

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.02>

УДК 004.81; 621.382

Оцінка параметрів надійності компонентів електроніки при відбракуванні за допомогою кластеризації з вейвлет-перетворенням

Щербакова Галина Юріївна¹⁾

Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0475-3854>; galina.sherbakova@op.edu.ua. Scopus Author ID: 27868185600

Кошутіна Дар'я Валеріївна¹⁾

PhD студент каф. Інформаційних систем

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1326-8775>; d.v.koshutina@op.edu.ua. Scopus Author ID: 58289385400

Сахно Кирил Олександрович¹⁾

PhD студент каф. Інформаційних систем

ORCID kirillsakhno70@stud.op.edu.ua

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Комплектація критично важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою – необхідна умова підвищення їхньої надійності. Тому однією з ключових задач є визначення параметрів надійності при відборі компонентів для апаратури відповідального призначення. У цьому дослідженні пропонується удосконалення процедури визначення параметрів надійності шляхом використання методу кластеризації на основі вейвлет функцій, який дозволяє підвищити швидкість процедури оцінки параметрів надійності. Перевагою підходу є підвищення швидкості за рахунок визначення обмежень на етапі обробки з допомогою вейвлета Хаара в області пошуку екстремуму. Моделювання підтвердило ефективність запропонованого підходу для визначення параметрів надійності, що і дозволяє рекомендувати його для використання при відборі компонентів для апаратури особливо важливого призначення.

Ключові слова: кластеризація вейвлет-перетворення; оптимізація; аналіз надійності; інтенсивність відмов; дифузійний розподіл.

Актуальність. Комплектація критично важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою – необхідна умова підвищення їхньої надійності. Для забезпечення цього при виробництві 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. Для виявлення потенційно ненадійних виробів розроблено кілька підходів. Наприклад, тривалі та витратні виробничі випробування можна скоротити, застосовуючи ІТ прогнозування [1–4]. Аналіз показав, що значна частина таких ІТ орієнтована на прогнозування значення визначального параметра конкретного виробу (часові ряди [4]). Численні технології прогнозу за багатовимірними параметрами з допомогою нейронних мереж 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 [4], які на виробництві часто провести неможливо. Водночас для зазначених додатків часто достатньо визначити клас виробу, порівнявши його параметри з межами поля допуску. Це дозволяє відома модель Маркова [6]. Вона 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 мультимодальною через варіабельність параметрів. У методів обробки, що ґрунтуються на оцінці градієнта, в таких умовах низька завадостійкість, вони чутливі до локальних екстремумів та початкової точки пошуку, у субградієнтних методів – висока похибка. Для зниження цих недоліків у роботах авторів запропоновано методи

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

класифікації [4], кластеризації [7] та оцінки параметрів виробів [4]. 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 апріорній 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 [4, 8].

ЕК поділяють на кластери за ознакою компактності параметрів за допомогою оптимізації функціоналу якості. Метод кластеризації з вейвлет-перетворенням (ВП), запропонований раніше, дозволяє проводити кластеризацію з низькою похибкою при високому рівні перешкод у даних та малих обсягах вибірок [4]. Однак через багатоетапну обробку за допомогою декількох вейвлет-функцій (ВФ) швидкодія цього методу не висока. Удосконалення цього з урахуванням обмежень, як нерівностей, може підвищити швидкодію кластеризації і водночас скоротити кількість вимірювань цільової функції [4].

На основі такого методу з урахуванням обмежень у вигляді нерівностей, які отримуються на етапі обробки з ВФ Хаара пропонується удосконалити процедури визначення параметрів надійності та ІТ оцінки параметрів електронних компонентів.

Мета дослідження. Найчастіше оцінюють надійність ЕК за моделлю експоненціального розподілу з одним параметром – інтенсивністю відмов. При цьому припущення про постійність цього параметра в часі підвищує похибку прогнозів надійності порівняно з двопараметричними розподілами. Тому за допомогою експоненціального розподілу рекомендується проводити відносну оцінку надійності на етапі ескізного проектування, коли необхідно оцінити надійність різних варіантів і на підставі їхнього аналізу обрати елементну базу [4].

Ця модель враховує раптові відмови випадкового характеру, тоді як відмови, що виникають через незворотні фізико-хімічні зміни параметрів ЕК, не підпорядковуються експоненційному закону. Тому використання експоненціальної моделі відмов призводить до похибок. Порівняльний аналіз імовірісно-фізичних розподілів показав, що оцінки надійності ЕК за результатами прискорених випробувань мають похибку не більше 10%, якщо як модель відмов використовується двопараметричний дифузійний розподіл, що відповідає немонотонному марковському процесу [1,4].

Тому є актуальним дослідження та вдосконалення методик і процедур оцінки параметрів як експоненціального, так і дифузійного розподілу на основі завадостійкої процедури кластеризації з ВП з метою забезпечення більш високої швидкодії.

У роботі для проведення кластеризації використовується метод оптимізації з вейвлет-функціями з урахуванням обмежень. Цей метод оптимізації визначається ітераційною схемою [4].

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

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

У схемі (1) для оцінки напрямку пошуку використовується згортка $Q(x, c)$ з ВФ Хаара. Мінімум, знайдений на цьому етапі, зміщений відповідно до асиметрії функціоналу. На основі координати мінімуму, отриманої при обробці з ВФ Хаара, за методикою, описаною в [4], формується функціонал $Q_1(\cdot)$, який дозволяє врахувати цю координату як обмеження.

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

де $Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}[n])$ – початковий функціонал на кроці пошуку n ; $Q(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_H^*[n-1])$ – значення функціоналу в точці мінімуму, отриманій після згортки з ВФ Хаара; $g(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_H^*[n-1]) = \mathbf{c}_H^*[n-1] - \mathbf{x}[n]$.

Пошук оптимального $Q_1(\cdot)$ здійснюється далі за схемою (1) [4].

Визначення λ для партії ЕК пропонується проводити наступним чином.

Етап 1. Визначення параметрів ЕК. Для N об'єктів (ЕК) з набором з k параметрів визначається вектор $\mathbf{x}_j(t) = (x_j^1(t), x_j^2(t), \dots, x_j^k(t))$. Цей вектор характеризує стан j -го об'єкта в момент часу t . Розташування точок $x_1(t), \dots, x_N(t)$ у k -вимірному просторі параметрів відображає групування за параметрами у часі досліджуваних об'єктів.

Етап 2. Кластеризація з ВФ [4].

За її допомогою при відбракуванні в момент часу t_1 здійснюється розподіл точок у просторі X на 2 класів (кластерів). Вводиться поняття центру класу $a_i(t)$ $i=1, \dots, r$. У момент часу t_2 кожна точка $x_j(t_2)$ за допомогою кластеризації відноситься до того чи іншого кластера, отриманого на першому кроці. Далі проводиться перерахунок значень центрів кластерів $a_i(t_2)$ $i=1, \dots, r$, і обчислення для точок $x_j(t_2)$ відстаней до нових центрів $i=1, \dots, r$, $j=1, \dots, n$. Така процедура виконується для всіх моментів часу.

Етап 3. Для кожної з двох груп оцінюється інтенсивність відмов λ [4].

Запропонований метод випробуваний на прикладі партії резисторів [4]. В якості прогнозуючих параметрів використано рівень шуму та математичне сподівання зміни опору в групах. Дані першого контролю (через 24 години роботи в навантаженому режимі) розподілені за допомогою кластеризації на 2 кластери, що включали: перший – групи з 1 по 8, другий – 9 групу за рівнем шуму [5]. Розраховані значення інтенсивності відмов склали відповідно $\lambda_1 = 0,35 \times 10^{-5}$ год⁻¹ – при відсутності відбракування, $\lambda_2 = 0,19 \times 10^{-5}$ год⁻¹ – для резисторів першого кластеру та $\lambda_3 = 0,19 \times 10^{-4}$ год⁻¹ – резисторів другого кластеру.

При визначенні параметрів DN-розподілу перші два етапи такі ж, як і при визначенні λ . На етапі 3 для кожної з двох груп оцінюються параметри DN-розподілу [4, 7].

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

де μ – параметр масштабу, що збігається з математичним очікуванням випадкової величини t ; ν – параметр форми, рівний коефіцієнту варіації розподілу.

Запропонований метод також випробувано на прикладі партії резисторів, призначених для апаратури відповідального призначення [4]. При цьому були обчислені коефіцієнти варіації діагностичного параметра – математичного очікування зміни опору для першого та другого кластерів і для всієї партії резисторів без відбраковки за формулою.

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

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

Інтервали між вимірюваннями прийняті нерівномірними (математичне сподівання зміни опору визначалося через 24, 168, 1000, 5000, 10000 годин після початку вимірювань). Далі

згідно з методикою [4], з урахуванням того, що значення v_j становили відповідно $v_1 = 1,38$, $v_2 = 1,43$ і $v_3 = 1,55$, оцінюються параметри масштабу шляхом розв'язання рівняння:

$$F_j(t_i, \mu_{ji}, v_j) = \tilde{F}_j(t_i), \quad (3)$$

де $\tilde{F}_j(t_i) = i/N$, ($i = 1, \dots, r$); i – номер відмови у відповідному кластері ($i = 1, \dots, r$); t_i – напрацювання i -го відмовленого резистора, оскільки точна інформація про момент відмови відсутня, при розрахунках моментом відмови вважалася права межа часового інтервалу, протягом якого він відмовив.

Усереднена оцінка параметра $\bar{\mu}_j$ для кожної з груп резисторів визначалася як

$$\bar{\mu}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \bar{\mu}_{ji},$$

де $\bar{\mu}_{ji}$ – результати рішень рівнянь (1) при ($i = 1, \dots, r$).

У результаті розраховані за допомогою розподілу значення середнього напрацювання до відмови склали відповідно 4,9 років за відсутності відбракування, 7,6 років – для резисторів першого кластера та близько 2,1 років для резисторів другого кластера.

Висновки. Удосконалено методи визначення інтенсивності відмов та параметрів DN розподілу для оцінки надійності при відбракувальних випробуваннях ЕК і процедури їх реалізації. Метод випробувано на прикладі відбракування резисторів за рівнем шуму та стабільністю. Підвищення швидкодії при збереженні достатньої завадостійкості й достовірності процедури відбракування досягається завдяки застосуванню в цьому методі кластеризації з ВФ з урахуванням обмежень. Цей результат дозволяє рекомендувати розроблений метод під час відбору ЕК, призначених для довготривало працюючої апаратури відповідального призначення. У результаті вдосконалення зазначеного підходу на базі запропонованого методу кластеризації швидкодія процедур була підвищена в середньому на 7-9 %. Такі результати можуть дозволити його застосування в додатках, що відповідають зазначеним умовам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловійов В. І. «Основи теорії надійності і експлуатації авіаційних систем». *КІ ВПС*. Київ: Україна. 2000.
2. Чорний М. В. «Оцінка параметра потоку відмов зразка озброєння і військової техніки за даними експлуатаційних спостережень в умовах інтенсивного використання». *Труди академії. НАОУ*. Київ: Україна. 2005; № 58: 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): 140–145.
4. Shcherbakova G., Antoshchuk S., Koshutina D., Sakhno K., Kondratiev S. “Adaptive Clustering for Distribution Parameter Estimation in Technical Diagnostics”. In: *Dovgyi S., Siemens E., Globa L., Kopyika O., Stryzhak O., editors. Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIT.. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer*. 2024. 1338. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_19.
5. Liu H., Wang W. “Simulation of an electronic equipment control method based on an improved neural network algorithm”. *Energy Reports*. 2022; 8: 13409–13416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.034>.
6. Prodanov I. P., Dankov D. D. “Applying Markov Analysis for Reliability Modeling of Energy Storage Devices”. *XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA50406.2020>.
7. Zheng Y., Shcherbakova G., Rusyn B., Sakhno A., Volkova N., Kliushnikov I., Antoshchuk S. “Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV Images for Sustainable Development

of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure”. *Sustainability*. 2025; 17: 927. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17030927>.

8. Zelenkov A. A., Golik A. P. “The on-board system reliability estimate on the base of DN-distribution”. *Electronics and control systems*. 2009; 2 (20): 12–17.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.02>

UDC 004.81; 621.382

Assessment of reliability parameters of electronic components in rejection processes using clustering with wavelet transform

Galina Y. Shcherbakova¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0475-3854>; galina.sherbakova@op.edu.ua. Scopus Author ID: 27868185600

Daria V. Koshutina¹⁾

PhD Student of the Department of Information Systems
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1326-8775>; d.v.koshutina@op.edu.ua. Scopus Author ID: 58289385400

Kiril O. Sakhno¹⁾

PhD Student, of the Department of Information Systems
kirillsakhno70@stud.op.edu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Equipping critically important complex electronic systems with high-quality components is a necessary condition for improving their reliability. Therefore, one of the key tasks is the determination of reliability parameters during the selection of components for mission-critical equipment. In this study, an enhancement of the procedure for determining reliability parameters is proposed through the use of a clustering method based on wavelet functions, which allows increasing the efficiency of the reliability parameter assessment procedure. The advantage of this approach lies in improving computational performance by setting constraints at the processing stage using the Haar wavelet in the extremum search area. Modeling confirmed the effectiveness of the proposed approach for determining reliability parameters, which makes it recommended for use in the selection of components for especially critical equipment.

Keywords: clustering; wavelet transform; optimization; reliability analysis; failure rate; diffusion distribution