

УДК 681.396.6

д-р техн. наук, професор Хорошко В. О. ORCID:0000-0001-6213-7086 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, доцент Клімович С. О. ORCID: 0000-0001-7209-2176 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Ланко А. В. ORCID: 0009-0001-1124-1526 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглядається питання контролю технічного стану радіоелектронного обладнання спеціального призначення в умовах впливу зовнішніх факторів. Основна увага приділяється формалізації процесу контролю через побудову математичної моделі, яка описує залежність вихідних параметрів системи контролю від внутрішніх та зовнішніх впливів.

Проаналізовано існуючі методи контролю, які відображають складнощі вибору точок контролю в сучасних інтегральних схемах. Показано необхідність впровадження нових, більш гнучких та адаптивних рішень при розв'язанні задач технічного діагностування. У роботі пропонується вдосконалена математична модель контролю технічного стану радіоелектронного обладнання, яка дозволяє більш точно оцінювати функціональний стан об'єкта контролю в реальному часі. Процес контролю описується в моделі через імовірності зміни стану узагальненого показника який забезпечує точність системи контролю. Такий підхід до контролю якості функціонального стану об'єкта на основі побудови стохастичних графів дозволяє оцінити імовірність помилки і точність під час контролю технічного стану.

Результати дослідження можуть бути застосовані для ефективного обслуговування радіоелектронного обладнання, а також покращення показників діагностування технічного стану та передбачення можливих відмов об'єкта контролю.

Ключові слова: радіоелектронне обладнання, система контролю (діагностування), методика, узагальнений показник, елементарні операції, імовірність станів.

V. Khoroshko, S. Klimovych, A. Lanko. Mathematical model of quality control assessment of the technical condition radio electronic equipment

The article examines the issue of monitoring the technical condition of special-purpose radio-electronic equipment under the influence of external factors. The main attention is paid to the formalization of the control process through the construction of a mathematical model that describes the dependence of the initial parameters of the control system on internal and external influences.

The existing control methods are analyzed, which reflect the difficulties of selecting control points in modern integrated circuits. The necessity of introducing new, more flexible and adaptive solutions in solving the problems of technical diagnostics is shown. The work proposes an improved mathematical model for monitoring the technical condition of radio-electronic equipment, which allows more accurate assessment of the functional state of the control object in real time. The control process is described in the model through probabilities of changing the state of a generalized indicator that ensures the accuracy of the control system. This approach to quality control of the functional state of the object based on the construction of stochastic graphs allows to estimate the probability of error and accuracy during the control of the technical condition.

The results of the research can be applied to the effective maintenance of radio-electronic equipment, as well as improving indicators of diagnosing the technical condition and predicting possible failures of the control object.

Keywords: radio-electronic equipment, control system (diagnosis), method, generalized indicator, elementary operations, probability of states.

Постановка завдання. При проектуванні засобів і систем контролю (діагностування) радіоелектронного обладнання (РЕО) спеціального призначення, а також у процесі їх експлуатації виникають задачі передбачення негативних (аварійних, заперечних) ситуацій процесу контролю. Зазвичай, цей процес відбувається в умовах, які потребують врахування елементів випадковості впливу зовнішніх факторів. Вирішення цих задач передбачає в собі формалізацію дослідження процесів формування рішень при контролі, а для застосування аналітичних методів у цих дослідженнях необхідна побудова математичної моделі контролю (системи рівнянь, операторів), яка описує залежність вихідних характеристик системи контролю (СК) від внутрішніх та зовнішніх впливів при функціонуванні РЕО [1, 2].

Якість контролю РЕО (обладнання, технічних процесів) визначається наступними поняттями (ознаками): фізична величина, сукупність фізичних величин, технічна характеристика, узагальнений показник тощо.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Проведений аналіз показав, що у роботах [1–12] наведені методи, способи та принципи контролю і діагностування різних радіоелектронних систем. В окремих роботах [1] стверджується, що важливою і достатньою умовою перевірки електричних зв'язків у мікросхемі є:

- доступність функціональних елементів крізь первинні входи;
- можливість транспортування несправностей до первинних виходів.

При цьому, об'єкт контролю (мікросхема), як правило, лише частково відповідає умовам, що згадані у роботі [1].

Враховуючи складність вибору контрольних точок і неможливість забезпечити доступ до них (неможливість створення додаткових контрольних виходів), доцільно розробити варіант аналізу схеми з врахуванням існуючих обмежень. Це особливо важливо при контролі та діагностуванні схем з високим ступенем інтеграції елементів і наявності великої кількості зворотних зв'язків, що характерно для великих інтегральних схем (ВІС).

Слід зауважити, що в роботах [2–3] наведені моделі контролю технічного стану РЕО, але ці моделі відносяться до статичного стану систем. Тобто, коли система функціонує нормально або коли система вже знаходиться у аварійному стані.

Слід враховувати, що методи та способи, які описані в літературі [4–5] не дають можливості швидко отримати якісні результати контролю функціонального стану об'єкта, а отримані результати ще слід додатково аналізувати та опрацьовувати.

На відміну від згаданих варіантів розв'язання визначеної технічної задачі, застосування математичної моделі дозволяє якісно оцінити функціональний стан об'єкта контролю у реальному часі та отримати інформацію щодо контролю якості цієї оцінки. Крім того, застосування додаткових обчислень на обробку отриманої інформації не потрібне.

Метою статті є опис математичної моделі контролю якості оцінки технічного стану радіоелектронного обладнання, що дозволить здійснювати швидке обслуговування радіоелектронного обладнання.

Виклад основного матеріалу. Ознака якості контролю РЕО може знаходитись в одному з m можливих станів. При цьому події F_z , які визначають умови знаходження узагальненого показника (УП) в z -му стані записуються в наступному вигляді:

$$F_z: \{\theta \in [d_{z-1}; d_z]\}, \quad (1)$$

де d_{z-1} – нижня границя z -го стану УП;

d_z – верхня границя z -го стану УП.

З точки зору дослідження операцій контролю, як будь-який інший захід (система дій), об'єднаний одним задумом і направлений задля досягнення визначеної цілі, являється операцією контролю.

Операція контролю [3] вміщує елементарні операції (ЕО), які виконуються у визначеній послідовності, а ступінь деталізації визначається метою дослідження. Процес контролю (операція контролю) полягає в тому, що УП піддається послідовному перетворенню.

Висновок за приналежністю УП за розрізненням, з точки зору контрольного експерименту, стану виконується шляхом розбраковки, порівняння результатів виміру перетвореного УП з встановленими межами станів.

При цьому стани G_i , визначають умови прийняття рішення визначеності УП i -му стану, записується у вигляді:

$$G_i: \{Y \in [D_{i-1}; D_i]\}, \quad (2)$$

де Y – результат виміру перетвореного УП;

D_{i-1} – нижня границя i -го стану перетвореного УП;
 D_i – верхня границя i -го стану перетвореного УП.

Оскільки події F_z і G_i внаслідок помилок контролю можуть не співпадати, за результатами контролю УП, знаходяться в z -му стані, можуть бути розрізнені m взаємно виключних подій $F_z G_i, i = \overline{1, m}$.

Графічно операція контролю z -го стану УП може бути представлена у вигляді стохастичного графу (рисунок 1) у якому імовірності відсутності дуг відповідають вірогідним імовірностям переходів, а імовірності реалізації вузлів – безумовним імовірностям подій.

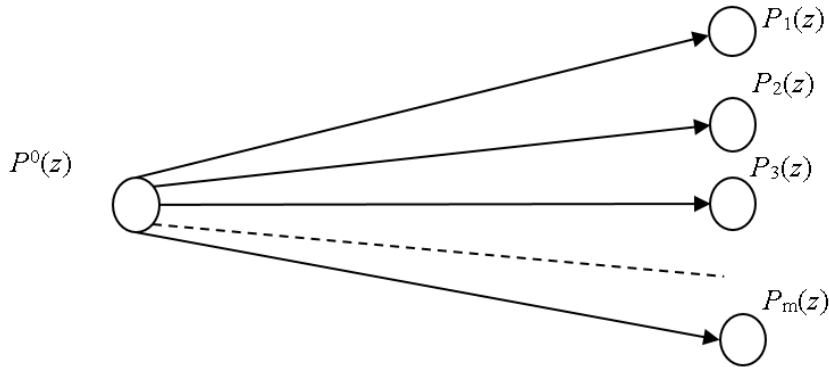


Рис. 1. Стохастичний граф операції контролю z -го стану УП

З рисунку видно, що $P^0(z) = P(\theta \in F_z)$ – імовірність знаходження УП у стані z ; $P_{iz} = P(\gamma \in G_i / \theta \in F_z)$ умовна імовірність визнати УП за результатами контролю в i -му стані за умови, що він знаходиться в z -му стані; $P_i(z) = P\left(\frac{\theta \in F_z}{\gamma \in G_i}\right)$ – безумовна імовірність відношення УП, яке знаходиться в z -му стані відповідно до i -го.

На рисунку 1 прийняті наступні значення:

$$P_i(z) = P^0(z)P_{zi}. \tag{3}$$

Таким чином, якість контролю z -го стану УП описується імовірністю його знаходження в даному стані перед контролем і матрицею перехідних імовірностей [6]:

$$\|P_{z1}, P_{z2}, \dots, P_{zi}, \dots, P_{zm}\|. \tag{4}$$

Оскільки все сказане відноситься до контролю будь-якого з можливих станів УП, отримані результати можуть бути застосовані для опису процесу контролю його наступних $m-1$ станів. В зв'язку з цим, що УП, віднесений за результатами контролю до i -го стану, перед контролем міг знаходитись в будь-якому з m можливих станів, то імовірність отримання рішення (УП знаходиться в i -му стані) визначається за формулою:

$$P(G_i) = \sum_{z=1}^m P^0(z) P_{zi}. \tag{5}$$

Таким чином, процес контролю УП може бути описаний матрицею імовірностей його різних станів перед початком контролю і матрицею перехідних імовірностей:

$$\left\| \begin{matrix} P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1j}, \dots, P_{1m} \\ P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{im} \\ P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mj}, \dots, P_{mm} \end{matrix} \right\|. \tag{6}$$

Однією з основних характеристик СК є точність. В подальшому під точністю СК будемо розуміти її якість, яка відображає наближення до нуля її помилок, а під помилками СК – відношення результатів контролю від деяких ідеальних показників. Поняття точності

і помилок СК можливо узагальнити, включивши у будь-які відхилення від бажаного результату, у тому числі і вагомі, пов'язані з частковою або повною її відмовою. Мета контролю УП – визначення стану, в якому він знаходиться. Помилка СК в цілому – це подія, котра полягає у відношенні до деякого i -го стану УП у дійсності, що знаходиться в j -му стані. Очевидно, що матриця перехідних імовірностей ідеального (абсолютно точного) контролю повинна бути одиничною матрицею порядку m тобто $P_{zj}(r \neq j) = 0$, $P_{zj}(z = j) = 1$. Оскільки матриця перехідних імовірностей вміщує імовірності усіх можливих при контролі УП переходів, як бажаних та і не бажаних, тоді вона може слугувати показником його точності, при чому елементи матриці $P_{z=j}$ характеризують правильність (точність), а елементи $P_{z \neq j}$ – помилки.

Для побудови математичної моделі формування рішення при контролі якості функціонування РЕО, яка описує залежності вихідних характеристик СК від вхідних і внутрішніх впливів, розглянемо формування рішення при якому, як результат послідовного виконання ряду ЕО, котрі виконують послідовно перетворення УП, і в результаті дій деяких ЕО, наступна операція використовує результат перетворення УП усіма попередніми ЕО.

Позначимо через $\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^i, \dots, \theta^N, N$ – результати перетворення УП однією, двома, ... i , ..., N ЕО, виконаних послідовно.

Розглянемо перетворення УП, який знаходиться в стані F_z , рядом послідовно виконаних ЕО контролю. Після виконання $(k - 1)$ ЕО перетворень УП θ^{k-1} може знаходитись в будь-якому з m можливих станів. Позначимо безумовно імовірність знаходження перетвореного УП в i -му стані після завершення $(k - 1)$ ЕО через $P_i^{(k-1)}(z)$, при цьому

$$P_i^{(k-1)}(z) = P \left(\begin{array}{l} \theta^{k-1} \in F_i^{k-1} \\ \theta \in F_z \end{array} \right), \quad (7)$$

де F_i^{k-1} – i -те з m можливих станів перетворення УП після завершення $(k - 1)$ ЕО.

Аналогічно для k -ї ЕО маємо:

$$P_i^k(z) = P \left(\begin{array}{l} \theta^k \in F_i^k \\ \theta \in F_z \end{array} \right). \quad (8)$$

Перетворення УП, знаходиться після виконання k -ї ЕО в стані P_j^k на її початку тобто після завершення $(k - 1)$ ЕО, може знаходитись в будь-якому з можливих станів. Тоді $P_i^k(z)$ визначається:

$$P_i^k(z) = \sum_{j=1}^m P_j^{k-1}(z) P_{ij}^k(z), \quad (9)$$

де $P_{ij}^k(z)$ – умовна імовірність переходу перетвореного УП з стану F_j^{k-1} в стан F_i^k при виконанні $(k - 1)$ ЕО, тобто

$$P_{ij}^k(z) = P \left(\begin{array}{l} \theta^k \in F_j^k / F_j^{k-1} \\ \theta \in F_z \end{array} \right), \quad (10)$$

k -та ЕО z -го стану УП може бути описана рядком безумовних імовірностей станів перед початком їх дій і матрицею перехідних імовірностей:

$$\left\| \begin{array}{l} P_{11}^k(z), \dots, P_{1j}^k(z), \dots, P_{1m}^k(z) \\ P_{i1}^k(z), \dots, P_{ij}^k(z), \dots, P_{im}^k(z) \\ P_{m1}^k(z), \dots, P_{mj}^k(z), \dots, P_{mm}^k(z) \end{array} \right\|. \quad (11)$$

Матриця перехідних імовірностей (11) – квадратна матриця порядку m з невід'ємними елементами, при чому доданок елементів матриці дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^m P_{ij}^k(z) = 1 \quad (12)$$

Відповідно до виразу (9), матриця-рядок безумовних імовірностей на виході k -ї ЕО – добуток матриці-рядка безумовних імовірностей на її виході на квадратну матрицю перехідних імовірностей.

Перша ЕО при контролі z -го стану УП повністю описується безумовною імовірністю z -го стану УП $P^0(z)$ та матрицею рядком перехідних імовірностей:

$$\|P_{z1}^1(z), \dots, P_{zj}^1(z), \dots, P_{zm}^1(z)\|. \quad (13)$$

Безумовні імовірності станів на виході першої ЕО визначаються за формулою:

$$P_j^k(z) = P^0(z)P_{zj}^1(z), j = \overline{1, m}. \quad (14)$$

Послідовне виконання n ЕО можливо замінити однією еквівалентною операцією для котрої матриця перехідних імовірностей є добутком матриць перехідних імовірностей всіх ЕО:

$$P_{ij}^{(k, k+n)}(z) = \sum_{\gamma_1=1}^m \sum_{\gamma_2=1}^m \dots \sum_{\gamma_n=1}^m P_{\gamma}^k(z) P_{\gamma_1 \gamma_2}^{k+1}(z) \dots P_{\gamma_{n-1} \gamma_n}^{k+n}(z). \quad (15)$$

Таким чином, якщо відома матриця-рядок безумовних імовірностей на початку деякої ЕО і матриця перехідних імовірностей наступних операцій, безумовні імовірності станів УП на виході останньої ЕО визначається за формулою, відповідною (8):

$$P_j^{(k, k+n)}(z) = \sum_{i=1}^m P_i^k(z) P_{ij}^{(k, k+n)}(z). \quad (16)$$

Перехідні імовірності $P_j^{(k, k+n)}(z)$ визначаються за формулою (16).

Безумовні імовірності станів на виході операції контролю визначаються з виразу:

$$P_j(z) = P_j^n(z) = P^0(z) P_{zj}^{(1, n)}(z), \quad (17)$$

$$P_{zj}^{(1, n)}(z) = \sum_{i=1}^m P_{zi}^1(z) P_{ij}^{(2, n)}(z), \quad (18)$$

де $P_{zi}^1(z)$ – перехідні імовірності першої ЕО;

$P_{ij}^{(2, n)}(z)$ – перехідні імовірності наступних ЕО, які визначають за формулою (15).

Оскільки все сказане відноситься до контролю будь-якого z -го стану УП, отримані результати розповсюджуються на контроль решти $m - 1$ станів УП.

Таким чином, для опису операцій контролю (визначення імовірності станів перетвореного УП на її виході) необхідно знати імовірність станів УП на її виході і перехідні імовірності кожної з ЕО, які складають операцію контролю, для обрахунків котрих необхідно знати характеристики похибок виконання цих операцій.

Для визначення перехідних імовірностей ЕО розглянемо деяку k -ту ЕО при контролі z -го стану УП. Дана операція після перетворення інформації, отриманої після перетворення її попередніми ЕО, при чому дійсне перетворення не відповідає необхідному перетворенню через недосконалість вибраних методів і засобів контролю, її реалізації, що призводить до виникнення помилок перетворення. Якщо б помилки перетворення були відсутні, дана ЕО призводила до перетворення УП в той стан, в якому вона його сприймала. Тоді матриця перехідних імовірностей представляла собою одиничну матрицю де $P_{ij}^k = 1$ при $i = j$ і $P_{ij}^k = 0$ при $i \neq j$.

Для реальної ЕО матриця перехідних імовірностей відрізняється тим більше від одиничної, чим більше помилок перетворення (вона характеризує точність ЕО). При дослідженні похибки ЕО, необхідно мати на увазі дві сторони цього питання [7]:

перше, здатність ЕО виконувати необхідне перетворення УП при її ідеальній реалізації засобами контролю;

друге, втрати або викривлення інформації пов'язане з похибкою засобів, реалізованих ЕО.

Перший відповідає методична помилка, друга характеризує інструментальну помилку ЕО.

Для визначення впливу методичної та інструментальної складових помилок перетворення ЕО на її перехідні імовірності розглянемо k -ту ЕО при контролі z -го стану УП відповідно до формули (8):

$$P_{ij12}^{(k, k+1)}(z) = \sum_{\gamma=1}^m P_{i\gamma 1}^k(z) P_{\gamma j 2}^{(k+1)}(z), \quad (19)$$

де $P_{ij12}^{(k, k+1)}$ – умовна імовірність переходу перетворення УП з i -го стану в j -те при послідовній дії двох помилок перетворення;

$P_{i\gamma 1}^k(z)$, $P_{\gamma j 2}^{(k+1)}(z)$ – умовна імовірність переходу перетвореного УП з i -го стану в j -те при дії першої (другої) в даній послідовності дії з двох помилок перетворення.

При підстановці у формулу (19) замість індексів 1 та 2 відповідно індекси M (методична складова похибки перетворення) або I (інструментальна складова) похибки перетворення залежно від послідовності їх дії, визначаються умови імовірності переходу перетвореного УП з i -го стану в j -те при сумісній дії методичних та інструментальних складових похибки перетворення ЕО. Оскільки все сказане відноситься до контролю z -го стану УП, отримані результати розповсюджуються на контроль решти $m - 1$ станів УП.

Висновки

Розглянута математична модель формування рішення при контролі РЕО дозволяє при відомих характеристиках УП об'єкта і засобів, реалізованих ЕО контролю, визначити імовірність станів перетвореного УП на виході останньої ЕО при контролі будь-якого з можливих станів об'єкта контролю і тим самим оцінити ступінь пристосованості операції контролю до виконання поставленої задачі або її ефективність. Модель дозволяє також оцінити вплив окремо взятої ЕО на результат контролю і раціональним чином вибрати її характеристики.

Подальші дослідження слід проводити у напрямку створення ефективних математичних та імітаційних моделей, які нададуть змогу достатньо швидко та точно визначати функціональний стан об'єкта контролю та якості його контролю з функціональними модулями різного типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузавков В. Технічна діагностика складних технічних об'єктів / В. Кузавков, В. Хорошко, О. Янковський // Захист інформації, Т. 24, № 3, 2022. С. 115–120.
2. Креденцер Б.П. Оценка эксплуатационно-технических характеристик объектов телекоммуникаций при априорной неопределенности / Б. П. Креденцер, А. И. Минович, Д. И. Могилевич. К.: Феникс, 2012. 335 с.
3. Креденцер Б.П. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації / Б.П. Креденцер, В.В. Вишнівський, М.К. Жердев та інші. К.: Фенікс, 2013. 334 с.
4. Geff I. Disz M. Unified approach to the study of self-checking systems – Digital Proc., 2007, v5, #6, p. 289–307.
5. Ashjaee M., Reddy S. On totally self-checking checkers for separable codes. – IEEE Trans. Comput., 2009, v.C-27, #7, p. 736–745.
6. Барковський В. В. Теорія імовірностей та математична статистика. 5-те вид. / В. В. Барковський, Н. В. Барковська, О. К. Лопатін. Київ: Центр учбової літератури, 2010. 424 с.
7. Белоконь Р. Н. Исследование влияния методических и инструментальных составляющих ошибки контроля определяющих параметров изделия на показатели достоверности контроля качества изделия / Р. Н. Белоконь // Современные методы оценки качества продукции. К.: Знания, 1994. С. 22–24.

8. Міночкін А. І. Перспективи створення та розвитку систем діагностування радіоелектронних засобів із вбудованим програмним забезпеченням / А. І. Міночкін, В. В. Кузавков, С. О. Клімович // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. Київ: ВІПІ. 2024. № 5. С. 78–86.

9. Кузавков В. В. Обґрунтування вибору показників оцінки ефективності функціонування автоматизованої системи контролю / В. В. Кузавков, О. Г. Янковський, Ю. В. Болотюк // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ. 2022. Том 2 (44). С. 21–27.

10. Вишнівський В. В. Особливості використання фізичного діагностування при побудові інтелектуальної системи діагностики радіоелектронної техніки / В. В. Вишнівський, С. І. Глухов, К. П. Сторчак // Зв'язок. 2019. № 1. С. 8–13.

11. Жердев М. К. Методика обробки діагностичної інформації для автоматизованої системи технічного діагностування радіоелектронної техніки / М. К. Жердев, С. І. Глухов, М. М. Нікіфоров // Розвиток радіотехнічного забезпечення, АСУ та зв'язку Повітряних Сил 2019. С. 70–78.

12. Рижов Є. В. Оцінка впливу діагностичного забезпечення на надійність радіоелектронних систем / Є. В. Рижов, Л. М. Сакович, С. І. Глухов, Ю. А. Настишин // Військово-технічний збірник, 2021 (24), С. 3–8.