

ОПРАЦЮВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

УДК 621.391.822

НАДЛИШКОВІ ШУМИ В МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ТА ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУРАХ

© Зеновій Колодій, Святослав Яцишин*, Юрій Саноцький, Олег Крук, Юрій Жовнір, 2002

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Теоретична радіотехніка та радіовимірювання”,
*кафедра “Інформаційно-вимірювальна техніка”, вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Представлені та аналізуються визначені експериментально спектральні густини низькочастотних шумів
монокристалічних (Pt, Cu) та полікристалічних (МЛТ) структур.*

*Представлены и анализируются экспериментально определенные спектральные плотности
низкочастотных шумов монокристаллических (Pt, Cu) и поликристаллических (МЛТ) структур.*

*Experimentally defined spectral densities of lowfrequency noises in single-crystal (Pt, Cu) and polycrystal structures
have been presented and analysed in this paper.*

Метою роботи було порівняння надлишкових низькочастотних шумів у матеріалах з різною структурою. Для досліджень були вибрані провідники з монокристалічною структурою – два платинові та один мідний термометри опору з номінальними статичними характеристиками перетворення відповідно 100 П та 100 М, та зразки з полікристалічною структурою – резистори типу МЛТ (спечена суміш електропровідних окислів). Електричний опір дослідних зразків при кімнатній температурі був відповідно: Pt – 107,0 Ом; Cu – 107,0 Ом; МЛТ₁ – 104,0 Ом; МЛТ₂ – 1215,0 Ом; МЛТ₃ – 3660,0 Ом. Спектр шумів дослідних зразків аналізувався у діапазоні частот 3,0 – 10000,0 Гц за методикою, описаною в [1]. Спектральна густина флуктуацій визначалась за формулою:

$$S(f) = \frac{\overline{U^2}}{\Delta f \cdot R}, \quad (1)$$

де R – опір досліджуваного зразка, Ом; Δf – смуга частот, в якій вимірювали значення $\overline{U^2}$, Гц; $\overline{U^2}$ – середньоквадратичне значення напруги шумів, В².

Своєю чергою, $\overline{U^2}$ визначалось як

$$\overline{U^2} = \overline{U^2_E} - \overline{U^2_T}, \quad (2)$$

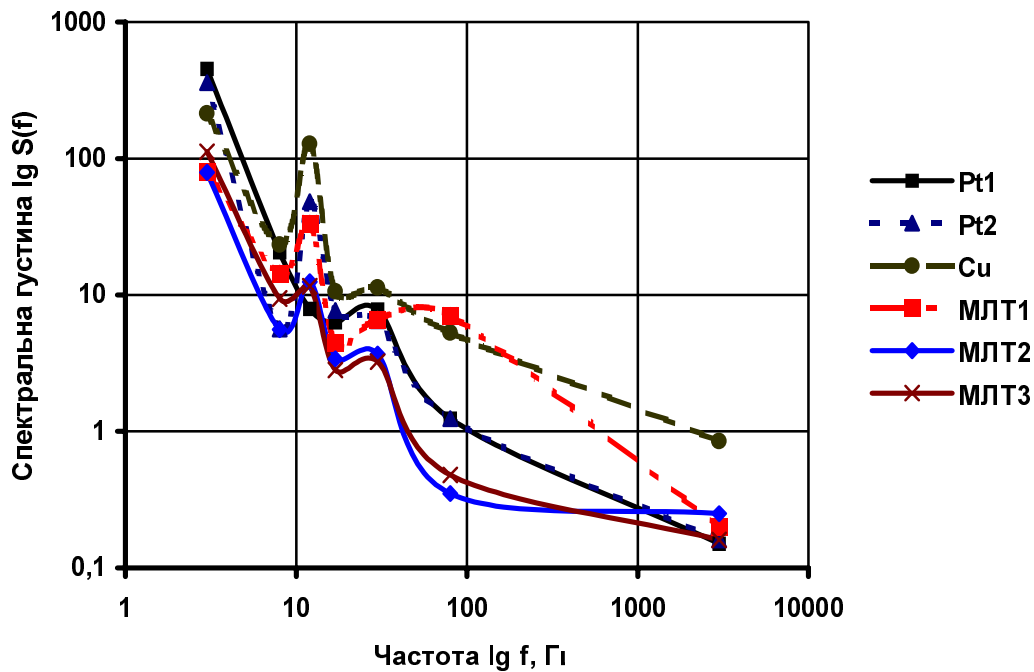
де $\overline{U^2_E} = \overline{U^2_R} - \overline{U^2_O}$; $\overline{U^2_R}$ – середньоквадратичне значення напруги шумів на виході аналізатора спектра при підключенні дослідного зразка; $\overline{U^2_O}$ – середньоквадратичне значення напруги власних шумів попереднього підсилювача аналізатора спектра; $\overline{U^2_T} = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R$ – теоретично розраховане середньоквадратичне значення напруги шумів дослідного зразка ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T – абсолютне значення температури дослідного зразка).

Отже, при обробці експериментальних результатів визначалась спектральна густина саме надлишкових шумів – шумів, що перевищують теоретично розрахований рівень. Визначені за результатами експерименту спектральні густини надлишкових шумів дослідних зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Спектральні густини надлишкових шумів

Спектральна густина Дослідні зразки	$S(f), 10^{-20} \frac{B^2}{Гц \cdot Ом}$							
	3 Гц	8 Гц	12 Гц	17 Гц	30 Гц	80 Гц	3000 Гц	10000 Гц
Pt ₁	454,66	20,63	7,91	6,31	7,84	1,24	0,15	0
Pt ₂	359,86	5,66	48,28	7,7	6,48	1,24	0,16	0
Cu	214,85	23,42	128,21	10,67	11,37	5,3	0,85	0
МЛТ ₁	80,34	14,44	33,65	4,45	6,64	7,07	0,2	0
МЛТ ₂	79,10	5,57	12,48	3,4	3,7	0,35	0,25	0
МЛТ ₃	112,10	9,42	11,54	2,83	3,25	0,48	0,16	0



Частотна залежність надлишкових шумів досліджуваних зразків

Експериментальні результати у вигляді графіка частотної залежності спектральної густини надлишкових шумів наведено на рисунку.

На підставі наведених експериментальних результатів можна зробити висновок, що спектральні густини надлишкових шумів досліджуваних зразків у загальному діапазоні частот 3,0 – 3000,0 Гц відповідають відомому співвідношенню Нооге [2]

$$\frac{S(f)}{R^2} = \frac{\alpha}{N \cdot f^k}, \quad (3)$$

де α – стала Нооге; N – сумарна кількість носіїв заряду в зразку; $k = 0,8-1,2$.

В нашому випадку значення k в діапазоні 3,0 Гц – 3000,0 Гц для різних зразків було близьким до 1: для Pt $k = 1,11$; для Cu $k = 0,8$; для МЛТ₁ $k = 1,20$; для МЛТ₂ $k = 0,83$; для МЛТ₃ $k = 0,95$. Однак всередині цього частотного діапазону значення k були значно більшими від 1 і наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення показника степеня f^k для різних зразків всередині частотного діапазону 3,0 Гц – 3000,0 Гц

Діапазон частот Дослідні зразки	3 – 8 Гц	3 – 17 Гц	3 – 30 Гц	3 – 80 Гц	3 – 3000 Гц
Pt ₁	3,15	2,46	1,76	1,79	1,16
Pt ₂	4,23	2,20	1,70	1,76	1,11
Cu	2,25	1,73	1,27	1,12	0,80
МЛТ ₁	1,75	2,99	2,08	1,44	1,20
МЛТ ₂	2,70	1,80	1,33	1,65	0,83
МЛТ ₃	2,52	2,12	1,54	1,66	0,95

Аналіз даних табл. 2 показує, що, принаймні, в діапазоні від 3,0 Гц до 8,0 Гц значення спектральної густини надлишкових шумів зменшувалось пропорційно до $1/e^{f^{k_0}}$, де k_0 в межах 0,7 – 0,9 для всіх дослідних зразків. Тобто із зменшенням частоти f спектральна густина надлишкових шумів наростає швидше за експоненціальним законом, ніж за законом оберненої пропорційності $1/f^k$.

При експериментальних дослідженнях спостерігалось деяке підвищення спектральних густин надлишкових шумів дослідних зразків на частоті 12,0 Гц, яке, найшвидше, було пов'язане із невідфільтрованими сторонніми наведеннями. На частоті 10000,0 Гц надлишкових шумів у дослідних зразках не було зареєстровано.

Природа надлишкових шумів в діапазоні низьких частот (фліккер-шумів, шумів типу $1/f$) на сьогодні остаточно не з'ясована. Нині не бракує математичних моделей, в яких спектральна густина $S(f)$ одержується у вигляді $S(f) \sim 1/f$. Справа не в моделях цього шуму, річ у тім, що ці моделі не прив'язані до відомих фізичних процесів, що відбуваються в системах, де спостерігаються шуми типу $1/f$. Слід відзначити, що розходження спектральних густин надлишкових шумів типу $1/f$ зафіксовано і іншими авторами [3,4], на підставі чого зроблено висновок, що плівки з одного і того самого металу, виготовлені за однією і тією самою технологією і які мають приблизно один і той самий

питомий опір, здебільшого сильно відрізняються за значенням шуму $1/f$ (різниця може доходити до одного порядку). В нашому ж випадку розходження спектральних густин надлишкових шумів зафіксовано як серед зразків, виготовлених за однією технологією (Pt₁ – Pt₂, МЛТ₁ – МЛТ₂ – МЛТ₃), так і серед зразків, виготовлених за різними технологіями, але які мають приблизно однаковий електричний опір (Pt – Cu – МЛТ₁). Рівень надлишкового шуму у монокристалічних структурах (Pt, Cu) виявився вищим, ніж в полікристалічних структурах (МЛТ). Серед монокристалічних структур рівень надлишкових шумів у зразках з Pt є вищим, ніж в зразках з Cu. Така залежність (у цьому випадку тільки серед досліджуваних монокристалічних структур) збігається з раніше відзначеною тенденцією зменшення шуму $1/f$ у міру зменшення питомого опору зразка [3]. Оскільки умови експерименту не змінювались, то, на думку авторів, значне розходження спектральних густин надлишкових шумів у монокристалічних і полікристалічних структурах зумовлене їх внутрішньою структурою.

Подібна гіпотеза була запропонована раніше [5, 6], згідно з якою є дві складові шуму $1/f$: а) $1/f$ -шум типу А – зв'язаний з тепловими процесами і значною мірою визначається теплообміном з оточенням; б) $1/f$ -шум типу В – визначається внутрішніми властивостями самого металу і не залежить від зовнішніх умов. До висновку про дві складові шуму можна прийти із визначення самих флуктуацій як хаотичного відхи-

лення параметрів системи від найімовірнішого значення. Найімовірнішим значенням може бути значення параметрів системи, що знаходиться у стані рівноваги або у вимушено підтримуваному стані. У вимушено підтримуваному стані флуктуації параметрів зумовлені сторонніми факторами: флуктуації температури та теплообміну, флуктуації зовнішньої дії тощо. – $1/f$ - шуми типу А. У стані рівноваги флуктуації параметрів зумовлені внутрішніми властивостями системи – її структурою, внутрісистемними зв'язками, характерними часами релаксації – $1/f$ - шуми типу В. Оскільки у наших експериментах вплив сторонніх факторів був зведений до мінімуму (струм через дослідні зразки не проходив, подвійне електромагнітне екранування, мінімальна довжина лінії зв'язку з попереднім підсилювачем), то зафіксовані надлишкові низькочастотні шуми – суть шуми типу В.

Спираючись на результати власних досліджень, наведених в цій роботі, а також аналізуючи опубліковані матеріали, автори прийшли до таких висновків:

1) спектральна густина низькочастотних шумів

$$S_0(f) = \frac{U_w^2}{\Delta f} \text{ пропорційна до електричного опору дослідного зразка } R, \text{ що збігається з висновками інших авторів [3, 7];}$$

2) спектральні густини низькочастотних шумів $S(f)$

$$= \frac{U_w^2}{\Delta f * R} \text{ відрізняються як серед дослідних зразків, виготовлених з різних матеріалів, але з однаковим значенням електричного опору } R, \text{ так і серед зразків з одного матеріалу, виготовлених за однією технологією, що також підтверджується іншими авторами [3, 4];}$$

3) зафіксовані у виконаних дослідженнях надлишкові низькочастотні шуми, а відтак зростання спектральної густини $S(f)$ із зменшенням f зумовлені внутрішніми властивостями системи і є притаманними всім кінетичним системам.

Щодо фізичних процесів, які зумовлюють надлишкові низькочастотні шуми в дослідних зразках, то, на думку авторів, у цьому разі переважав механізм флуктуації концентрації носіїв заряду (“аномальний” броунівський рух носіїв заряду на низьких частотах). Однак на проблему надлишкових низькочастотних шумів можна подивитись з іншого боку, не конк-

ретизуючи певних фізичних процесів, через які проявляються ці шуми, а саме з позицій термодинаміки. Кінетичні системи, а такими можна вважати дослідні зразки, можна порівнювати за їх внутрішньою енергією E та структурою, зокрема за ентропією S . На зв'язок флуктуацій із структурою системи вказується в [8]: “...Як рівноважний, так і нерівноважний фліккер-шуми зв'язані з виникненням в системі довготривалих часових кореляцій, часового упорядкування, самоорганізації”, а також в [4]: “...Рівень низькочастотного шуму дозволяє робити висновок про структурну досконалість матеріалу”. Оскільки спектральна густина є енергетичною характеристикою, то значення її визначається через внутрішню енергію системи, а також через ентропію (структуру) системи. Серед дослідних зразків найменше неоднорідних включень мають зразки із ряду Pt – Cu – МЛТ, а відтак внутрішня структура зразків із Pt є упорядкованішою порівняно із МЛТ і Cu, а структура Cu впорядкованіша порівняно із МЛТ. Інакше кажучи, ентропія зразків із Pt є найменшою серед дослідних зразків, ентропія зразків із Cu є меншою, ніж у зразках із МЛТ. Зафіксований рівень надлишкових шумів, особливо на низьких частотах, збільшується у ряду МЛТ – Cu – Pt, що може свідчити про обернену залежність $S(f)$ від ентропії S [9]. Очевидним є те, що внутрішня структура (ентропія) є чутливою до технології виготовлення зразка, до густини дислокацій, внутрішніх напружень тощо. Цим можна пояснити різний рівень низькочастотних шумів у зразках, виготовлених за однією технологією з одного матеріалу. У [4] наведено результати досліджень низькочастотних шумів у нітриді галію GaN, де зафіксовано збільшення сталої Hooge у зразках, виготовлених при сучасному рівні технології, порівняно із зразками, виготовленими більш ніж 10 років тому. Пояснення цьому феномену автори знаходять у високому рівні внутрішніх напружень, значній неоднорідності сучасних зразків тощо. Однак, на нашу думку, якраз високий рівень сучасної технології дав змогу зменшити неоднорідності, знизивши тим самим ентропію зразків, що привело до збільшення рівня низькочастотних шумів.

Автори висловлюють сподівання, що подальші дослідження низькочастотних шумів та їх аналіз з позицій термодинаміки дадуть змогу зробити практичні висновки щодо зменшення рівня низькочастотних

шумів у різних матеріалах і підвищення чутливості радіоелектронної апаратури в діапазоні низьких частот.

1. Колодій З.О. Нестационарність низькочастотних флуктуацій в провідниках з різним характером електропровідності // Вимірвальна техніка та метрологія. 2000. №56. С.34-37. 2. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследовании $1/f$ -шума. // Успехи физических наук. 1983. Т.141. Вып.1. С.151-176. 3. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах. // Успехи физических наук. 1985. Т.145. Вып.2. С.285-326. 4. Дьяконова Н.В., Левинштайн М.Е., Contreras S., Кнар W., Веаumont B., Gibart P. Низкочастотный шум в n -GaN. // Физика и техника

полупроводников. 1998. Т.32. №3. С.285-289. 5. Dutta P., Horn P.M.- Rev/ Mod. Phys., 1981, v. 53, p.497. 6. Eberhard J. W., Horn P.M.-Phys. Rev. Ser. C, 1972, v. 18, p. 6681. 7. Ткаченко М.М., Строїтелева Н.І., Грушка Г.Г., Грушка З.М. Спектри струмового шуму фотопровідника $Hg_3In_2Te_6$. // Український фізичний журнал. 1999. Т.44. Вып.6. С.748-751. 8. Битюцкая Л.А., Селезнев Г.Д. Тепловой фликкер-шум в диссипативных процессах кристаллических веществ. // Физика твердого тела. 1999. Т.41. Вып.9. С.1679-1682. 9. Колодій З.О. Електричні флуктуації – різні сторони одного процесу // Вісник НУ “Львівська політехніка”. 2001. №428. С.226-227.

УДК 681.325

ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЇХ МАЛОХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

© Ростислав Наконечний, 2002

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Автоматика і телемеханіка”,
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглядаються основні принципи та алгоритми вимірювання енергетичних параметрів сигналів, які базуються на їх малохвильовому перетворенні. Наводяться результати моделювання процесу вимірювання активної потужності з малохвильовим перетворенням сигналів.

Рассматриваются основные принципы и алгоритмы измерения энергетических параметров сигналов, которые базируются на их маловолновом преобразовании. Приведены результаты моделирования процесса измерения активной мощности с маловолновым преобразованием сигналов.

The basic strategy and algorithms of measurement of signals energy parameters using the wavelet transform have been presented in this article. Process simulation results of active power measurement from wavelet transform have been shown.

Вступ. До найважливіших енергетичних параметрів сигналів насамперед належать середньоквадратичні значення напруги та струму, повна, активна і реактивна потужності та енергія сигналу. Оцінка вказаних характеристик є однією з найважливіших при аналізі якості силових енергетичних систем, систем зв'язку, комунікацій та ехолокації. Широке практичне застосування нелінійної силовой електроніки, яке пов'язане з використанням високочутливого обладнання, що контролюється за допомогою комп'ютерної техніки, ставить на перший план проблему якості отриманої потужності на розподільній мережі. У такому разі якість потужності аналізується при ustalених значеннях, де визначаються спотворення гармонік або незбалансованість напруг і при перехідних значеннях, які ви-

никають внаслідок аварій і наявності режимів перемикання. Однак ефективність такої оцінки в багатьох випадках істотно залежить від вибору області представлення сигналів, а, значить, їх математичної моделі. Досі переважно для розв'язання таких задач використовувався спектральний аналіз Фур'є або метод симетричних складових, однак порівняно недавно в таких випадках все більше застосовується малохвильовий аналіз.

Виконання досліджень у цьому напрямку дає можливість підвищення ефективності використання малохвильового перетворення для вимірювання енергетичних параметрів сигналів як для перехідних, так і для ustalених режимів.

Відомо, що малохвильове перетворення досліджується також як потужний інструмент при обробці