

ПІВОВАР О. С.

<https://orcid.org/0000-0002-4041-1248>  
[opyvovar2@gmail.com](mailto:opyvovar2@gmail.com)

ПІДЧЕНКО С. К.

<https://orcid.org/0000-0001-9488-1782>  
[sergpchn@gmail.com](mailto:sergpchn@gmail.com)

ТАРАНЧУК А. А.

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-9686-8784>  
[allatr@ukr.net](mailto:allatr@ukr.net)

## ПОЛІГАРМОНІЧНИЙ ВИЯВНИК СЛАБКИХ СФІГМОМЕТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Показана можливість та доцільність виявлення слабких сигналів сфінгометричних сенсорів за допомогою застосування нелінійних динамічних систем із хаотичними режимами роботи. Розроблено імітаційні моделі сфінгометричних сигналів та їх хаотичних виявників на базі нелінійної системи Дафінга. Проведено дослідження моделей в широкому полі параметрів нелінійних динамічних систем в рамках хаотичного виявника. Доведена можливість виявлення полігармонічних сигналів сфінгометричних сенсорів на тлі потужних флукуаційних завад через застосування нелінійних способів обробки в реальному часі.

Ключові слова: нелінійна система, хаотичний генератор, полігармонічний сигнал, хаотичний виявник.

OLEG PYVOVAR, SERHII PIDCHENKO, ALLA TARANCHUK,  
Khmelnytskyi National University

## POLYHARMONIC DETECTOR OF WEAK SPHYGMOGRAPHIC SIGNALS

The application of chaotic modes of nonlinear dynamics is valid within the process of description and study of circulatory processes in the human body. Such an approach can potentially ensure the most plausible reproduction and reliability of the detection of weak biological images of signals in conditions of powerful interference arising from other systems of the human body and through external influences.

The essence of the method of detecting polyharmonic signals by a chaotic detector is to use sharp transitions between chaotic and periodic modes of operation during the action of the detected signal. The weak signal processing circuit is actually a nonlinear filter with a certain frequency resource. The simulation of the nonlinear Duffing system allowed us to conclude that the frequency resource of such a chaotic detector is sufficient to detect not only weak harmonic but also polyharmonic signals against the background of powerful fluctuation noise. In this case, the operating frequency range of the chaotic detector is up to a decade, and the reaction of the nonlinear system in the phase plane with respect to the action of the harmonic signal generally does not change.

A simulation model (Simulink) and a reconstruction of sphygmometric sensor signals for modeling in conditions of powerful interference were developed. The possibility of detecting a polyharmonic signal with a high level of reliability under the condition of signal-to-noise ratio up to -20 dB, and with a permissible level of reliability – up to -37 dB in real time, is shown. The possibility of detecting polyharmonic signals by a chaotic detector in the conditions of fluctuating non-Gaussian noise according to different criteria of discrimination of chaotic generator operating modes is also confirmed.

The confirmed properties of the chaotic detector allow the analysis and diagnosis of the human condition according to the main first harmonics of the spectrum of the weak sphygmometric signal, which determine the nature of the disease of the cardiovascular system. The proposed method of detecting sphygmometric signals by the chaotic detector can be used for non-contact study of pulse wave signals by remote non-contact sensors, the work of which is associated with the appearance of a high level of interference ..

Keywords: nonlinear system, chaotic generator, polyharmonic signal, chaotic detector.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

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

За даними звітів міжнародної організації здоров'я (МОЗ) захворювання серцево-судинної системи є домінуючою причиною летальних випадків світової популяції людей. Жоден інший фактор не викликає стільки невідворотних втрат серед населення, скільки наслідки серцево-судинних захворювань, тому генерація нових методів та вдосконалення існуючих методів діагностики захворювань серцево-судинної системи та прогнозування її подальшої поведінки актуальні натеper залишатимуться актуальними і надалі [1].

Складний багатоконтурний зв'язок та складність біологічних взаємодій під час процесів кровообігу людини дозволяє провести ряд паралелей в поведінкових механізмах із процесами еволюції в нелінійних динамічних системах (НДС) та проявах багатьох ознак динамічного хаосу під час життєдіяльності. Поняття нелінійності, циклічності, фрактальності, саморегуляції та самоорганізації, які застосовують для опису хаотичної поведінки в моделях НДС також органічно властиві і системі кровообігу людини. В таких умовах «хаос», що часто розглядається як деструктивний фактор набуває протилежного змісту та дозволяє комплексно вирішити ряд завдань щодо діагностики функціонування системи кровообігу.

Подібні підходи щодо аналізу таких біометричних даних спроможні забезпечити не тільки високий рівень комплексності обробки під час вирішення завдань діагностики патології людини за даними сигналів біосенсорів в умовах завад що значно перевищують рівень сигналу, але й сформулювати прогнози щодо наступного розвитку подій, що важливо в критичних ситуаціях [2].

На даний час комплексна ефективність побудови та використання хаотичних виявників (ХВ) слабких біологічних сигналів ще чітко не доведена, але в умовах імітаційного моделювання за окремими

параметрами якості, такими, як чутливість до слабких квазіперіодичних сигналів, якими є сигнали сфінгометричних методів досліджень стану системи кровообігу людини, можливо отримати результати, недосяжні для класичних методів обробки [3].

Отже застосування хаотичних режимів НДС є органічним під час опису та дослідження процесів кровообігу організму людини, та можуть потенційно забезпечуючи максимальне правдоподібне відтворення та достовірність виявлення слабких біологічних образів сигналів в умовах потужних завад, а будь-які нові ідеї та спроби реалізації хаотичних методів на практиці сприятимуть поліпшенню рівня медичного обслуговування населення.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для діагностики стану системи кровообігу застосовують різноманітні методи досліджень: кінетокардіографія, сфінгографія, електрокардіографія, реографія луна-кардіографія тощо. Найбільш часто застосовується метод сфінгографії, що ґрунтується на вимірюванні пульсових коливань стінок кровонесних судин (переважно головних артерій) і дозволяє отримати часову залежність параметрів пульсової хвилі, що поширюється в системі кровообігу. Під час сфінгометричних вимірювань, залежно від типу сенсора та його розташування отримані дані можуть бути сильно спотворені як завадами від інших систем організму людини так зовнішніми впливами. Цей факт має особливе значення під час дистанційних вимірювань, наприклад, пошуку потерпілих під завалами будинків під час стихійного лиха або надзвичайного стану, де вчасне виявлення серцебиття дозволяє спасти дорогоцінне життя .

Для вторинної обробки та дослідження патології на основі сфінгограм застосовують як пряме вимірювання параметрів пульсової хвилі та і аналіз спектральних характеристик в аналоговому або цифровому вигляді. Під час спектрального аналізу досліджується наявність та відсутність, а також співвідношення між спектральними складовими для здорової та хворої людини (рис. 1), що дозволяє покращити ймовірність правильного діагностування. Аналіз спектру сфінгограм дозволяє віднести такі сигнали до квазіперіодичних полігармонічних сигналів, де основне інформаційне навантаження зосереджено у декількох перших спектральних складових. Вторинну обробку сфінгометричних сигналів (СФС) можливо провести і іншими математичними методами, наприклад: перетворення Гільберта-Хуанга, вейвлет-аналізу тощо [4, 5].

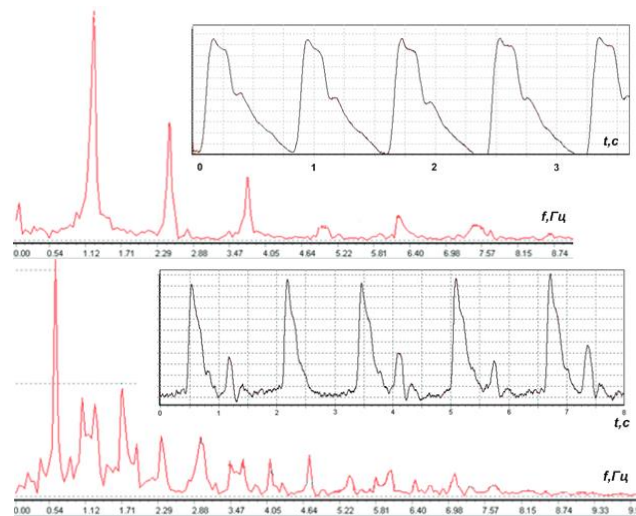


Рис. 1. Типовий спектр та форма сфінгометричних сигналів для здорової (ліворуч) та хворої (праворуч) людини

Вже в цьому сторіччі для обробки слабких сигналів активно застосовуються методи нелінійної динаміки [3–5], що ґрунтуються на застосуванні генераторів сигналів детермінованого хаосу [6]. Привабливість застосування таких методів для обробки сигналів біологічної природи обґрунтовується схожістю узагальненої поведінки складних біологічних процесів із поведінкою НДС за умови певних значень керуючих параметрів [2, 3]. Нелінійні схеми обробки, дозволяють виявляти та обробляти СФС в цілому, отримуючи результати через налаштування режимів роботи за допомогою встановлення параметрів НДС, що можливо співвідносити як характеристики реальних процесів [4].

Узагальнений принцип роботи ХВ полягає у зрушенні критичного режиму роботи НДС після впливу на неї слабкої періодичної або квазіперіодичної зовнішньої дії. Такий зовнішній вплив обумовлює різкий перехід між режимами роботи НДС із зміною характеру її поведінки, що відбивається на фазовій площині як зміна типу атратора фазових траєкторій руху у багатовимірному просторі станів [7].

Найбільша чутливість під час цього процесу забезпечується під час переходів із режиму формування простого атратора до режиму із формуванням дивного атратора або навпаки. Подібний перехід відбивається на формі вихідного сигналу генератора хаотичної системи та його спектрі як перерозподіл енергії між спектральними складовими під дією слабого сигналу зовнішнього збудження. Факт зміни характеру генерованого хаотичною системою сигналу легко визначається за допомогою

дискримінатора режимів хаотичного генератора, що побудовано, наприклад, на базі простих лінійних схем класичної обробки (фільтрації). Методи хаотичного виявлення теоретично спроможні забезпечити виявлення слабких гармонічних сигналів, рівень яких відносно флуктуаційних завад складає більш ніж мінус 100дБ! [8].

**Виклад основного матеріалу**

Завдяки аналоговому характеру СФС основою побудови ХВ має бути аналогова динамічна система із хаотичними режимами роботи, що з математичної точки зору описується диференційними рівняннями та підлягає декомпозиції для введення сигналу, що виявляється [7]. Однією із подібних НДС є система Дафінга, що за умови застосування гармонічного опорного сигналу математично описується за допомогою диференційних рівнянь другого порядку [8]:

$$\frac{1}{\omega_1^2} d^2 \xi / dt^2 + \frac{b}{\omega_1} d\xi / dt + N_D \{ \xi \} = \{ A_1 \cos(\omega_1 t) + \sigma_1 n_0(t) \} + A_0 \cos(\omega_0 t), \tag{1}$$

де  $\xi$  – фазова змінна,  $\xi(t)$  – сигнал на виході 1 системи Дафінга,  $\xi'(t) = d\xi/dt$  – сигнал на виході 2 системи Дафінга;  $b$  – параметр біфуркації системи Дафінга, що відповідає коефіцієнту дисипації;  $N_D \{ \xi \}$  – нелінійна функція, що для системи Дафінга визначається як поліном вище третього порядку, наприклад  $N_D \{ \xi \} = \xi^5 - \xi^3$ ;  $A_1, A_0$  – амплітуди гармонічних сигналів зовнішнього та внутрішнього сигналів збудження відповідно;  $\omega_1, \omega_0$  – частоти гармонічних сигналів зовнішнього та внутрішнього сигналів збудження відповідно;  $\sigma_1$  – амплітуда сигналу флуктуаційної завади;  $n_0(t)$  – сигнал нормованого флуктуаційного процесу.

Традиційно систему Дафінга використовують саме для виявлення слабких гармонічних сигналів на фоні потужних завад із гаусівським законом розподілу [8], але завдяки особливостям роботи нелінійних схем, що реагують на вхідний сигнал в цілому, слід передбачати можливість виявлення також і полігармонічних квазіперіодичних СФС. Для підтвердження такої можливості в середовищі Matlab/Simulink на основі математичної моделі (1) створено субмодель системи Дафінга із кубічною нелінійністю (рис. 2), що є основою роботи ХВ слабких СФС.

Слід вказати, що ХВ, побудований на принципі різкого переходу між режимами роботи (фазовими станами) хаотичної системи (1) має обмежений діапазон частот. Надто великі значення частот вхідних сигналів збудження «не встигають» впливати на характер еволюції неавтономної динамічної системи, а надто повільна зміна значень призводить до порушення умов чутливості критичного режиму. Тому діапазон змін швидкостей наростання вхідних сигналів для виявлення або їх ширина спектру мають обиратись оптимально і якщо цього не відбувається, слід застосовувати схеми перенесення спектру в «зону дії» конкретного типу хаотичної системи.

Поняття частотного ресурсу ХВ передбачає отримання частотної залежності параметра виявлення, що характеризує ширину робочої зони припустимої для сигналів, що виявляються. СФС по своїй суті є низькочастотними (близько 1 Гц), квазіперіодичними та полігармонічними сигналами (рис. 1) [2, 3], що спрощує їх виявлення за допомогою інерційних НДС, що мають у складі інтегратори (рис. 2).

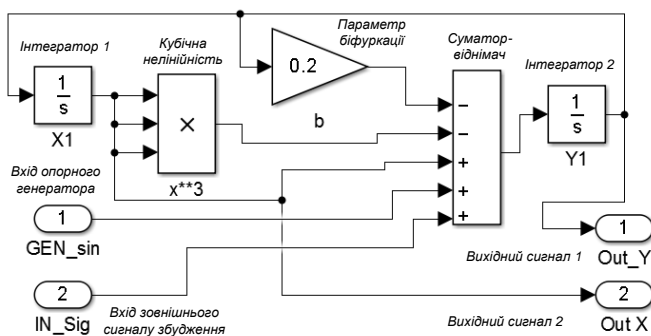


Рис. 2. Імітаційна модель оператора еволюції системи Дафінга в середовищі Matlab/Simulink

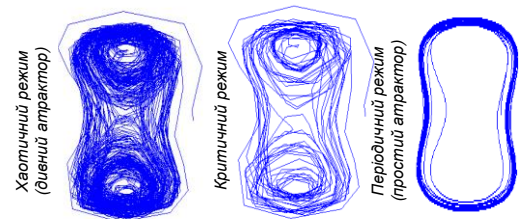


Рис. 3. Форми атракторів системи Дафінга під час імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink за умови гармонічних сигналів

ХВ перед початком виявлення за допомогою регулювання параметрів біфуркації системи потребує встановлення критичного режиму роботи, що розташований на межі формування простого та дивного атрактора в застосованій НДС (рис. 3) [7]. Із критичного режиму НДС може переходити або у хаотичний режим або у періодичний режим, залежно від параметрів сигналу збудження – амплітуди та частоти. Якщо параметром збудження є амплітуда, то мова йде про амплітудний ХВ, що саме представлено в математичній моделі (1). Головна відмінність між режимами полягає у формі сигналів на виходах хаотичного генератора, що і визначають форму атрактора у фазовій площині (рис. 3). Однак важливий також спектральний склад та загальна енергетика системи, що визначає апертуру та топологію отриманого атрактора (рис. 3) під час встановлення певного поля біфуркаційних параметрів [9].

Структурна схема дослідження частотного ресурсу ХВ (рис. 4) системи Дафінга також передбачає наявність дискримінатора режимів роботи хаотичного генератора на базі фільтра низьких частот (ФНЧ) [9]. Такий спосіб дискримінації ґрунтується на появі субгармонічних складових під час генерації сигналів детермінованого хаосу за умови впливу зовнішнього гармонічного сигналу із амплітудою, що перевищує критичну. Сукупна енергія субгармонічних складових спектру, виділена фільтром нижніх частот визначається у квадратичному детекторі та фіксується індикатором діючого значення. Періодичний режим роботи хаотичної системи мінімізує діюче значення сигналу після обробки ФНЧ, а хаотичний навпаки.

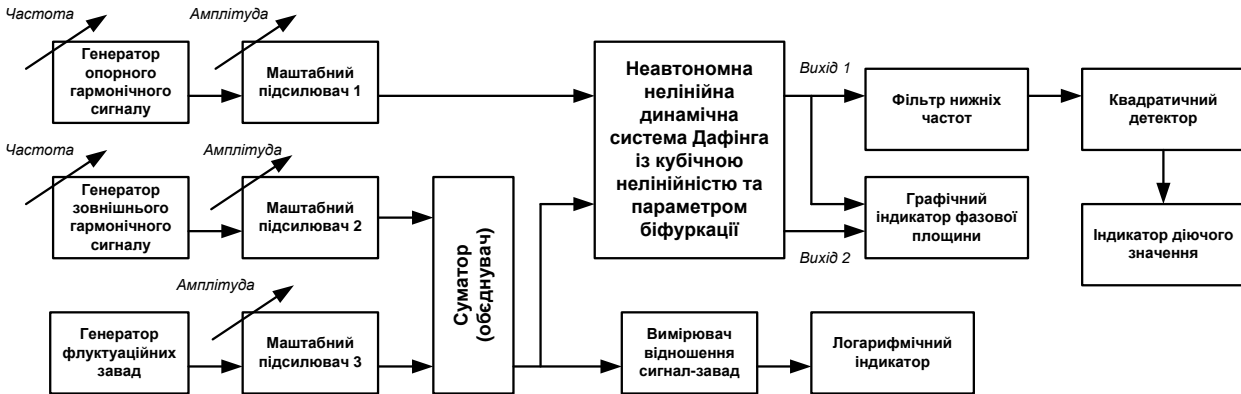


Рис. 4. Схема дослідження можливостей виявлення полігармонічних сфiгмометричних сигналів хаотичним виявником

Під час проведених надалі численних імітаційних моделювань в середовищі Matlab/Simulink встановлено, що не всі вихідні сигнали системи Дафінга мають високу чутливість до зміни енергії низькочастотних складових виділених фільтром низьких частот (рис. 4). Для застосованої імітаційної моделі (рис. 2) системи Дафінга з точки зору отримання більшої чутливості дискримінації слабких сигналів за критерієм низькочастотної фільтрації субгармонік більше доцільно застосовувати сигнал, позначений як «У». Крім того, в сигналі на такому виході системи Дафінга відсутня постійна складова [9, 10], що обумовлює еквівалентність значень повної енергії та енергії флукутацій випадкового процесу.

Крім системи Дафінга та дискримінатора її режимів до складу схеми досліджень введено контрольний вимірювач логарифмічного відношення сигнал-шум зовнішнього вхідного сигналу та графічний індикатор фазових траєкторій у фазовій площині (рис. 4), що дозволяє візуально оцінити форму та апертуру атратора в поточному режимі роботи генератора ще до завершення тривалої симуляції. Регулювання режимів роботи хаотичної системи Дафінга під час визначення частотного ресурсу ХВ проводиться на базі встановлення частот та амплітуд сигналів зовнішнього збудження та опорного сигналів відповідно під час дії гаусівського шуму із регульованою амплітудою (рис. 4).

Критерієм виявлення для слабких вхідних сигналів є перевищення відношення показників (енергій) на виході квадратичного детектора в періодичному та хаотичному режимах. Перевірка частотних властивостей ХВ в залежності від критеріального відношення енергій гармонічних сигналів проводилась за умов відношення сигнал-шум близько мінус 30 дБ, тобто сигнал, по відношенню до завади за енергетикою був меншим більш як в 1000 разів і тим не менше призводив до зміни режиму роботи генератора Дафінга в певному діапазоні частот від періодичного до хаотичного (або навпаки). Значення частотного ресурсу також залежить також від надійності правильного виявлення сигналів, що визначається відношенням середньоквадратичних значень сигналів на виході системи Дафінга в періодичному та хаотичному режимах роботи.

Дослідження частотного ресурсу проводилось на базі імітаційної моделі виявлення (рис. 5) для ряду відношень сигнал-шум в рамках точкового дослідження за умови параметра біфуркації системи Дафінга (рис. 1)  $b = 2$ . Встановлення критеріального значення режимів реалізовано за допомогою керування амплітудою опорного гармонічного сигналу  $A_0 = 2, 4 \dots 2, 6$ .

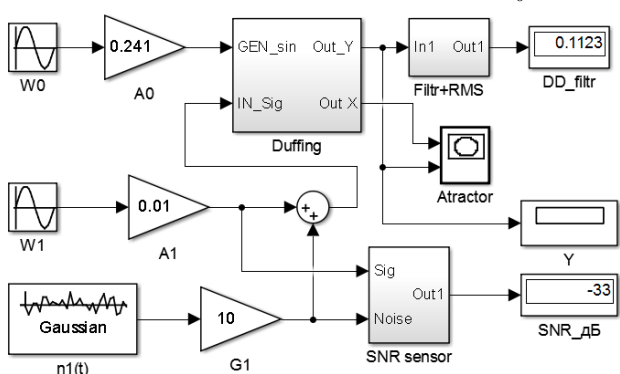


Рис. 5. Імітаційна модель дослідження частотного ресурсу системи Дафінга в середовищі Matlab/Simulink

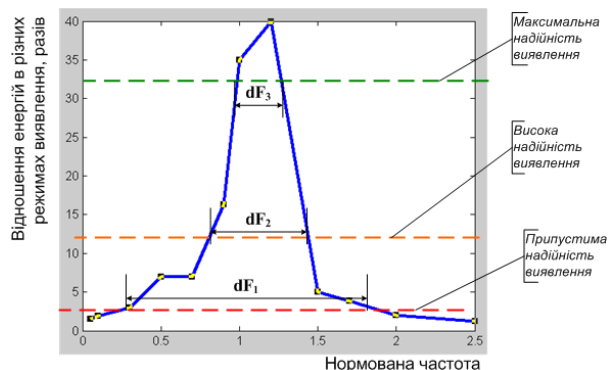


Рис. 6. Результати дослідження частотного ресурсу хаотичного виявника для рівня шуму -32дБ



За результатами досліджень та наступного якісного аналізу отриманих даних можливо подати наступні висновки:

1. Частотна залежність (рис. 6) відношення енергій в різних режимах системи Дафінга за умови слабких сигналів на фоні завад загалом носить дзвоноподібний характер із максимумом на основній частоті, що підкреслює найкращі можливості виявлення гармонічних сигналів, але при цьому не заперечує виявлення і більш широкосмугових сигналів, спектр яких повністю або охоплює частотний ресурс такого ХВ.

2. Вірогідність отримання правильного результату виявлення для сигналів із широким спектром залежить від встановлених параметрів та характеристик дискримінатора хаотичної системи (рис. 4), а саме параметрів фільтра низьких частот та рівня, за яким відмінності між енергіями вважатимуться достатніми для правильного розрізнення. Зазвичай подвоєне перевищення енергії на виході дискримінатора під час переходу між режимами вважається достатнім для прийняття рішення про наявність сигналу.

3. На частотній залежності ХВ (рис. 6) для негармонічних сигналів умовно можливо виділити три робочі зони із різним частотним ресурсом: якщо ширину смуги визначати за пороговим відношенням від 2 до 6 частотний ресурс складає близько декади відносно опорної частоти; у випадку від встановлення порогів від 6 до 15 частотний ресурс охоплює декілька октав; в найкращому випадку із точки зору ймовірності виявлення поріг складає більше 15, але робочий діапазон частот складає менше 10% відносно частоти опорного коливання неавтономної хаотичної системи Дафінга.

На основі того факту, що для дослідження СФС та діагностики за їх допомогою стану серцево-судинної системи фахівці використовують лише декілька перших гармонік (5...8) [4], частотний ресурс ХВ є достатнім для подальшого дослідження можливостей комплексного виявлення слабких СФС, що мають квазіперіодичний полігармонічний характер та значно спотворені флуктуаційними завадами.

Математичну модель системи Дафінга із кубічною нелінійністю в складі ХВ полігармонічних СФС можливо визначити як:

$$\frac{1}{\omega_0^2} d^2 \xi / dt^2 + \frac{k}{\omega_0} d\xi / dt - \xi + \xi^3 = A_1 \left[ \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_{i1}) + \sigma_1 n_1(t) \right] + A_0 \left[ \sum_{i=1}^N a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_{0i}) \right], \quad (2)$$

де  $\sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_{i1}) + \sigma_1 n_1(t)$  – полігармонічна модель вхідного СФС із адитивними

флуктуаційними завадами;  $\sum_{i=1}^N a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_{0i})$  – полігармонічна модель опорного СФС.

Проведення імітаційних в середовищі Matlab\Simulink досліджень роботи полігармонічного ХВ потребує формування моделі опорного сигналу. Для конструювання опорного сигналу застосуємо нормовані моделі СФС здорової людини (рис. 1) в частотній та амплітудній зоні. Первинна модель побудована на основі 32 дискретних відліків в підсистемі Signal Builder (Simulink), результат може бути оброблений в системі Matlab для обчислення параметрів спектральних складових за (2).

В умовах подібної реконструкції опорного СФС кількість гармонік не має бути надто великою, завдяки тому, що із зростанням номеру гармоніки амплітуда гармонічної складової різко зменшується, та вони стають несуттєвими для діагностики, але кількість досліджуваних спектральних складових не має бути і надто малою, для правильної оцінки наявності саме СФС у вхідному потоці даних. Загалом оптимальна кількість гармонік моделі опорного СФС складає 5 до 10, на що вказується в медичних роботах із досліджень діагностики за параметрами пульсової хвилі [2]. Для побудови моделі періодизації СФС (рис. 7) модуль Simulink Repeating Sequence Interpolated, що реалізує також і часову інтерполяцію, необхідну для застосування механізмів обробки Simulink.

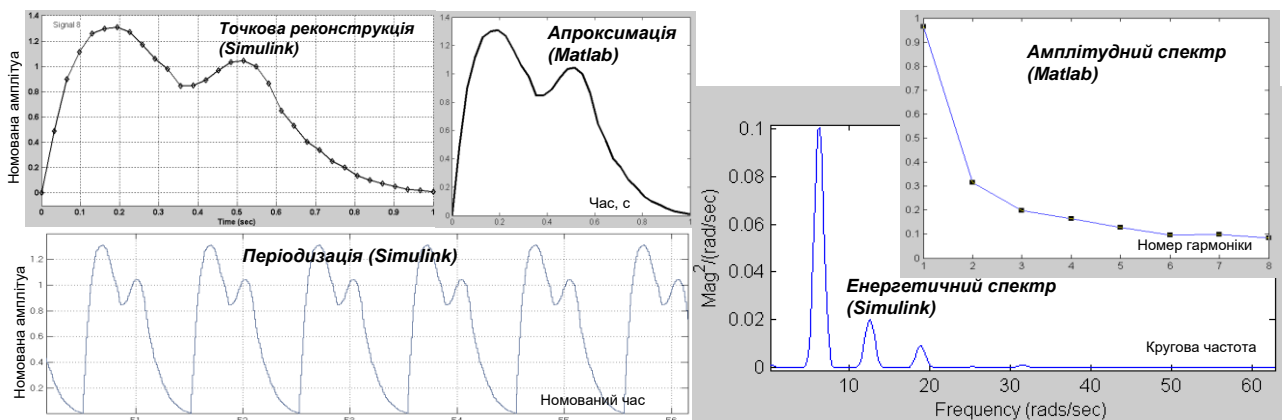


Рис. 7. Результат реконструкції форми та спектру опорного сфігмометричного сигналу хаотичного виявника

Імітаційна Simulink модель (рис.8) дослідження роботи полігармонічного ХВ сфінгометричних сигналів має у складі два паралельних канали обробки відповідно двом режимам роботи. Зовнішні параметри амплітуд парціальних полігармонічних ХВ в схемі дослідження встановлено в крайніх межах критичного режиму. Схема ХВ полігармонічних сигналів подібна до схеми виявлення гармонічних сигналів (рис. 4), що включає опорний генератор біосигнатури СФС (рис. 7), динамічну систему Дафінга із кубічною нелінійністю та амплітудним керуванням режимами. Режими виявляються на основі дискримінатора режимів хаотичного генератора на базі фільтра низьких частот другого порядку із частотою зрізу, що вдвічі менше за основну частоту СФС. Фільтр дискримінатора застосовується для виділення субгармонік вихідного сигналу системи Дафінга із обраного виходу .

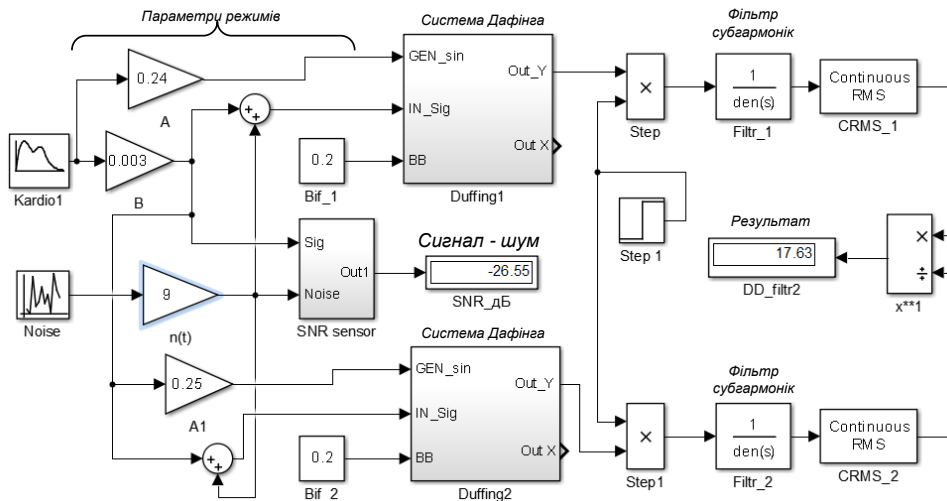


Рис. 8. Імітаційна модель дослідження полігармонічного виявника слабких сфінгометричних сигналів

Дослідження роботи ХВ імітаційною моделлю (рис. 8) можливо проводити через подання різних типів періодичних полігармонічних сигналів на фоні флуктуаційних завад із різноманітними розподілами миттєвих значень. Дискримінація режимів відбувається через деякий час після встановлення певного режиму, для цього достатньо 50...100 циклів розрахунків Simulink. Такий час затримки складається із часу входження в режим і часу дискримінації режиму. Механізм появи часу входження в режим пов'язаний із невизначеністю щодо встановлення початкових параметрів ініціалізації інтеграторів (рис. 2), що яскраво видно на фазових діаграмах паралельної роботи ідентичних за схемою генераторів, що введено в різні режими (рис. 9).

Під час побудови ХВ було перевірено велику кількість критеріїв фіксації факту переходу системи Дафінга із періодичного режиму в хаотичний і навпаки. Під час таких перевірок сформувався остаточний енергетичний критерій виявлення, що забезпечує найбільше значення відношення показників енергії флуктуацій субгармонік в різних режимах. Реалізацію обчислення за вказаним критерієм в Simulink доступна за спеціалізованим блоком CRMS. Значення всіх сигналів системи Дафінга під час попереднього аналізу роботи запропонованого ХВ (рис. 8) знаходяться в амплітудних межах до 10В. Регулювання значень біфуркаційних параметрів та параметрів генераторів сигналів реалізовано в Simulink за допомогою блоків лінійних підсилювачів та констант (рис. 8).

Попереднє оцінювання руху фазових траєкторій в різних режимах проводилось через використання фазових портретів (рис. 9) та виділено наступні особливості:

1. Характер входження в режими із точки ініціалізації під час входження в синхронізм із зовнішнім опорним сигналом спіралеподібний із кількістю циклів до 10.
2. Форма дивного атратора системи Дафінга в хаотичному режимі аналогічний формі в гармонічному режимі та являє собою класичний «подвійний завиток».
3. Значення апертури атратора в режимі генерування як хаотичного так і квазігармонічного сигналів розташовані в межах одиниць вольт для зазначених біфуркаційних параметрів.

Таким чином, характер реакції поведінки системи Дафінга під час дії полігармонічного сигналу загалом не змінюється. Для підтвердження цього висновку проведена симуляція дії слабого полігармонічного сфінгометричного сигналу на ХВ за умови різної потужності адитивних завад білого гаусівського шуму. Також проводились дослідження дії флуктуаційних завад із рівномірним розподілом, але особливих розбіжностей не виявлено. В результаті симуляції за схемою (рис. 8) отримано залежність відношення діючих значень в хаотичному та періодичному режимах від відношення сигнал-шум, що можливо інтерпретувати як характеристику виявлення (рис. 10) за умови рівня слабого сигналу мінус 60 дБ відносно рівня опорного.

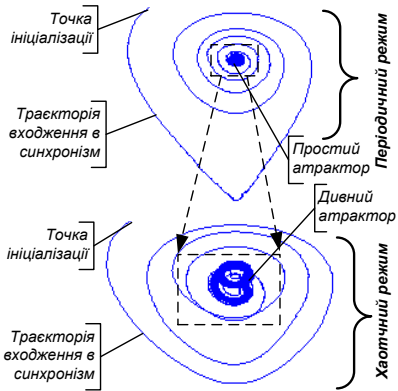


Рис. 9. Фазові портрети роботи хаотичного виявника сфігмометричних сигналів

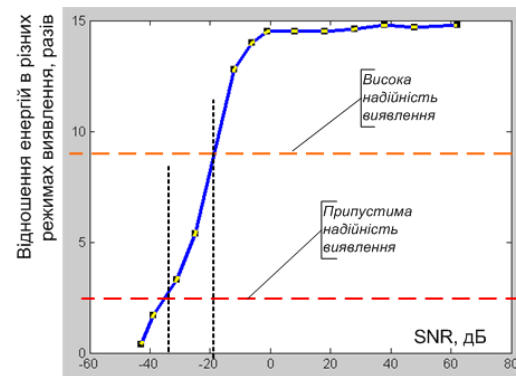


Рис. 10. Характеристика виявлення сфігмометричних сигналів пульсової хвилі від відношення сигнал-шум

За результатами проведених імітаційних симуляцій роботи ХВ сфігмометричних сигналів показана можливість виявлення полігармонічного сигналу із високим рівнем надійності за умови відношення сигнал-шум до мінус 20 дБ, а з припустимим рівнем надійності до мінус 37 дБ (рис. 10). За таких значень параметрів вхідного полігармонічного сигналу (рис. 11) виявлення класичними оптимальними виявниками із високою вірогідністю виявлення спряжене із використанням набагато більшого часу обробки та складністю побудови оптимального фільтра.

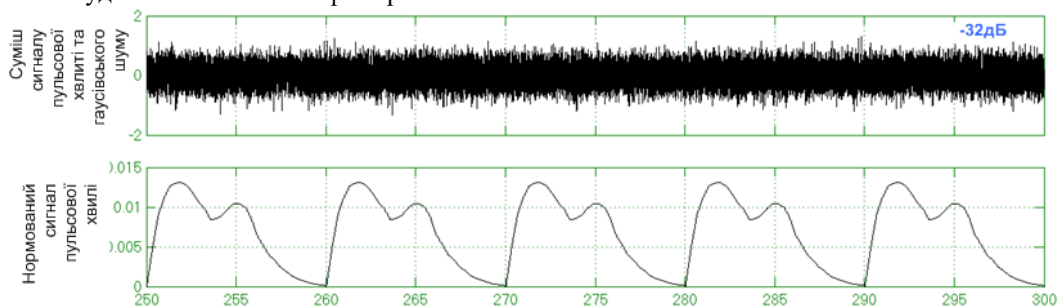


Рис. 11. Форма сигналу пульсової хвилі під дією гаусівського шуму на рівні -32 дБ, що впевнено виявляється

Загалом схема хаотичного виявлення нагадує оптимальний виявник на базі узгодженого фільтру в класичній техніці обробки сигналів із максимізацією відношення сигнал-завада, але відрізняється більшою ступенем універсальності щодо полігармонічних сигналів та скороченим часом обробки. Практична реалізація ХВ набагато більш простіша за побудову оптимального лінійного фільтра за класичними методами та має високий ступінь універсальності, однак всі ці переваги спряжені із рядом труднощів конструкторсько-технологічного характеру щодо забезпечення точності та надійності елементів схеми, що поступово вирішуються через застосування швидкісних сигнальних процесорів із високою розрядністю та удосконаленням технологічних процесів виготовлення елементів, в першу чергу мікросхем.

Запропонований метод виявлення сфігмометричних сигналів ХВ можливо використати для безконтактного дослідження сигналів пульсової хвилі віддаленими сенсорами, що особливо актуально в умовах пандемії пов'язаною із хворобою COVID19. Рекомендується продовжити дослідження запропонованих методів виявлення слабких періодичних сигналів за запропонованими схемами методиками досліджень із застосуванням НДС із хаотичними режимами роботи та різноманітними операторами еволюції.

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

1. Розглянуто можливості використання нелінійних динамічних систем із хаотичною поведінкою для проведення виявлення слабких сигналів сенсорів пульсової хвилі людини. Привабливість застосування таких методів для обробки сигналів сенсорів пульсової хвилі обґрунтовується схожістю узагальненої поведінки складних біологічних процесів із поведінкою динамічних систем із нелінійним оператором еволюції та відповідністю частотно-часової динаміки під час практичної реалізації виявників.

2. Запропоновано модель та проведено дослідження частотного ресурсу хаотичного виявника слабких сигналів сфігмометричних сенсорів. Виявлено, що частотний ресурс хаотичного виявника на основі нелінійної системи Дафінга достатній для виявлення та аналізу до 10 основних спектральних складових сфігмометричного сигналу за рівня завад до мінус 32 дБ.

3. Розроблена імітаційна модель (Simulink) та реконструкція сигналів сфігмометричних сенсорів для проведення моделювання в умовах потужних завад. Показана можливість виявлення полігармонічного сигналу із високим рівнем надійності за умови відношення сигнал-шум до мінус 20 дБ, а з припустимим рівнем надійності до мінус 37 дБ в реальних ділянках часу.

## Література

1. Серцево-судинні захворювання. Класифікація, стандарти діагностики та лікування / за ред. В.М. Коваленка, М.І. Лутая, Ю.М. Сіренка, О.С. Сичова. – 5-е вид., переробл.і доповн. – К. : МОРІОН, 2021. – 320 с.
2. Taranchuk A., Pidchenko S. Design Methodology to Construct Information Measuring Systems Built on Piezoresonant Mechanotrons with a Modulated Interelectrode Gap. Applied Measurement System, pp. 229-258, Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia (2012).
3. Медична фізика : підручник : у 4 т. Т. 1. Динамічні і статистичні моделі / [Л.А. Булавін, Л.Г. Гречко, Л.Б. Лерман, А.В. Чалий] ; за ред. Л.А. Булавіна. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010. – 600 с.
4. Дослідження динамічних властивостей та адаптаційних резервів системи кровообігу людини та розробка критеріїв їх оцінки із застосуванням математичного моделювання : звіт про НДР (заключ.) / НТУУ "КПІ" ; кер. роб. В. Б. Максименко. – К., 2012. – 279 л.
5. Hametner B., Wassertheurer S. Pulse Waveform Analysis: Is It Ready for Prime Time? Curr Hypertens Rep., Center for Health & Bioresources, AIT Austrian Institute of Technology 2017, Vienna, Austria, vol. 19:73. DOI: 10.1007/s11906-017-0769-3.
6. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / [Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський] ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів ; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.
7. Li Y., Yang B., Deng X-Y., Jin L., Du L-Z. Physical mechanism of the detection of the unknown frequency of weak harmonic signal and effects of damping ratio on the detection results. Chinese Physics, Vol. 13, No. 9, September, 2004. pp. 1386–1390.
8. Martynyuk V., Fedula M., Balov O. Periodic signal detection with using Duffing system Poincare map analysis. Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 8, No. 22, June 2014. pp. 26–30.
9. Golevykh 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. Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.
10. Li S., Shang Q., Yin C., Qi Y. Practical methods to identifying chaotic characters. IEEE International Conference Neural Networks & Signal Processing. Nanjing, China, December 14-17, 2003. p. 764–767.

## References

1. Sertsevo-sudynni zakhvoriuvannia. Klyasyfikatsiia, standarty diahnostryky ta likuvannia. Za red. V.M. Kovalenka, M. I.Lutaia, Yu.M. Sirenka, O.S. Sychova, 5-e vyd.,pererobl.i dopovn. K.: MORION, 2021. 320 s.
2. Taranchuk A., Pidchenko S. Design Methodology to Construct Information Measuring Systems Built on Piezoresonant Mechanotrons with a Modulated Interelectrode Gap. Applied Measurement System, pp. 229-258, Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia (2012).
3. Medychna fizyka: pidruchnyk. T. 1. Dynamichni i statystychni modeli / L.A. Bulavin, L.H. Hrechko, L.B. Lerman, A.V. Chalyi; za red. L.A. Bulavina. K.: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet", 2010. 600 s.
4. Doslidzhennia dynamichnykh vlastyvoستي ta adaptatsiynykh rezerviv systemy krovoobihu liudyny ta rozrobka kryteriiv yikh otsinky iz zastosuvanniam matematychnoho modeliuвання : zvit pro NDR (zakliuch.) / NTUU "KPI" ; ker. rob. V. B. Maksymenko. K., 2012. - 279 l.
5. Hametner B., Wassertheurer S. Pulse Waveform Analysis: Is It Ready for Prime Time? Curr Hypertens Rep., Center for Health & Bioresources, AIT Austrian Institute of Technology 2017, Vienna, Austria, vol. 19:73. DOI: 10.1007/s11906-017-0769-3.
6. Prykladne zastosuvannia teorii khaotychnykh system u telekomunikatsiiah : monohrafiia / Yu. Ya. Bobalo, S. D. Haliuk, M. M. Klymash, R. L. Politanyskiy ; Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika". – Lviv; Drohobych : Kolo, 2015. – 184 s.
7. Li Y., Yang B., Deng X-Y., Jin L., Du L-Z. Physical mechanism of the detection of the unknown frequency of weak harmonic signal and effects of damping ratio on the detection results. Chinese Physics, Vol. 13, No. 9, September, 2004. pp. 1386–1390.
8. Martynyuk V., Fedula M., Balov O. Periodic signal detection with using Duffing system Poincare map analysis. Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 8, No. 22, June 2014. pp. 26–30.
9. Golevykh 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. Volume 55, Issue 3, 1 June 2018, Pages 70-76. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0023>.
10. Li S., Shang Q., Yin C., Qi Y. Practical methods to identifying chaotic characters. IEEE International Conference Neural Networks & Signal Processing. Nanjing, China, December 14-17, 2003. p. 764–767.