

## ЯВИЩЕ СТОХАСТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПОБУДОВИ НОВИХ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

**Жук О.В., Байдур О.В., Ткаченко Д.В.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації

**Яровий О.В.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведено дослідження ефекту стохастичного резонансу на прикладі моделі стохастичного осцилятора з дволямним потенціалом під впливом гармонійного і фрактального сигналів. Здійснено обґрунтування можливості створення пристроїв передачі даних для безпроводових сенсорних мереж, що здатні передавати сигнали малої потужності за умови наявності шуму високої інтенсивності.

**Ключові слова:** ефект стохастичного резонансу, гармонійні і фрактальні сигнали, безпроводові сенсорні мережі.

**Постановка проблеми.** Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – розподілені мережі (наземні, повітряні, підземні), що складаються з сенсорних вузлів (стаціонарні малогабаритні сенсори, мобільні роботи-сенсори, сенсорні аероплатформи), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1].

Загальна ідея функціонування БСМ полягає у використанні великої кількості неоднорідних безпроводових сенсорів, які можуть бути розташовані на значних географічних територіях для моніторингу за цілями або різномірних параметрів навколишнього середовища. Отримана безпроводовим сенсорним вузлом інформація передається на спеціальні шлюзи безпосередньо, або шляхом ретрансляції через проміжні сенсорні вузли.

Сучасний досвід ведення бойових дій показав, що засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника здатні ефективно придушувати радіозв'язок у зоні ведення бойових дій (в тому числі передачу розвідувальної інформації від сенсорних вузлів до базової станції). Цивільні та військові рішення наразі не спроможні забезпечити передачу розвідувальної інформації до базової станції в ситуаціях коли радіоканал цілеспрямовано заповнюють шумом високої інтенсивності. Тому одним з першочергових завдань в галузі розробки військових систем передачі є завдання створити передавальні пристрої радіосигналів здатні працювати в умовах активного застосування засобів РЕБ, як власних так і супротивника.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Сформулюємо вимоги до подібних засобів військового радіозв'язку:

– здатність передавати сигнали з обмеженою потужністю в умовах дії шуму високої інтенсивності;

– забезпечити можливість скритої передачі сигналів від супротивника.

Для повного виконання цих вимог необхідна розробка принципово нових пристроїв передачі сигналів. Можливий варіант – це розробка засобів передачі сигналів на основі відомого фізичного ефекту стохастичного резонансу. Простий гармонійний сигнал був використаний для перевірки побудованої математичної моделі. Результати досліджень впливу гармонійного сигналу на стохастичний осцилятор в квадратичному потенціалі були опубліковані в багатьох роботах [2, 3, 4] і використовувались для перевірки правильності побудови моделі і отриманих в результаті експерименту значень параметрів.

Фрактальний сигнал був обраний, як той, що може задовольнити другу вказану вимогу. Він має складний спектральний склад і це значно ускладнює його пошук серед шумового сигналу високої інтенсивності. Таким чином можна приховати факт передачі сигналів від противника.

**Мета статті.** Основна мета статті полягає у аналізі проведеного чисельного дослідження моделі стохастичного осцилятора у квадратичному потенціалі з двома видами сигналів: простого гармонійного та фрактального сигналу складного спектру.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження явища стохастичного резонансу будемо проводити за допомогою моделі нелінійного осцилятора, що імітує рух броунівської частки з двохямним потенціалом в умовах, коли на осцилятор діє зовнішній шум та сигнали різного спектрального складу.

Змоделюємо осцилятор за допомогою диференціального рівняння:

$$\dot{x} = -\frac{\delta U(x)}{\delta x} + s(t) + \xi(t) \quad (1)$$

де  $x(t)$  – координата частки,  $U(x)$  – потенціальна функція,  $\xi(t) = \sqrt{2D}n(t)$  – Гаусівський білий шум інтенсивності  $D$ , а  $s(t)$  – функція, що задає зовнішню силу.

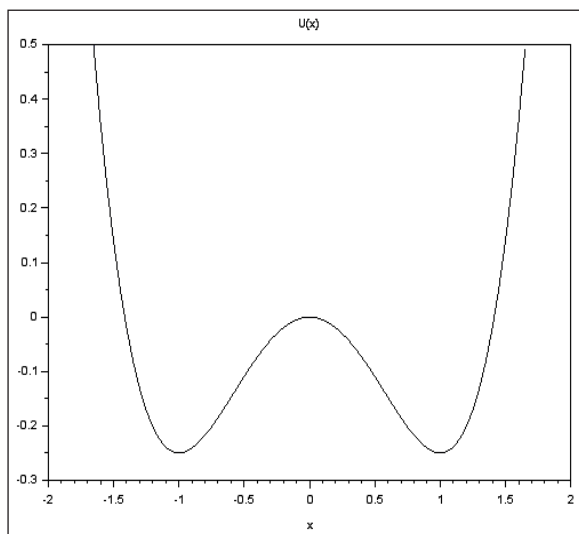


Рис. 1. Потенціал стохастичного осцилятора

Потенціал осцилятора (рис. 1) має вигляд:

$$U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4,$$

де параметри  $a$  та  $b$  впливають на положення мінімумів потенціалів  $x^- = -\sqrt{\frac{a}{2}}$ ,  $x^+ = \sqrt{\frac{a}{2}}$  та на висоту потенціального бар'єру  $\Delta U = \frac{a^2}{4b}$ .

В цій роботі дослідження проводились із значеннями параметрів  $a = 1$ ,  $b = 1$  для зручності порівняння результатів з іншими подібними роботами [3, 4].

Рівняння (1) – це стохастичне диференціальне рівняння першого порядку, з адитивним шумом і згідно теорії стохастичних диференціальних рівнянь для його розв'язання можна використовувати стандартні методи математичного аналізу [5], тому для чисельного дослідження моделі осцилятора ми використали симуляцію за допомогою пакету наукових програм Scilab.

Функція  $\varepsilon(t) = \sqrt{2D}n(t)$ , що імітує білий шум була створена за допомогою генератора випадкових чисел з розподілом Гауса (рис. 3). Генерація відбувалась у тих точках по осі  $t$ , що використовувались при розв'язанні диференціального рівняння. Дослідження осцилятора для кожного нового значення параметрів вхідного сигналу повторювалось не менше 5 разів з генерацією нової функції шуму.

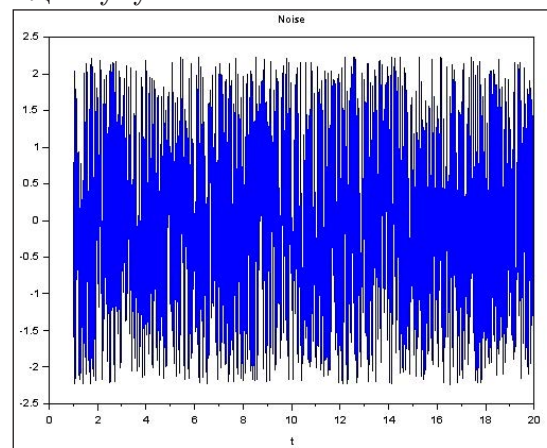


Рис. 2. Білий гаусів шум

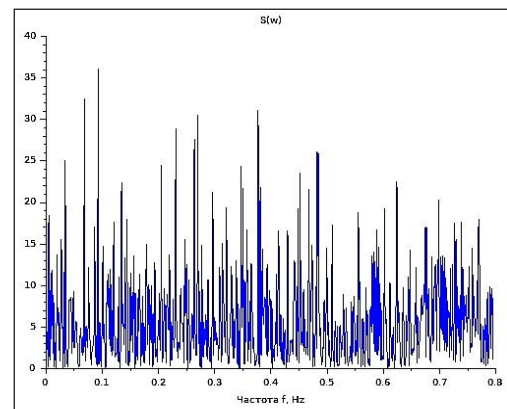


Рис. 3. Спектр частот білого Гаусівського шуму

Для оцінювання можливостей системи розпізнавати сигнал використовувався відомий у радіотехніці параметр  $SINR$ , як відношення потужності сигналу до потужності шуму. На відміну від

лінійних систем, в яких енергія спектру на виході відповідає енергії на виході, спектр нелінійної системи є більш складною структурою [6]. Вихід нелінійного пристрою утворює нові спектральні компоненти обумовлені взаємодією сигналів на вході. В цьому експерименті не ставилось за мету відтворити параметри діючого сигнал, а просто детектувати його наявність. Тому, як результат спрацювання системи на зовнішній вплив вважалась поява у вихідному спектрі компонентів з амплітудою значно більше ніж амплітуда компонентів спектру частот шуму (рис. 3). Для такого випадку рахувалось відношення SINR за формулою [7]:

$$SINR = \frac{P_s}{P_f} = \frac{\int_0^T s(t) dt}{\int_0^T [s(t) + \varepsilon(t)] dt},$$

де  $P_s$  – потужність корисного сигналу  $s(t)$ , а  $P_f$  – потужність на вході осцилятора, що складається з адитивного шуму  $\varepsilon(t)$  та корисного сигналу  $s(t)$ .

Остаточо рівняння, що чисельно досліджувалось за допомогою пакету програм Scilab виглядало так:

$$\dot{x} = -x + x^2 + s(t) + \zeta(t),$$

де  $x$  – координата частки,  $t$  – час,  $s(t)$  – корисний сигнал,  $\zeta(t)$  – білий Гаусів шум.

#### Дія на осцилятор гармонійного сигналу

Дія на осцилятор з квадратичним потенціалом гармонійного сигналу  $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \Phi)$ , добре досліджена в багатьох роботах, наприклад [5,6], але ми проведемо дослідження цієї дії з точки зору поставленої у вступі задачі.

Форма потенціалу системи передбачає наявність в ній двох квазістабільних станів, які позначимо  $x^-$  та  $x^+$ . Будемо вважати, що система знаходиться в стані  $x^-$ , якщо  $x < 0$  і в стані  $x^+$ , якщо  $x > 0$ . Дослідимо її поведінку при різних значеннях інтенсивності шуму  $D$  та за відсутності періодичного сигналу, тобто  $A=0$ .

Існує два крайні стани системи. Перший – коли значення інтенсивності шуму  $D$  досить мала і коливання осцилятора відбуваються в одному із станів  $x^-$  або  $x^+$ , як на рис. 5, другий – значення  $D$  високе і система багаторазово переходить із одного стану в інший, рис. 6.

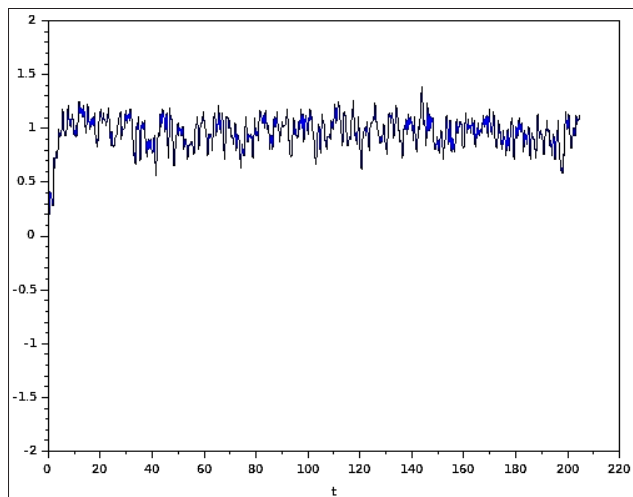


Рис. 4. Значення  $D = 0.1$ , коливання відбуваються навколо одного із положень

Інтенсивність шуму  $D$  вибиралась таким чином, щоб кількість переходів із стану в стан була незначна (рис. 7), але, в той же час, не нульовою. Цього легко досягнути при практичній реалізації пристроїв за допомогою регулювання потужності підсилення вхідного сигналу. Проведені чисельні експерименти показали, що відповідне значення інтенсивності шуму  $D=0.5$ , що близько до значення  $D=0.6$  в роботі [4].

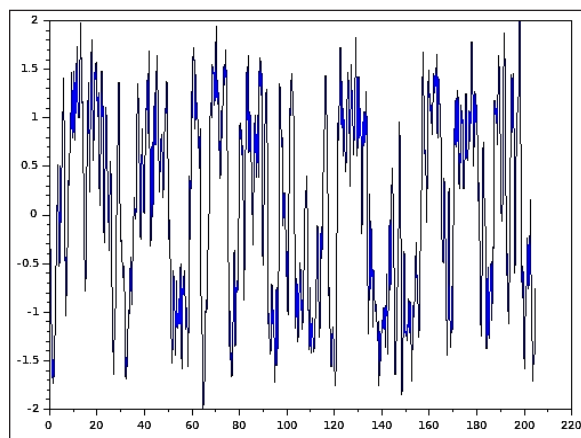


Рис. 5. Значення  $D = 4$ , система постійно переходить із стану в стан

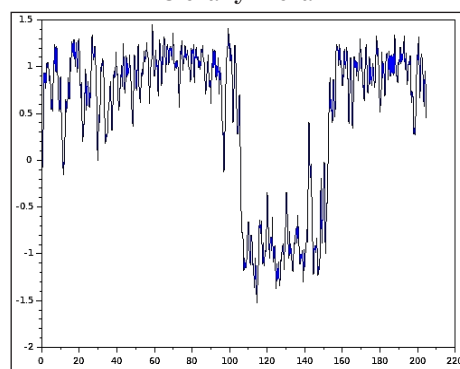


Рис. 6. Система при  $D = 0.5$

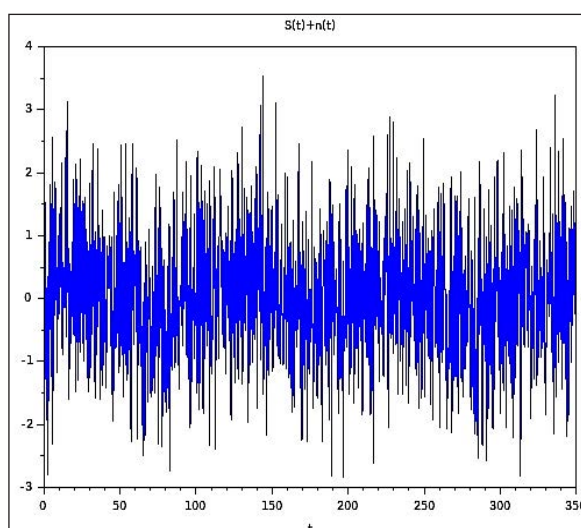


Рис. 7. Вхідний сигнал осцилятора  $D = 0.5$ ,  $A = 0.2$

Частота дискретизації була обрана згідно до рекомендацій до чисельного розв'язання стохастичних диференціальних рівнянь [5]  $f_d = 5 \text{ Гц}$ , що відповідало кроку  $dt=0.2$ . Ця частота не повинна

бути занадто високо, так як при її високих значеннях з'являється її відчутній вклад у компоненти спектру сигналу.

Далі досліджувався вплив амплітуди гармонійного сигналу (рис. 7). На вхід осцилятора подавався разом шум і гармонійний сигнал (рис. 8). Значення поступово збільшувалось до того моменту поки у спектрі вихідного сигналу її частота не починала домінувати, що дозволяло чітко детектувати наявність гармонійного сигналу. Вихід осцилятора мав вигляд як на (рис. 9). Спектр вихідного сигналу на (рис. 10). Співвідношення сигнал шум отримане в експерименті  $SINR=0.0198$ .

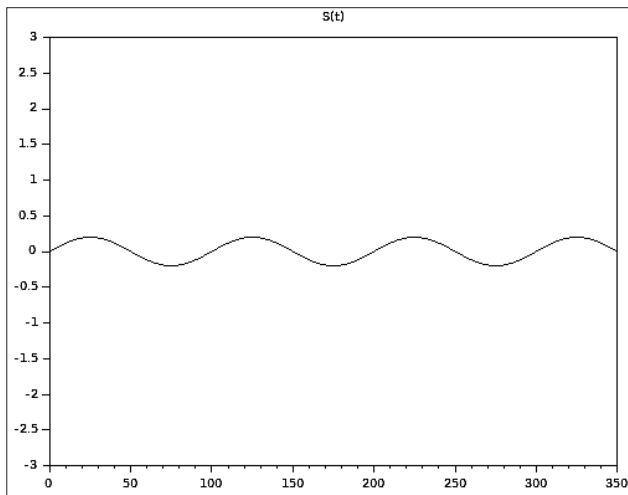


Рис. 8. Гармонійний сигнал  $A = 0.2$

Тобто теоретично система дозволяє розпізнавати гармонійні сигнали, навіть за наявності шуму з потужністю в 50 разів більше.

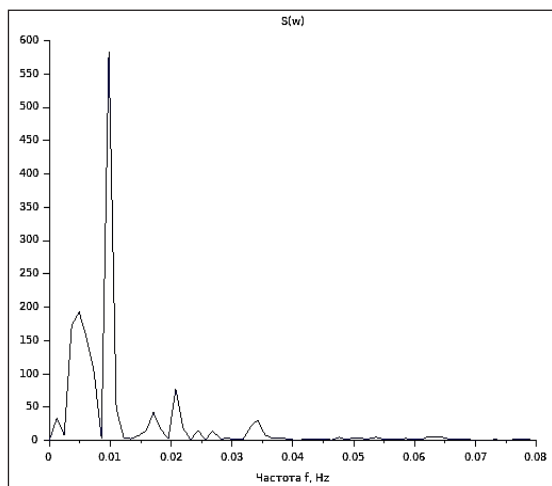


Рис. 9. Спектр вихідного сигналу

Але, водночас, суттєвим недоліком такої схеми передавання є те, що у спектрі ефірного сигналу частота гармонійного сигналу буде виділятися досить сильно і поставлена задача прихованого передавання сигналів, таким чином, повністю не вирішується. Для того, щоб повною мірою розв'язати поставлене завдання, у наступному розділі буду проведення дослідження фрактального сигналу складного спектру, що може бути прихований у ефірному шумі радіоканалу.

Загалом було проведено близько тисячі симуляцій з різними значенням інтенсивності шуму

$D$ , амплітуди  $A$  та частоти  $f_0$ . Отримані результати співпали з результатами роботи [6]. Що свідчить про коректно поставлений експеримент.

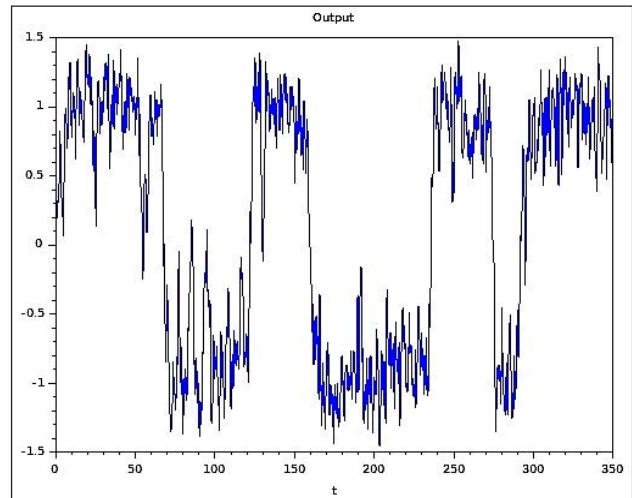


Рис. 10. Вихідний сигнал

### Дія на осцилятор фрактального сигналу

Дослідимо дію на осцилятор фрактального сигналу. Такий вибір обумовлений тим, що фрактальні сигнали мають складний спектральний склад і їх важко виділити із шумової складової без знання їх параметрів. Такого типу сигнали дозволять забезпечити умову приховування факту передачі даних від супротивника у військових системах зв'язку.

Моделювання фрактального сигналу здійснювалось на основі способу запропонованого у роботі [7]. В цій роботі були змодельовані сигналу типу фрактальний вейвлет (рис. 11). Це імпульси складної форми, спектр яких задається передканторовською множиною. Спектр фрактального вейвлету є самоподібним і його часова реалізація описується виразом:

$$s(t) = \prod_{n=0}^N \cos((1 - \varepsilon)\varepsilon^n 2\pi f_0 t),$$

де  $N \rightarrow \infty$ , але в реальному застосуванні  $N$  вибирають в залежності від  $0 < \varepsilon < \frac{1}{2}$  можливостей обладнання, а частоти спектру даного сигналу (рис. 12) зосереджені на відрізку.

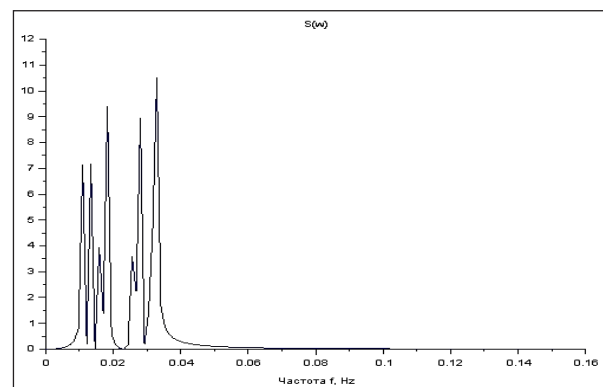


Рис. 11. Спектр фрактального вейвлету

Дослідження дії фрактального вейвлету на стохастичний осцилятор відбувалось за умови дії на осцилятор білого шуму інтенсивності

$D = 0.5$  ході проведення чисельного експерименту змінювались значення максимальної амплітуди фрактального сигналу  $A$  і граничної частоти  $f_0$  до того моменту поки спектр частот фрактального вейвлету не починав значно вирізнятися на фоні спектру білого шуму на виході із стохастичного осцилятора.

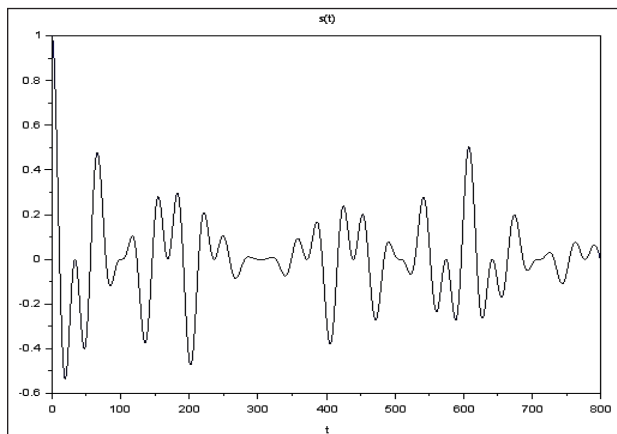


Рис. 12. Фрактальний вейвлет  $f_0 = 0.1$

Найкращий результат був отриманий для фрактального вейвлету з граничною частотою  $f_0 = 0.03$ . На рис. 13 Зображений графік стану осцилятора одночасно з вхідним корисним сигналом. Спектр вихідного сигналу на рис. 14.

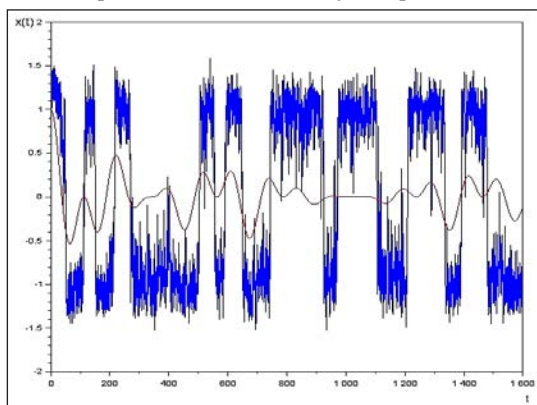


Рис. 13. Вихід осцилятора із фрактальним вейвлетом

Для порівняння на рис. 15 спектр сигналу фрактальний вейвлет із граничною частотою  $f_0 = 0.03$ .

Співвідношення сигнал шум отримане в експерименті  $SINR=0.0266$ . Цей результат дозволяє використовувати при передачі даних фрактальні сигнали з потужністю значно менше потужнос-

ті шуму. Крім того, так як фрактальний сигнал має складний спектральний склад його важко відізнати від спектру шуму і це може забезпечити приховане передавання сигналів необхідно за умови військового застосування систем зв'язку.

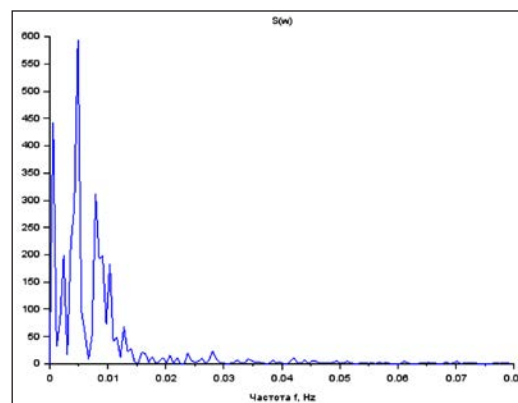


Рис. 14. Спектр вихідного сигналу

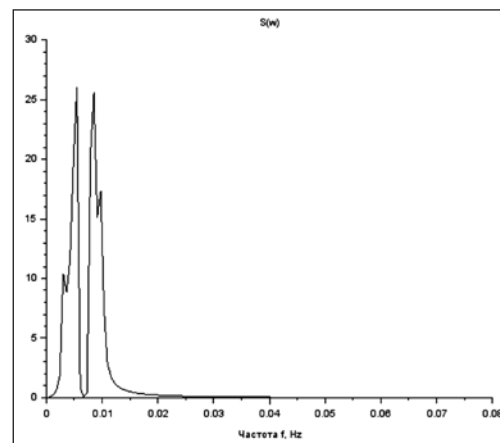


Рис. 15. Спектр фрактального вейвлету  $f_0 = 0.03$

**Висновки і пропозиції.** Проведено дослідження ефекту стохастичного резонансу на прикладі моделі стохастичного осцилятора з двох-ямним потенціалом під впливом гармонійного і фрактального сигналів. Результати отримані для гармонійного сигналу повторюють отримані в інших дослідницьких роботах [7], результати дослідження впливу фрактального сигналу демонструють ефект стохастичного резонансу в осциляторі. Проведене дослідження обґрунтовує можливість створення пристроїв передавання даних, що здатні передавати сигнали малої потужності за умови наявності шуму високої інтенсивності. Подібні пристрої можуть мати практичне застосування у військовій справі.

## Список літератури:

1. Жук О.В. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами / Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. // Тези доповідей та виступів учасників ІХ науково-практичної конференції «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». Київ. 2016 р. С. 34-44.
2. Анищенко В. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайнер Л. // Успехи физической наук. – М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 1999 – Т. 169 № 1 – С. 7-37.
3. Кузнецов Д.Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения // СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. – 786 с.
4. Scott Bloom. Принципы работы FSO – систем (перевод ООО «МОСТКОМ») [Текст] / Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, Heinz Willebrand // JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING. – June 2003, Vol. 2, № 6.4.

5. Kharchenko O. Simulation of the Stochastic Resonance Effecting a Non linear Device // Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering Volume 15 Issue 7, 2015. – С. 19-24.
6. Horsthemke W., Lefever R. Noise – induced Transitions // Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology. 1981. P. 673-682.
7. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский-Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах / М-И: из-во «Институт компьютерных исследований». 2003. С. 352-355.

**Жук А.В., Байдур А.В., Ткаченко Д.В.**

Военный институт телекоммуникаций и информатизации

**Яровой А.В.**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## **ЯВЛЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НОВЫХ УСТРОЙСТВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

### **Аннотация**

Проведено исследование эффекта стохастического резонанса на примере модели стохастического осциллятора с двухямным потенциалом под влиянием гармоничного и фрактального сигналов. Осуществлено обоснование возможности создания устройств передачи данных для беспроводных сенсорных сетей, способных передавать сигналы малой мощности при наличии шума высокой интенсивности.

**Ключевые слова:** эффект стохастического резонанса, гармоничные и фрактальные сигналы, беспроводные сенсорные сети.

**Zhuk A.V., Baydur A.V., Tkachenko D.V.**

Military Institute of Telecommunications and Informatization

**Yaroviy A.V.**

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnics Institute»

## **STOCHASTIC RESONANCE EVENT AS A BASIS FOR CONSTRUCTION OF NEW DATA TRANSFER DEVICES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

### **Summary**

The effect of stochastic resonance on the example of a stochastic oscillator model with a double potential is investigated under the influence of a harmonious and fractal signal. The feasibility of creating data transmission devices for wireless sensor networks capable of transmitting low power signals in the presence of high-intensity noise has been substantiated.

**Keywords:** effect of stochastic resonance, harmonious and fractal signals, wireless sensor networks.