

## Висновки

Показані приклади макромоделювання відрізняються складністю апроксимованих нелінійних функцій та некоректністю задач макромоделювання. Якість апроксимації, оцінена модулем максимальної похибки, є кращою у чебишевській метриці, ніж у евклідовій. Однак у всіх трьох прикладах якість макромоделей у сенсі відтворення сигналів модельованих пристроїв є помітно гіршою для чебишевської метрики. До того ж чебишевська апроксимація займає значно більше обчислювальних ресурсів ніж евклідова.

Можна стверджувати про наявність певної закономірності не на користь використання чебишевської метрики у макромоделюванні. Причини такої ситуації поки що незрозумілі.

1. Матвійчук Я.М. *Математичне макромоделювання динамічних систем: теорія та практика.* / Наукове видання. Видавн. центр ЛНУ ім.І.Франка, 2000. –215с. 2. Матвійчук Я.М. *Елементи теорії систем та макромоделювання* / Навч. пос. для студ. радіотехн. та комп. напрямків підгот. Вид-во ППТ при Нац. ун-ті “Львівська політехніка”, 2004. – 45 с. 3. Матвійчук Я., Курганевич А. *Регуляризація задачі ідентифікації макромоделей нелінійних динамічних систем методом редуції апроксимаційного базису*// Теоретична електротехніка: Зб. Львів. ун-ту, Вип. 55, 2000. – С. 31–36.

УДК 621.391.822

З.О. Колодій

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

## ФЛІКЕР-ШУМ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОНІКИ

© Колодій З.О., 2011

Проведено експериментальні дослідження флікер-шуму резисторів типу МЛТ-0,125 та С-2-23 з різною потужністю розсіяння та діодів типу 2D503A. Виявлено зростання рівня шумів на низьких частотах із зменшенням потужності розсіяння резисторів. На основі експериментальних результатів визначено час релаксації  $\tau$  резисторів та діодів. За відомим значенням  $\tau$  можна визначити рівень власних шумів елементів електроніки в практичному діапазоні частот від  $f_1 \rightarrow 0$  до  $f_2 = 1 \cdot 10^9$  Гц.

**Ключові слова:** флікер-шум, спектральна густина потужності шумів, час релаксації.

**Experimental researches of flicker-noise of resistors such as MLT-0,125 and C-2-23 with different power dispersion and diodes of 2D503A type were performed. It was found the growth of noises level on low frequencies with diminishing of resistors dispersion power. Relaxation time  $\tau$  of resistors and diodes was found based on the experimental results. Based on known value of  $\tau$  it is possible to figure out the level of own noises of electronic elements in the practical range of frequencies from  $f_1 \rightarrow 0$  to  $f_2 = 1 \cdot 10^9$  Hz.**

**Key words:** flicker-noise, noise poneer spectral density.

## Вступ

Підвищення чутливості радіоелектронної апаратури (РЕА) пов'язане не стільки із збільшенням підсилення корисного сигналу, скільки із зменшенням рівня її власних шумів. У діапазоні середніх і високих частот основний внесок у загальний рівень шумів роблять теплові шуми елементів РЕА, знизити які можна, знизивши їхню температуру. У діапазонах низьких частот, крім теплового шуму, є інші види шумів, зокрема генераційно-рекомбінаційний шум і флікер-шум, причому спектральна густина потужності (СГП) флікер-шуму зростає із зниженням частоти  $f$ , перевищуючи при  $f \rightarrow 0$  рівень теплового шуму. Виникнення генераційно-рекомбінаційного шуму пов'язане із принципом роботи напівпровідникових елементів, тому їх можна мінімізувати для конкретного напівпровідникового елемента, вибираючи оптимальні значення температури, струму та напруги зміщення  $p-n$  – переходу [1]. Рівень флікер-шуму (ФШ) залежить від особливостей

внутрішньої структури елемента [2,3] і в [4] наведено вираз для середнього квадрата напруги шумів елементів РЕА в діапазоні частот від  $f_1 \rightarrow 0$  до  $f_2 \leq 10^9$  Гц, який враховує і ФШ:

$$\overline{U_{ш}^2} = \int_f^{f_2} \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \text{Re} Z \cdot e^{f \cdot \tau}}{e^{f \cdot \tau} - 1} \cdot df, \quad (1)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана;  $T$  – температура елемента, К;  $\text{Re}Z$  – дійсна складова електричного опору елемента, Ом;  $\tau$  – час релаксації елемента, с.

Час релаксації  $\tau$  залежить від особливостей внутрішньої структури елемента [5] і, оскільки внутрішня структура кожного окремого елемента має свої особливості, значення  $\tau$  є різним для кожного окремого елемента. Однак, зважаючи на те, що елементи одного типу мають приблизно однакову внутрішню структуру, то під час розрахунків шумів РЕА за формулою (1) значення  $\tau$  для одного типу елементів можна вважати однаковим. Здебільшого під час розрахунків шумів РЕА значення  $T$  і  $\text{Re}Z$  є відомими. Значення  $\tau$  є невідомим, однак його можна визначити експериментально за рівнем власних шумів елемента в діапазоні низьких частот [5].

Метою роботи було визначення значення  $\tau$  для найпоширеніших елементів РЕА – резисторів типу МЛТ, а також прецизійних резисторів типу С-2-23 і діодів типу 2D503А.

### Проведені дослідження

Рівень власних шумів елементів визначали за допомогою селективного вольтметра типу “Unipan 233” в діапазоні частот 80 Гц – 8000 Гц (на частотах 80,0 Гц, 200,0 Гц, 300,0 Гц, 8000,0 Гц). СГП шумів  $S(f)$  визначали за формулою

$$S(f) = \frac{\overline{U^2}}{R \cdot \Delta f},$$

де  $\overline{U^2}$  – середньоквадратичне (середній квадрат) значення напруги шумів досліджуваного елемента;  $R$  – електричний опір елемента;  $\Delta f$  – смуга частот, у якій вимірювали шуми елемента.

Вимірювали шуми досліджуваних елементів без пропускання через них струму, тому флікер-шум, який проявляється на низьких частотах, є рівноважним [6].

На рис. 1 наведено частотну залежність СГП шумів  $S(f)$  резисторів типу МЛТ-0,125 (12,02 кОм), С-2-23-0,125 (19,98 кОм) та діода типу 2D503А (345,30 кОм – опір визначений за тепловими шумами діода).

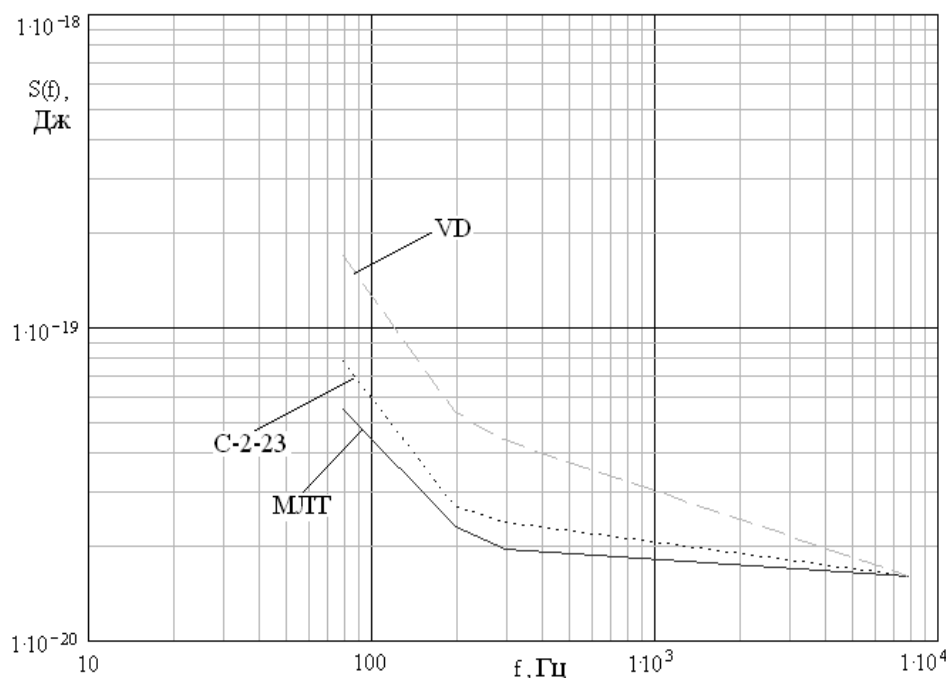


Рис. 1. Частотна залежність СГП шумів  $S(f)$  резисторів типу МЛТ-0,125, С-2-23-0,125 та діода типу 2D503А

За методикою, наведеною в [5], визначено час релаксації досліджуваних елементів: при  $f_0 = \frac{1}{\tau}$ ,  $S(f_0) = 1.58 \cdot a$ , де значення  $a$  дорівнює значенню СГП  $S(f)$  в області середніх частот (в даному випадку  $a = S(f = 8000)$ ),  $\tau = \frac{1}{f_0}$ . За рис.1 визначено значення часу релаксації:  $\tau_{\text{МЛТ}} = 0,005$  с;  $\tau_{\text{С-2-23}} = 0,003$  с;  $\tau_{\text{VD}} = 0,0012$  с.

У таблиці наведені значення власних шумів кожного із досліджуваних елементів в діапазоні частот від 1,0 Гц до 100,0 Гц, визначені за формулою (1) і за формулою Найквіста ( $U_N^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f$ ), при температурі 20 °С.

### Шуми досліджуваних елементів в діапазоні низьких частот

Досліджуваний елемент	Шум елемента в діапазоні частот 1Гц – 100Гц, В		$\frac{\sqrt{U^2}}{\sqrt{U_N^2}}$
	$\sqrt{U_{\text{C-2-23}}^2} = 0,716 \cdot 10^{-6}$	$\sqrt{U_N^2} = \sqrt{4kTReZ \cdot \Delta f}$	
Резистор МЛТ-0,125	$0,435 \cdot 10^{-6}$	$0,139 \cdot 10^{-6}$	3,135
Резистор С-2-23-0,125	$0,716 \cdot 10^{-6}$	$0,179 \cdot 10^{-6}$	4,002
Діод VD503A	$4,660 \cdot 10^{-6}$	$0,744 \cdot 10^{-6}$	6,267

Із результатів, наведених в таблиці, видно, що значення шумів досліджуваних елементів, розрахованих за формулою Найквіста, є значно меншими від значень, розрахованих за формулою (1). Отримані результати можуть бути корисними під час розрахунку чутливості вимірювальної електронної апаратури, що працює в діапазоні низьких частот, оскільки показують, що розрахунок шуму апаратури за формулою (1) дає змогу визначити реальний рівень власного шуму апаратури.

Аналіз графіків на рис.1 показує також, що під час виготовлення високочутливої апаратури необхідно віддавати перевагу резисторам типу МЛТ перед прецизійними резисторами типу С-2-23, оскільки рівень їх шумів є меншим.

Крім досліджень шумів у резисторах одного типу конструкції (потужність розсіяння 0,125 Вт), були виміряні СГП шумів резисторів з різним типом конструкції, які мають приблизно однакове значення електричного опору, але різну потужність розсіяння – 0,25 Вт, 0,5 Вт і 1,0 Вт.

На рис. 2 наведено частотну залежність СГП шумів резисторів типу МЛТ із різною потужністю розсіяння. Із наведених на рис. 2 графіків видно, що рівень шумів резисторів типу МЛТ зменшується по мірі зростання їх потужності розсіяння: найбільший рівень шумів є у резисторів з потужністю розсіяння 0,125 Вт, а найменший – у резисторів з потужністю розсіяння 1,0 Вт. Така залежність може бути пояснена в межах гіпотези про визначальний вплив внутрішньої структури на рівень ФШ, оскільки, як відомо, зменшення об'єму елементів збільшує вплив невеликих концентрацій сторонніх домішок. Отже, для виготовлення електронної вимірювальної апаратури з малим рівнем власного шуму потрібно використовувати резистори з більшою потужністю розсіяння.

Значення часу релаксації для резисторів типу МЛТ з різною потужністю розсіяння, визначене за графіками на рис. 2, є таким:  $\tau_{\text{МЛТ-0,125}} = 0,0046$  с;  $\tau_{\text{МЛТ-0,25}} = 0,0051$  с;  $\tau_{\text{МЛТ-0,5}} = 0,0052$  с;  $\tau_{\text{МЛТ-1,0}} = 0,0054$  с. В загальному ж для розрахунків шумів резисторів типу МЛТ значення часу релаксації потрібно приймати  $\tau_{\text{МЛТ}} = 0,005$  с.

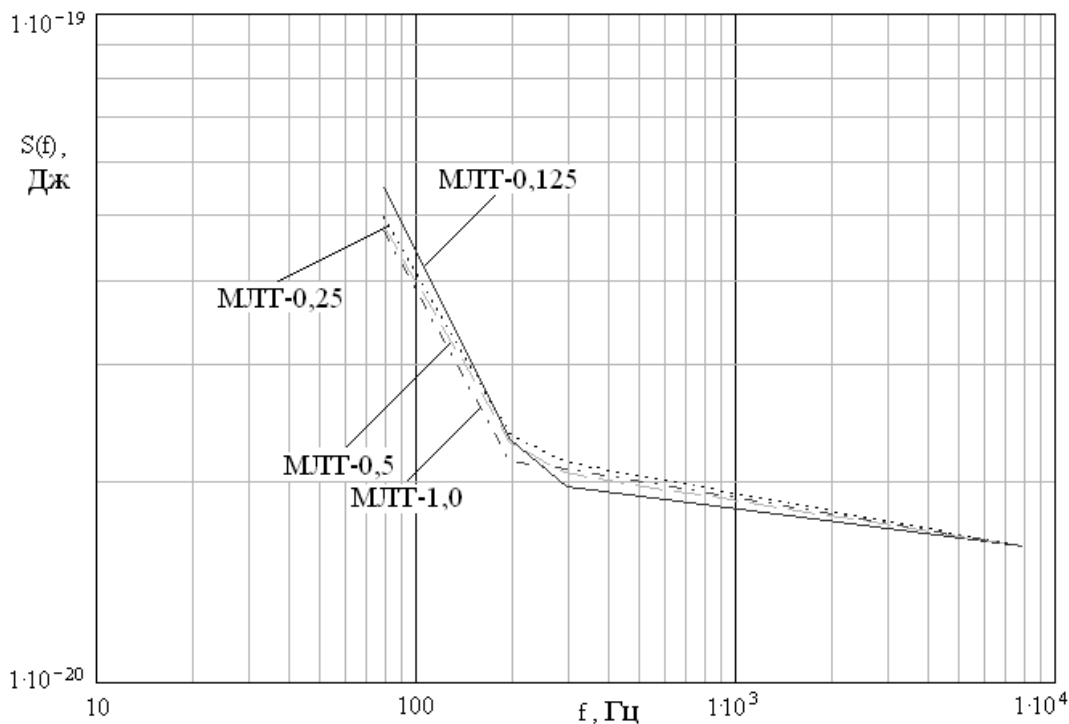


Рис. 2. Частотна залежність СПП шумів резисторів типу МЛТ із різною потужністю розсіяння

### Висновки

Проведено експериментальне дослідження шумових властивостей найпоширеніших елементів електроніки – резисторів типу МЛТ з різною потужністю розсіяння, а також прецизійних резисторів типу С-2-23 і діодів 2D503А. Визначено час релаксації  $\tau$  досліджуваних елементів, який в середньому становить:  $\tau_{\text{МЛТ}} = 0,005$  s,  $\tau_{\text{С-2-23}} = 0,003$  s;  $\tau_{\text{VD}} = 0,0012$  s. За відомим значенням  $\tau$  можна визначати реальний рівень власних шумів елементів електроніки за формулою (1) в діапазоні частот від  $f_1 \rightarrow 0$  до  $f_2 \leq 10^9$  Hz, в той час як розрахунок власних шумів елементів електроніки за формулою Найквіста дає занижені результати, особливо в діапазоні низьких частот.

Аналіз результатів дослідження шумових властивостей резисторів з різною потужністю розсіяння показує, що чим менша потужність розсіяння резистора, тим більший рівень його флікер-шуму. Тому під час виготовлення РЕА з малим рівнем власних шумів у діапазоні низьких частот необхідно надавати перевагу резисторам з більшою потужністю розсіяння.

1. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
2. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др. Низкочастотный шум в n-GaN // Физика и техника полупроводников, 1998, т. 32, № 3. – С. 285–288.
3. Врачев А.С. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Матер. Докл. научно-техн. семинара МНТОРЭС им. Попова, М. (1995). – С. 43.
4. Kolodiy Z.A. and Kolodiy A.Z. Calculation of tse Noise Level in Electronic Elements // Automatic Control and Computer Sciences. – 2009. Vol. 43, No. 4. – P. 179–183.
5. Колодій З.О. Флікер-шумова діагностика внутрішньої структури елементів електроніки // Радиоелектроника и информатика, 2005, № 3. – С. 40–42 . Библиогр. 7 назв.
6. Жигальский Г.П. “Неравновесный  $1/f^2$ -шум в проводящих пленках и контактах” // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 5, – С. 465–490.