

1. Вольтметр универсальный В7-21. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. 2. А.с. № 449309 (СССР). Измеритель электрических и неэлектрических величин / Л.К. Золотков, М.Ф. Марунчак, В.П. Пивоваров // Открытия. Изобрет. 1974. № 41. 3. Золотков Л.К. некоторые методы линеаризации характеристики преобразователей аналог-частота-цифровой код //

Вопросы радиоэлектроники. 1971. Вып. №2. 4. Вольтметр универсальный В7-21А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1988. 5. Полупроводниковые приборы. Справочник // Под руководством А.В. Голомедова. М., 1989. 6. А.с. № 1478138 (СССР). Цифровой вольтметр / Н.И. Грибок и др. // Открытия. Изобрет. 1989. № 17.

УДК 621.382.01

НЕСТАЦІОНАРНІСТЬ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ФЛУКТУАЦІЙ В ПРОВІДНИКАХ З РІЗНИМ ХАРАКТЕРОМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

© Зеновій Колодій, 2000

Державний університет “Львівська політехніка», кафедра “Теоретична радіотехніка і радіовимірювання”, вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Аналізуються результати експериментальних досліджень низькочастотних флуктуацій у провідниках з іонною та електронною провідностями. Встановлено, що флуктуації із спектральною густиною, пропорційною $1/f^\alpha$, належать до нестационарних процесів.

Анализируются результаты экспериментальных исследований низкочастотных флуктуаций в проводниках с ионной и электронной проводимостями. Установлено, что флуктуации, спектральная плотность которых пропорциональна $1/f^\alpha$, принадлежат к нестационарным процессам.

The results of experimental investigations of LF-fluctuations in the conductors with ion and electron conductivity are analyzed in this paper. It has been proved that fluctuations with spectra density proportional to $1/f^\alpha$ belong to non-stationary processes.

Вимірювання параметрів низькочастотних сигналів, значення яких є на межі чутливості радіоелектронної апаратури, пов'язані із певними труднощами. Однією із перешкод є низькочастотні флуктуації (НЧ-флуктуації) як самої апаратури, так і джерела сигналу. Експериментально встановлено [1], що інтенсивність флуктуацій зростає із зниженням частоти, проте єдиний механізм генерування НЧ-флуктуацій лишається невідомим. Є декілька гіпотез, які на підставі експериментальних результатів пояснюють причини зростання інтенсивності флуктуацій із зниженням частоти, проте жодна із них не може повністю пояснити всіх експериментальних результатів. Продовжуються також дискусії щодо стаціонарності чи нестационарності НЧ-флуктуацій. Метою нижчеописаних досліджень було з'ясування питання стаціонарності НЧ-флуктуацій у провідниках з електронною та іонною провідностями.

Для досліджень була використана експериментальна установка, описана у [2]. Замість окре-

мих блоків смугового фільтра, квадратичного детектора, інтегратора, аналізатора спектра і реєструвальної апаратури був використаний селективний нановольтметр типу «Unipan 233» (виробництво Польщі) із виносним широкосмуговим підсилювачем з коефіцієнтом підсилення 20 дБ, що дає змогу збільшити чутливість приладу до одиниць нановольт.

Спектральні густини НЧ-флуктуацій досліджували на зразках, виготовлених на основі розчинів NaCl і порівнювали із НЧ-флуктуаціями в резисторах типу МЛТ-0,25. Вибір для досліджень електrolітичних розчинів був зроблений для того, щоб виключити гіпотезу про вплив поверхневого ефекту на НЧ-флуктуації. Було виготовлено три дослідні зразки з 1%, 2% і 4% розчином NaCl, – скляні трубочки із зовнішнім діаметром 10 мм і завдовжки 60 мм, герметично закриті на кінцях металевими електродами з нержавіючої сталі. Перед проведенням експерименту та після його завершення були виміряні опори зразків на різних частотах. Результати вимірювань наведені в таблиці.

Таблиця 1

Значення опорів досліджуваних зразків із розчинів NaCl

№	Частота, Гц	Опір досліджуваного зразка, Ом					
		1%		2%		4%	
		1.02.99	25.06.99	1.02.99	25.06.99	1.02.99	25.06.99
1	10	1800	2667	906	1426	1753	2089
2	30	1020	1510	870	969	1144	1383
3	80	990	1233	850	876	759	1106
4	300	857	901	715	750	656	850
5	800	716	755	620	689	550	670
6	3000	605	687	596	628	490	603

Резистори типу МЛТ-0,25 вибирали, виходячи із приблизної рівності їхніх опорів опорам зразків із розчину NaCl на частоті 10 Гц. Були вибрані резистори з опором 1,84 кОм, 0,91 кОм і 1,88 кОм.

Досліджувані зразки були поміщені в контейнер з подвійним електромагнітним екрануванням: зверху мідна труба з торцевими кришками, всередині – листовий відпалений пермалой. На одній торцевій кришці контейнера розміщений рознім для з'єднання з попереднім підсилювачем, на другій - перемикач досліджуваних зразків. Довжина лінії зв'язку від контейнера до попереднього підсилювача зведена до мінімальних розмірів: попередній підсилювач за допомогою перехідного розніму кріпиться безпосередньо до розніму на кришці контейнера.

Вимірювання НЧ-флукуацій проводилось на частотах 1,5; 3; 8; 30; 80; 300; 800 і 3000 Гц. Смуга пропускання селективного нановольметра на цих частотах становить відповідно 0,06; 0,1; 0,23; 0,85; 2,3; 8,6; 25 і 110 Гц. Рівень флукуацій на частоті 3000 Гц аргіогі був вибраний за контрольний рівень, оскільки на частоті вище 1000 Гц переважають теплові шуми, рівень яких можна визначити за відомою формулою [3]:

$$\overline{U^2} = 4kT\Delta fR. \quad (1)$$

Отримані експериментальні результати підтвердили правильність такого підходу. Під час вимірювань покази селективного вольметра фіксували через кожні 5 с протягом 1 хв, після чого результати усереднювались як один відлік.

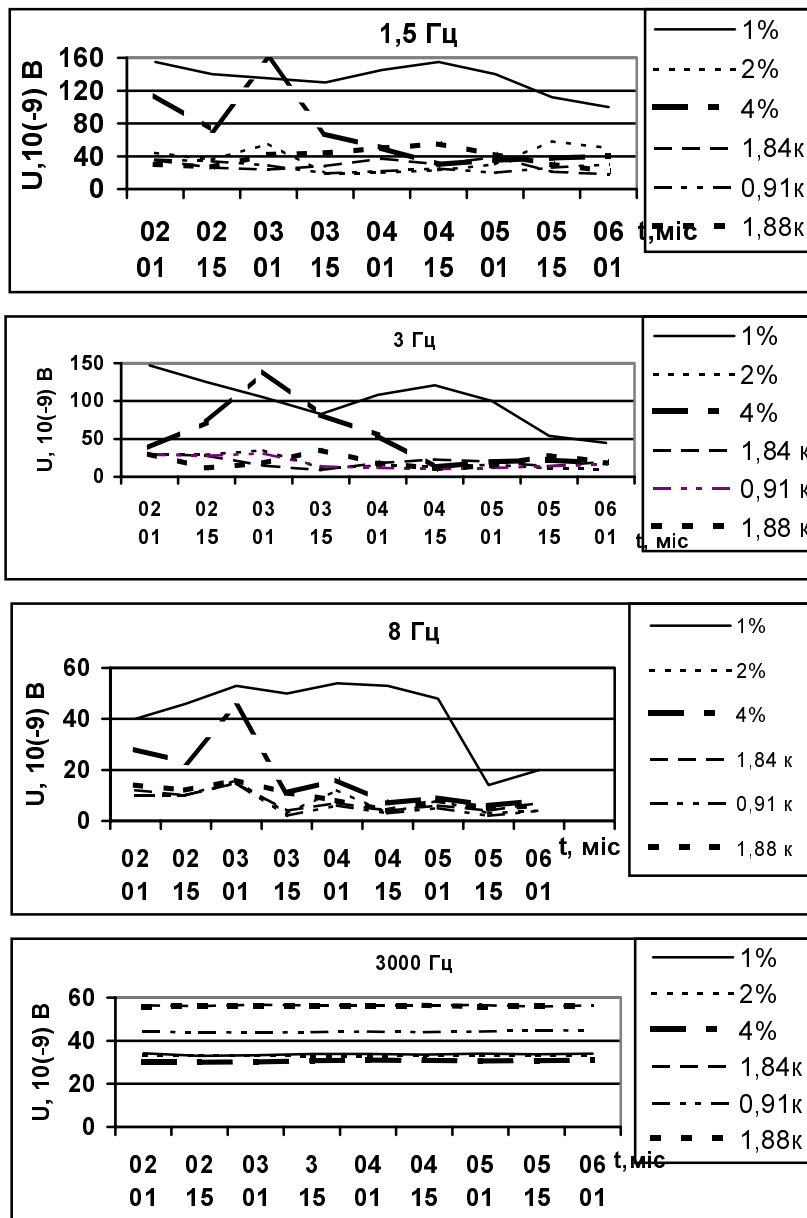
Експерименти із дослідження НЧ-флукуацій проводили серіями протягом довгого періоду (02.1999р по 06.1999р включно). Результати ек-

периментів показали, що на досліджуваній частоті 30 Гц рівень флукуацій є мінімальним. При зміні частоти від 30 Гц в один й інший бік рівень флукуацій зростає, причому інтенсивність зростання є більшою при зниженні частоти від 30 Гц до 1,5 Гц і меншою при зростанні частоти від 30 Гц до 3000 Гц. Оскільки рівень флукуацій на досліджуваних частотах 30 Гц, 80 Гц, 300 Гц і 800 Гц є нижчим, ніж на крайніх частотах діапазону, то, зважаючи на необхідність компактного подання матеріалу статті, результати їх вимірювань на цих частотах не приводяться. Не наводяться в даній статті і зроблені розрахунки середньоквадратичних відхилень (дисперсії) отриманих результатів.

Рівень флукуацій на частоті 3000 Гц в межах похибки вимірювань ($\pm 5\%$) для всіх досліджуваних зразків відповідає значенню, розрахованому за формулою (1), і не змінювався протягом всього періоду експериментів.

Результати вимірювань середніх значень напруг флукуацій на частотах 1,5 Гц, 3 Гц, 8 Гц і 3000 Гц протягом всього періоду експериментальних досліджень наведені на рисунку.

Із наведених результатів можна зробити висновки, що низькочастотні флукуації належать до нестационарних процесів, оскільки середні значення (математичне очікування), а також розраховані за експериментальними результатами середньоквадратичні відхилення (дисперсії) є функціями часу, причому нестационарність НЧ-флукуацій більше проявляється у зразках із розчину NaCl і менше у зразках із МЛТ. На підставі одержаних експериментальних результатів було встановлено також, що спектральна густина флукуацій для дослідних зразків із розчину NaCl для частот 1,5 ÷ 8 Гц



Виміряні середні значення напруг флуктуацій на частотах 1,5 Гц, 3 Гц, 8 Гц і 3000 Гц протягом всього періоду експериментальних досліджень

пропорційна до $f^{-0,8}$. Для зразків із МЛТ ця пропорційність набирає вигляду $f^{-1,0}$ і більше наближається до формули Хуга [4]. Для частот 30 Гц і вище ці пропорційності не зберігаються.

Аналізуючи результати експериментів можна зробити деякі висновки і про можливі джерела НЧ-флуктуацій. По-перше, якщо НЧ-флуктуації виникають внаслідок процесів, що відбуваються у самому дослідному зразку і ці процеси при однакових в часі зовнішніх умовах є постійними, то

такі флуктуації, скоріше всього, повинні були б бути стаціонарними. Якщо ж НЧ-флуктуації пов'язані із зміною внутрішнього термодинамічного стану (наприклад, старіння зразка), то вони наблизатимуться до нестационарних флуктуацій. Але зміна внутрішнього термодинамічного стану резисторів МЛТ протягом 150 днів при незмінних зовнішніх умовах (температура $20 \pm 2^\circ \text{C}$) є неістотною (інакше радіоелектронна апаратура, в якій є велика

частка резисторів МЛТ, вийшла б з ладу). Тому для зразків із резисторів МЛТ НЧ-флуктуації повинні були б бути стаціонарними. Термодинамічний стан зразків із розчину NaCl, очевидно, змінюється інтенсивніше, ніж в МЛТ внаслідок хімічної взаємодії з електродами, часткового випаровування та ін., що і було зафіксовано у зміні опору зразків в кінці серії експериментів. Проте з часом така інтенсивність повинна була б зменшуватись і флуктуації із нестаціонарних на початку вимірювання переходили у стаціонарні в кінці вимірювань.

По-друге, якщо термодинамічний стан зразків із розчину NaCl є причиною нестаціонарних НЧ-флуктуацій, то для одного і того самого зразка протягом хоча б невеликого проміжку часу повинна бути корельованість результатів вимірювань. Однак розрахований за одержаними результатами коефіцієнт кореляції НЧ-флуктуацій упродовж двох днів для всіх дослідних зразків (МЛТ і розчин NaCl) не виходить за межі $|0,3 \div 0,6|$, що не дає підстав стверджувати про їхню корельованість.

По-третє, нестаціонарність НЧ-флуктуацій легше було б пояснити, припустивши, що причиною їх є сторонні наведення, проте природа таких гіпотетичних наведень на сьогодні автору невідома.

Методика експерименту (почерговість підключення дослідних зразків до вимірювальної апаратури) не дає можливості розрахувати коефіцієнт кореляції НЧ-флуктуацій, що відбуваються одночасно у двох або більше зразках. Тому за результатами даного експерименту не можна зробити остаточного висновку щодо впливу сторонніх наведень.

Встановлена внаслідок експериментальних досліджень нестаціонарність НЧ-флуктуацій, а також аналогічні висновки, наведені в [5], де на підставі аналізу НЧ-шумів стверджується, що «... 1/f-шум має деяку форму умовної стаціонарності», звужує коло питань, відповідь на які дасть змогу встановити причини та джерела генерації НЧ-флуктуацій.

1. D.A.Bell (1980), *A survey of 1/f noise in electrical conductors* // *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 13, 4425-4437.
 2. Hooge F.N., Kleinpenning T.G.M., Vandamme L.K.J. *Experimental studies of 1/f noise* // *Rep. Progr. Phys.*, 1981. V. 44. P. 479-532.
 3. Nyquist H. (1927), *Thermal agitation in conductors* // *Phys. Rev.*, 29, 614; (1928), *Thermal agitation of electric charge in conductors* // *Phys. Rev.*, 32, 110-113.
 4. Hooge F.N. (1969), *1/f noise is no surface effect* // *Phys. Lett. A*, 29, 139-140.
 5. Brophy J. J. (1970), *Low-frequency variance noise* // *J. Appl. Phys.*, 41, 1697-1701.

УДК 621.317.73

ЛОГОМЕТРИЧНЕ ФАЗОЧУТЛИВЕ ДЕТЕКТУВАННЯ У ВИМІРЮВАЧАХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСНИХ ОПОРІВ

© Микола Грибок, Сергій Савенко, 2000

Державний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Інформаційно вимірювальна техніка”, вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Описується принцип і математичний апарат логометричного фазочутливого детектування. Показана доцільність його використання у вимірювачах параметрів комплексних опорів.

Описывается принцип и математический аппарат логометрического фазочувствительного детектирования. Показана целесообразность его использования в измерителях параметров комплексных сопротивлений.

The fasesensitive ratiometer detection mathematical and operating procedures are investigated in this paper.

Під час вимірювання синфазної та квадратурної складових комплексних опорів здебільшого застосовують процедуру фазочутливого детектування, яка, переважно, реалізується

релейним або синхронним детектором СД [1]. Гармонічний СД перемножує вхідний сигнал

$$U(t) = \frac{U_m Z \sin(\omega t + \varphi)}{R}, \quad (1)$$