

З.О. Колодій, Л.А. Недоступ, А.З. Колодій
Національний університет “Львівська політехніка”

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДЕФЕКТНОСТІ СТРУКТУРИ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОНІКИ ЗА РІВНЕМ ЇХ ФЛІКЕР-ШУМУ

© Колодій З.О., Недоступ Л.А., Колодій А.З., 2009.

Запропоновано методику оцінки дефектності структури елементів електроніки за мінімальним значенням спектральної густини потужності їх флікер-шуму і мінімальним значенням середнього квадрата напруги шумів в діапазоні низьких частот.

The method of estimation of electronic elements reliability using their minimal value of flicker-noise power spectral density and minimal value of noises voltage average square in the range of low frequencies is proposed.

Постановка завдання

Надійність радіоелектронної апаратури значною мірою залежить від надійності окремих її елементів. Однак за відомих показників надійності елементів немає повної гарантії, що серед використовуваних елементів не трапляється елемент із заниженими показниками надійності. Під час здійснення вхідного контролю елементів в багатьох випадках перевірку показників надійності не проводять із-за складності і довготривалості такої перевірки, довіряючи показникам, значення яких вказані в технічних характеристиках елементів.

Загалом проблему складності і довготривалості перевірки показників надійності можна вирішити, скориставшись відомим зв'язком показників надійності, зокрема часом напрацювання на відмову, із дефектами внутрішньої структури елемента. Наприклад, дефекти структури резистора у вигляді мікротріщин знижують його напрацювання на відмову.

Дефекти структури елементів можуть бути виявлені під час рентгеноструктурного аналізу, однак це потребує необхідного громіздкого обладнання.

Для оцінки стану дефектності структури елемента можна використати його флікер-шум (ФШ) [1, 2]. У [3] стверджується, що за рівнем ФШ в деяких випадках вдається оцінити не тільки електроміграційну стійкість тонкоплівкових провідників, але і стабільність контактних систем і плівкових резисторів. У цій роботі пропонується методика оцінки дефектності структури елементів за їх рівнем ФШ.

Методика оцінки дефектності структури

В [4] наведено зв'язок параметра ФШ-часу релаксації τ із особливостями внутрішньої структури елемента: чим меншим є значення τ , тим більше дефектів є у структурі досліджуваного елемента. Своєю чергою, час релаксації τ безпосередньо пов'язаний із рівнем ФШ [5]:

$$S(f) \sim \frac{a \cdot e^{f \cdot \tau}}{e^{f \cdot \tau} - 1}, \quad (1)$$

де $S(f)$ – спектральна густина потужності шумів, Дж; a – значення спектральної густини в області середніх частот ($a \sim \text{кГ}$), Дж; τ – час релаксації системи, с.

Із (1) зрозуміло, що чим меншим є значення τ , тим більшим є $S(f)$ (більшим є рівень шуму за $f \rightarrow 0$).

Як відомо, потужність шумів елементів електроніки пов'язана із $S(f)$ співвідношенням

$$P_{III} = \int_{f_1}^{f_2} S(f) \cdot df,$$

де f_1 і f_2 – нижня і верхня частоти діапазону частот, в межах якого визначають рівень шуму.

Середній квадрат напруги шумів:

$$\overline{U_{III}^2} = P_{III} \cdot \text{Re} Z,$$

де $\text{Re} Z$ – активний опір елемента, шум якого визначають.

Враховуючи вираз для $S(f)$ (1), для діапазону частот від $f_1 \rightarrow 0$ до $f_2 \leq 10^9$ Гц (в такому діапазоні частот можна нехтувати проявом квантових ефектів) і приймаючи значення $a = 4kT$ [6], остаточний вираз для середнього квадрата напруги шумів елементів електроніки матиме вигляд

$$\overline{U_{III}^2} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \text{Re} Z \cdot e^{f \cdot \tau}}{e^{f \cdot \tau} - 1} \cdot df. \quad (2)$$

Вираз для середнього квадрата струму шумів:

$$\overline{I_{III}^2} = \int_{f_1}^{f_2} \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \text{Re} Y \cdot e^{f \cdot \tau}}{e^{f \cdot \tau} - 1} \cdot df,$$

де $\text{Re} Y$ – активна провідність елемента, шум якого визначають.

На сьогоднішній день рівень шумів елементів електроніки в діапазоні частот від $f_1 \rightarrow 0$ до $f_2 \leq 10^9$ Гц визначають за формулою Найквіста [6]:

$$\overline{U_{III}^2} = 4 \cdot k \cdot T \cdot \text{Re} Z \cdot (f_2 - f_1). \quad (3)$$

Однак формулу (3), як це випливає із самого її визначення [6], можна використовувати для розрахунку рівня шумів системи (елемента), що перебуває у стані термодинамічної рівноваги. Оскільки реальні системи (елементи) не є в стані термодинамічної рівноваги [3], то використання тільки формули (3) для розрахунку шумів в діапазоні частот від $f_1 \rightarrow 0$ до $f_2 \leq 10^9$ Гц дає занижені результати, особливо в діапазоні низьких частот.

Вирази для $S(f)$ (1) і $\overline{U_{III}^2}$ (2) можуть бути покладені в основу методики оцінки надійності елементів електроніки за рівнем їх ФШ. При використанні виразу (1) для визначення ФШ-елемента необхідне використання попереднього підсилювача з низьким рівнем власних шумів (рис. 1). При цьому вимірюють рівноважний ФШ, як і в [7]. За схемою на рис. 1 можна вимірювати ФШ в діапазоні низьких частот (наприклад, 50 – 100 Гц) резисторів, діодів, біполярних транзисторів (під час вимірювання шуму колекторно-базового переходу або базо-емітерного переходу), польових транзисторів (під час вимірювання шуму каналу виток-сток або переходу затвор-канал).

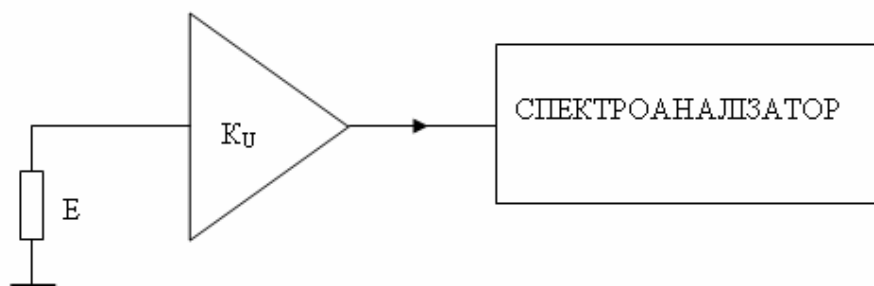


Рис. 1. Вимірювання спектральної густини шумів $S(f)$:
E – досліджуваний елемент; *K_U* – попередній підсилювач

Як було зазначено вище, рівень ФШ залежить від стану внутрішньої структури досліджуваного елемента. Тому критерієм вибору елемента із сукупності однотипних елементів, який має мінімальну кількість дефектів внутрішньої структури, а відтак і більшу відмовостійкість, є мінімальне значення $S(f)$ на одній і тій самій частоті в діапазоні низьких частот.

Під час визначення ФШ за формулою (2) необхідним є використання попереднього підсилювача K_U , смугового підсилювача (для підсилення сигналу в діапазоні частот $\Delta f = |f_1 - f_2|$) і в загальному випадку комп'ютера для оброблення сигналу: піднесення сигналу $u_{ш}(t)$ до квадрата ($u_{ш}^2(t)$) та інтегрування сигналу в межах від f_1 до f_2 (рис. 2).



Рис. 2. Вимірювання середнього квадрата напруги шумів досліджуваного елемента

Досліджуваним елементом (Е) на рис. 2, як і в попередньому випадку на рис. 1, можуть бути резистори, діоди, біполярні та польові транзистори. Оскільки вибір за рівнем ФШ здійснюється серед однотипних елементів, то значення ReZ із (2) можна не визначати, вважаючи їх однаковими для партії досліджуваних зразків, як і значення температури T , за якої здійснюється вимірювання ФШ, що значно спрощує саму методику оцінки надійності елементів.

Відбір елемента за мінімальним значенням ФШ серед партії однотипних елементів спрощує вимоги і до попереднього підсилювача: достатньою умовою проведення коректних вимірювань ФШ досліджуваних елементів є забезпечення меншого рівня власних шумів підсилювача порівняно із шумами досліджуваних елементів, що можна перевірити, закортити вхід підсилювача.

Критерієм вибору елемента з мінімальними дефектами внутрішньої структури за рис. 2 є мінімальне значення $\overline{U_{ш}^2}$.

Висновки

У запропонованій методиці оцінки дефектності структури елементів електроніки використана залежність параметра ФШ-часу релаксації τ від особливостей внутрішньої структури елементів: із збільшенням кількості дефектів структури значення τ зменшується, при цьому рівень ФШ із (1) зростає. Ця методика може бути використана під час вхідного контролю елементів. Апаратура, яка використовується у цій методиці, є значно простіша і доступніша за апаратуру, яка використовується під час рентгеноструктурного аналізу.

1. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических потоков в распределенных динамических диссипативных системах // Журнал физической химии. – 2001. – Т. 75, №10. – С.1900–1908.
2. Kolodiy Z.A. Detection of changes in the structure of a system according to changes of its flicker noise // Ukrainian Journal of Physics. – 2008. – V.53, №7. – P.718–722.
3. Жигальский Г.П. Неравновесный $1/f$ -шум в проводящих пленках и контактах // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, №5. – С.465–490.
4. Колодій З.О., Крук О.Г., Саноцький Ю.В., Гольнський В.Д., Колодій А.З., Денко П.И. Связь параметров спектральной плотности фликкер-шума с особенностями внутренней структуры системы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №1. – С.10–14.
5. Колодій З.О. Спектр флюктуацій при моделюванні хаотичного руху в об'єктах, які перебувають у нерівноважному стані // Журнал фізичних досліджень. – 2005. – Т.9, №2. – С.103–111.
6. Nyquist By H. Thermal agitation of electric charge in conductors. // Phys. Rev. – V.32, 1928, July. – №1. – P.110.
7. Voss R.F., Clarke J. // Phys. Rev. Lett. –1976. –Vol, 36. – P.42.