

## СТРУКТУРОВАНІСТЬ СИСТЕМИ – ОСНОВНИЙ ЧИННИК, ЩО ВПЛИВАЄ НА НИЗЬКОЧАСТОТНІ ФЛУКТУАЦІЇ В СИСТЕМІ

© Колодій Зеновій, 2004

**Проаналізовано експериментальні результати по дослідженню НЧ-флуктуацій у різних системах. На підставі аналізу запропоновано модель НЧ-флуктуацій, у якій визначальним чинником є структурованість системи, яка впливає на форму спектральної густини флуктуацій.**

**The experimental outcomes on a research of low frequency fluctuations in different systems are analysed. On the basis of the analysis the model of low frequency fluctuations is offered, in which the defining factor is structure of a system, which influences the shape of a spectral concentration of fluctuations.**

### Постановка задачі

Низькочастотні флуктуації (НЧ-флуктуації) або низькочастотні шуми на сьогодні є невирішеною проблемою, що не дає можливості підвищувати чутливість радіоелектронної апаратури в області низьких частот до бажаного рівня. Ситуація ускладнюється тим, що природа НЧ-флуктуацій, джерела їх генерації остаточно не з'ясовані. Немає загальноприйнятих механізмів, які відповідають за поведінку спектральної густини  $S(f)$  НЧ-флуктуацій, а саме: зростання  $S(f)$  при зменшенні частоти за законом  $S(f) \sim \frac{1}{f^\alpha}$ , де  $\alpha=0,8-1,2$ . Огляд літератури, в якій розглядаються флуктуаційні процеси [1–19], дає підстави стверджувати, що спектральна густина флуктуацій  $S(f) \sim \frac{1}{f^\alpha}$  притаманна кожній системі, в якій спостерігаються хаотичні (флуктуаційні) відхилення від положення рівноваги, тобто, практично, кожній кінетичній системі – механічній, електричній, біологічній тощо. Оскільки шуми електричних систем (напівпровідникових елементів, металевих провідників та провідникових плівок) сьогодні є найбільш вивченими, то для з'ясування природи НЧ-флуктуацій доцільним є їх всебічний аналіз саме в електричних системах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

НЧ-флуктуації посідають перше місце серед інших типів флуктуацій за кількістю запропонованих гіпотез щодо фізичних механізмів їх виникнення. Зупинимось тільки на деяких із них. В [2] флуктуації із спектром  $1/f^\alpha$  трактуються як суперпозиція релаксаційних випадкових процесів, а також “...стохастичний процес з  $1/f$ -спектром можна розглядати як результат аномального броунівського руху”. В [3] пропонується “...нова оригінальна модель фліккер-шуму, згідно з якою флуктуації із спектром  $1/f$  виникають в системі в результаті одночасного протікання взаємодіючих нерівноважних фазових переходів в присутності білого шуму”; в [4] “...модель, що являє собою  $1/f$ -шум суперпозицією випадкових телеграфних сигналів”; в [5] “... в даний час прийнято пов'язувати фліккер-шум (флуктуації із спектром  $1/f^\alpha$  – прим. авт.) з великими масштабами часу, наприклад, з повільними термоактивованими флуктуаціями структурного безладу, заселеності електронних пасток тощо”; у [6] “...природа шуму в зразках не пов'язана із флуктуаціями рухливості носіїв заряду, яка є основною причиною появи  $1/f$ -шуму за моделлю Хоухе”; у

[7] "...Як рівноважний, так і нерівноважний фліккер-шуми пов'язані із виникненням в системі довготривалих часових кореляцій, часового упорядкування, самоорганізації"; в [8] "...альтернативна модель, що пов'язує виникнення  $1/f$ -шуму з наявністю рухомих дефектів у напівпровіднику". Варто зазначити, що кожна із запропонованих моделей більш-менш добре узгоджується з цими експериментальними результатами. Для інших експериментальних результатів, як правило, запропонована модель не діє. Це означає, що флуктуацій із спектром  $1/f^\alpha$  або взагалі не існує (отримані результати є похибкою експерименту), або механізми таких флуктуацій заховані глибше. Тому перш ніж розглядати чи пропонувати гіпотези флуктуацій із спектром  $1/f^\alpha$  необхідно детальніше розглянути опубліковані експериментальні результати.

### Мета роботи

Метою проведеної роботи був аналіз експериментальних результатів з дослідження флуктуацій із спектром  $1/f^\alpha$  в електричних системах (напівпровідникових елементах та металевих зразках), виділення спільних особливостей досліджуваних систем та обґрунтування можливого механізму виникнення у них флуктуацій із спектром  $1/f^\alpha$ .

### Проведені дослідження

Експериментальні результати з дослідження флуктуацій із спектром  $1/f$  у зразках із металів та напівпровідників наведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

#### Низькочастотні флуктуації у металах

Метали	
Тверда фаза	Рідка фаза
<b>1. Залежність НЧ-флуктуацій від питомого опору</b>	
а) "...якісна тенденція зменшення шуму $1/f$ при зменшенні питомого опору зразка..." [9, 10]	
<b>2. Залежність від температури</b>	
а) "...виявлено, що відносний рівень шуму тим вищий, чим більший температурний коефіцієнт опору зразка" [11] б) "...При зниженні температури від 400 К для Ag і 500 К для Cu інтенсивність шуму спочатку швидко зменшується, а пізніше виходить на приблизно незмінний рівень" [11] в) "...Поблизу точки плавлення у зразках із Cu виявлено теплові флуктуації типу $1/f$ . Із початком плавлення ці флуктуації зникають" [7] г) "...Шум в металевих плівках сильно залежить від температури і типу підложки..." [9]	а) "...Рівні $1/f$ – шуму в твердому і рідкому металах (галії і ртуті) однакові за порядком величини" [11].
<b>3. Залежність від технології виготовлення</b>	
а) "...сильна залежність шуму $1/f$ від технології виготовлення" [9].	
<b>4. Залежність від внутрішньої структури</b>	
а) "...Шум аномально великий також в різного роду неоднорідних (неупорядкованих) середовищах гранульованих, зернистих плівках, матричних композиціях тощо" [11] б) "...рівень низькочастотного шуму дає змогу зробити висновок про ступінь структурної досконалості матеріалу..." [12]	

Порівнюючи наведені у табл. 1 і 2 дані, зазначимо:

1) зростання НЧ-флуктуацій у металах і напівпровідниках при збільшенні питомого опору дослідного зразка;

2) нечітка залежність НЧ-флуктуацій від температури:

а) у напівпровідниках – від незначної температурної залежності [12] до зростання НЧ-флуктуацій із зниженням температури [9] і із збільшенням температури [6];

## Низькочастотні флуктуації у напівпровідниках

Напівпровідники		
Напівпровідники p- та n- типу	Напівпровідники фоточутливих елементів	Напівпровідникові плівки
<b>1. Залежність НЧ-флуктуацій від питомого опору</b>		
а) „...Із збільшенням питомого опору рівень шумів зростає...” [13] б) „...Шум набагато менший у сильно легovanому напівпровіднику, ніж у власному” [11]	а) „...Рівень 1/f-шуму був більший у зразках з більшим значенням питомого опору” [6]	
<b>2. Залежність від температури</b>		
а) „...шум в інверсному шарі на p-Si навіть зростає при зниженні температури від 4,2 до 1,5 К” [9] б) „...із збільшенням температури шуми зростають” [14]	а) „...у GaNi рівень шуму слабо залежить від температури” [12] б) „...з підвищенням температури рівень шумів зростає” [6]	а) „...Епітаксціальні плівки високотемпературних надпровідників $YBa_2Cu_3O_7$ мають високий рівень шумового параметра при 93 К, що на 2–3 порядки більше ніж для нормальних металів” [14]
<b>3. Залежність від технології виготовлення</b>		
а) „...Рівень шуму в зразках, отриманих рідинним травленням, є більшим, чим рівень шуму в зразках, отриманих іонним травленням” [14]	а) „ рівень низькочастотних шумів залежить від технології виготовлення зразків...” [12]	а) „...Вимірювання шумових характеристик плівок показали, що за абсолютним значенням вони перевищують аналогічні значення для монокристалів в 1,2 – 1,3 раза” [15]
<b>4. Залежність від внутрішньої структури</b>		
а) „...Для одного і того ж матеріалу залежно від рівня структурної досконалості, наявності внутрішніх напружень, густини дислокацій тощо значення $\alpha$ (параметр Нооге – прим. авт.) можуть різнитися на багато порядків” [12]		
<b>5. Залежність низькочастотних флуктуацій від зовнішньої підсвітки</b>		
	а) „...підсвітка не впливала на 1/f-шум у всьому досліджуваному діапазоні температур” [12] б) „...із зростанням рівня освітленості рівень шуму зростає” [6]	
<b>6. Стаціонарність низькочастотних флуктуацій</b>		
		а) „...НЧ-шум в плівках із GaAs, очевидно, є нестаціонарним” [16]

б) у металах – зростання рівня НЧ-флуктуацій починається з деякої температури і є пропорційне до температурного коефіцієнта опору [11];

3) залежність НЧ-флуктуацій у металах і напівпровідниках від технології виготовлення зразків [9, 12, 14, 15];

4) нестаціонарність НЧ-флуктуацій у напівпровідниках (GaAs) [4, 16] і спечених окислах металів [16].

Із наведених вище особливостей низькочастотних флуктуацій за основу гіпотетичної моделі механізмів, що відповідають за генерацію НЧ-флуктуацій, найбільше підходить залежність їх від внутрішньої структури, що відзначено практично у всіх дослідженнях [7–10, 12–16]. Залежність НЧ-флуктуацій від питомого опору зразка не може бути основною, оскільки „...для одного і того ж

матеріалу залежно від рівня структурної досконалості матеріалу, наявності внутрішніх напружень, густини дислокацій тощо значення  $\alpha$  можуть різнитися на багато порядків” [12]. В подальшому для визначення моделі НЧ-флуктуацій приймемо за постулати такі положення:

1) НЧ-флуктуації із спектром  $1/f$  є наслідком хаотичного (броунівського) руху елементарних частинок;

2) визначальним чинником, що відповідає за форму спектра НЧ-флуктуацій, є внутрішня структура дослідного зразка.

Перший постулат ґрунтується на тому, що НЧ-флуктуації із спектром типу  $1/f$  реєструють у дослідних зразках без пропускання через них струму по реєстрації миттєвих значень напруги, як і теплових шумів [10]. Такі флуктуації можуть бути викликані або флуктуаціями рухливості носіїв заряду, або флуктуаціями їх концентрації. Перше припущення не витримує експериментальної перевірки [6]. Щодо другого припущення, то останні дослідження [6, 8] вказують на їх переважаючу роль. А флуктуація концентрації носіїв заряду (елементарних частинок) при їх хаотичному русі є структурно залежною – некомпенсована кількість зарядів на кінцях досліджуваного зразка в кожний момент часу залежить не тільки від кількості дефектів структури зразка, але і від їхнього розташування (орієнтації) за об’ємом зразка (другий постулат). У зразках, внутрішні дефекти яких рівномірно розподілені по всьому об’єму (ізотропна структура дефектів), флуктуації концентрації носіїв заряду будуть незначними (наближатимуться до білого шуму). Якщо ж розподіл внутрішніх дефектів є неоднорідним (анізотропна структура дефектів), то при спостереженні флуктуацій на низьких частотах (при збільшенні часу спостереження) проявлятиметься „кооперативний” рух носіїв заряду (елементарних частинок) – некомпенсована кількість зарядів із-за меншого розсіяння їх на внутрішніх дефектах зростатиме. З таких позицій можна пояснити як залежність флуктуацій типу  $1/f$  від питомого опору зразка (питомий опір залежить від кількості і упорядкованості внутрішніх дефектів зразка), так і неповторність форми НЧ-флуктуацій – неповторність дефектності внутрішньої структури. Загалом під дефектністю внутрішньої структури необхідно розуміти ті неоднорідності, які є по об’єму дослідного зразка.

Наведені вище міркування стосуються систем з вираженою кристалічною будовою. Флуктуації ж із спектром  $1/f^\alpha$  спостерігаються також і в рідких металах та електролітах [17], які не мають кристалічної структури. Однак на підставі результатів, наведених у [18], можна стверджувати про відносну структурованість рідин, оскільки „...Таким чином, знімається основне застереження статистичної теорії рідин, що не допускає можливості утворення відносно стійких кристалоподібних конфігурацій атомів розмірами принаймні в декілька елементарних комірок, таких, наприклад, як зародки кристалізації докритичних розмірів.”. В такому разі і для рідин можна застосувати вищенаведені постулати для пояснення виникнення в них флуктуацій із спектром  $1/f^\alpha$ .

Для одного і того самого дослідного зразка, наприклад резистора типу МЛТ, що знаходиться при сталій температурі, флуктуації спостерігаються в діапазоні частот від  $f_n \rightarrow 0$  до  $f_g \rightarrow \infty$  [10] і є наслідком хаотичного руху вільних електронів (хаотичного руху елементарних частинок). Тому значення частоти  $f$ , що входить до виразу спектральної густини  $S(f) \sim 1/f^\alpha$ , є насамперед лише масштабним коефіцієнтом, а не визначальним чинником. В [19] висловлено припущення про обернено пропорційну залежність спектральної густини флуктуацій, що виникають в системі, із ентропією системи  $\Delta S$ . Якщо ж врахувати, що  $\Delta S$  залежить як від частоти флуктуацій  $f$ , так і від часу релаксації  $\tau$ , причому зв’язок між ними із [20]:  $\Delta S = A * k * f * \tau$ , де  $A = \text{const}$ ,  $k = 1,28 * 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана, то, зважаючи на вищенаведене, спектральна густина флуктуацій  $S(f)$  є функцією  $\tau$ , який і є визначальним чинником у формуванні форми спектра флуктуацій. Водночас під  $\tau$  потрібно розуміти сукупність сталих часу релаксаційних процесів, що відбуваються в системі, а також середній час руху елементарних частинок між зовнішніми, доступними для спостереження, сторонами системи. Своєю чергою, очевидним є той факт, що величина  $\tau$  залежить від структури системи.

## Висновки

На підставі аналізу опублікованих експериментальних результатів інших авторів [2–9, 11–16] та власних отриманих результатів [10, 17, 19] автор приходиться до висновку, що:

1) НЧ-флуктуації із спектром  $1/f^\alpha$ , як і флуктуації на середніх і високих частотах, є наслідком хаотичного руху елементарних частинок, з яких складається макросистема;

2) спектральна густина НЧ-флуктуацій  $S(f)$  є функцією часу релаксації системи  $\tau$ , який і є визначальним чинником у формуванні спектра флуктуацій, причому  $S(f) \sim \frac{c}{f * \tau}$ , де  $c \sim kT$ ;

3) час релаксації  $\tau$  на низьких частотах для систем із структурованими неоднорідностями є  $\tau < \infty$ . Для систем, внутрішні неоднорідності яких рівномірно розподілені по всьому об'єму, час релаксації  $\tau$ , що фіксується на низьких частотах,  $\tau \rightarrow \infty$ . Відповідно спектральна густина флуктуацій в діапазоні низьких частот для систем із структурованими неоднорідностями є більшою, ніж для систем із рівномірно розподіленими неоднорідностями. На середніх і високих частотах при  $f_g \rightarrow \infty$  фіксується час релаксації  $\tau \rightarrow 0$ , залишаючи незмінним добуток  $f * \tau = const$ . Спектральна густина  $S(f)$  при цьому наближається до спектральної густини білого шуму.

Отже, флуктуації параметрів системи, проявляючись у всьому діапазоні частот від  $f_n \rightarrow 0$  до  $f_g \rightarrow \infty$ , містять інформацію як про запасену і розсіювану у вигляді тепла внутрішню енергію (білий шум), так і про структурованість системи – низькочастотні флуктуації.

1. Стадник Б.І., Колодій З.О., Саноцький Ю.В. Шум-інформаційний параметр / Міжвідомчий наук.-техн. зб. "Вимірювальна техніка та метрологія". – 1998. – № 52. – С.5–8. 2. Коверда В.П., Скоков В.Н. Критическое поведение и  $1/f$ -шум при пересечении двух фазовых переходов в сосредоточенных системах // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – Вып. 10. – С. 1–7. 3. Скрипов В.П., Виноградов А.В., и др. Капля на горячей плите: появление  $1/f$ -шума при переходе к сфероидальной форме // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 21–23. 4. Макаров С.В., Медведев С.Ю., Якимов А.В. и др. Влияние негауссовости на погрешность измерения интенсивности фильтрованного фликкерного шума // Известия вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. XLII. – № 3. – С. 278–286. 5. Кузовлев Ю.Е., Медведев Ю.В., Гришин А.М. Эффекты квантовой дискретности и фликкерные флуктуации туннельной проводимости // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44. – Вып. 5. – С. 811–819. 6. Ткаченко М.М., Строїтелева Н.І. та ін. Спектри струмового шуму фотопровідника  $Hg_3In_2Te_6$  // Український фізичний журнал. – 1999. – Т. 44, Вып. 6. – С. 748–751. 7. Битюцкая Л.А., Селезнев Г.Д. Тепловой фликкер-шум в диссипативных процессах предплавления кристаллических веществ // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41, Вып. 9. – С. 1679–1682. 8. Якимов А.В. Могут ли подвижные дефекты вызвать  $1/f$  шум в полупроводнике? // Известия вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. XLII, № 6. – С. 590–594. 9. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа  $1/f$  в твердых телах // Успехи физических наук. – 1985. – Т. 145, Вып. 2. – С. 285–325. 10. Колодій З., Яцишин С., Саноцький Ю. та інші. Надлишкові шуми в монокристалічних та полікристалічних структурах // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2002. – №59. – С.3–7. 11. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях  $1/f$ -шума // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 141. – Вып. 1. – С. 151–176. 12. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др. Низкочастотный шум в  $n$ -GaN // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 285–289. 13. А. Ван дер Зил. Единое представление шумов типа  $1/f$  в электронных приборах: фундаментальные источники // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76. – № 3. – С. 28–55. 14. Карманенко С.Ф., Семенов А.А. и др. Источники фликкер-шума и технология сверхпроводящих микрополосков на основе пленок иттрий-бариевого купрата // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, Вып. 4. – С. 63–72. 15. Ковалюк З.Д., Орлецький В.Б., Будзуляк І.М. та ін. Характер шумів у

шаруватих монокристалах і плівках InSe // Журнал фізичних досліджень. – 2001. – Т. 5, № 1. – С. 43–45. 16. Макаров С.В., Медведєв С.Ю., Якимов А.В. Корреляція между интенсивностями спектральных компонент 1/f шума // Известия вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. XLIII, № 11. – С. 1016–1023. 17. Колодій З.О. Нестационарність низькочастотних флуктуацій в провідниках з різним характером електропровідності // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2000. – №56. 18. Гальчак В.П., Мудрий С.І. Флуктуації координатних чисел у рідких металах // Журнал фізичних досліджень. – 2002. – Т.6. – №1. – С.78–82. 19. Колодій З. Електричні флуктуації – різні сторони одного процесу // Вісник НУ „Львівська політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 2001. – №428. – С.226–227. 20. Колодій З.А. Низкотемпературные термошумовые преобразователи: Дисс.... канд. техн. наук. – Львов, 1988. – 138 с.

УДК 621.391

Іван Лісовий, Олександр Філарєтов

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
кафедра волоконно-оптичних ліній зв'язку,  
Одеський науково-дослідний інститут зв'язку

## ПРИСТРІЙ ТАКТОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ З ЦИФРОВИМ РЕГУЛЯТОРОМ НА БАЗИСІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

© Лісовий Іван, Філарєтов Олександр, 2004

Викладено результати моделювання цифрового регулятора пристрою тактової синхронізації на базисі теорії нечітких множин.

The modeling result of clock system digital controller applying the theory of fuzzy sets are explained.

Цифрові регулятори на базисі нечіткої логіки дають змогу створювати САР, характеристики яких порівняно з результатами найбільш розвинутих традиційних методів керування, показали їх високу ефективність, а в багатьох випадках й істотні переваги над класичними цифровими регуляторами [1–4].

На рис. 1 показано структурну схему пристрою тактової синхронізації з цифровим регулятором на базисі нечіткої логіки, який виробляє керуючий вплив на підставі нечітких продукційних правил, що визначають конкретні ситуації керування.

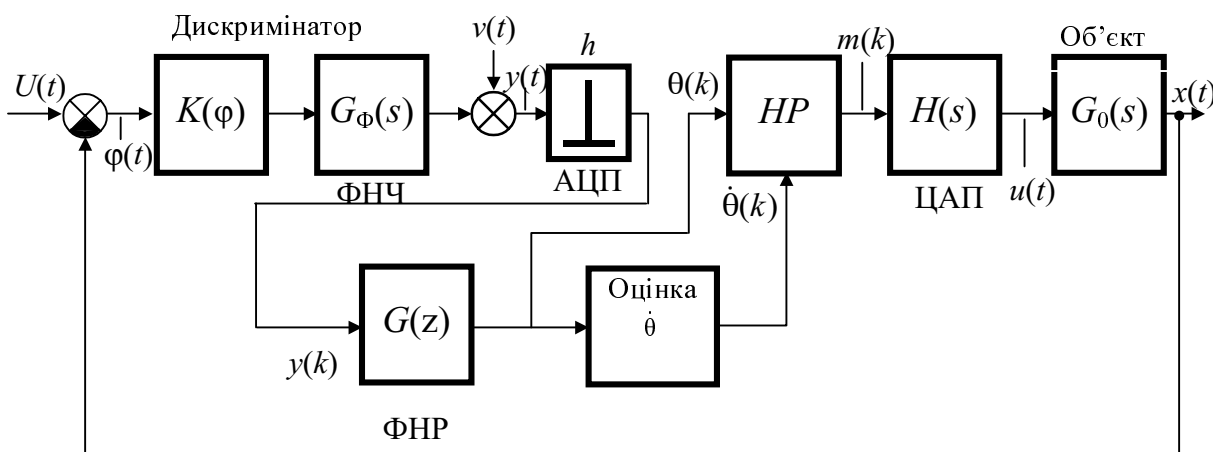


Рис. 1. Структурна схема пристрою тактової синхронізації