ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

МОЖЛИВІСТЬ ВИЯВЛЕННЯ ПОТЕНЦІЙНО НЕНАДІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОНІКИ

ABILITY OF IDENTIFYING THE UNRELIABLE ELEMENTS OF ELECTRONICS

Колодій З. О., д-р техн. наук, проф., Крук О. Г., канд. техн. наук, доц.
Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: kzenoviy@gmail.com

Z. Kolodiy, Dr. Sc., Prof., O. Kruk, PhD, As.-Prof.
Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: kzenoviy@gmail.com

https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.03.083

Анотація. Наведено результати комп'ютерного моделювання власного шуму елемента електроніки (ЕЕ) для різних моделей його внутрішньої структури. Наведено результати експериментальних досліджень власного шуму ЕЕ в діапазоні низьких частот, які підтверджують результати комп'ютерного моделювання, а саме: вищий рівень шуму в діапазоні низьких частот мають ті ЕЕ, у внутрішній структурі яких більше дефектів. Наведено аналітичний вираз енергетичного спектра власного шуму ЕЕ, у якому параметр τ залежить від особливостей внутрішньої структури ЕЕ. Показано, що виявлення потенційно ненадійних елементів можна здійснювати або за рівнем їхнього власного шуму в діапазоні низьких частот, або за значенням параметра τ.

Ключові слова: флікер-шум, внутрішня структура, енергетичний спектр, час релаксації.

Abstract. Hidden defects can turn into obvious defects and characteristics of electronic elements become inappropriate. Therefore, the techniques of non-destructive diagnostics of inner structure state are of great importance. One of these techniques is the diagnostics of electronics by their own noise, which advantageously differs by low time consuming and absence of the risk of damage of the element under investigation. Noise measurements are capable to detect the defects in a material with a sensitivity that cannot be reached by other methods.

The results of computer simulation of noise for different models of its internal structure are presented. The simulation was carried out in order to reveal the influence of the internal structure elements of the system under study on the level of its noise at low frequency range. It is shown that systems with fewer structural elements have lower noise level at low frequencies concerning the systems that comprise more elements. The results of the simulation also demonstrate that systems with the same number of structure elements are inherent in different noise levels in low frequency range: systems with an ordered arrangement of the elements are the less noisy then more disordered omes.

The results of noise studies of metal films, composite resistors and semiconductor diodes at low-frequency range are presented. It is noted that noise of composite resistors at low frequencies is greater than noise of the metal film resistors for the same scattering power (0,125 watts). The noise of the diodes at low frequencies is much larger than the resistors noise. The increase in noise for diodes can be explained within the hypothesis of the substantial influence of the internal structure of the test sample.

Analytical expression of the energy spectrum of the own noise of electronic element, which parameter τ depends on the features of the internal structure, is presented. It has been shown that the detection of potentially unreliable elements can be carried out either by the level of their own noise at the low-frequency band or by the value of the parameter τ.

Key words: Flicker Noise, Inner Structure, Energy Spectrum, Relaxation Time.

Вступ

Під час виробництва радіоелектронної апаратури особливу увагу звертають на надійність і якість апаратури. Надійність твердотільних елементів електроніки (ЕЕ) безпосередньо пов'язана зі станом їх внутрішньої структури – з кількістю дефектів кристалічної ґратки і їхнім типом (мікротріщини, дислокації, міжвузлові атоми тощо) [1, 2].

Сьогодні виявлення дефектів у структурі елементів електроніки зводиться до спроб активізувати приховані дефекти елемента (інтегральної схеми, модуля) до того, як він потрапить до споживача. Це можуть бути різні варіанти термовипробовувань, електротермовипробовувань, енергоциклювання тощо [3–5]. Елемент зазнає значних навантажень (температурних, електричних, екстремальних перехідних процесів) [6]. Такі дії зумовлюють прояв прихованих дефектів елемента, однак після них приховані дефекти можуть перетворитись на явні. В такому випадку потенційно ненадійні елементи або

виходять з ладу, або їхні характеристики недопустимо змінюються. Час, необхідний для такого способу контролю якості та діагностики потенційної надійності, великий – десятки, сотні годин. Втрати часу ускладнюють виробництво елементів радіоелектронної апаратури і спричиняють її подорожчання. Зменшити часові витрати можна, підвищивши інтенсивність впливу на елементи. Тоді приховані дефекти проявляються швидше, однак можуть виникнути нові дефекти унаслідок збільшеної інтенсивності зовнішнього впливу. Наприклад, тридцятигодинне випробування напівпровідникових елементів за температури 150 ºС еквівалентне режиму випробувань протягом 168 годин за температури 125 ºС. Треба враховувати, що у разі підвищення температури можуть виникати пошкодження елемента, спричинені великими неконтрольованими внутрішніми струмами або іншими причинами, які не піддаються контролю під час випробовування елемента за високої температури.

Недоліки

Тривалість випробовувань ЕЕ є проблемою як для виробника, так і для споживача. Невелика кількість відмов елементів електроніки може трактуватись як наслідок недостатньої тривалості випробувань, і навпаки, велика кількість відмов може свідчити про надмірну тривалість випробувань.

З урахуванням вищенаведеного, актуальними є методи неруйнівного діагностування стану внутрішньої структури ЕЕ [7]. Одним із таких методів є діагностування елементів електроніки за їхнім власним шумом, що вигідно відрізняється малими часовими затратами і відсутністю ризику пошкодження досліджуваного елемента [8, 9, 10]. Шумові вимірювання дають змогу виявити дефектність матеріалу з такою чутливістю, яка може бути недоступною для інших методів, наприклад, електричних або оптичних [11–15].

Мета роботи

Метою роботи є встановлення можливості оцінювання дефектності внутрішньої структури елементів електроніки за параметрами їхніх власних електричних шумів.

1. Проведені дослідження

Для дослідження кореляції власних шумів ЕЕ із особливостями внутрішньої структури ЕЕ розроблена математична модель (із використанням комп’ютерних засобів) хаотичного руху елементарних кульок у двовимірній системі (плоский прямокутник зі співвідношенням сторін 1:2, у якому можна розставляти внутрішні перегородки, що імітують структуру об’єкта досліджень) [16]. У цьому випадку під елементарними кульками розуміють кульки, геометричні розміри яких набагато менші за розміри прямокутника (імітація молекул, атомів або елементарних частинок). Такому прямокутнику можна поставити у відповідність (з певним наближенням) металевий плівковий резистор гомогенної структури. Вертикальні перегородки, довжину і розташування яких по площі прямокутника можна змінювати, імітують упорядковане та неупорядковане (хаотичне) розміщення елементів кристалічної ґратки, статичних спотворень кристалічної гратки (дислокації, вакансії, міжвузлові атоми) та домішок. Під час хаотичного руху елементарних кульок по площі прямокутника здійснюється їх пружне відбивання від сторін прямокутника та вертикальних перегородок, що відповідає розсіянню електронів на структурних спотвореннях ґратки. Надалі розраховували енергетичний спектр *S(f)* хаотичного руху кульок для кожної модельованої структури.

На рис. 1 наведено моделі структур та відповідні енергетичні спектри *S(f)* хаотичного руху кульок.

З рис. 1 видно, що енергетичний спектр *S(f)* «шумів» системи без внутрішньої структури однаковий у досліджуваній смузі частот від 0 до 100 Гц (модель без внутрішньої структури імітує систему в стані термодинамічної рівноваги). Особливістю енергетичних спектрів «шумів» систем із внутрішньою структурою (рис. 1, *b, c, d*) є їхня нерівномірність у досліджуваній смузі частот і подібність до флікер-шуму (ФШ) із енергетичним спектром $S(f) \sim \frac{1}{f}$. Спектри на рис. 1, *b, c і d* також різняться за формою. Для системи із «неупорядкованою» структурою (рис. 1, *c*) підйом енергетичного спектра зі зниженням частоти f починається на вищих частотах, ніж для системи із «упорядкованою» структурою (рис. 1, *b*) за однакової кількості елементів структури (десять перегородок). Для системи із «неупорядкованою» структурою із більшою кількістю елементів структури (20 перегородок, рис. 1, *c*) підйом енергетичного спектра зі зниженням частоти f починається на вищих частотах, ніж для системи із «неупорядкованою» структурою (рис. 1, *b*) з меншою кількістю елементів структури (десять перегородок). Відтак, на частоті f = 10,0 Hz рівень власних «шумів» системи із «упорядкованою» внутрішньою структурою (рис. 1, *b*) менший, ніж у системи із «неупорядкованою» внутрішньою структурою (рис. 1, *c*), і рівень власних «шумів» систем із «неупорядкованою» внутрішньою структурою нижчий у тієї системи, кількість елементів структури якої менша (рис. 1, *c, d*).

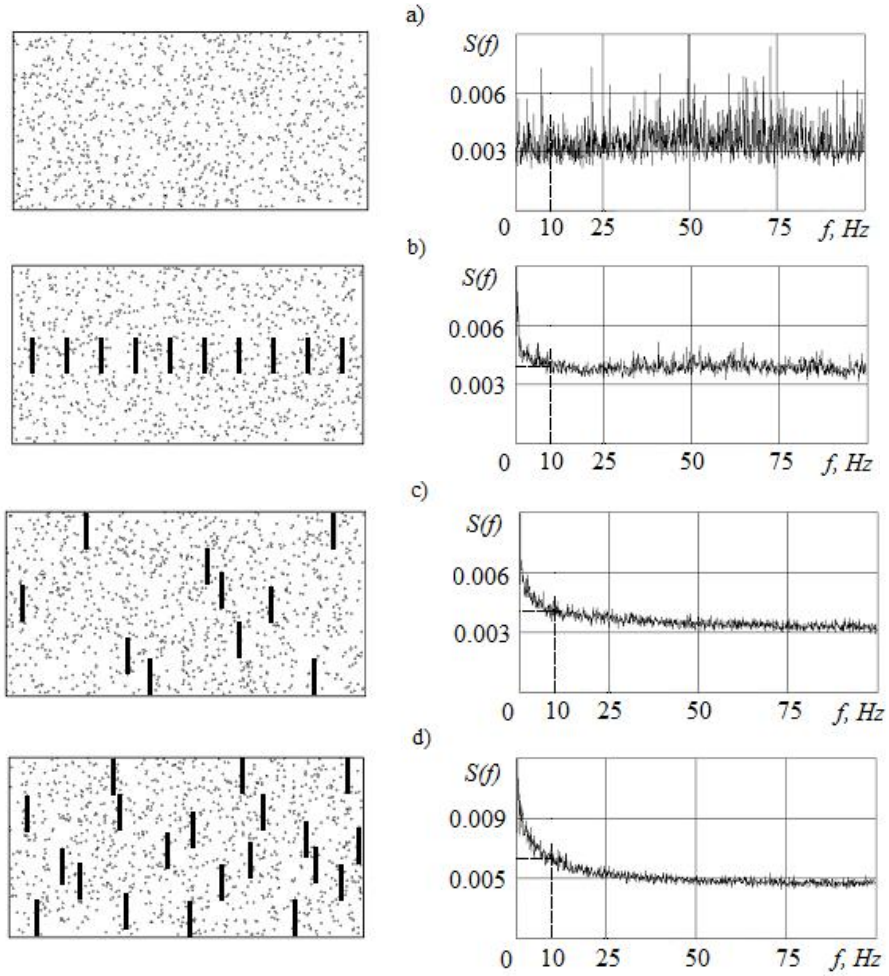

Рис. 1. Моделі двовимірної системи без внутрішньої структури (a) і з внутрішньою структурою (b, c, d) та енергетичні спектри S(f) їх «шумів»

Figure 1. Models of a two-dimensional system without internal structure (a) and with internal structure (b, c, d) and energy spectra S (f) of their "noise"

Таблиця 1

Спектральна густина потужності шумів резисторів МЛТ-0,125, С2–23–0,125 та напівпровідникових діодів 2D503A

Table 1

Power spectral density of noise of resistors МЛТ-0,125, С2–23–0,125 and semiconductor diodes 2D503A

№	R, kOm	$S(f)\cdot 10^{-21}$, J			
		f = 80 Hz	f = 200 Hz	f = 300 Hz	f = 8000 Hz
R1	11,952	57,09	25,44	20,71	16,00
R2	11,621	52,63	25,34	20,65	16,00
R3	11,776	55,72	22,08	20,37	16,00
R4	19,98	78,02	26,56	23,78	16,00
R5	23,56	87,97	29,85	26,10	16,00
R6	26,78	85,58	30,50	25,06	16,00
VD1	348,300	143,60	48,51	46,14	16,00
VD2	346,900	185,75	54,71	46,82	16,00
VD3	304,400	187,21	59,84	52,03	16,00

У разі поширення (екстраполяції) результатів комп'ютерного моделювання на реальні твердотільні ЕЕ можна припустити, що нижчий рівень власних шумів у діапазоні низьких частот (де проявляється ФШ) мають ті ЕЕ, у внутрішній структурі яких менше дефектів (рис. 1, *c, d*), або внутрішня структура яких «упорядкованіша» за однакової кількості дефектів (рис. 1, *b, c*). Для перевірки такого припущення проведені експериментальні дослідження частотної залежності СГП шумів металоплівкових резисторів типу МЛТ-0,125 (R1, R2, R3 у табл. 1), композиційних резисторів типу С2–23–0,125 (R4, R5, R6 у табл. 1) та напівпровідникових діодів типу 2D503A (VD1, VD2, VD3 у табл. 1). Дослідження здійснено за допомогою селективного нановольтметра типу „UNIPAN-233" без пропускання струму через діоди: за такої методики вимірювань підключення діодів до вимірювальної схеми (пряме або зворотне) є некритичним. Опір діодів визначено за рівнем їх теплового шуму на частоті 8000 Гц.

У табл. 1 наведено результати вимірювань СГП шумів у резисторах і діодах.

Із наведених у табл. 1 даних видно, що за однакової потужності розсіяння (0,125 Вт) шуми композиційних резисторів С-2-23 на низьких частотах (f < 200 Гц) більші, ніж шуми металоплівкових резисторів МЛТ. Досліджувані резистори С2–23 і МЛТ, крім значень електричного опору, відрізняються внутрішньою структурою – напилена на керамічний каркас плівка (МЛТ) і спресований композиційний матеріал (С2–23). Можна припустити, що різниця у значеннях СГП шумів обох типів резисторів зумовлена особливостями їх внутрішньої структури. Таке припущення видається логічним, оскільки перед початком експерименту в резисторах R5 і R6 було спеціально пошкоджено (спиляно) верхній провідний шар для перевірки впливу зміни структури резистора на рівень його ФШ, унаслідок цього рівень їхнього ФШ значно зріс (табл. 1).

Зауважимо, що СГП шумів діодів на низьких частотах значно більші за СГП шумів резисторів (табл. 1). Збільшене, порівняно із резисторами, значення СГП шумів діодів на низьких частотах можна пояснити, в загальному випадку, наявністю декількох джерел шумів: генераційно-рекомбінаційного, вибухового, нерівноважного джонсонівського та лавинного шумів, а також флікер-шуму та теплового шуму. Оскільки під час експерименту до досліджуваних діодів не було прикладено зовнішнього електричного поля, то вибуховий, нерівноважний джонсонівський та лавинний шуми повинні бути відсутніми, а рівень генераційно-рекомбінаційного шуму зводиться до рівня теплового шуму. Отже, вирішальний влив на збільшення СГП шумів діодів на низьких частотах в цьому випадку здійснює ФШ. Збільшення ФШ для діодів можна пояснити в межах гіпотези про визначальний вплив внутрішньої структури досліджуваного зразка на рівень його ФШ, оскільки, крім дефектів кристалічної структури напівпровідникового матеріалу у вигляді вакансій, міжвузлових атомів, атомів легуючих елементів, границь зерен, блоків, у НП-діодах є ще і дефекти *p–n*-переходу – дефекти самої границі переходу, різна концентрація неосновних носіїв заряду тощо.

Проведено експериментальні дослідження впливу відносної кількості дефектів структури ЕЕ на їх шум у діапазоні низьких частот. Для цього виміряно енергетичні спектри шумів $S(f)$ резисторів одного типу з різними габаритними розмірами, що забезпечують різну потужність розсіяння – 0,25 Вт, 0,5 Вт та 1,0 Вт. За однакової технології виготовлення провідної плівки резисторів кількість дефектів на одиницю площі поверхні менша у тих резисторах, габарити й потужність розсіювання яких більші. В табл. 2 наведено результати вимірювань $S(f)$ шумів резисторів типу МЛТ, що характеризуються приблизно однаковим значенням електричного опору, але різною потужністю розсіювання.

Таблиця 2

Енергетичний спектр електричних шумів у резисторах МЛТ з потужністю розсіювання 0,25; 0,5; 1,0 Вт

Table 2

Power spectral density of noise of resistors МЛТ-0.25; 0.5; 1.0 W

№	R, Om	Потужність розсіяння, W	$S(f)\cdot10^{-21}$, J			
			f = 80 Hz	f = 200 Hz	f = 300 Hz	f = 8000 Hz
R1	11796,0	0,25	49,71	23,96	21,24	16,00
R2	10908,0	0,5	48,13	22,76	20,46	16,00
R3	10682,0	1,0	47,14	21,34	20,04	16,00
R4	10887,0	0,25	64,37	24,23	18,86	16,00
R5	10782,0	0,5	61,14	23,36	17,83	16,00
R6	10875,0	1,0	52,12	21,45	18,45	16,00
R7	12335,0	0,25	55,13	24,81	20,01	16,00
R8	11038,0	0,5	52,73	23,83	20,08	16,00
R9	10713,0	1,0	50,17	21,03	19,04	16,00

Як видно з табл. 2, спектральна густина потужності шумів на низьких частотах збільшується у разі зменшення потужності розсіяння резистора. Це може бути підтвердженням результатів комп'ютерного моделювання впливу кількості дефектів внутрішньої структури досліджуваної системи (ЕЕ) на рівень її шумів у діапазоні низьких частот (рис. 1, *c*, *d*). Рівень власних шумів досліджуваних резисторів на частотах від 8000 Гц і вище (область теплових шумів) не залежить від потужності розсіювання.

Із результатів (табл. 2) видно також, що резистори однакової конструкції, виготовлені за однією технологією (R1, R4, R7; R2, R5, R8; R3, R6, R9 – однакової потужності), мають різні значення власних шумів у діапазоні низьких частот. Таку відмінність можна пояснити різним розташуванням дефектів (за однакової їх кількості) внутрішньої структури досліджуваних резисторів (приклад комп'ютерного моделювання, рис. 1, *b*, *c*).

Результати і обговорення

Наведені у табл. 1 і табл. 2 результати експериментальних досліджень підтверджують висновки, зроблені на підставі результатів компютерного моделювання: енергетичний спектр власних шумів ЕЕ у діапазоні низьких частот (ФШ) чутливий до особливостей внутрішньої структури ЕЕ. Відтак, таку особливість енергетичного спектра власних шумів ЕЕ можна покласти в основу методу неінвазивної діагностики внутрішньої структури ЕЕ, а також використовувати для виявлення потенційно ненадійних ЕЕ.

Діагностування внутрішньої структури ЕЕ можна виконувати або за рівнем їхнього власного шуму в діапазоні низьких частот, або за параметром їх флікер-шуму, оскільки в діапазоні низьких частот у ЕЕ переважає флікер-шум [17, 18]. У [19] виведено вираз для енергетичного спектра флуктуацій параметрів досліджуваної системи (ЕЕ), який описує її ФШ: $S(f)=\frac{\exp(f\cdot t)}{\exp(f\cdot t)-1}S_0$, де f – частота, τ – час релаксації, S_0 – значення енергетичного спектра *S(f)*, якщо $t\to\infty$. Значення S_0 можна встановити за експериментальними результатами дослідження шумів ЕЕ як енергетичний спектр *S(f)* у діапазоні високих частот [20].

Значення τ також можна визначити за енергетичним спектром *S(f)* [20]: якщо $f=f_0=\frac{1}{t}$, $S(f_0)=1.58\cdot S_0$.

Із наведеного вище виразу для *S(f)* видно, що вищому рівню ФШ відповідає менше значення τ. У [21] встановлено, що параметр τ чутливий до особливостей внутрішньої структури досліджуваної системи (ЕЕ): у систем із більшою кількістю дефектів внутрішньої структури менше значення τ, ніж у систем із меншою кількістю дефектів. Параметр τ можна визначити під час вимірювання власного шуму ЕЕ і визначення його енергетичного спектра [20]. Відтак неінвазивну діагностику ЕЕ можна здійснювати за значенням параметра τ: що менше значення τ, то більше дефектів у структурі досліджуваного ЕЕ і нижчий рівень потенційної надійності ЕЕ.

Висновки

1. Неінвазивна діагностика ЕЕ на предмет виявлення потенційно ненадійних елементів вигідно відрізняється від традиційних методів діагностування, оскільки не впливає на внутрішню структуру ЕЕ.

2. Результати комп'ютерного моделювання та експериментальні дослідження показують, що рівень власних шумів ЕЕ у діапазоні низьких частот (флікер-шум ЕЕ) залежить від особливостей внутрішньої структури ЕЕ: вищий рівень ФШ мають елементи з більшою кількістю дефектів у внутрішній структурі.

3. Залежність власних шумів ЕЕ від особливостей внутрішньої структури ЕЕ можна використати у методі неінвазивної діагностики для виявлення потенційно ненадійних елементів або за рівнем їх власного шуму в діапазоні низьких частот, або за параметром ФШ τ. Ті з ЕЕ, у яких ФШ є більшим (значення τ є меншим), мають більше дефектів або їх внутрішня структура відхилилась від ідеальної. Відтак такі ЕЕ менш надійні, ніж ЕЕ з нижчим рівнем ФШ (з більшим значенням τ).

Література

[1] N. Mielke, R Frickey, I. Kalastirsky, M. Quan, D. Ustinov, V. Vasudevan, "Reliability of Solid-State Drives Based on NAND Flash Memory", Proc. of the IEEE, vol. 105, iss. 9, p. 1725–1750, 2017.

[2] V. Kharchenko, "Problems of reliability of electronic components", Modern Electronic Materials, vol. 1, iss. 3, p. 88–92, 2015.

[3] M. Farhadi, M. Abapour, B. Mohammadi-Ivatloo,"Reliability analysis of component-level redundant topologies for solid-state fault current limiter", Int. Journ. Electronics, vol. 105, iss. 4, p. 541–558, 2018.

[4] C. Claeys, E. Simoen, S. Put, G. Giusi , F. Crupi, "Impact strain engineering on gate stack quality and reliability", Solid-State Electronics, vol. 52, p. 1115–1126, 2008.

[5] H. Pon, J. Dayacap, R. Frickey, "Reliability issues studied in Solid-State Drives", Memory Workshop IEEE 6th International, May 18–21, 2014.

[6] R. Amy, G. Aglietti, G. Richardson, "Reliability analysis of electronic equipment subjected to shock and vibration – A review", Shock and Vibration, vol. 16, p. 45–59, 2009.

[7] Nondestructive Testing in Electronics Manufacturing. [Online]. Available: http://poeth.com/.

[8] A. Konczakowska, B. Wilamowski. Noise in Semiconductor Devices. 2010 [Online]. Available: www.eng. auburn.edu/~wilambm/pap/.../K10147_C011.pdf

[9] R. Harsh, K. Narayan, "Noise spectroscopy of polymer transistors", Journ. Appl. Phys., vol. 118, p. 205502, 2015.

[10] A. Szewczyk, L. Łentka, J. Smulko, P. Babuchowska, F. Béguin, "Measurements of flicker noise in supercapacitor cells", in Proc. Int. Conf. on Noise and Fluctuations, June 20–23, 2017. DOI: 10.1109/ICNF.2017.7985985.

[11] A. Balandin, K. L. Wang, S. Cai, R. Li, C. R. Viswanathan, E. N. Wang, M. Wojtowicz, "Investigation of Flicker oise and Deep-Levels in GaN/AlGaN Transistors", J. Electron. Materials, vol. 29, p. 297, 2000.

[12] M. Kayyalha,.Yo. Chen, "Observation of reduced 1/f noise in graphene field effect transistors on boron nitride substrates", Appl. Phys. Let., vol. 107, p. 113101, 2015.

[13] E. Simoen, M. Aoulaiche, S. dos Santos et al, "Low-Frequency Noise Studies on Fully Depleted UTBOX Silicon-on-Insulator nMOSFETs: Challenges and Opportunities", ECS J. Solid State Sci. Technol., vol. 2(11), p. 205–210, 2013.

[14] M. Mihaila, "On the 1/f Noise and Energy Partition in Solid", Rom. Journ. Inf. Sc. and Techn., vol. 19, no. 1–2, p. 175–187, 2016.

[15] H. Kang, V. Subramanian, "Measurement and analysis of 1/f noise under switched bias in organic thin film transistors", Appl. Phys. Lett., vol. 194, iss .2, 2014.

[16] Z. Kolodiy, A. Kolodiy, "Fluctuations of flicker type in technical and natural systems", in Thesis 22nd Int. Conf. on Noise Fluctuations, Corum de Montpellier, France, p. 131, June 24–28, 2013, DOI:10.1109/ICNF.2013.6578927.

[17] S. Qinghui, L. Guanxiong, D. Teweldebrhan, A. Balandin, S. Rumyantsev, M. Shur, Y. Dong, "Flicker Noise in Bilayer Graphene Transistors", Electron Device Letters, vol. 30, iss. 3, p. 288–290, 2009.

[18] G. Leroy, L. Yang, J. Gest, L. Vandamme, "Research on the properties of ZnO films by 1/f noise measurement", in Thesis 22nd Int. Conf. on Noise Fluctuations. Corum de Montpellier, France, p. 48, June 24–28, 2013.

[19] Z. Kolodiy, "Flicker-noise of electronic equipment: Sources, ways of reduction and application", Radioelectronics and Communications Systems, vol. 53, p. 421–417, 2010.

[20] Z. Kolodiy, B.. Mandziy, "Calculation of Flicker Noise Power", Automatic Control and Computer Sciences, vol. 50, no. 1, p. 15–19, 2016.

[21] Z. Kolodiy, "Detection of changes in the structure of a system according to changes of its flicker noise", Ukr. J. Phys., vol. 53, no. 7, p. 718–722, 2008.

References

[1] N. Mielke, R Frickey, I. Kalastirsky, M. Quan, D. Ustinov, V. Vasudevan, "Reliability of Solid-State Drives Based on NAND Flash Memory", Proc. of the IEEE, vol. 105, iss. 9, p. 1725–1750, 2017.

[2] V. Kharchenko, "Problems of reliability of electronic components", Modern Electronic Materials, vol. 1, iss. 3, p. 88–92, 2015.

[3] M. Farhadi, M. Abapour, B. Mohammadi-Ivatloo,"Reliability analysis of component-level redundant topologies for solid-state fault current limiter", Int. Journ. Electronics, vol. 105, iss. 4, p. 541–558, 2018.

[4] C. Claeys, E. Simoen, S. Put, G. Giusi , F. Crupi, "Impact strain engineering on gate stack quality and reliability", Solid-State Electronics, vol. 52, p. 1115–1126, 2008.

[5] H. Pon, J. Dayacap, R. Frickey, "Reliability issues studied in Solid-State Drives", Memory Workshop IEEE 6th International, May 18–21, 2014.

[6] R. Amy, G. Aglietti, G. Richardson, "Reliability analysis of electronic equipment subjected to shock and vibration – A review", Shock and Vibration, vol. 16, p. 45–59, 2009.

[7] Nondestructive Testing in Electronics Manufacturing. [Online]. Available: http://poeth.com/.

[8] A. Konczakowska, B. Wilamowski. Noise in Semiconductor Devices. 2010 [Online]. Available: www.eng.auburn. edu/~wilambm/pap/.../K10147_C011.pdf

[9] R. Harsh, K. Narayan, "Noise spectroscopy of polymer transistors", Journ. Appl. Phys., vol. 118, p. 205–502, 2015.

[10] A. Szewczyk, L. Łentka, J. Smulko, P. Babuchowska, F. Béguin, "Measurements of flicker noise in supercapacitor cells", in Proc. Int. Conf. on Noise and Fluctuations, June 20–23, 2017. DOI: 10.1109/ICNF.2017.7985985.

[11] A. Balandin, K. L. Wang, S. Cai, R. Li, C. R. Viswanathan, E.N. Wang, M. Wojtowicz, "Investigation of Flicker oise and Deep-Levels in GaN/AlGaN Transistors", J. Electron. Materials, vol. 29, p. 297, 2000.

[12] M. Kayyalha, Yo. Chen, "Observation of reduced 1/f noise in graphene field effect transistors on boron nitride substrates", Appl. Phys. Let., vol. 107, p. 113101, 2015.

[13] E. Simoen, M. Aoulaiche, S. dos Santos et al, "Low-Frequency Noise Studies on Fully Depleted UTBOX Silicon-on-Insulator nMOSFETs: Challenges and Opportunities", ECS J. Solid State Sci. Technol., vol. 2(11), p. 205–210, 2013.

[14] M. Mihaila, "On the 1/f Noise and Energy Partition in Solid", Rom. Journ. Inf. Sc. and Techn., vol. 19, no. 1–2, p. 175–187, 2016.

[15] H. Kang, V. Subramanian, "Measurement and analysis of 1/f noise under switched bias in organic thin film transistors", Appl. Phys. Lett., vol. 194, iss. 2, 2014.

[16] Z. Kolodiy, A. Kolodiy, "Fluctuations of flicker type in technical and natural systems", in Thesis 22nd Int. Conf. on Noise Fluctuations, Corum de Montpellier, France, p.131, June 24-28, 2013, DOI:10.1109/ICNF.2013.6578927.

[18] G. Leroy, L. Yang, J. Gest, L. Vandamme, "Research on the properties of ZnO films by 1/f noise measurement", in Thesis 22nd Int. Conf. on Noise Fluctuations. Corum de Montpellier, France, p. 48, June 24-28, 2013.

[19] Z. Kolodiy, "Flicker-noise of electronic equipment: Sources, ways of reduction and application", Radioelectronics and Communications Systems, vol. 53, p. 421–417, 2010.

[20] Z. Kolodiy, B.. Mandziy, "Calculation of Flicker Noise Power", Automatic Control and Computer Sciences, vol.50, no. 1, p. 15–19, 2016.

[21] Z. Kolodiy, "Detection of changes in the structure of a system according to changes of its flicker noise", Ukr. J. Phys., vol. 53, no. 7, p. 718–722, 2008.