

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ОБТ

УДК 623.486

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.67-71>Л.А. Коротченко<sup>1</sup>, Г.Д. Радзівілов<sup>1</sup>, В.С. Гулій<sup>1</sup>, С.М. Яковенко<sup>2</sup><sup>1</sup>Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ<sup>2</sup>Військова частина А0415, с. Семиполки

### АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЗА РІВНЕМ ТЕСТОВОГО ШУМУ

У статті розглядаються класичні методи діагностування радіоелектронних засобів, які в поєднанні з новими дають можливість із заданою ймовірністю визначити технічний стан типових елементів зміни радіоелектронних засобів. Одним з таких методів є метод прогнозування надійності радіоелектронних засобів військового призначення за рівнем тестового шуму, який полягає в використанні двох каналів для вимірювання рівня шумів: вимірний канал і опорний канал з використанням алгоритму відносного прогнозування надійності. Прогнозування надійності здійснюється у три етапи, що дозволяє значно зменшити рівень систематичної похибки, виключити вплив температурних характеристик і електромагнітних завад, що, в свою чергу, дасть змогу підвищити достовірність прогнозування надійності радіоелектронної апаратури, зменшити кількість раптових відмов блоків радіоелектронної техніки, що є особливо актуальним для частин та підрозділів, які виконують завдання в зоні проведення операції Об'єднаних сил, оскільки непередбачуваний вихід їх з ладу може призвести до катастрофічних та навіть невилправних наслідків. Впровадження нових методів прогнозування надійності радіоелементів приведе до підвищення коефіцієнта готовності як комплексного показника надійності радіоелектронної техніки, а також дозволить заощадити значну частину коштів, які витрачаються на резервування техніки. Напрямки подальших досліджень доцільно направити на вдосконалення методу прогнозування надійності за рівнем тестового шуму.

**Ключові слова:** радіоелектронні засоби, методи прогнозування надійності, методи діагностування, тестовий шум, діагностична інформація.

#### Постановка проблеми

Найбільш перспективними методами діагностування якості радіоелектронних засобів (РЕЗ) при серійному виробництві на етапі вихідного контролю є методи прогнозування їх надійності за рівнем низькочастотного (НЧ) шуму. Ці методи базуються на вимірюваннях спектральної щільності шуму або рівня шумової напруги на одній фіксованій частоті з подальшим аналізом показників надійності. Таким чином, процедура діагностування РЕЗ за методом прогнозування надійності має дві складові: вимірювання і аналіз вимірних параметрів. Для вимірювань цих параметрів існує чотири основних методи: метод порівняння, компенсаційний, модуляційний і метод безпосереднього вимірювання шумової напруги. Перший метод базується на порівнянні шумів, які досліджуються із еталонним джерелом шуму. При цьому вимірюються відносні значення, і є доцільним використовувати коефіцієнт шуму. Недоліком даного методу є неможливість встановлення інтервалу контролю для партії РЕЗ, рівень шумів

яких є невідомим. Компенсаційний і модуляційний методи забезпечують високу чутливість і точність вимірювань на високих частотах, але використовувати їх для вимірювання НЧ шумів недоцільно [1]. Останній метод полягає у вимірюванні ефективного параметра шуму на певній частоті за допомогою високочутливого вимірювача. Основними перевагами таких приладів є простота реалізації і висока чутливість, яка визначається внутрішніми шумами вимірювального пристрою. Цей метод є оптимальним і нескладним у реалізації.

Недоліком цього методу є електромагнітні завади і температурні характеристики вимірювального каналу, що призводять до непередбачуваної похибки і впливають на межі операції контролю та безпосереднього прогнозування показників надійності [2].

Саме на базі цього методу вимірювання шумових характеристик запропоновано новий підхід щодо прогнозування надійності РЕЗ за рівнем тестового шуму, який передбачає введення опорного каналу з використанням алгоритму відносного прогнозування надійності.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемі дослідження прогнозування надійності РЕЗ присвячена велика кількість публікацій як у нас в країні, так і за кордоном, і на теперішній час досягнуті значні успіхи у розвитку нових методів та принципів прогнозування надійності РЕЗ. Суттєвий внесок у розробку шумових моделей, теорії розрахунку шумових характеристик напівпровідникових структур і методів прогнозування надійності виробів РЕЗ за рівнем низькочастотного шуму внесли такі вчені: В. Придорогін, В. Пряніков, В. Воронцов, М. Лукянчикова, М. Горлов, І. Суходоєв, М. Жердєв, Б. Креденцер, Н. Байда, П. Пархоменко, Е. Согомоян, В. Гуляєв, А. Перротте, Г. Карташов, Ф. Прошан, А. Свешніков, Р. Юсупов, А. Соловйов, І. Ушаков, А. Федухін, А. Мозгалевський та інші.

Загальним недоліком згаданих методів і засобів контролю за якістю РЕЗ є їх низька достовірність контролю, що обумовлюється неповною відповідністю математичних моделей і недосконалістю апаратних засобів. Це спричиняє недостовірність отриманих результатів контролю і не відповідає сучасному рівню розвитку РЕЗ [3–6]. В зв'язку з цим є необхідним розв'язання науково-технічної задачі підвищення вірогідності існуючих і створення нових методів та засобів прогнозування надійності РЕЗ за рівнем НЧ шуму на етапі вихідного контролю у виробників цих виробів та на етапі вхідного контролю на підприємствах, що виготовляють РЕЗ.

**Мета статті** полягає у проведенні аналізу існуючих методів прогнозування надійності РЕЗ за рівнем НЧ шуму. Основна увага приділена перспективним методам прогнозування, одним з яких є метод прогнозування надійності за рівнем тестового шуму. Особливість методу полягає у використанні двох каналів для вимірювання рівня шумів, що дозволить значно зменшити рівень систематичної похибки та виключити вплив температурних характеристик і електромагнітних завод.

## Виклад основного матеріалу

Прогнозування надійності за рівнем тестового шуму проводиться за допомогою двох каналів: вимірювального і опорного. Прогнозування надійності здійснюється у три етапи: вимірювання інформативного параметра шуму на будь-якій частоті від 10 Гц до 1 кГц і подальша обробка результатів із винесенням рішення (надійний, ненадійний). Вимірювання інформативного параметра одночасно проводиться по двох каналах. На виході першого каналу вимірюється рівень НЧ шумів РЕЗ, що досліджується. На виході другого каналу із заданим рівнем контролю вимірюється рівень шуму еталонного РЕЗ. За допомогою аналогової операції порівняння встановлюється сигнал, який містить інформацію про

надійність РЕЗ, що досліджується. Для еталонного шумового параметра опорного каналу вибирається РЕЗ, який є високонадійним. Об'єкт контролю вмикається за відповідною схемою, яка забезпечує оптимальні умови для вимірювання шуму. На виході отримуємо шумовий сигнал, який визначається середньоквадратичним значенням шумової напруги в певному діапазоні частот [3].

$$\overline{e_{\text{вих}}^2} = \int_{f_1}^{f_2} K(f) \overline{e_{\text{вх}}^2}(f) df,$$

де  $K(f)$  – коефіцієнт передачі шуму із входу на вихід;  $\overline{e_{\text{вх}}^2}$  – еквівалентна шумова напруга, визначається за шумовою моделлю РЕЗ.

Рівень шумової напруги РЕЗ на виході схеми вмикання запишемо як

$$\overline{e_{\text{вих}}^2} = \int_{f_1}^{f_2} \overline{U_{\text{вх}}^2}(f) df, \quad (1)$$

де  $\overline{U_{\text{вх}}^2}$  – визначає повний рівень шумів на низьких частотах із урахуванням паразитних і зворотних зв'язків схеми вмикання РЕЗ і коефіцієнта  $K(f)$ .

Після підсилення і смугової фільтрації вираз (1) можна записати так

$$\overline{e_{\text{вх}}^2} = k_1 k_2 k_{\phi} \int_{f_1}^{f_2} \overline{U_{\text{вх}}^2}(f) df,$$

де  $k_1, k_2$  коефіцієнти підсилення попереднього і основного підсилювачів, відповідно,  $k_{\phi}$  – коефіцієнт передачі смугової фільтрації зі смугою пропускання  $f_2 - f_1$ .

Для реєстрації рівня шуму необхідно використовувати квадратичний детектор, характеристика перетворення якого для малого рівня сигналу буде мати вигляд [4]

$$i_t(t) = i_0(t) + a_1 e^{-t} + a_2 e^{-2t},$$

де  $a_1, a_2$  – крутість вольт-амперної характеристики діодів.

Оскільки шум характеризується середньоквадратичним значенням, то на виході квадратичного детектора приріст струму буде визначатися за виразом

$$i_{\Delta} = \frac{1}{2} S_{\Delta} U_{\text{СК}}^2,$$

де  $U_{\text{СК}}^2 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} e_{\text{вх}}^2(t) dt$  – напруга на виході детектора із крутістю  $S_{\Delta}$ .

Таким чином, рівняння перетворення для вимірювального і опорного каналів запишуться так

$$U_{\text{вим}} \frac{k_1^2 k_2^2 k_{\phi}^2 S_{\Delta} R_n}{2T_c} \int_0^{T_c} \left( \int_{f_1}^{f_2} U_{\text{вх}}^2(f) df \right)^2 dt, \quad (2)$$

де  $R_n$  – опір навантаження.

В результаті аналого-цифрових перетворень отримаємо

$$N = \frac{Uk_3}{U_{on}} 2^n \quad (3)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт підсилення підсилювача із регульованим коефіцієнтом підсилення,  $U_{on}$  – рівень опорної напруги,  $N$  – розрядність регістра наближення.

Підставивши (2) у (3), отримаємо (4)

$$N = \frac{k_1^2 k_2^2 k_\phi^2 S_\phi R_n T_c}{2T_c U_{on}} \int_0^{T_c} \left( \int_{f_1}^{f_2} U_{ш}^2(f) df \right)^2 dt \quad (4)$$

Отже, наведена формула є перетворенням шумового сигналу на виході вимірювального і опорного каналів, який забезпечує рівень вхідного сигналу компаратора.

Дані результати були використані в методі безпосереднього вимірювання напруги [7]. Прилад, на якому проводились вимірювання (рис. 1), складається з схеми вмикання (СВ) і блока режиму (БР), який забезпечував оптимальний режим роботи РЕЗ, на виході якого формується шумова напруга  $U_{ш}$ . Підсилювач напруги забезпечує підсилення шуму до рівня сприйняття аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Підсилювач складається із двох частин: попереднього підсилювача, із коефіцієнтом підсилення  $k_1$  і кінцевого  $k_2$ . Попередній підсилювач узгоджує СВ із вимірювальним блоком пристрою. Діапазон частот  $f_2 - f_1$  вибирається смуговим фільтром із коефіцієнтом послаблення  $k_\phi$ . Середньоквадратичний детектор (СКД) виділяє середньоквадратичне значення шуму, яке подається на АЦП. Для оцінки викидів імпульсного шуму цей вид шуму являє собою послідовність імпульсів постійної амплітуди, рівень яких більший у два і більше разів від власних шумів. Тому для реєстрації цього виду шумів використовуємо компаратор (К). Для визначення систематичної похибки пристрою використовується внутрішній цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) із фільтром нижніх частот (ФНЧ) [8].

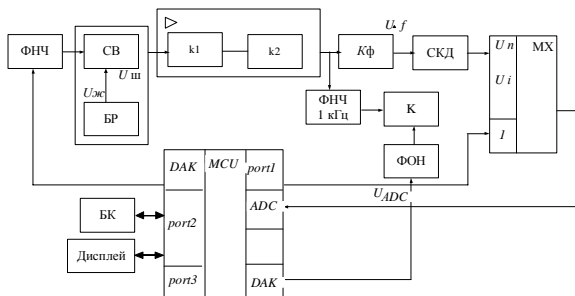


Рис. 1. Структурна схема пристрою для прогнозування надійності

Процес прогнозування надійності РЕЗ передбачає порівняння тестового значення шуму із еталонним. На результат вимірювань впливає похибка вимірювального засобу. Тому для контролю за рівнем

шумової напруги можна задати допустимий інтервал, за яким будуть зрівнюватись результати вимірювань і за яким можна визначати надійний чи ненадійний РЕЗ.

Подаючи вимірювальний сигнал на інвертувальний вхід компаратора, а сигнал опорного каналу на неінвертувальний, отримаємо

$$U_{швих} = \begin{cases} U_6 & U_{вим} < U_{on} \\ U_n & U_{вим} > U_{on} \end{cases} \quad (5)$$

де  $U_n$ ,  $U_6$  – високий і низький рівень напруги на виході компаратора.

Вимірювальний і опорний канали за перетворювальними характеристиками повинні бути максимально подібними і використовувати однакову елементну базу, тому порівнюючи сигнал на компараторі, вимірювальну похибку виключають, оскільки оцінюються відносні величини. Для виключення впливу власних шумів компаратора і електромагнітних впливів використаємо позитивний зворотний зв'язок для отримання гістерезису [4]. Гістерезис  $\epsilon$ , по суті, зоною невизначеності перемикання виходу компаратора із високого рівня в низький або навпаки. Суттєвий вплив на гістерезис вносить шум опорів резисторів схеми вмикання компаратора. Тоді зону невизначеності або похибку при прогнозуванні надійності РЕЗ можна записати як

$$\Delta U = U_{on1} - U_{on0} + U_{ш} + U_{зм},$$

де  $U_{on1}$ ,  $U_{on0}$  – верхня і нижня межа опорної напруги, для схеми із відкритим колектором на виході;  $U_{зм}$  – напруга зміщення операційного підсилювача.

Для схеми компаратора із відкритим колектором можна записати

$$U_{on1} = \frac{U_{on} R_2}{R_1 + R_2}, U_{on0} = \frac{E R_1 + U_{on} (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_k} \quad (6)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – опори зворотного позитивного зв'язку компаратора,  $E$  – напруга живлення,  $R_k$  – опір колектора.

Напруга шумів для зворотного зв'язку схеми запишеться так

$$U_{ш} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (7)$$

Враховуючи (6) і (7), умова (5) запишеться

$$U_{швих} = \left\{ U_6 U_{вим} \geq \frac{U_{on} R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 + R_2}{R_1} \sqrt{4kTR\Delta f} - U_{зм} \right\}$$

Статичні характеристики вимірювального і опорного каналу при малих рівнях шумової напруги межі прогнозування надійності збігаються із рівнем вимірювального каналу, а при більших – межа зростає, на основі адитивної складової похибки можна здійснити прогнозування надійності РЕЗ.

Після операції вимірювання рівня шумової напруги слідує операція оцінки надійності.

Як було встановлено раніше, ненадійними вважаються вироби, рівень власних НЧ шумів яких перевищує допустимий у 2 і більше разів [1]. Сучасні дослідження показали, що встановлення такого діапазону недоцільно і його необхідно зменшувати, тому пропонується встановлювати рівень прогнозування надійності в межах: перша – на рівні 1,3 (або 30%) для високонадійних РЕЗ, друга – на рівні 1,6 (60%) – надійні РЕЗ, якщо рівень перевищує у два рази власні шумів – ненадійні РЕЗ [10-11].

Для встановлення вказаних меж допустимого контролю надійності в опорному каналі використовують підсилювач з низькими шумами із регульованим коефіцієнтом підсилення на аналоговому комутаторі [12].

Наукова новизна методу прогнозування надійності за рівнем тестового шуму полягає у підвищенні достовірності та швидкодії контролю радіо електронних виробів за рівнем тестового шуму на етапі вхідного та вихідного контролю параметрів.

## Висновки

Проведений аналіз методів діагностування РЕЗ, показав, що найбільш перспективним напрямком в прогнозуванні надійності за рівнем НЧ шумів є метод прогнозування за рівнем тестового шуму. Він є ефективним методом під час діагностування РЕЗ. Перевагами даного методу є: простота реалізації вимірювальних приладів, можливе використання одного інформативного параметра, такого, як шумова напруга, простота визначення меж контролю, економічна ефективність відносно інших методів. Так метод прогнозування надійності за рівнем тестового шуму дозволить зменшити рівень систематичної похибки і температурних впливів, що, в свою чергу, дасть змогу підвищити достовірність виявлення несправних радіоелементів під час проведення діагностування РЕЗ.

У даний час вважається доцільним подальші дослідження направити на вдосконалення показників надійності методу прогнозування за рівнем тестового шуму, що в подальшому дозволить спростити процес вимірювання і контролю параметрів елементів РЕЗ для відбракування непридатних радіоелементів і скорочення часу контролю.

## Список літератури

1. Глухов С.І. Методика діагностування та прогнозування технічного стану об'єктів РЕТ при використанні автоматизованої системи технічного діагностування / С.І. Глухов, В.П. Романенко // Сучасні інформаційні технології та кібербезпека: науково-практична конференція, 26-27 квітня 2018: тези доп. XXII Всеукр. НПК. – Житомир. – С. 195-196.
2. Бригадир С.П. Метод прогнозування надійності радіоелектронної апаратури військового призначення за рівнем тестового шуму / С.П. Бригадир, А.І. Міночкін, Г.Д. Радзівілов. – К.: Зб. наук. праць, ВІПІ № 4. – 2018. – 21 с.
3. Кичак Д.В. Метод безпосереднього прогнозування виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / Д.В. Кичак, В.М. Михалевський, В.Ф. Яблонський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 196–203.
4. Горлов М.І. Методы диагностики полупроводниковых изделий с использованием электростатических разрядов / М.І. Горлов, В.А. Емельянов, И.И. Рубцевич, Д.Ю. Смирнов // Микроэлектроника. – 2005. – Т. 34. – № 3. – С. 27–36.
5. Горлов М.І. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании / М.І. Горлов, Д.Ю. Смирнов, Ю.Е. Сегал, А.В. Емельянов // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 6. – С. 89–92.
6. Kester W., Bryant J. Programmable Gain Amplifiers. Op Amp Applications. 2002. ISBN 0-916550-26-5.
7. Красносельский М.А. Системы с гистерезисом / М.А. Красносельский, А.В. Покровский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1983. – 272 с.
8. Омельченко В.О. Теорія електричного зв'язку. Ч. 1 / В.О. Омельченко, В.Г. Санніков. – К.: ІСДО, 1994. – 304 с.
9. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов / В.С. Пряников. – М.: Энергия, 1978. – 112 с.
10. Кичак В.М. Оцінка якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів / В.М. Кичак, Д.В. Михалевський, В.В. Стронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, Хм. – 2005. – № 2. – С. 177-178.
11. Горлов М.І. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума / М.І. Горлов, А.В. Емельянов, Д.В. Смирнов. – М.: Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 198–202.
12. Горлов М.І. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства / М.І. Горлов, Л.П. Ануфриев, О.Л. Бордюжа. – М.: Интеграл. – 2005. – С. 18–22.

---

**Анализ применения метода прогнозирования надежности радиоэлектронных средств по уровню тестового шума**

---

Л.А. Коротченко, Г.Д. Радзивилов, В.С. Гулий, С.Н. Яковенко

*В статье рассматриваются классические методы и принципы диагностирования, которые в сочетании с современными позволяют повысить эффективность процесса определения технического состояния радиоэлектронных средств. Одним из таких рассмотренных методов является метод прогнозирования надежности радиоэлектронных средств военного назначения по уровню тестового шума, который предусматривает введение опорного канала с использованием алгоритма относительного прогнозирования надежности. Особенность метода заключается в использовании двух каналов для измерения уровня шумов: измерительный канал и опорный канал. Статические характеристики измерительного и опорного каналов при малых уровнях шумового напряжения, пределы прогнозирования надежности совпадают с уровнем измерительного канала, а при больших – предел растет, появляется аддитивная составляющая погрешности, на основе которой можно осуществить прогнозирование надежности радиоэлектронных средств.*

*Прогнозирование надежности осуществляется в три этапа, что позволяет значительно уменьшить уровень систематической погрешности, исключить влияние температурных характеристик и электромагнитных помех, что в свою очередь, позволит повысить достоверность прогнозирования надежности радиоэлектронных средств, уменьшить количество внезапных отказов блоков радиоэлектронной техники, что особенно актуально для частей и подразделений, выполняющих задачи в зоне проведения операции Объединенных сил, поскольку непредсказуемый выход их из строя может привести к катастрофическим и даже непоправимым последствиям.*

*Внедрение новых методов технического диагностирования радиоэлементов приведет к повышению коэффициента готовности как комплексного показателя надежности радиоэлектронных средств. Это позволит сэкономить значительную часть средств, расходуемых на резервирование техники, а также приведет к повышению боеготовности радиоэлектронных средств связи за счет сокращения времени проведения технического обслуживания и ремонта, увеличению достоверности определения технического состояния, реконфигурации контрольно-диагностического оборудования под новые объекты системы контроля. Направления дальнейших исследований направлены на совершенствование методов диагностирования.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронные средства, методы прогнозирования надежности, методы диагностирования, тестовый шум, диагностическая информация.

**Analysis of the application of the method of forecasting the reliability of radioelectronic means at the test noise level**

L. Korotchenko, G. Radzivilov, V. Hulii, S. Yakovenko

*The article discusses classical methods and principles of diagnosis, which, in combination with modern ones, make it possible to form even more reliable methods and principles of diagnosis. One of these proposed methods is a method for predicting the reliability of military electronic equipment for the level of test noise, which provides for the introduction of a reference channel using the relative reliability prediction algorithm. The peculiarity of the method is the use of two channels for measuring the noise level: the measuring channel and the reference channel. Static characteristics of the measuring and reference channels at low levels of noise voltage, the limits of prediction of reliability coincide with the level of the measuring channel, and at large levels, the limit increases, an additive component of error appears, on the basis of which it is possible to predict the reliability of REA.*

*Prediction of reliability is carried out in three stages, which allows to significantly reduce the level of systematic error, eliminate the influence of temperature characteristics and electromagnetic interference, in turn, will increase the accuracy of prediction of reliability of electronic equipment, reduce the number of sudden failures of electronic equipment, which is especially important for tasks in the area of operation of the combined forces, because their unpredictable exit from the line it can lead to catastrophic or even fatal consequences.*

*The introduction of new methods of technical diagnostics of radioelements will lead to an increase in availability as a comprehensive indicator of the reliability of radioelectronic equipment, and will also save a significant portion of the funds spent on redundancy of equipment, as well as lead to an increase in the readiness of radioelectronic communication devices by reducing the time for maintenance and repair, an increase in the reliability indicators for the determination of technical means, reconfiguration of diagnostics equipment under new control objects without the acquisition of new control systems. Further researches are aimed at improving the diagnostic methods.*

**Keywords:** radio-electronic, reliability prediction methods, diagnostics, methods, test noise, diagnostic information.

---