

УДК 621.396

**Жук О.В.**

Інститут телекомунікацій та інформатизації

**Романюк А.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Байдур О.В.**

Інститут телекомунікацій та інформатизації

## ВИКОРИСТАННЯ ЕФЕКТУ СТОХАСТИЧНОГО РЕЗОНАНСУ ПІД ЧАС ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

*Розглянуто основні теоретичні підходи до передачі інформації моніторингу безпроводними сенсорними мережами в умовах радіоперешкод за допомогою слабого сигналу підпорогового рівня з використанням ефекту стохастичного резонансу.*

**Ключові слова:** *безпроводні сенсорні мережі, стохастичний резонанс, модель лінійного відклику.*

**Постановка проблеми.** Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) або Wireless Sensor Network (WSN) – розподілені мережі, що складаються з маленьких сенсорних вузлів, з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1].

Одним із основних завдань оперативного управління БСМ є процес моніторингу навколишнього середовища та передача отриманої інформації до базових станцій [2]. Здатність БСМ ефективно обмінюватися інформацією істотно залежить від наявності незашумленого каналу радіозв'язку. В умовах, коли рівень радіоперешкод є досить значним, забезпечити зв'язок із конкретним вузлом мережі не завжди можливо.

**Постановка завдання.** Одним із способів передавання інформації в умовах високого рівня шуму могло би стати застосування нового класу приймачів-передавачів з використанням ефекту стохастичного резонансу (СР). Ефект СР дає змогу використовувати слабкі сигнали підпорогового рівня для зміну стану нелінійної системи в умовах наявності шуму високої інтенсивності. На цей час пристрої, засновані на ефекті СР, вже активно використовуються у схемах підсилення та детектування сигналу, але ці рішення не здатні повністю вирішити завдання передачі сигналів в умовах, коли потужність передавача значно менша за потужність зовнішнього шуму [3].

Тому актуальною є науково-прикладна задача дослідження процесів впливу підпорогових сигналів в умовах значного рівня шуму на нелінійні системи з ефектом стохастичного резонансу та створення нового класу приймачів-передавачів з використанням цього ефекту.

**Виклад основного матеріалу.**

**Математичні моделі дослідження ефекту стохастичного резонансу.** Сьогодні для дослідження ефекту СР найчастіше використовують математичну модель руху броунівської частки (зі значним тертям) у двохмному потенціалі

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

під дією білого шуму та періодичної сили  $f(t) = A \cos(\Omega t + \phi)$  [4]. Рівняння руху цієї броунівської частки в безрозмірних змінних матиме вигляд:

$$\dot{x} = x - x^3 + A \cos(\Omega t + \phi) + \sqrt{2D} \cdot \xi(t),$$

де  $\xi(t)$  – білий шум,  $D$  – інтенсивність білого шуму,  $A$  – амплітуда періодичної сили,  $\Omega$  – частота періодичної сили,  $\phi$  – фазовий зсув.

На базі цієї математичної моделі було створено декілька основних теорій, таких як теорія відгуку на слабкі сигнали, теорія двох станів, теорія лінійного відгуку [3].

Розглянемо ефективність використання математичних моделей у межах цих теорій з позиції їх придатності для дослідження поставленої науково-прикладної задачі.

**Теорія відгуку на слабкий сигнал.** У межах цієї теорії для періодично збуджуваного броунівського руху в цій теорії отриманий такий результат для асимптотичного середнього відгуку  $\langle x(t) \rangle$ :

$$\langle x(t) \rangle = \sum M_n e^{in(\Omega t + \phi)},$$

де  $\langle x(t) \rangle$  – асимптотичний середній відгук,  $M_n$  – комплексні амплітуди, що залежать від інтенсивності шуму,  $\Omega$  – частота сигналу,  $A$  – амплітуда сигналу,  $\phi$  – фазовий зсув сигналу [4].

Коефіцієнт підсилення потужності  $\eta$  на основній частоті визначається як [4]:

$$\eta = \left( \frac{2|M_1|}{A} \right)^2,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт підсилення потужності,  $M_1$  – комплексна амплітуда відгуку на основній частоті,  $A$  – амплітуда сигналу.

Аналітичні вирази цієї теорії отримані за допомогою низки наближень, головне з яких – наближення малого сигналу, таким чином, що функцію відгуку можна вважати лінійною, що значно обмежує застосування теорії відгуку на слабкий сигнал у завданні дослідження процесів впливу підпорогових сигналів в умовах значного рівня шуму на нелінійні системи.

**Теорія двох станів.** У межах цієї теорії розглядають бістабільну систему, змінна стану якої може приймати всього два значення  $x(t) = \pm x_m$ , позначаючи через  $n_{\pm}(t)$  відповідні ймовірності станів з урахуванням умови нормування. Щільність імовірності станів відповідно позначимо  $\dot{n}_{\pm}$ . Отримане керівне рівняння:

$$\dot{n}_{\pm} = -[W_{\pm}(t) + W_{\mp}(t)]n_{\pm} + W_{\pm}(t),$$

де  $n_{\pm}(t)$  – ймовірність одного зі станів,  $[W_{\pm}(t) + W_{\mp}(t)]$  – відповідні щільності ймовірностей.

Пропонується, що закони зміни  $W_{\mp}(t)$  мають такий вигляд:

$$W_{\pm}(t) = r_k e^{\pm \frac{Ax_m \cos \Omega t}{D}},$$

де  $r_k$  – швидкість Крамерса,  $x_m$  – значення змінної стану,  $D$  – інтенсивність білого шуму,  $A$  – амплітуда періодичної сили,  $\Omega$  – частота періодичної сили.

Середня швидкість виходу з метастабільного стану – швидкість Крамерса  $r_k$  – в цій теорії визначається як:

$$r_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{4D}},$$

де  $r_k$  – швидкість Крамерса,  $D$  – інтенсивність білого шуму.

В умовах асимптотичної границі

$$\langle x(t) \rangle = \lim_{t_0 \rightarrow -\infty} \langle x(t) | x_0, t_0 \rangle$$

відгук системи  $\langle x(t) \rangle$ :

$$\langle x(t) \rangle = A_1(D) \cos[\Omega t + \psi(D)],$$

де  $\langle x(t) \rangle$  – асимптотичний середній відгук,  $A_1 D$  – амплітуда відгуку, що залежить від інтен-

сивності шуму,  $\Omega$  – частота сигналу,  $\psi D$  – фазовий зсув відгуку, що залежить від інтенсивності шуму.

Отриманий коефіцієнт підсилення потужності  $\eta$  визначається як:

$$\eta = \frac{4r_k^2 x_m^4}{D^2 (4r_k^2 + \Omega^2)},$$

де  $\eta$  – коефіцієнт підсилення потужності,  $r_k$  – швидкість Крамерса,  $x_m$  – значення змінної стану,  $D$  – інтенсивність білого шуму,  $\Omega$  – частота періодичної сили.

Ця теорія обмежена своїм початковий припущенням, що система має всього два значення змінної стану. Системи передачі даних у реальних умовах значно складніші, і застосувати цю теорію для них неможливо.

**Теорія лінійного відгуку.** У цій теорії відгук нелінійної стохастичної системи  $\langle x(t) \rangle$  на слабкий зовнішній вплив у границі з великими проміжками часу задається інтегральним співвідношенням [4]:

$$\langle x(t) \rangle = \langle x \rangle_{st} + \int_{-\infty}^t \chi(t-\tau, D) f(\tau) d\tau,$$

де  $\langle x \rangle_{st}$  – середнє значення незбудженої змінної стану системи, а  $f(t)$  – зовнішня збуджуюча сила,  $x(t, D)$  – функція відгуку системи. Для симетричних відносно початку координат можна припустити  $\langle x(t) \rangle = 0$ .

В умовах дії гармонічної сили відгук системи стає вираженим через сприйнятливність системи  $\chi(\Omega)$ , котра є Фур'є-образом функції відгуку:

$$\langle x(t) \rangle = A |\chi(\omega)| \cos(\Omega t + \psi),$$

де  $\langle x(t) \rangle$  – асимптотичний середній відгук,  $A$  – амплітуда відгуку,  $\Omega$  – частота сигналу,  $\psi$  – фазовий зсув відгуку,  $\chi(\Omega)$  – сприйнятливність системи.

Фазовий зсув визначений виразом

$$\psi = -\arctan \frac{\text{Im } \chi(\Omega)}{\text{Re } \chi(\Omega)},$$

де  $\psi$  – фазовий зсув відгуку,  $\chi(\Omega)$  – сприйнятливність системи на частоті сигналу.

Швидкість Крамерса  $r_k$  в цій теорії визначається так само, як і у в теорії двох станів (7):

$$r_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{4D}},$$

де  $r_k$  – швидкість Крамерса,  $D$  – інтенсивність білого шуму.

Отриманий коефіцієнт підсилення потужності  $\eta$  визначається як:

$$\eta = |\chi(\omega)|^2,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт підсилення потужності,  $\chi(\omega)$  – сприйнятливність системи.

Головним наслідком цієї теорії став висновок, що за досить низькочастотних сигналів максимум відношення сигнал/шум досягається при  $D \approx \frac{1}{8}$ .

однак зі збільшенням частоти ефект стохастичного резонансу взагалі пропадає [4].

У розглянутих теоріях як зовнішня сила розглядається вплив гармонійного сигналу малої амплітуди. Але виникає потреба у межах поставленого завдання розглянути відгук системи на багаточастотні і шумові сигнали. Теорія лінійного відгуку може бути поширена на ситуацію сигналів зі складним спектральним складом [5]. Спектральна щільність на виході матиме вигляд:

$$G_{xx}(\omega) \approx G_{xx}^{(0)}(0) + |\chi(\omega)|^2 G_{ff}(\omega),$$

де  $G(\omega)$  – спектральна щільність на виході,  $\chi(\omega)$  – сприйнятливості системи.

Розглянемо слабкий сигнал, що дає дискретний спектр, зовнішню силу  $f(t)$  представимо у вигляді ряду Фур'є:

$$f(t) = A \sum_{k=1}^M c_k \cos \Omega_k t,$$

де  $A c_k$  – амплітуди гармонік сигналу,  $\Omega_k$  – частоти гармонік сигналу.

Згідно з теорією лінійного відгуку відгук системи буде:

$$\langle x(t) \rangle = A \sum_{k=1}^M c_k |\chi(\Omega_k, D)| \cos[(\Omega_k + \psi_k)t]. \quad (1)$$

де  $A c_k$  – амплітуди гармонік сигналу,  $\Omega_k$  – частоти гармонік сигналу,  $\psi_k$  – фазові зсуви гармонік,  $\chi(\Omega_k, D)$  – сприйнятливості системи на частоті гармоніки,  $D$  – інтенсивність білого шуму.

У формулі (1) фазові зсуви  $\psi_k$  для кожної з гармонік визначаються співвідношеннями:

$$\psi_k(\Omega_k, D) = -\arctan \frac{\text{Im } \chi(\Omega_k, D)}{\text{Re } \chi(\Omega_k, D)},$$

де  $\psi_k$  – фазові зсуви гармонік,  $\chi(\Omega_k, D)$  – сприйнятливості системи на частоті гармоніки,  $\Omega_k$  – частота гармоніки сигналу,  $D$  – інтенсивність білого шуму.

Отриманий коефіцієнт підсилення потужності  $\eta$  визначається як:

$$\eta(\Omega_k, D) = |\chi(\Omega_k, D)|^2,$$

де  $\eta(\Omega_k, D)$  – коефіцієнт підсилення потужності на частоті гармоніки,  $\chi(\Omega_k, D)$  – сприйнятливості системи на частоті гармоніки,  $\Omega_k$  – частоти гармоніки сигналу,  $D$  – інтенсивність білого шуму.

Теорія лінійного відгуку з її розширенням у разі сигналів зі складним спектральним складом добре підходить для побудови математичної моделі задачі передавання сигналів підпорогового рівня з високим рівнем шуму. На базі цієї моделі можна провести чисельний експеримент і натурні досліди з метою перевірки можливості створення пристроїв приймання і передавання інформаційних радіосигналів в умовах наявності значного рівня шуму.

**Висновки.** Поставлена науково-прикладна задача дослідження процесів впливу підпорогових сигналів в умовах значного рівня шуму на нелінійні системи з ефектом стохастичного резонансу. Проведений аналіз основних теорій, що описують явище стохастичного резонансу у двоямному потенціалі, з позиції їх застосування під час моделювання в умовах поставленої задачі. Обрана модель розширена у разі сигналів складного спектрального складу теорії лінійного відгуку для проведення подальших чисельних і натурних експериментів. Вирішення цієї задачі дасть змогу створити принципово новий тип приймачів-передавачів для передачі інформації в БСМ в умовах впливу навмисних завад.

#### Список літератури:

1. Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами // Тези доповідей та виступів учасників ІХ науково-практичної конференції «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». – Київ. – 2016. – С. 34–44.
2. Романюк В.А., Жук О.В., Сова О.Я. Система управління тактичними сенсорними мережами. Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ». – Київ. – 2008. № 2. – С. 88–97.
3. Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайнер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка. Успехи физических наук // Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. 1999. – № 1. – С. 7–37.
4. Маляев В.С., Владивасова Т.Е., Анищенко В.С. Стохастический резонанс, стохастическая синхронизация и индуцированный шумом хаос в Осциляторе // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2007. Саратов. – № 5. – С. 74–82.
5. Moss F. Noise in Nonlinear Dynamical System Vol. 1 Theory of Continuous Fokker – Planck Systems Cambridge: Cambridge University Press. 1989. – 384 с.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА  
ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

*Рассмотрены основные теоретические подходы к передаче информации мониторинга беспроводными сенсорными сетями в условиях радиопомех с помощью слабого сигнала подпорогового уровня с использованием эффекта стохастического резонанса.*

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети, стохастический резонанс, модель линейного отклика.

**USE OF THE STOCHASTIC RESONANCE EFFECT  
IN TRANSMISSION OF INFORMATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

*The basic theoretical approaches to the transmission of information monitoring by wireless sensor networks in the conditions of radio interference with the help of a weak signal at the subthreshold level using the effect of stochastic resonance are considered.*

**Key words:** wireless sensor networks, stochastic resonance, linear response model.