

УДК 004.3

Шевченко Н. – ст.гр. СНа-31

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **МОДЕЛЬ ВИПАДКОВО-ЦИКЛІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ**

Науковий керівник: старший викладач Шимчук Г.В.

Shevchenko N.

*Ternopil Ivan Puluj National Technical University*

## **A RANDOM-CYCLIC PROCESS MODEL FOR FORECASTING CHANGES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS**

Supervisor: Senior Lecturer Shymchuk G.

Ключові слова: математична модель, бездротові сенсорні мережі, прогноз, тренд

Keywords: mathematical model, wireless sensor networks, forecast, trend

Бездротові сенсорні мережі широко застосовують у системах екологічного, промислового, транспортного та інфраструктурного моніторингу. Їх ефективність значною мірою залежить від того, наскільки точно система може передбачати подальшу поведінку контрольованих параметрів і стан самої мережі. Для WSN це особливо важливо через обмежений енергетичний ресурс вузлів, несталу якість радіоканалу, втрати пакетів, зміни топології та потребу мінімізувати кількість передавань. У реальних умовах значення, що реєструються сенсорами, часто змінюються не строго періодично, а квазіциклічно: повторюваність зберігається, проте тривалість циклу, його фаза та амплітуда можуть випадково відхилятися. Саме тому стандартні трендові або сезонні моделі не завжди адекватно відтворюють динаміку таких процесів.

Метою роботи є побудова математичної моделі, придатної для короткострокового прогнозування змін у WSN за умов випадкової мінливості ритму циклу та просторової залежності між вузлами. На відміну від класичних сезонних схем, запропонований підхід орієнтований не лише на оцінювання майбутнього рівня параметра, а й на прогноз його приросту або спаду, що важливо для раннього виявлення критичних тенденцій. Така постановка задачі дає змогу використовувати модель не тільки для аналітики, а й для керування режимами роботи мережі: адаптації частоти вимірювань, скорочення трафіку, локалізації аномалій і підтримки реконфігурації.

Для опису поведінки параметра у вузлі доцільно використовувати модель, у якій спостереження подається як сума чотирьох компонентів: повільного тренду, циклічної складової зі змінним ритмом, просторової поправки від сусідніх вузлів і випадкового шуму. У спрощеному вигляді це можна записати так:

$$x_i(k) = T_i(k) + C_i(\varphi_i(k)) + S_i(k) + \varepsilon_i(k) \quad (1)$$

де  $T_i(k)$  відображає зміну середнього рівня процесу,  $C_i(\varphi_i(k))$  описує квазіциклічну динаміку,  $S_i(k)$  враховує вплив просторового оточення, а  $\varepsilon_i(k)$  характеризує невпорядковані збурення. Така структура є інтерпретованою і дає можливість окремо аналізувати довготривалі тенденції, повторювані коливання та мережеву взаємодію.

Трендову частину доцільно задавати поліномом невисокого порядку, параметри якого визначаються на ковзному вікні останніх спостережень. Для практичних задач цього, як правило, достатньо, щоб відобразити повільний дрейф температури, вологості, залишку енергії або затримок передавання. Ковзне оцінювання забезпечує адаптацію моделі до нових умов без повного перенавчання, що важливо для ресурсно обмежених вузлів. Отже, тренд формує базову траєкторію процесу, відносно якої виявляються більш швидкі відхилення.

Основою циклічного опису є фазова змінна  $\varphi_i(k)$ , яка визначає внутрішній стан циклу. Її еволюція задається співвідношенням:

$$\varphi_i(k+1) = \varphi_i(k) + \omega_i + \eta_i(k), \quad (2)$$

де  $\omega_i$  є середньою швидкістю проходження циклу, а  $\eta_i(k)$  моделює випадкові відхилення ритму. Саме завдяки цій складовій модель враховує зсуви, стискання та розтягування циклів у часі. Циклічний компонент доцільно представляти гармонічним розкладом за фазою, що дозволяє описувати як прості майже синусоїдні коливання, так і складніші асиметричні профілі, характерні для природних і технічних процесів.

Для підвищення точності прогнозу необхідно використовувати просторово-часову кореляцію між сусідніми вузлами. Якщо показники кількох сенсорів змінюються узгоджено, то інформація від сусідів допомагає компенсувати локальний шум, пропуски або похибки окремого датчика. Просторову поправку можна задавати як зважену суму значень сусідніх вузлів, а вагові коефіцієнти визначати за відстанню, кореляцією часових рядів чи якістю каналу. Це особливо корисно для систем моніторингу довкілля та технічних об'єктів, де суміжні точки мають споріднену динаміку.

Прогнозування виконується послідовно. Спочатку формується вікно останніх  $L$  спостережень і оцінюються параметри тренду. Після вилучення трендової складової визначаються фазова змінна та гармонічні коефіцієнти циклічного компонента. Далі обчислюються просторові ваги та формується короткостроковий прогноз на горизонт  $h$ . Додатково визначається прогноз зміни:

$$\Delta x_i(k, h) = \hat{x}_i(k+h) - x_i(k), \quad (3)$$

який дозволяє оцінити не тільки очікуване значення, а й напрям та швидкість його зміни. Саме цей показник є особливо важливим для раннього попередження про небажані тенденції в роботі мережі. Практична значущість підходу полягає в тому, що модель може використовуватися одразу в кількох режимах. За малої прогнозованої похибки вузол здатний зменшувати частоту вимірювань і передавань, економлячи енергію. Якщо ж фактичне значення істотно відхиляється від прогнозу, система отримує підставу або для передавання нового пакета, або для фіксації аномалії. Таким чином модель придатна для адаптивної дискретизації, prediction-based data reduction, виявлення відмов сенсорів і підтримки динамічної реконфігурації WSN.

Отже, модель випадково-циклічного процесу є більш придатною для WSN, ніж класичні схеми зі сталим періодом, оскільки враховує мінливість ритму циклу та просторові зв'язки між вузлами. Її перевагами є інтерпретованість, орієнтація на прогнозування саме змін, а також можливість інтеграції у механізми керування мережею. Подальші дослідження доцільно пов'язати з програмною реалізацією моделі, експериментальною перевіркою на реальних наборах даних та порівнянням із базовими підходами типу ARIMA і SARIMA.