випробуваний на прикладі партії резисторів [10]. Як прогноуючі параметри використано рівень шуму та математичне очікування зміни опору в групах.

Дані першого контролю (через 24 години роботи у навантаженому режимі) розділені за допомогою кластеризації на 2 кластери, що включили: перший – групи з 1 по 8, другий – 9 групу за рівнем шуму [10].



а)



б)

Рис. 1. Дані при кластеризації (а), значення $F(c_0)$ (б)

Розраховані значення інтенсивності відмов склали відповідно $\lambda_1 = 0,35 \times 10^{-5}$ год $^{-1}$ – за відсутності кластеризації, $\lambda_2 = 0,19 \times 10^{-5}$ год $^{-1}$ – для резисторів першого кластера і $\lambda_3 = 0,19 \times 10^{-4}$ год $^{-1}$ для резисторів другого кластера.

Метод визначення параметрів DN -розподілу

Перший і другий етапи такі ж, як і при визначенні λ . На етапі 3 для кожної з двох груп оцінюються параметри DN -розподілу [13]:

$$F(t) = DN(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp(2\nu^{-2})\Phi\left(-\frac{t+\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right),$$

де μ – параметр масштабу, який співпадає з математичним очікуванням випадкової величини t ; ν – параметр форми, який дорівнює коефіцієнту варіації розподілу величини t .

Цей метод також випробуваний на прикладі партії резисторів, призначених для апаратури відповідального призначення [10].

Далі за методикою [10, 13] було обчислено коефіцієнти варіації діагностичного параметра – математичного очікування зміни опору для першого, другого кластера та всієї партії резисторів без відбраковування за формулою:

$$v_j = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{ji}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\Delta x_{ji} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_{ji} \right)^2}$$

де $\Delta x_{ji} = x_{ji+1} - x_{ji}$, індекс j – відповідає номеру кластера $j = 1, 2$ чи $j = 3$ для всієї партії резисторів; індекс i відповідає моменту часу t_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Інтервали між вимірюваннями $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ прийняті нерівномірними (математичне очікування змін опорів визначалось через 24, 168, 1000, 5000, 10000 годин після початку вимірювань) [13]. Далі, за методикою [4], з урахуванням того, що значення v_j склали відповідно $v_1 = 1,38$, $v_2 = 1,43$ та $v_3 = 1,55$, оцінюються параметри масштабу шляхом рішення рівняння:

$$F_j(t_i, \mu_{ji}, v_j) = \tilde{F}_j(t_i), \quad (6)$$

де $\tilde{F}_j(t_i) = i/N$, ($i = 1, \dots, r$); i – номер відмови у відповідному кластері ($i = 1, \dots, r$); t_i – час роботи до відмови i -го резистора. Оскільки точна інформація про момент відмови відсутня [13], при розрахунках моментом відмови вважалась права границя часового інтервалу, на протязі якого він відмовив.

В результаті розраховані з допомогою DN -розподілу значення середнього часу роботи до відмови склали відповідно 4,8 років за відсутності розділу на кластери, 7,5 років – для резисторів першого кластеру і порядку 2 років резисторів другого кластеру.

Інформаційна технологія оцінки якості компонентів електроніки

Цей підхід пропонується для оцінки якості компонентів електроніки, якщо необхідно вибрати такі вироби для збирання [відповідального призначення.

Передбачається, що в N виробів k параметрів $x_j(t_1), \dots, x_j(t_n)$ є відомою частиною траєкторії зміни в часі параметра виробу j . Вони визначаються під час прискорених виробничих випробуваннях. Для виявлення груп (кластерів) параметрів використовується метод кластеризації з ВФ з урахуванням обмежень й у час t_1 поділяються n виробів на r кластерів. Число кластерів обираємо одним із відомих методів [20]. Основні етапи ІТ наведені нижче.

1. Визначають інформативні параметри і проводять їх вимірювання.

2. Для t_1 розділяють n точок на r кластерів шляхом кластеризації з ВФ з урахуванням обмежень. Визначають координати їхніх центрів $a_i(t)$, $i = 1, \dots, r$ [9, 10]. Обчислюються відстані $R_{ij}(t)$, $i = 1, \dots, r$, $j = 1, \dots, n$ до центрів.

3. Для моменту часу t_1 розраховується матриця ймовірностей $p_{ji}^{(1)} = p_{ji}(t_1)$ [9, 10]:

$$p_{ji}^{(1)} = \frac{\alpha_j^{(1)}}{R_{ji}^{(1)}}, \quad (7)$$

де множник $\alpha_j^{(1)}$ визначають як:

$$\alpha_j^{(1)} = \left(\sum_{l=1}^r \frac{1}{R_{jl}^{(1)}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

4. В момент t_2 кожен $x_j(t_2)$ з допомогою класифікації з ВП [3] відноситься до одного з кластерів, що отримані на першому кроці. Далі перераховуються значення центрів $a_i(t_2)$, $i = 1, \dots, r$, і підраховуються для $x_j(t_2)$ відстані $R(x_j(t_2), a_i(t_2))$ до нових центрів $i = 1, \dots, r$, $j = 1, \dots, n$. Така процедура виконується для всіх m моментів часу.

5. На s -му кроці модифікується матриця перехідних ймовірностей (1) [10]:

– якщо параметр співпадає з центром кластера, ймовірність лишитися в ньому дорівнює 1, а перейти в інший кластер – дорівнює 0;

- коли j -ий параметр не співпадає з центром кластера, ймовірності перераховуються:

$$p_{ji}^{(s)} = \gamma \left[p_{ji}^{(s-1)} + \left(\frac{1 + \text{sign}(\Delta R_{ji}^{(s)})}{2} - p_{ji}^{(s-1)} \text{sign}(\Delta R_{ji}^{(s)}) \right) \Delta \hat{R}_{ji}^{(s)} \right], \quad (11)$$

$$\text{де : } \text{sign}(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z \geq 0, \\ -1, & \text{если } z < 0; \end{cases}$$

$$\Delta R_{ji}^{(s)} = R_{ji}^{(s-1)} - R_{ji}^{(s)}; \quad (12)$$

$$\Delta \hat{R}_{ji}^{(s)} = \frac{R_{ji}^{(s-1)} - R_{ji}^{(s)}}{R_{ji}^{(s-1)} + R_{ji}^{(s)}}; \quad (13)$$

γ – нормуючий множник (визначається з урахуванням $\sum_{i=1}^r p_{ji}^s = 1$):

$$\gamma = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 + \text{sign}(\Delta R_{ji}^{(s)})}{2} - p_{ji}^{(s-1)} \text{sign}(\Delta R_{ji}^{(s)}) \right) \Delta \hat{R}_{ji}^{(s)}} \quad (14)$$

6. За значеннями матриці перехідних ймовірностей прогнозують належність параметра виробу до класу з використанням байесівської схеми, коли виріб відносять до класу $zp_{ji0} = \max_{i=1, \dots, r} p_{ji}$ [10].

7. Вироби з класу з потрібною якістю надходять до збирання вузлів апаратури відповідального призначення.

В результаті удосконалення вказаного підходу на базі кластеризації з урахуванням обмежень швидкодія процедур під час дослідження параметрів резисторів була підвищена в середньому на 7 – 9 %.

Висновки

Удосконалено методи визначення інтенсивності відмов та параметрів DN-розподілу для оцінки надійності під час випробувань ЕК та процедура реалізації цього методу. Метод випробування на прикладі відбракування резисторів за рівнем шуму та стабільності. Підвищення швидкодії за збереження достатньої стійкості до перешкод і достовірності процедури відбракування досягається за рахунок застосування в цьому методі кластеризації з ВФ з урахуванням обмежень. Цей результат дозволяє рекомендувати розроблений метод при відборі ЕК, призначених для апаратури відповідального призначення.

Удосконалено інформаційну технологію оцінки якості компонентів електроніки перед збиранням.

В результаті використання цієї ІТ достовірність прогнозу становила 0,88. Перешкодостійкість була підвищена в середньому до 20 % порівняно з наявними системами, що відповідає вимогам практики.

Дослідження показали, що достовірність діагностування виробів у діапазоні відношення сигнал/перешкода 10...20 (за потужністю) підвищилася до 1,2 рази порівняно з наявними ІТ. У діапазоні відносин сигнал/перешкода 7..10 (за потужністю) системи діагностування на основі наявних ІТ не працездатні, а достовірність діагностування під час застосування розробленої ІТ – 0,88. В результаті вдосконалення зазначеного підходу з урахуванням запропонованого методу кластеризації з ВФ з обмеженнями швидкодії процедур було підвищено загалом на 7 – 9 %. Такі результати можуть дозволити застосування розробленої ІТ у додатках, що відповідають зазначеним умовам.

Дослідження проведено за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (грант № 2023.04/0161).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловйов В. І. Основи теорії надійності і експлуатації авіаційних систем. Київ: КІ ВПС, 2000. 248 с.
2. Чорний М. В. Оцінка параметра потоку відмов зразка озброєння і військової техніки за даними експлуатаційних спостережень в умовах інтенсивного використання. *Труди академії*. 2005. № 58. С. 235–242.
3. Chorny N. V., Stepanov S. S., Matuzko B. P. Information support assessment of reliability and armament equipment during use. *Військово-технічний збірник*. 2011. №2 (5). P. 140–145.
4. Singh K., Kalra S. Reliability Forecasting and Accelerated Life time Testingin Advanced CMOS Technologies. *Microelectronics Reliability*. 2023. Vol. 151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115261> (Last accessed 02.10.2025).
5. Hsu P. -N. Artificial Intelligence Deep Learning for 3D IC Reliability Prediction. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12 (1). DOI: 10.1038/s41598-022-08179-z.
6. Time Series Data for Equipment Reliability Analysis with Deep Learning / B. Chenet et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 105484–105493. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3000006.
7. Evaluation Of Reliability Of Radio-Electronic Devices With Variable Structure / Y. V. Ryzhov et al. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. №3. P. 31–41. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-3> (Last accessed 01.10.2025).
8. Haar Wavelet-Based Classification Method for Visual Information Processing Systems / W. Huan et al. *Appl. Sci*. 2023. №13 (9). URL: <https://doi.org/10.3390/app13095515> (Last accessed 01.10.2025).
9. Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV Images for Sustainable Development of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure / Y. Zheng et al. 2025. №17. P. 927–940. URL: <https://doi.org/10.3390/su17030927> (Last accessed 01.10.2025).
10. Information Technology of Parameters Prediction with Adaptive Clustering in the Space of the Wavelet Transform / G. Shcherbakova et al. *Пр. Одес. політехн. ун-ту*. Вип. 1 (40). С. 104–109.
11. Олійник В. П. Елементна база радіоелектроніки: навч. посіб. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2022. 88 с.
12. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: підручник. Львів: Новий Світ, 2003. 208 с.
13. Квасніков В. П., Єгоров С. В. Визначення довірчих інтервалів і планування випробувань при використанні DN – розподілу. *Вісник Інженерної академії України*. 2016. Вип. 2. С. 72–75.
14. Zelenkov A. A., Golik A. P. Theon-board system reliability estimate on the base of DN-distribution. *Електроніка та системи управління*. 2009. №2 (20). P. 12–17.
15. Fault Diagnosis for Attitude Sensors Based on Analytical Redundancy and Wavelet Transform. Chinese Automation Congress (CAC) / Liu W. et al. China, Shanghai. 2020. P. 6471–6476. DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9327370.
16. Gill P. E., Murray W., Wright M. H. Practical Optimization. New York: Academic Press, 1981. 509 p.
17. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. New York: Springer-Verlag, 2006. 651 p.
18. Avriel M. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. New York: Dover Publishing, 2003. 453 p.
19. Мовчан А. П., Степанець О. В. Методи статичної оптимізації : навч. посіб. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 138 с.
20. The Determination of Cluster Number at k-Mean Using Elbow Method and Purity Evaluationon Headline News / D. Marutho et al. *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication, Semarang, Indonesia*. 2018. P. 533–538. DOI: 10.1109/ISEMANTIC.2018.8549751.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 25.09.2025.

Антошук Світлана Григорівна – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних систем, директор інституту комп'ютерних систем, e-mail: asg@op.edu.ua.

Щербак Галина Юрійвна – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних систем, e-mail: galina.sherbakova@op.edu.ua.

Кошутіна Дар'я Валерійвна – аспірант кафедри інформаційних систем, e-mail: d.v.koshutina@op.edu.ua.

Національний університет «Одеська політехніка».