

## МЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФЛІКЕР-СКЛАДОВОЇ СПЕКТРА

© Колодій З.О., Денко П., 2008

**Створена механічна модель хаотичного руху кульок у замкненій коробці з метою підтвердити адекватність комп'ютерної моделі. Виконаний пошук та аналіз факторів, що впливають на характер флікер-складової енергетичного спектра.**

**The mechanical model of chaotic motion of balls the closed box is created with the purpose of confirming adequacy of computer model. The search and analysis of factors which have an influence on the flicker-constituent character of power spectrum is conducted.**

**Постановка задачі.** Незважаючи на велику кількість як теоретичних, так і експериментальних досліджень з проблеми низькочастотних шумів, сьогодні немає загальноприйнятої теорії, яка б пояснювала причини виникнення флікер-шуму.

Чи не єдиним способом, за допомогою якого людина навчилася досліджувати і аналізувати світ, є моделювання. Однак завжди виникає питання адекватності вибраної моделі об'єктові, який вона відображає, оскільки чим складніший об'єкт досліджень, тим важче врахувати усі його особливості і обґрунтувати неістотність неврахованих параметрів.

Історично першим і найдостовірнішим є безпосереднє моделювання на реальних об'єктах. Однак для дослідження флікер-складової спектра безпосереднє моделювання є надзвичайно складною задачею, оскільки вимірювання на низьких частотах пов'язане з великим часом експерименту (тривалий період накопичення даних). Складно виконувати вимірювання та аналізувати внутрішню структуру досліджуваного зразка. Також виникають труднощі забезпечення відсутності впливу зовнішніх чинників і підтримання заданих параметрів досліджуваної системи упродовж часу експерименту.

Сьогодні надзвичайно популярним і широко використовуваним є комп'ютерне моделювання. Такий підхід дає можливість реалізувати складні задачі, а також пришвидшити дослідження.

Створена комп'ютерна модель хаотичного руху елементарних частинок і їхньої взаємодії дає змогу аналізувати залежність флікер-складової спектра від внутрішньої структури системи. Використання комп'ютерної моделі хаотичного руху кульок у плоскому прямокутнику дає змогу уникнути впливу зовнішніх чинників, а також самому задавати і підтримувати незмінною внутрішню структуру досліджуваного зразка.

При такому способі моделювання питання адекватності стоїть надзвичайно гостро. Підставою для цього є генерація випадкових чисел за певним законом розподілу, а також можливість впливу на отримані результати алгоритму роботи мови програмування і компілятора.

Складність безпосереднього моделювання і наявність певних особливостей комп'ютерного моделювання спричиняє труднощі у формуванні доведення адекватності вибраних моделей. Це призводить до необхідності пошуку іншої моделі флікер-шуму, де питання адекватності простіше вирішити.

**Аналіз відомих публікацій.** Залежність флікер-шуму від багатьох чинників ускладнює пошук джерела його виникнення. Опубліковані роботи з дослідження шумів у металах, напівпровідниках та інших системах в діапазоні низьких частот виявили деякі загальні тенденції для флікер-шуму. Опубліковані сьогодні результати досліджень шумів переважно ґрунтуються на безпосередніх експериментальних вимірюваннях.

Необхідною умовою отримання достовірних експериментальних результатів є високоякісний захист об'єкта і вимірювальної апаратури від впливу чинників, що не є об'єктами дослідження (температурні зміни, електромагнітні наведення тощо).

Більшість авторів не наводять аналізу адекватності виконаних вимірювань. Однак деякі автори доводять достовірність своїх експериментальних результатів, описуючи створені вимірювальні установки і наводячи результати їхніх випробувань при штучній дії зовнішніх чинників.

Все-таки, незважаючи на створення складних, високозахисених вимірювальних установок, питання достовірності отриманих результатів є невирішеним. Оскільки при великій тривалості експерименту, яка необхідна для аналізу низькочастотного шуму, залишається відчутним вплив джерела живлення, а також необхідність врахування старіння взірця і самої вимірювальної апаратури.

Не знайдено публікацій, у яких би здійснювався б аналіз флікер-шуму за допомогою комп'ютерних чи інших моделей. Однак велика кількість опублікованих результатів безпосереднього моделювання у надзвичайно різних об'єктах і явищах свідчить про сильну зацікавленість цією проблемою і дає можливість оцінити загальні тенденції для флікер-шуму.

**Мета роботи.** Метою роботи був пошук і створення альтернативної комп'ютерної моделі для аналізу флікер-шуму, у якій можна було б уникнути відомих труднощостей, які виникають при безпосередньому і комп'ютерному моделюванні.

Можна запропонувати велику, а може і безмежну кількість моделей будь-якого процесу чи явища. Серед них комп'ютерна, механічна, біологічна та інші моделі, кожна з яких можна спробувати використати для аналізу досліджуваної системи. Однак важливим є те, щоб вибрана модель найповніше відображала важливі для аналізу характеристики досліджуваного об'єкта, була зручною для проведення і могла легко змінювати необхідні параметри.

Така постановка задачі вимагає визначення чинників, що є істотними для аналізу флікер-шуму і мають бути враховані у моделі що створюється.

Аналіз опублікованих результатів безпосередніх вимірювань показав, що:

- існує нечітка залежність флікер-шуму від температури зразка [1, 2];
- збільшення опору зразка спричиняє підвищення флікер-шуму [3];
- виявлено вплив технології виготовлення матеріалів на величину флікер-шуму [2, 3];
- рівень флікер-шуму різко зростає у різних неоднорідних середовищах [1, 3].

Результати комп'ютерного моделювання [4] дають підстави стверджувати, що:

- кількість і швидкість руху кульок змінюють загальний рівень шуму, але не впливають на характер флікер-складової спектра;
- відсутність дефектів внутрішньої структури спричиняє зникнення флікер-складової;
- величина флікер-складової спектра шуму залежить від характеру внутрішніх неоднорідностей.

Результати виконаного аналізу характерних особливостей флікер-шуму показали, що у виборі моделі необхідно керуватися можливістю легкої зміни внутрішньої структури змодельованої системи.

Під час вибору моделі було також вирішено відмовитися від використання у вимірюваннях аналогових фізичних і нефізичних величин. Це дасть змогу практично ліквідувати вплив зовнішніх завод і шумів вимірювального обладнання.

На підставі перерахованих міркувань було прийняте рішення створити для аналізу флікер-шуму механічну модель хаотичного руху кульок у плоскому прямокутнику.

На відміну від комп'ютерної моделі, механічна модель дасть змогу врахувати розмір кульок, реальну взаємодію між ними. Використання для руху кульок вібраційного стенда вирішить проблему способу генерації випадкових чисел, а також впливу алгоритму роботи комп'ютерної моделі.

За аналогією з комп'ютерною моделлю, у плоскому прямокутнику можна довільно розставляти металеві перегородки різних розмірів. Це дасть змогу імітувати внутрішню структуру, моделюючи внутрішні неоднорідності і дефекти зразка. Швидкість руху кульок можна змінювати за допомогою заданої частоти і прискорення вібростенда.

Для підрахунку кількості кульок, що торкнулися протилежних стінок прямокутника, створена мікропроцесорна система. Вона фіксує кількість кульок через задані проміжки часу  $Dt$  упродовж

заданого часу експерименту  $T$  і запише результати у текстовий файл, а також виводить на дисплей і зберігає у файл графік енергетичного спектра.

Протягом заданого часу  $T$  через задані проміжки  $\Delta t$  здійснюється підрахунок кількості кульок, що торкнулися правої  $n_{np}$  і лівої  $n_{лв}$  сторін прямокутника та визначається їхня різниця  $\Delta n = n_{np} - n_{лв}$ , яка відповідає різниці потенціалів (або напрузі). Спектральна густина такого флуктуаційного процесу (різниця кількості кульок  $\Delta n$  хаотично змінюється навколо деякого середнього значення) визначалась за допомогою кореляційної функції.

Отримані числа  $\Delta n$  є вибірками випадкового процесу  $a_i = \Delta n$  і кількість таких вибірок  $N$  за час спостереження  $T$  визначається як:

$$N = \frac{T}{\Delta t} \quad (1)$$

На основі отриманих вибірок визначалась дисперсія:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (a_i - \bar{a})^2 \quad (2)$$

та кореляційна функція:

$$R_i = \frac{1}{N \cdot D} \sum_{j=i}^{N-1} (a_j - \bar{a}) \cdot (a_{j-i} - \bar{a}) \quad (3)$$

де  $\bar{a}$  – середнє значення вибірки випадкового процесу

Спектральна густина флуктуаційного процесу (енергетичний спектр)  $S(f)$  визначалась за розрахованою кореляційною функцією

$$S(f)_i = D \cdot \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} R_k \cdot e^{-j \cdot k \cdot i \cdot 2 \frac{P}{N}} \quad (4)$$

**Результати досліджень.** Механічне моделювання хаотичного руху кульок у замкненій металевій коробці розміром 210x297 здійснювалося на електромагнітному вібростенді (тип ST-5000/300 Germany). Цей вібростенд дає змогу дискретно встановлювати частоту вібрації у діапазоні від 10 Гц до 5 кГц і плавно регулювати прискорення в діапазоні до 6g при амплітуді вібрації 6 мм. Коробка моделі має прозору кришку, крізь яку можна візуально спостерігати характер руху і взаємодію кульок. По площині коробки можна довільно розміщувати металеві перегородки, моделюючи внутрішню структуру. Для моделювання елементарних частинок використано підшипникові кульки діаметром  $\varnothing$  8 мм.

На менших сторонах коробки розташовані контактні пластини, завданням яких є фіксація торкання кульки. Вимірювальна частина через задані проміжки часу опитує усі контактні пластини, фіксує наявність або відсутність кульки біля них і здійснює підрахунок їхньої кількості. Період опитування і час накопичення можна задавати у широких межах.

Спочатку досліджувався енергетичний спектр хаотичного руху кульок у коробці без перегородок. Така коробка моделює систему, що не містить жодних неоднорідностей і дефектів, тобто перебуває у рівноважному стані. Експеримент здійснювався при частоті вібрації  $F_{вібр.} = 20$  Гц з прискоренням  $A = 6g$  і кількості кульок  $N = 85$ . На рис. 1 подано отриманий спектр.

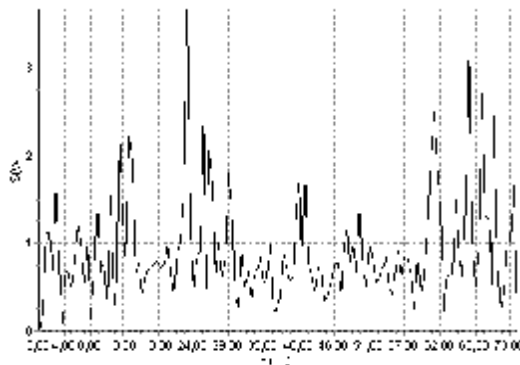
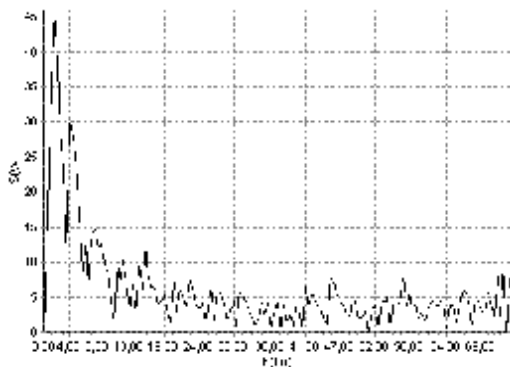


Рис. 1. Енергетичний спектр хаотичного руху кульок у коробці без перегородок

Енергетичний спектр хаотичного руху кульок у коробці без перегородок є рівномірним з піками на частотах, приблизно кратних частоті вібрації.

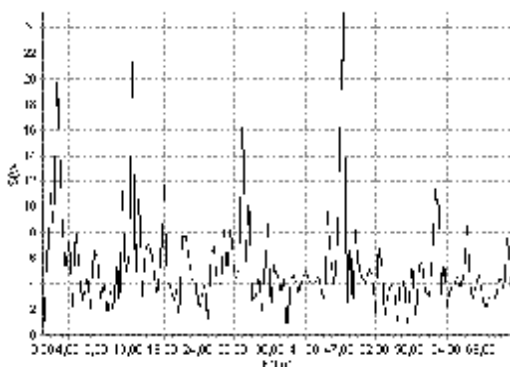
Подальші експерименти були зосереджені на моделюванні внутрішньої структури. На рис.2 зображено енергетичний спектр хаотичного руху кульок у коробці з чотирма рівномірно розташованими по площині перегородками. Наведений спектр отримано при частоті вібрації  $F_{вібр.} = 20$  Гц з прискоренням  $A = 6g$  і кількості кульок  $N = 50$ .



*Рис. 2. Енергетичний спектр хаотичного руху кульок з прискоренням 6g у коробці з чотирма рівномірно розташованими по площині перегородками*

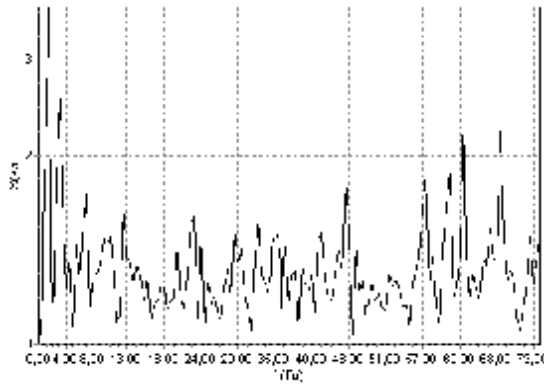
Необхідно відзначити різке зростання рівня спектральних складових на низьких частотах порівняно із спектром у коробці без перегородок. Рівні спектральних складових на вищих частотах мають подібні значення.

Хаотичне розташування чотирьох перегородок такої самої довжини приводить до появи значних піків в області вищих частот (рис. 3) порівняно зі спектром у прямокутнику з рівномірним розташуванням перегородок. Однак на вищих частотах рівні спектральних складових співмірні.



*Рис. 3. Енергетичний спектр хаотичного руху кульок з прискоренням 6g у коробці з чотирма хаотично розташованими по площині перегородками*

Зменшення частоти вібрації  $F_{вібр.}$  до 15 Гц і прискоренням  $A$  до 3g при незмінній кількості кульок  $N = 50$  і рівномірному розташуванні перегородок під кутом по площині коробки приводить до значного зниження рівня спектральних складових. Це можна пояснити зменшенням швидкості руху і взаємодії кульок. Але підйом рівня спектральних складових на низьких частотах надалі проявляється (рис. 4).



*Рис. 4. Енергетичний спектр хаотичного руху кульок з прискоренням 3g у коробці з чотирма рівномірно розташованими по площині перегородками*

**Висновки.** Отримані результати механічного моделювання хаотичного руху кульок у замкненій коробці добре узгоджуються з одержаними раніше результатами комп'ютерного моделювання. Обидві моделі за відсутності перегородок (тобто при ідеальній внутрішній структурі) дають рівномірний енергетичний спектр. Наявність перегородок викликає появу флікер-складової спектра. Рівень спектральних складових переважно залежить від швидкості руху кульок (величини прискорення вібростенда), що також виявлено і на комп'ютерній моделі.

На характер флікер-складової спектра має вплив спосіб розташування перегородок і їхня кількість. Встановити залежність між внутрішньою структурою і формою флікер-складової спектра за допомогою механічної моделі є надзвичайно складно.

Однак отримані результати добре узгоджуються зі створеною комп'ютерною моделлю, що підтверджує її адекватність і можливість використання для аналізу флікер-шуму.

1. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др. Низкочастотный шум в n-GaN // *Физика и техника полупроводников.* – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 285–289.
2. 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.
3. Колодій З.О. Нестационарність низькочастотних флуктуацій в провідниках з різним характером електропровідності // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2000. – № 56. – С. 34–37.
4. Колодій З., Стадник Б., Бардила Т., Саноцький Ю., Колодій А. Флуктуації та їх комп'ютерне моделювання // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2005. – Вып. 65. – С. 11–19.