

ПИВОВАР ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4041-1248>e-mail: [pyvovarov@khmnu.edu.ua](mailto:pyvovarov@khmnu.edu.ua)

ГОЛЕВИЧ ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-2987-6722>e-mail: [digasgo@gmail.com](mailto:digasgo@gmail.com)

КАМЕНЯР МИКОЛА

Хмельницький національний університет

## СИНТЕЗ КРИТЕРІЮ РІВНЯ СИНХРОНІЗМУ В ХАОТИЧНІЙ СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ДОПОМІЖНИМ ГЕНЕРАТОРОМ

На даний час використання сигналів детермінованого хаосу в системах передачі інформації є перспективним напрямком наукових та прикладних досліджень завдяки їх властивостям широкосмуговості, шумоподібності, високій інформаційній ємності, можливості протистояти потужним завадам та синхронізації генераторів сигналів на приймальному та передавальному боці. В статті розглянуто ряд поступових кроків, що дозволили сформулювати універсальний критерій для визначення рівня ідентичності еволюції двох нелінійних динамічних систем в хаотичному режимі односпрямованої синхронізації системи передачі бінарного сигналу із застосуванням на приймальному боці для ідентифікації логічних рівнів допоміжної нелінійної динамічної системи.

Ключові слова: детермінований хаос, хаотична синхронізація, хаотична система зв'язку, критерій ідентичності, бінарний сигнал.

PYVOVAR OLEH, GOLEVYCH OLEG, KAMENIAR MYKOLA

Khmelnyskyi National University

## SYNTHESIS OF A CHAOTIC COMMUNICATION SYSTEM SYNCHRONIZATION LEVEL CRITERION WITH AN AUXILIARY GENERATOR

Currently, the use of deterministic chaos signals in information transmission systems represents a promising area of scientific and applied research due to their properties, including wide bandwidth, noise-like behavior, high information capacity, resistance to strong interference, and the ability to synchronize signal generators on both the transmitting and receiving sides. This paper presents a simulation model of a binary information transmission system in the Matlab/Simulink environment, based on the Rucklidge nonlinear dynamic system operating in chaotic mode.

During the transmission of binary messages, unidirectional chaotic synchronization of structurally identical Rucklidge systems occurs on the receiving side. Modulation of the chaotic channel oscillations is achieved by altering the bifurcation parameters of the nonlinear transmitter system. The identification of received logical levels and the information message is accomplished by determining the level of chaotic synchronization between the two nonlinear dynamic Rucklidge systems on the receiving side. The applied criterion for the similarity of the evolution of chaotic systems on both the receiving and transmitting sides determines the accuracy of logical level identification.

The selection of the synchronization criterion directly impacts the system's tactical characteristics, including immunity to interference, sensitivity to nonlinear distortions, bandwidth, and more. The evolution of chaotic generators is proposed to be compared by utilizing the energy difference of signals from driven nonlinear dynamic systems. Several implementations of the energy criterion were considered, and their impact on the parameters of information signal transmission under conditions of additive interference and nonlinear channel distortions was modeled. As a result of this research, a universal criterion for the level of chaotic synchronization is proposed, involving the normalized energy difference of the signals from the main and auxiliary driven chaotic generators across all phase variables.

Research on the system model for various levels of interference and distortions has shown that the proposed criterion is weakly sensitive to additive noise up to -10 dB and nonlinear channel signal distortions, such as bilateral clipping and step changes in the transmission line up to 20%. This finding allows for the application of this method in logical level identification amid strong interference and moderate nonlinear distortions.

Keywords: deterministic chaos, chaotic synchronization, chaotic communication system, identity criterion, binary signal.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Побудова нелінійних моделей транспортування сигналів потребує більш узагальненого підходу та введення в практику передачі сигналів нових понять, таких як атрактор, детермінований хаос, фрактальність, дисипація тощо. Відкриття явища появи хаотичної поведінки в нелінійних динамічних системах та доведення ряду властивостей взаємодії систем із хаотичними режимами створило підґрунтя для побудови неklasичних систем передачі інформації, що мають ряд суттєвих потенційних переваг над існуючими [1].

Як показала практика імітаційного моделювання використання сигналів детермінованого хаосу у багатьох заводових ситуаціях є більш доцільним, а отримані результати відповідають більш комплексному підходу до завдань захисту інформації, забезпечення підвищення інформаційної ємності, збереження енергетичної ефективності, тощо. [3-7].

Зазвичай усі погоджуються, що нелінійний підхід до проектування засобів телекомунікацій є необхідним та доцільним, але недостатність теоретичних знань застосування нелінійних ефектів «відлякують» розробників від практичного застосування подібних технологій через розгляд хаотичної поведінки як деструктивного явища [8].

Головна особливість нелінійних динамічних систем – це явище самоорганізації та чутливість до слабких флуктуацій початкових станів, що дозволяє реалізовувати засоби телекомунікацій, які впевнено працюють із рівнями сигналів набагато меншими за природні завади. Таким чином вирішується головне завдання передачі сигналів – збільшення відношення сигнал-завада під час обробки за допомогою відносно невеликої кількості технічних засобів, що забезпечує перспективність подібних підходів під час побудови сучасних систем електронних комунікацій.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Під час хаотичних режимів роботи фіксують зростання темпів самоорганізації поведінки системи на структурному рівні, що особливо виразно проглядається в зонах біфуркації. Саме наявність хаотичних режимів спонукає до руйнування минулих структур та побудови інших із хаосу, або формування, відокремлення, виділення впорядкованості із структур, що із класичних позицій розглядаються як деструктивні елементи [2].

Крім того важливим елементом хаотичної динаміки є обов'язкова необхідність флуктуацій [5], або з точки зору передачі інформації – шумоподібних завад. Саме так виникають синергетичні процеси самоорганізації, власні дивні атрактори і навіть хаотична синхронізація та нелінійна симетрія, що не може існувати в інших умовах. Отже в нелінійних системах шумоподібні завади є необхідною умовою функціонування та носять конструктивний характер під час обробки телекомунікаційних сигналів [3].

Аналоговий генератор детермінованого хаосу (ГДХ) складається як мінімум із трьох основних компонент: нелінійного елемента, інерційної структури та зворотного зв'язку, а також мати щонайменше три незалежні неперервні фазові змінні та хоча б один біфуркаційний параметр керування встановленням хаотичних режимів [2-4]]. Зацікавленість фахівців електронних комунікацій хаотичними системами зв'язку обумовлена відкриттям явища хаотичної синхронізації та хаотичного синхронного відгуку. На даний момент виділено ряд способів як забезпечення синхронізації ГДХ, так і способів хаотичної модуляції, які не мають аналогів в класичних системах [1-3].

Умовою будь якої синхронізації є двобічний обмін енергією між рознесеними системами. Якщо таким чином взаємодіють нелінійні системи (НС) то утворюється єдиний ГДХ із розподіленими параметрами, що суттєво ускладнює побудову його моделі. Тому в практиці хаотичного зв'язку застосовують однобічну хаотичну синхронізацію однакових за структурою ГДХ. В таких умовах ГДХ на приймальному боці (ведений) із часом повторює еволюцію ГДХ на передавальному боці системи зв'язку. Такий спосіб синхронізації називають повною або ідентичною хаотичною синхронізацією. Однак, навіть за умови ідентичних структур ГДХ, запуск процесу хаотичної синхронізації з загальному випадку не гарантується, але численними моделюваннями наявність такого способу синхронізації можливо вважати доведеним [3-8].

Контроль наявності синхронізації між ГДХ можливий декількома способами, найбільш відомими із яких є спосіб обчислення метрики суміжних траєкторій, спосіб обчислення показників Ляпунова та спосіб допоміжного генератора (узагальненої системи) тощо [3]. Способи контролю наявності синхронізації між віддаленими ГДХ можливо використати для детектування передачі інформаційного бінарного сигналу, де наявність/відсутність синхронізації ГДХ говорить про передачу логічних рівнів 1/0. В такому випадку якість контролю синхронізації безпосередньо впливає на якість передачі інформаційного сигналу, тому синтез найбільш оптимального критерію є актуальним завданням в теорії хаотичних систем зв'язку.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** встановлення оптимального критерію для порівняння еволюції хаотичних генераторів що синхронізуються в системі передачі бінарної інформації.

#### Виклад основного матеріалу

Хаотична система зв'язку (рис.1) для проведених досліджень складається із трьох ГДХ однакової структури, які будемо називати ведучим, основним і допоміжним. Режим ідентичної (повної) синхронізації між ведучим та веденими ГДХ виникає за умови «сильного» зв'язку (більше 50%) [2-4]. На практиці встановити повну 100% ідентичність еволюції всіх ГДХ можливо тільки асимптотично із зростанням часу. Введення інформаційного бінарного сигналу в хаотичний (рис.1) реалізується через маніпуляцію біфуркаційними параметрами ведучого генератора, в результаті чого характер його хаотичної динаміки дещо змінюється але в межах діючого атрактора.

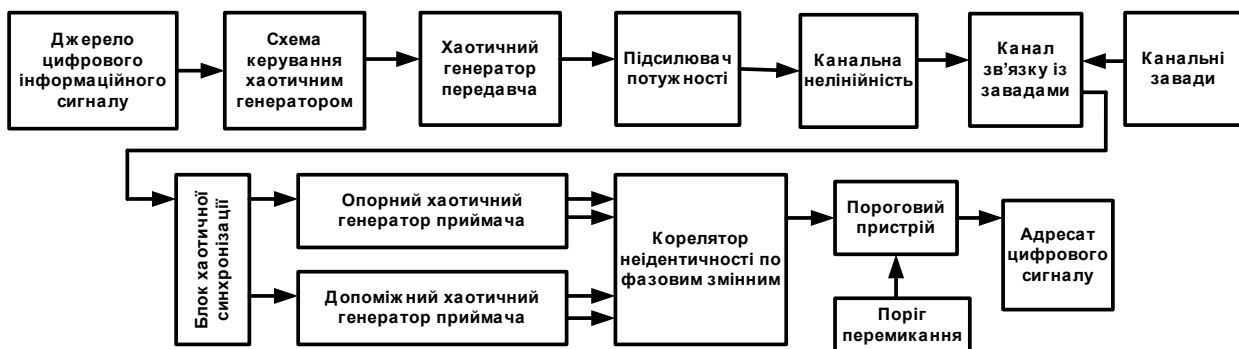


Рис.1. Структурна схема цифрової хаотичної системи зв'язку

Такий хаотичний шумоподібний сигнал діє в лінії передачі та є стійким до впливу завад та спотворень за умови певного вибору параметрів ГДХ та параметрів модуляції як на приймальному так і на передавальному боці [3]. Детектування бінарного сигналу ґрунтується на порівнянні динаміки синхронізації основного та допоміжного ГДХ із різними значеннями біфуркаційних параметрів між собою. Найбільш тривіальний та бажаний випадок такої схеми передачі для користувача є ситуація, коли під час передачі одного логічного рівня основний та допоміжний генератор входили в повний синхронізм із ведучим, а під час другого логічного рівня синхронізація ведених генераторів була відсутня.

Для отримання інформаційного повідомлення із більшим рівнем достовірності слід зважати на ряд факторів: реалізувати оптимальний вибір параметрів біфуркації та параметрів ініціалізації усіх ГДХ; врахувати рівень завад та спотворень в каналі зв'язку; забезпечити режим сильного зв'язку між ведучим та веденими генераторами та його нормування; оптимальним чином обрати критерій ідентичності еволюцій ГДХ на приймальному боці і не тільки обрати але і відслідковувати динаміку його змін із часом [4].

Формальна модель дослідження динаміки синхронізації/десинхронізації (рис.2) в рамках вибору найбільш оптимального критерію ідентичності еволюції двох рознесених у просторі ГДХ реалізована на базі хаотичних станів НДС Rucklidge [2,3], що має три фазові змінні (3D) та два біфуркаційних параметри. Встановлено [2], що сигнали різних фазових змінних такої НДС можуть із різними ступенями ефективності бути застосовані як каналні сигнали системи (рис.1) в умовах хаотичної ідентичної синхронізації. Крім того для забезпечення синхронізації декомпозиція структури хаотичних генераторів для введення сигналу ведучого генератора має бути реалізована певним чином [2].

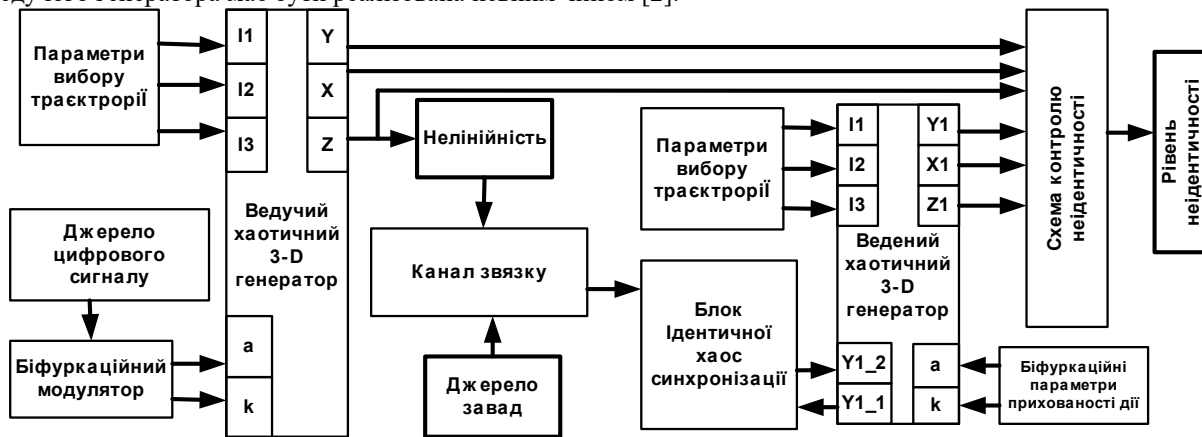


Рис.2. Структурна схема формальної моделі досліджень

Під час синхронізації основного та допоміжного ГДХ на приймальному боці системи (див.рис.1) реалізація порівняння за певним критерієм ідентичності має забезпечувати швидке та надійне виявлення факту входження в синхронізм обох ГДХ. Найбільш простим та інтуїтивно зрозумілим є кореляційний критерій синхронізації, або міра ідентичності сигналів за рівнем різницевої енергії сигналів, що виглядає як:

$$\delta_{\eta\Sigma} = \frac{1}{T_I} \int_0^{T_I} (\eta_m - \eta_s)^2 dt \quad (1)$$

де  $T_I$  - час дослідження рівня синхронізації двох ГДХ, що має бути співмірний із бітовим інтервалом інформаційного повідомлення;  $\xi_m; \xi_s$  - сигнали однойменних фазових змінних на виходах ГДХ (ведучого та веденого або основного та допоміжного), що синхронізуються.

В дискретній системі моделювання Matlab/Simulink аналітична реалізація критерію (1) виглядатиме як:

$$\delta_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\eta_{m_k} - \eta_{s_k})^2 \quad (2)$$

де  $N$  - кількість поточних вибірок, кількість яких еквівалентна часу інтегрування (бітовому інтервалу);  $\eta_{m_k} - \eta_{s_k}$  - поточна різниця між вибірками однієї фазової змінної але різних ГДХ, що синхронізуються.

Реалізація блоку Simulink за виразом (2) складається із віднімача двох хаотичних сигналів, наступного квадратора і дискретного інтегратора-накопичувача (рис.3).

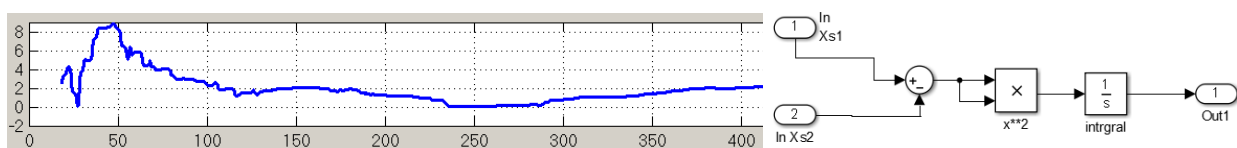


Рис.3. Результат ідентифікації логічних рівнів (ліворуч) під час роботи енергетичного корелятора двох хаотичних сигналів Simulink (праворуч)

Для порівняння результатів визначення ідентичності під час передачі логічного нуля і логічної одиниці паралельно аналізувалась роботи системи із встановленням біфуркаційних параметрів модуляції для різних логічних рівнів (рис.4). Параметри каналу передачі логічної 1 (верхня частина схеми рис.4) відповідають максимальному рівню синхронізації двох ведених генераторів, а каналу передачі логічного нуля – мінімальній синхронізації або десинхронізації взагалі.

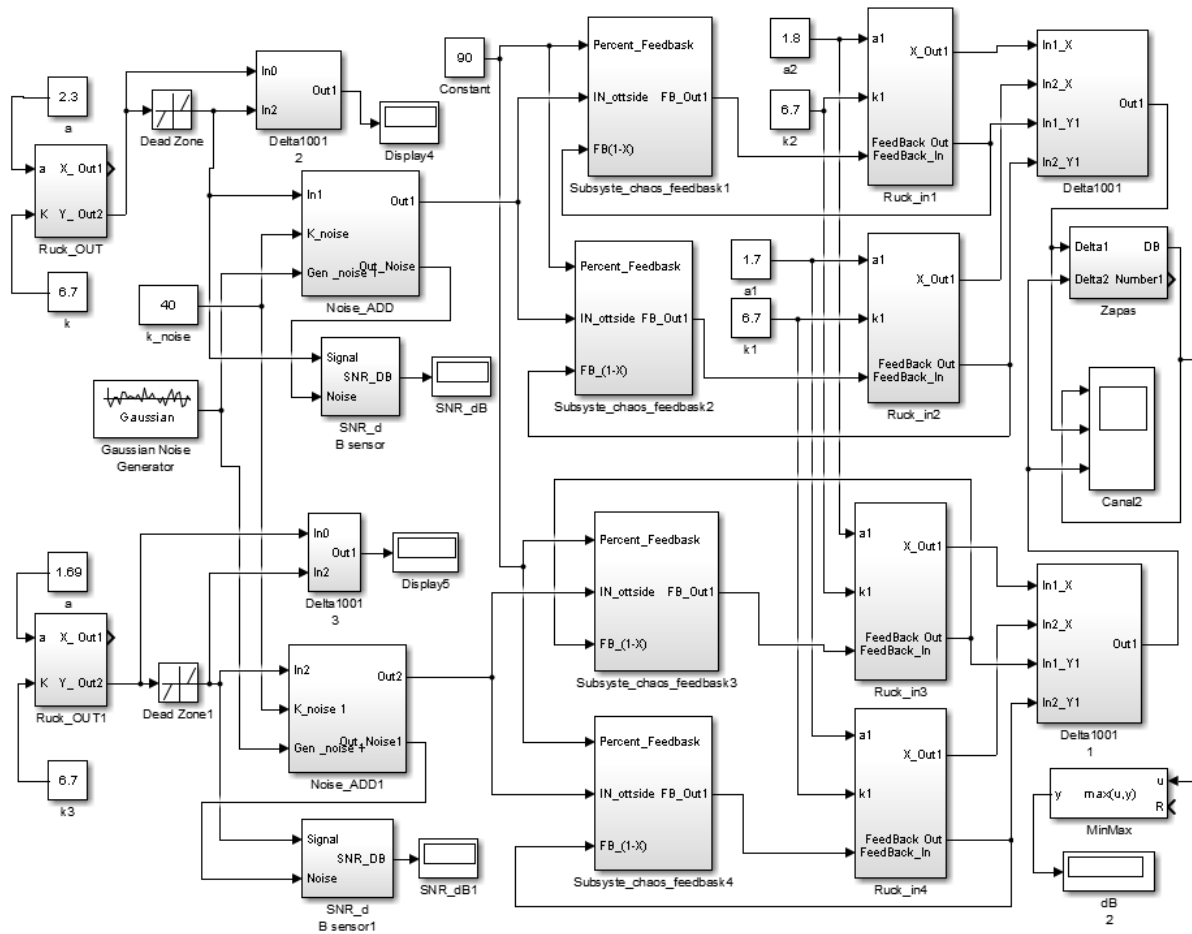


Рис.4. Модель Simulink для оптимізації критерію ідентичності в бінарній хаотичній системі зв'язку

В результаті роботи моделі (рис.4) маємо пару значень рівня неідентичності еволюції для різних логічних рівнів інформаційного сигналу, відношення яких слушно вибрати критерієм правильного або неправильного прийому переданого логічного рівня або критерієм ідентифікації логічних рівнів. За умови використання критерію ідентифікації (3) в логарифмічній формі алгоритм роботи пристрою як оптимального приймача представляється як:

$$10 \lg \left( \frac{\delta(1)}{\delta(0)} \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \log."1" \\ \log."0" \end{matrix} \quad \xi(\text{дБ}), \quad (3)$$

де  $\delta(1), \delta(0)$  - значення критерію синхронізації основного та допоміжного ведених ГДХ під час передачі рівня логічної одиниці та логічного нуля відповідно;  $\xi(\text{дБ})$  - значення порогу ідентифікації логічних рівнів, що має значення більше нуля.

Результати досліджень за використанням критерію (3) у схемі (див. рис.4) демонструють асимптотичне входження в синхронізм обох ведених генераторів, але один із робить це швидше за інший в межах початкової ділянки часу (див.рис.3). Поріг ідентифікації для використання критерію синхронізму (2) слід обирати в межах 3-6дБ. Перевагою кореляційного способу ідентифікації за (2) є швидкість подання результатів та простота обчислень, а вагомим недоліком – суттєва залежність значення критерію ідентифікації в межах початкової ділянки, що утруднює вибір бітового інтервалу для інформаційного повідомлення та збільшує кількість можливих помилок ідентифікації, а отже зменшує якість переданого бінарного повідомлення.

Для усунення частини вказаних недоліків під час ідентифікації логічних рівнів в схемі досліджень (див.рис.4) запропоновано скористатись вбудованими в Simulink засобами обрахунку поточного середньоквадратичного значення (RMS), в результаті алгоритм обрахунку рівня ідентичності має аналітичний вигляд:

$$\delta_{2\eta} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( RMS \{ \eta_{s1_k} - \eta_{s2_k} \} \right)^2 \quad (4)$$

де  $\eta_{s1_k} - \eta_{s2_k}$  - поточна різниця між вибірками однієї фазової змінної різних ведених ГДХ, що синхронізуються. Сам алгоритм (4) фактично є процедурою подвійного інтегрування поточних значень вибірок сигналу та еквівалентний сигнальній обробці додатковим фільтром низьких частот (ФНЧ), що призводить згладжування результатів (рис.5). При цьому поріг ідентифікації слід обирати в межах 2-4дБ.

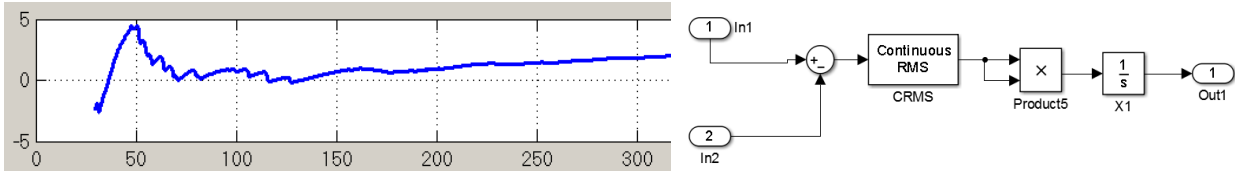


Рис.5. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії із подвійним інтегруванням в системі Simulink (праворуч)

За однакових вихідних умов використання критерію (4) порівняно із критерієм (2) підтверджує припущення про «згладжування» залежності, однак зменшується зона ідентифікації або діапазон можливих бітових інтервалів для інформаційного сигналу на початкових ділянках залежності (рис.5). Із збільшенням часу аналізу значення критерію ідентифікації монотонно зростають, що автоматично покращує якість розпізнавання логічних рівнів але суттєво зменшує інформаційну пропускну спроможність.

Наступним кроком оптимізації значення рівня ідентичності еволюції ГДХ є спроба використання декількох фазових змінних в рамках 3D простору атрактора:

$$\delta_{x,y,z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 (\xi_{i1} - \xi_{i2})^2, \text{ де } \xi_1 \rightarrow x, \xi_2 \rightarrow y, \xi_3 \rightarrow z, \quad (5)$$

де  $\xi_1 \rightarrow x, \xi_2 \rightarrow y, \xi_3 \rightarrow z$ , відповідність між узагальненими фазовими змінними та фазовими змінними в 3D ГДХ. Численними дослідженнями встановлено, що різні фазові змінні двох ведених генераторів хаосу синхронізуються приблизно однаково завдяки роботі в межах одного атрактора, а використання умови (5) може дати потенційно кращі результати відносно попередніх через опосереднення входження в синхронізм різних фазових змінних. Наприклад, за умови використання лише двох фазових змінних критерій неідентичності має наступний вигляд:

$$\delta_3 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ (x_{s1_k} - x_{s2_k})^2 + (y_{s1_k} - y_{s2_k})^2 \right], \quad (6)$$

де  $x, y$  - фазові змінні, сигнали які не мають постійної складової (знакозмінні сигнали).

Симуляція значення критерію (6) для ідентифікації логічних рівнів (рис.6) за умови використання лише двох фазових змінних порівняно із попередніми випадками (див.рис.4,5) дала можливість суттєво зменшити нерівномірність на початковій ділянці роботи та сформулювати ідею ідентифікації в момент максимального значення. Це дозволяє приблизно на 50% скоротити час аналізу рівня синхронізму ГДХ і, таким чином, збільшити продуктивність обробки за інформаційним сигналом. На практиці максимум легко визначається піковим вольтметром і таке схемотехнічне рішення не призводить до невиправданих зайвих апаратурних витрат на прийняття рішення про ідентифікацію певного логічного рівня.

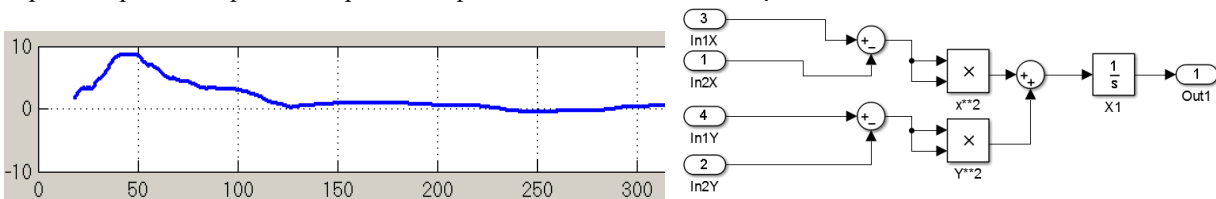


Рис.6. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії із використанням декількох фазових змінних в системі Simulink (праворуч)

Об'єднуючи дві останні ідеї щодо визначення рівня збігу еволюції ГДХ, що синхронізуються легко удосконалити критерій (6) через використання вбудованої функції поточного визначення середньоквадратичного значення (RMS) за двома фазовими змінними як:

$$\delta_4 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \left( RMS \{ x_{s1_k} - x_{s2_k} \} \right)^2 + \left( RMS \{ y_{s1_k} - y_{s2_k} \} \right)^2 \right], \quad (7)$$

Застосування алгоритму ідентифікації (8) рівня синхронізації обробки виявився найбільш доцільним серед вищезазначених завдяки відсутності локальних екстремумів, гладкості кривої та стабільному додатному значенню критерію ідентифікації, що дозволяє використовувати бітові інтервали інформаційного сигналу в широких межах за умови порогу ідентифікації 4-6дБ.

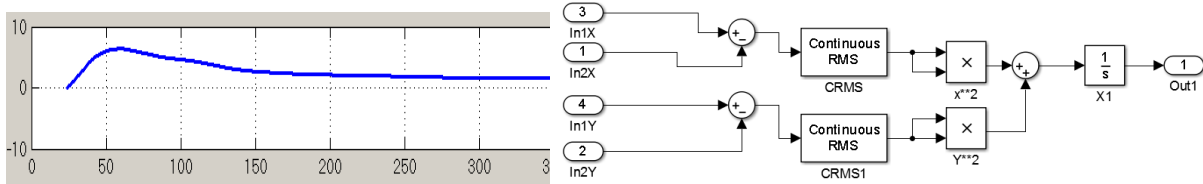


Рис.7. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії двох фазових змінних із використанням подвійного інтегрування в системі Simulink (праворуч)

Наступний крок оптимізації критерію ідентичності для 3D ГДХ за (7) можливо отримати через розуміння факту роботи обох ведених генераторів в близьких, але загалом в різних хаотичних режимах. Тому в критерій доцільно ввести обрахунок поточного значення енергій хаотичних сигналів різних фазових змінних, що будуть виступати нормуючим фактором такої відмінності. Застосування вказаних особливостей для (7) з аналітичної точки зору виглядатиме як:

$$\delta_5 = \sum_{k=1}^N \left( \frac{RMS\{x_{s1_k} - x_{s2_k}\} + RMS\{y_{s1_k} - y_{s2_k}\}}{RMS\{x_{s1_k}\} + RMS\{x_{s2_k}\} + RMS\{y_{s1_k}\} + RMS\{y_{s2_k}\}} \right), \quad (8)$$

а для випадку аналогових ГДХ із розмірністю D (3,4,5...) вираз критерію ідентичності хаотичної еволюції двох ведених генераторів (8), що синхронізуються виглядатиме як:

$$\delta_{5D} = \sum_{i=1}^D (RMS\{\eta_{iS1} - \eta_{iS2}\})^2 / \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^2 RMS\{\eta^2_{iSj}\}, \quad (9)$$

де  $\eta_{iSj}$  - поточне значення  $i$ -ї фазової змінної для  $j$ -го веденого генератора, що синхронізуються одним ведучим генератором. Проведення симуляції для найбільш складним критерієм (8) показало ряд переваг отриманої залежності (рис.8) ідентифікації логічних рівнів, що в першу чергу полягають в однозначності максимуму та мінімізації часу аналізу, що позитивно позначається як на зменшенні коефіцієнту помилок передачі інформаційного сигналу так і на збільшенні його пропускної спроможності.

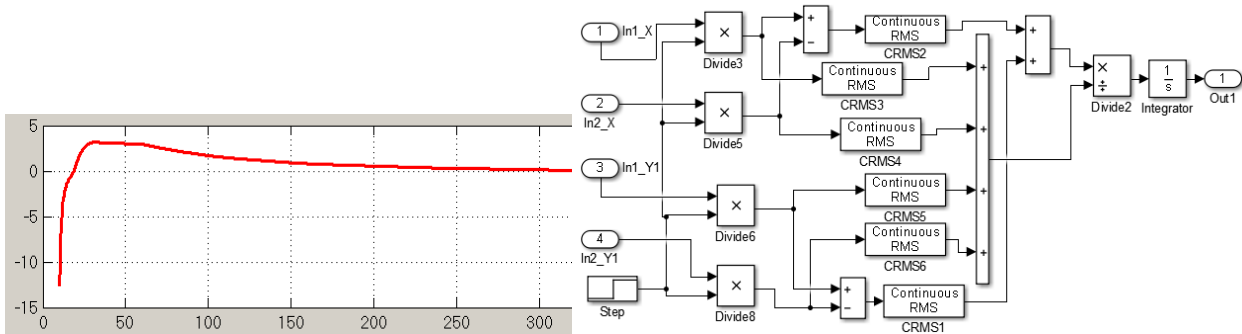


Рис.8. Реалізація обрахунку рівня ідентифікації (ліворуч) за критерієм різницевої енергії двох фазових змінних та нормуванням за енергією фазових змінних в системі Simulink (праворуч)

Часова залежність (рис.8) рівня ідентичності має яскравий максимум, що відповідає декільком десяткам елементарних циклів атрактору НДС Rucklidge, після набуття максимуму поточні значення залежності поступово зменшуються до рівня 0, що означає схожість еволюцій ведених генераторів із зростанням часу через наявність сильного зв'язку із ведучим генератором. Застосування критерію ідентичності (9) легко реалізувати на практиці для побудови діючих систем прихованого хаотичного зв'язку, також застосування нормування за енергією дає можливість використання максимальної кількості незалежних фазових змінних.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Шляхом поступової оптимізації тривіального кореляційного енергетичного критерію різницевої енергії та симуляції його використання в системі цифрового хаотичного зв'язку на базі нелінійної динамічної системи Rucklidge із допоміжним веденим генератором за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink запропоновано критерій, що дозволяє забезпечити більш високу точність та пропускну спроможність передачі інформаційного повідомлення та забезпечити універсальність використання в умовах застосування хаотичних генераторів високих розмірностей.

Також запропонований критерій виявився слабо чутливий до адитивних завад на рівні до -10дБ та нелінійних спотворень каналного сигналу типу двобічне обмеження та сходинка в лінії передачі до 20%, що дозволяє застосовувати подібний спосіб ідентифікації логічних рівнів за умови потужних завад та помірних нелінійних спотворень.

У подальших дослідженнях планується сформулювати критерії для вибору біфуркаційних параметрів генераторів детермінованого хаосу в умовах передачі багаторівневих цифрових інформаційних сигналів під час дії системних завад від аналогічних хаотичних систем зв'язку.

## Література

1. Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics / [Editors: Larson L.E., Liu J. – M., Tsimirng L.S. – New York : Springer. – 2006. – 382 p.
2. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія / Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М.М. Климаш, Р. Л. Політанський; Нац. ун–т «Львів. політехніка».– Львів: Коло, 2015. – 178 с.
3. Pyvovar, O.S., Polikarovskyykh, O.I.A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477566.
4. Golevych.O, Pyvovar. O. Dumenko.P "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences Открытый доступ Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.
5. Пивовар О. С. Полігармонічний виявник слабких сфигмометричних сигналів/ О. С.Пивовар, С. К.Підченко, А. А.Таранчук // Вісник ХНУ. - 2022. - №2 – С.133-141.
6. Пивовар О.С. Застосування сигналів детермінованого хаосу для систем ближньої навігації мобільних роботів/О.С. Пивовар, О.О. Михальчук, І.О. Веремійчук// Вісник ХНУ. - 2019. - №6 – С.149-154.
7. Пивовар, О. С. Моделювання генераторів хаосу для використання в UWB системах обробки [Текст] / О. С. Пивовар, С. Р. Павлінський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 6. – С. 207-211.
8. Chapeau-Blondeau, F., Rousseau, D., Constructive action of additive noise in optimal detection // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 15, No. 9, 2005. pp. 2985 – 2994.
9. Рябенський В.М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакету прикладних програм MATLAB/Simulink). Навчальний посібник / Під редакцією проф. В.М. Рябенського. – Львів: новий Світ – 2000, 2008. – 385 с.

## References

1. Digital Communications Using Chaos and Nonlinear Dynamics / [Editors: Larson L.E., Liu J. – M., Tsimirng L.S. – New York : Springer. – 2006. – 382 p.
2. Pry'kladne zastosuvannya teoriyi haoty'chny'x sy'stem u telekomunikaciyax: monografiya / Yu. Ya. Bobalo, S. D. Galyuk, M.M. Kly'mash, R. L. Politans'ky'j; Nacz. un–t «L'viv. politexnika».– L'viv: Kolo, 2015. – 178 c.
3. Pyvovar, O.S., Polikarovskyykh, O.I.A System of Secure Communication with Chaos Masking Based on Rucklidge Generators, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477566.
4. Golevych.O, Pyvovar. O. Dumenko.P "Synchronization of non-linear dynamic systems under the conditions of noise action in the channel", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences Открытый доступ Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76 DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.
5. Py'vovar O. S. Poligarmonichny'j vy'yavny'k slabky'x sfigmometry'chny'x sy'gnaliv/ O. S.Py'vovar, S. K.Pidchenko, A. A.Taranchuk // Visny'k XNU. - 2022. - #2 – S.133-141.
6. Py'vovar O.S. Zastosuvannya sy'gnaliv determinovanogo xaosu dlya sy'stem bly'zhn'oyi navigaciyi mobil'ny'x robotiv/O.S. Py'vovar, O.O. My'xal'chuk, I.O. Veremijchuk// Visny'k XNU. - 2019. - #6 – S.149-154.
7. Py'vovar, O. S. Modelyuvannya generatoriv xaosu dlya vy'kory'stannya v UWB sy'stemax obrobky' [Tekst] / O. S. Py'vovar, S. R. Pavlins'ky'j // Visny'k Xmel'ny'cz'kogo nacional'nogo univ'ersy'tetu. Texnichni nauky'. – 2012. – # 6. – S. 207-211.
8. Chapeau-Blondeau, F., Rousseau, D., Constructive action of additive noise in optimal detection // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 15, No. 9, 2005. pp. 2985 – 2994.
9. Ryaben'ky'j V.M. Osnovy' modelyuvannya sy'stem i procesiv v elektrotexnici (Vy'kory'stannya paketu pry'kladny'x program MATLAB/Simulink). Navchal'ny'j posibny'k / Pid redakciyeyu prof. V.M. Ryaben'kogo. – L'viv: novy'j Svit – 2000, 2008. – 385 s.