

О.Л. Коренівська, к.т.н., доц.  
Ю.В. Богоявленська, к.е.н., доц.  
В.Б. Бенедицький, ст. викладач

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Нелінійна динаміка біосигналів: застосування схеми Чуа для аналізу психоемоційних станів

*У представлених матеріалах описано ідею методу аналізу психоемоційного стану людини за допомогою кола Чуа, що розглядає шкіру як елемент динамічної хаотичної системи. На відміну від традиційних вимірювань опору, цей підхід фіксує топологічні зміни в сигналах, де стрес або збудження спричиняють перехід від складного хаосу до впорядкованих періодичних коливань.*

*У роботі розроблено математичну модель модифікованої схеми Чуа, в якій імпеданс шкіри людини інтегровано як змінний параметр, що впливає на провідність кола. Такий підхід дозволяє трансформувати незначні зміни електрофізіологічних характеристик шкіри у суттєві зміни динамічного режиму системи – зокрема, переходи між хаотичними та періодичними коливаннями, а також деформацію фазових портретів.*

*Для забезпечення фізіологічної обґрунтованості моделі проведено аналіз відкритих біомедичних датасетів, зокрема WESAD, DEAP, AMIGOS та PhysioNet, що містять записи електродермальної активності у різних психоемоційних станах. Встановлено характерні діапазони шкірної провідності: у стані спокою – 100–2000 кОм, при стресі та емоційному збудженні – 10–300 кОм. Отримані значення використано для параметризації моделі та проведення моделювання.*

*Результати моделювання демонструють, що навіть незначні зміни імпедансу шкіри призводять до суттєвих змін топології атрактора, що дозволяє використовувати запропоновану систему як високочутливий біосенсор. Виявлено, що у стані спокою система перебуває у режимі розвиненого хаосу, тоді як при стресових впливах спостерігається перехід до більш впорядкованих, квазіперіодичних режимів. Така поведінка може бути використана для побудови нових методів класифікації психоемоційних станів та створення надточних та чутливих детекторів стресу і систем моніторингу нервової діяльності.*

*Практичне застосування методу дозволяє візуалізувати реакції організму через деформацію атракторів на осцилографі, що забезпечує високу чутливість до найменших біофізичних змін.*

**Ключові слова:** нелінійна динаміка; теорія хаосу; схема Чуа; імпеданс шкіри; психоемоційні стани; детектори стресу.

**Актуальність дослідження.** Сучасні методи оцінювання психоемоційного стану людини, такі як аналіз варіабельності серцевого ритму (HRV) або гальванічної реакції шкіри (GSR), базуються на вимірюванні амплітудних або часових характеристик сигналів [1, 2]. Проте такі підходи мають обмежену чутливість до складних нелінійних змін, що супроводжують функціонування біологічних систем.

У той же час, біологічні процеси мають виражену нелінійну та хаотичну природу, що обумовлює доцільність застосування методів теорії динамічних систем для їх аналізу. Зокрема, використання детермінованого хаосу відкриває нові можливості для підвищення чутливості сенсорних систем за рахунок ефекту сильної залежності від початкових умов.

Схема Чуа [3–5] як найпростіша фізична реалізація хаотичної системи демонструє високу чутливість до змін параметрів і може бути використана як основа для побудови інтелектуальних біосенсорів нового покоління. Інтеграція біологічного об'єкта, зокрема шкіри людини, у таку систему дозволяє перейти від класичних вимірювань електричних параметрів до аналізу топологічних і інформаційних характеристик сигналу.

Таким чином, актуальним є розроблення нових підходів до оцінювання психоемоційного стану людини на основі аналізу хаотичної динаміки, що забезпечують підвищену чутливість, завадостійкість та інформативність.

**Метою роботи** є дослідження можливості застосування схеми Чуа для вимірювання рівня електрошкірної провідності та можливості оцінювання психоемоційного стану людини.

**Аналіз попередніх досліджень.** До традиційних методів оцінки стресу та емоційного стану належать: гальванічна реакція шкіри (GSR) – вимірює зміни провідності шкіри; варіабельність серцевого ритму (HRV) – оцінюється активність вегетативної нервової системи; електроенцефалографія (ЕЕГ) – реєструється електрична активність мозку [1, 2]. Хоча ці методи є ефективними, вони мають певні обмеження: чутливість до шуму, обмежене вилучення нелінійних ознак, залежність від зовнішніх умов.

Останній часом активно проводяться дослідження розробки сенсорів на основі хаосу, аналізу сигналів на основі ентропії та нелінійного моделювання біоімпедансу. Однак використання схеми Чуа як біосенсорної платформи залишається недостатньо дослідженим, особливо в контексті психоемоційного моніторингу.

Ранні дослідження теорії хаосу дозволили встановити основні властивості хаотичних коливань у схемі Чуа [3, 4], зокрема добре відомий атрактор у формі подвійної спіралі та чутливість до початкових умов [5–9]. Подальші дослідження були зосереджені на аналізі біфуркацій, прихованих атракторах та мультистабільності в нелінійних схемах [7].

Сучасні роботи додатково демонструють, що динамічна поведінка системи значною мірою залежить від параметрів схеми [6, 10], причому переходи між хаотичним і періодичним режимами відбуваються в межах вузьких діапазонів параметрів [10].

Значна кількість досліджень присвячена управлінню та синхронізації хаотичних систем. Було запропоновано різні методи регулювання хаотичної поведінки, зокрема модуляція параметрів, управління зі зворотним зв'язком та адаптивні нелінійні елементи [7, 8].

Хоча в попередніх дослідженнях широко вивчалися процеси генерації, керування та синхронізації хаосу, а також їх застосування у виявленні слабких сигналів [11], питання інтеграції хаотичних систем у біомедичні сенсорні системи залишається недостатньо дослідженим. У більшості існуючих досліджень біологічні сигнали розглядаються як вихідні дані, що підлягають аналізу, а не як вхідні дані, які безпосередньо впливають на динаміку нелінійної системи [12]. Використання ж фізіологічних параметрів, таких як імпеданс шкіри, як керуючої змінної нелінійної хаотичної системи, не було належним чином розглянуто. Тому розробка біосенсорів на основі хаосу є новим та перспективним напрямком у біомедичній інженерії [13].

**Викладення основного матеріалу.** Фундаментальна відмінність хаотичної динаміки від стохастичного шуму полягає в її детермінованості. Хаотична система повністю описується набором диференціальних рівнянь, і її майбутній стан однозначно визначається теперішнім, проте практична передбачуваність втрачається через експоненціальне розходження траєкторій, що стартують із надзвичайно близьких точок. Ця чутливість до початкових умов і параметрів системи є основою для створення надточних сенсорів, де мізерна зміна вимірюваної величини призводить до радикальної та легко фіксованої зміни режиму роботи кола.

Вимірювальна система на основі схеми Чуа, є пристроєм, що перетворює зміну фізичного параметра в статистичні або топологічні характеристики хаотичного атрактора.

Будова вимірювальної системи наведена на рисунку 1. Схема містить: активну частину, яка є нелінійним резистором з від'ємним опором, реалізованим на двох операційних підсилювачах (так званий діод Чуа); резонансний контур: котушка індуктивності (L1) та два конденсатори (C1, C2) [3–5].

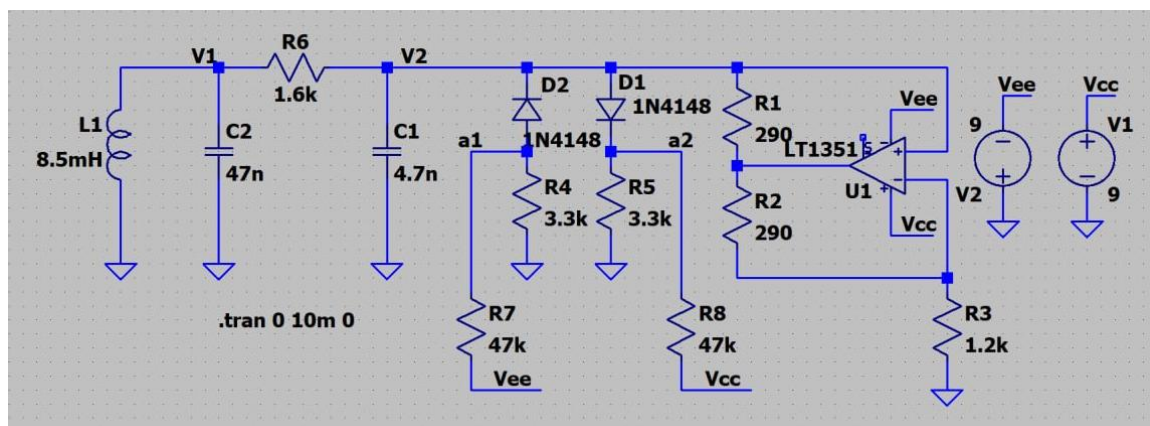


Рис. 1. Електрична принципова схема Чуа

Математична модель схеми Чуа базується на системі трьох автономних звичайних диференціальних рівнянь. Ці рівняння описують швидкість зміни напруг на двох конденсаторах C1 та C2, а також струму через індуктивність L1. Ключовим елементом, що забезпечує нелінійність, є так званий діод Чуа – активний резистор із негативним опором, чия вольт-амперна характеристика зазвичай моделюється як трисегментна кусково-лінійна функція  $f(U_{C1})$ . Наявність ділянки з негативним нахилом дозволяє елементу «експортувати» енергію в коло, підтримуючи незгасаючі неперіодичні коливання.

Запишемо систему рівнянь для класичної схеми Чуа. Використаємо закони Кірхгофа та Ома:

$$\begin{cases} C1 \frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{1}{R6} (U_{C2} - U_{C1}) - f(U_{C1}), \\ C2 \frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{1}{R6} (U_{C1} - U_{C2}) - i_{L1}, \\ L1 \frac{di_{L1}}{dt} = -U_{C2}, \end{cases}$$

де  $U_{C1}, U_{C2}$  – напруги на ємностях  $C1, C2$ ,  $i_{L1}$  – струм на ємності,  $f(U_{C1})$  – кусково-лінійна функція, що характеризує нелінійний діод Чуа.

$$f(U_{C1}) = G_b U_{C1} + \frac{1}{2} (G_a - G_b) ((U_{C1} + E) - (U_{C1} - E)),$$

де  $E$  – точки, що відповідають зламів кривої,  $G_a, G_b$  – крутизна ламаних ліній ВАХ.

Найбільш поширеним атрактором у таких системах є «подвійний завиток» (double-scroll) (рис. 2), який отримав свою назву через форму траєкторії, що по чергово обертається навколо двох точок рівноваги.

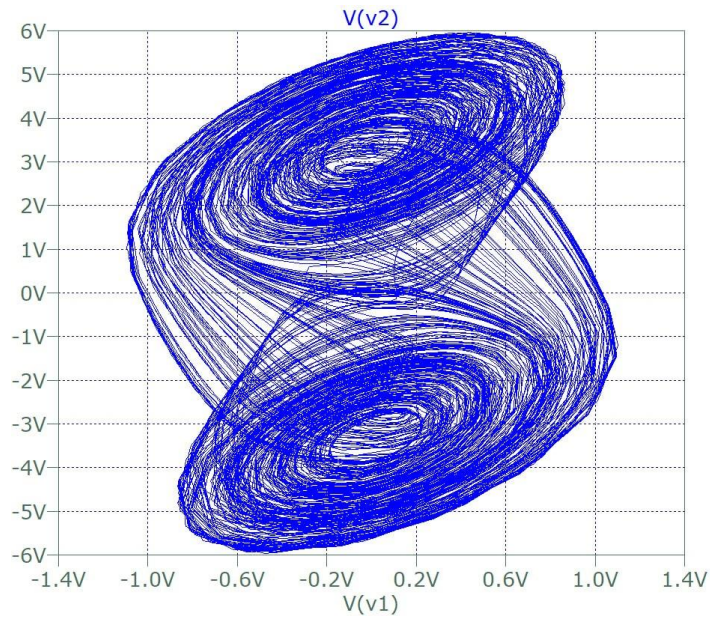


Рис. 2. Атрактор «подвійний завиток» класичної схеми Чуа

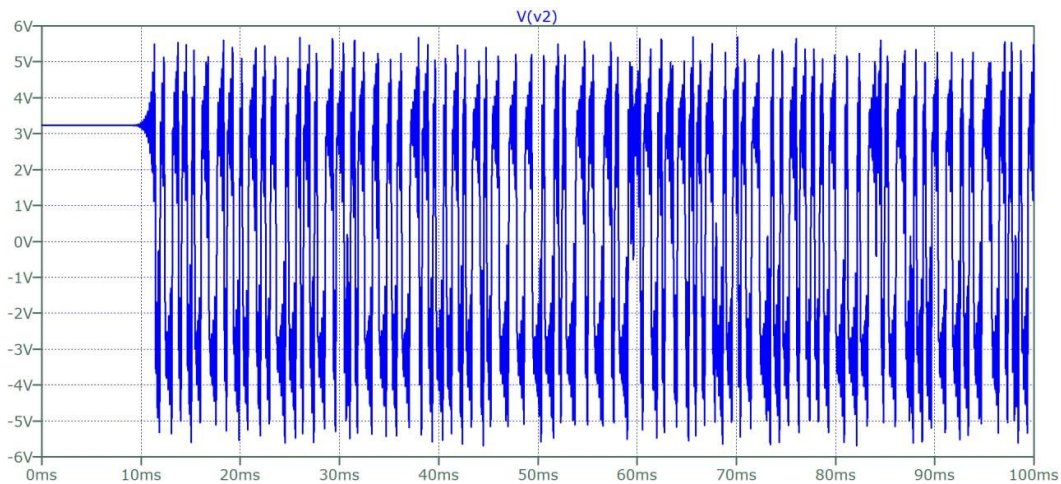


Рис. 3. Часова реалізація хаотичного процесу

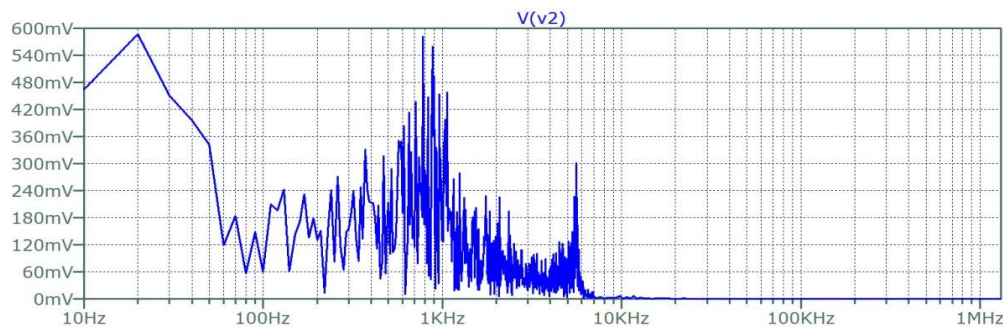


Рис. 4. Спектр сигналу, що знімається з конденсатора  $C1$

Для отримання класичного атрактора при напрузі живлення 9 В (дві батарейки «Крона»), використовуємо такі номінали: конденсатори  $C1$  – 4,7 нФ,  $C2$  – 47 нФ (для виникнення хаосу критично забезпечити співвідношення  $C2/C1 = 10$ ), котушка індуктивності  $L$  – 8,5 мГн (можна використати готову або намотати на феритовому осерді), змінний резистор  $R6$  – 1,6 кОм (цим резистором будемо «ловити» хаос, змінюючи опір).

Діод Чуа реалізуємо на здвоєному операційному підсилювачі (наприклад, LT351 або TL072). Для створення від'ємного опору виберемо номінали резисторів:  $R4$  – 3,3 кОм,  $R5$  – 3,3 кОм,  $R7$  – 47 кОм,  $R8$  – 47 кОм,  $R1$ ,  $R2$  – 290 Ом,  $R3$  1,2 кОм. Ці номінали забезпечують ламану вольт-амперну характеристику, яка «штовхає» систему, не даючи коливанням згаснути.

Процес вимірювання в такій системі зазвичай складається з декількох етапів кондиціонування та аналізу сигналу. На першому етапі схема Чуа генерує напругу  $U_{C1}(t)$ , яка містить у собі інформацію про стан вимірюваного параметра, що включений до кола як опір, ємність або індуктивність. Оскільки хаотичний сигнал є неперіодичним, традиційні методи вимірювання частоти тут непридатні. Замість цього використовується метод підрахунку «подій» або «обертів» траєкторії навколо центрів атрактора.

Автори пропонують застосувати коло Чуа для аналізу потенціалу шкіри, коли замість простого вимірювання напруги, ми розглядаємо шкіру як частину динамічної системи, що генерує хаотичні сигнали. У цьому випадку шкіра людини виступає як елемент ланцюга (зазвичай замість лінійного резистора або як частина нелінійного елемента) і є частиною динамічної системи, а параметри шкіри (її комплексна провідність) впливають на динаміку хаотичної системи. Замість амплітуди ми реєструватимемо зміну режиму хаосу, фіксуючи інформаційну та динамічну складність людських емоцій.

Шкіра людини має свій опір та ємність. При зміні емоційного стану ці параметри змінюються, оскільки коли людина перебуває у різних станах, змінюється товщина діелектрика (епідермісу) через наповнення каналів потових залоз електролітом, що впливає на ємність. Це призводить до різкого падіння опору та зростання ємності шкіри [14]. Оскільки коло Чуа надзвичайно чутливе до початкових умов, навіть мінімальна зміна потенціалу шкіри призводить до деформації атрактора або переходу від хаосу до структурованих коливань. Сформувавши різні варіанти емоційного або фізичного впливу, можна спостерігати зміну фазових портретів та досліджувати динамічну складність нервової системи. Момент емоційної реакції відповідає моменту синхронізації або виходу системи з хаотичного режиму.

Існує декілька еквівалентних схем – заміщення судини, рогового шару шкіри; клітинної мембрани; клітини; тканини (рис. 5) [14].

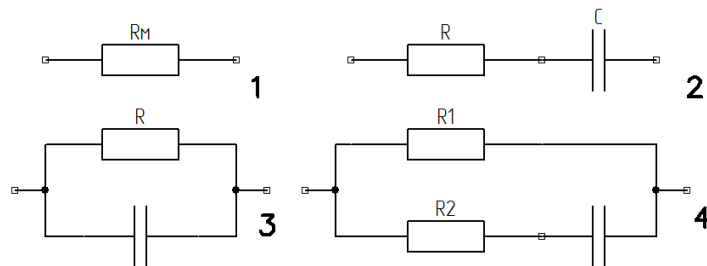


Рис. 5. Еквівалентні електричні схеми компонентів живої тканини:

1 – судина, роговий шар шкіри; 2 – клітинна мембрана; 3 – клітина; 4 – тканина

Шкіра людини – це складна структура, що містить три шари: епідерміс, дерма, гіподерма (підшкірно-жирова клітковина). Кожен шар епідермісу має свої параметри омичного та ємнісного опору і в значній мірі залежить від ділянки вимірювання. Провідність рогового шару також залежить від ступеня зволоження та електролітного складу вологи. Тому реальний омичний опір незволоженого епідермісу може

коливатись від мегомів (МОм) до десятків кілоом (кОм). Значення ємнісного опору для шарів шкіри має зворотне значення і у рогового шару наближається до нуля, тому розглянемо найпростіший варіант моделі шкіри, без вирахування ємності шкіри (рис. 5) [14–15].

Опір, моделюючий опір шкіри  $R_{skin}$ , підключимо паралельно до резистора  $R_6$ . Загальна провідність системи тоді зміниться на величину  $G_{total} = G_{circuit} + 1/R_{skin}$ .

У стані повного фізичного та емоційного спокою нормальні показники опору шкіри зазвичай знаходяться в таких межах: у стані спокою від 100 кОм до 5000 кОм, при глибокому релаксі (сон) опір може зростати до 1 МОм і вище. При сильному хвилюванні опір падає до 10 – 50 кОм [14–17].

З метою визначення реальних значень провідності шкіри людини при різних факторах впливу було проаналізовано низку датасетів з реєстрацією електродермальної активності (табл. 1). Аналіз показав, що більшість із них орієнтовані на вимірювання шкірної провідності (EDA) у низькочастотному або квазістаціонарному режимі. Найбільш збалансованим за якістю сигналу та наявністю розмітки є датасет WESAD, тоді як AMIGOS і DEAP, CASE забезпечують ширший спектр емоційних станів, але в менш реалістичних умовах. Аналіз відкритих датасетів (WESAD, DEAP, AMIGOS, PhysioNet, CASE) показав, що шкірна провідність у стані спокою знаходиться в діапазоні 1–10  $\mu S$ , тоді як при психоемоційному навантаженні (стрес, когнітивні задачі, емоційні стимули) зростає до 10–40  $\mu S$ . Найбільш виражені зміни спостерігаються у контрольованих стресових експериментах (WESAD), тоді як у реальних умовах сигнал характеризується більшою варіабельністю та наявністю артефактів.

Водночас всі розглянуті набори даних мають спільні обмеження: невелику вибірку, відсутність мультичастотного аналізу та ігнорування комплексної імпедансної моделі шкіри. Це відкриває перспективи для розробки нових підходів, що базуються на аналізі активного та реактивного компонентів імпедансу шкіри.

Таблиця 1

Характеристики відкритих наборів даних по вимірюванні опору шкіри [16, 17]

Датасет	Кількість учасників	Частота EDA	Умови експерименту	Переваги	Недоліки
WESAD	15	4 Гц / 700 Гц	Стрес	Найкраща якість, мультисенсорність	Невелика вибірка
AMIGOS	40	~128 Гц	Відео (емоції), індивід/група	Емоційна глибина	Шумні дані
DEAP	32	128 Гц	Музичні відео	Класичний benchmark	Менш реалістичний стрес
PhysioNet EDA	11	256 Гц	Контрольовані умови	Чистий сигнал	Немає емоційних міток
MDEAW	~67	~4–32 Гц	Повсякденні умови	Реалістичність	Нижча точність
EDAMAME	634 (meta)	різна	Об'єднаний	Великий масштаб	Гетерогенність

Узагальнені дані по датасетам наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Показники опору шкіри при різних психоемоційних станах людини (узагальнені дані аналізу відкритих наборів даних) [16, 17]

Психоемоційний стан	Опір, кОм	Динаміка фазичних піків
Базовий спокій (Baseline)	400–2000	Майже відсутні (0–1 на хв)
Амітрактивне навантаження (Stress)	66–333	Часті, висока амплітуда
Розваги (Amusement/Video)	250–660	Нерегулярні піки середньої сили
Медитація (Recovery)	1000–5000	Повна відсутність спонтанних піків
Страх (Fear)	40–120	Різке падіння опору (стрибок провідності) протягом 1–2 с
Гнів (Anger)	60–150	Стабільно низький опір з повільним поверненням до норми
Смуток (Sadness)	600–900	Опір може бути навіть вищим, ніж у нейтральному стані
Відраза (Disgust)	150–300	Короткочасні коливання опору, помірне зниження

Під час розробки методики вимірювання необхідно враховувати такі фактори впливу:

- на результати вимірювань значно впливають фізіологічні особливості людини: у людей з сухою шкірою опір у спокої може бути 2000 кОм, тоді як у людей з гіпергідрозом (підвищеним потовиділенням) – лише 100 кОм. Тому варто аналізувати не абсолютне значення, а відсоток зміни атрактора відносно базової лінії. Тому для проведення вимірювань спочатку схема налаштовується на початковий режим, коли на осцилографі формується «подвійна петля», атрактор Чуа (рис. 2), а потім досліджується стан у спокої, з яким порівнюють всі інші зміни опору, як реакції на емоції;

- опір на кінчиках пальців завжди значно нижчий, ніж на передпліччі або щиколотці;

- страх викликає миттєву реакцію (фізичну), тоді як стрес поступово знижує загальний тонічний опір протягом декількох хвилин.

**Результати та обговорення.** За даними таблиці 2 у програмному середовищі LTspice, було промодельовано роботу схеми 2, з підключенням опору різних номіналів, які відповідають певним психоемоційним станам людини. Результати моделювання для різних психоемоційних станів наведені на рисунку 6.

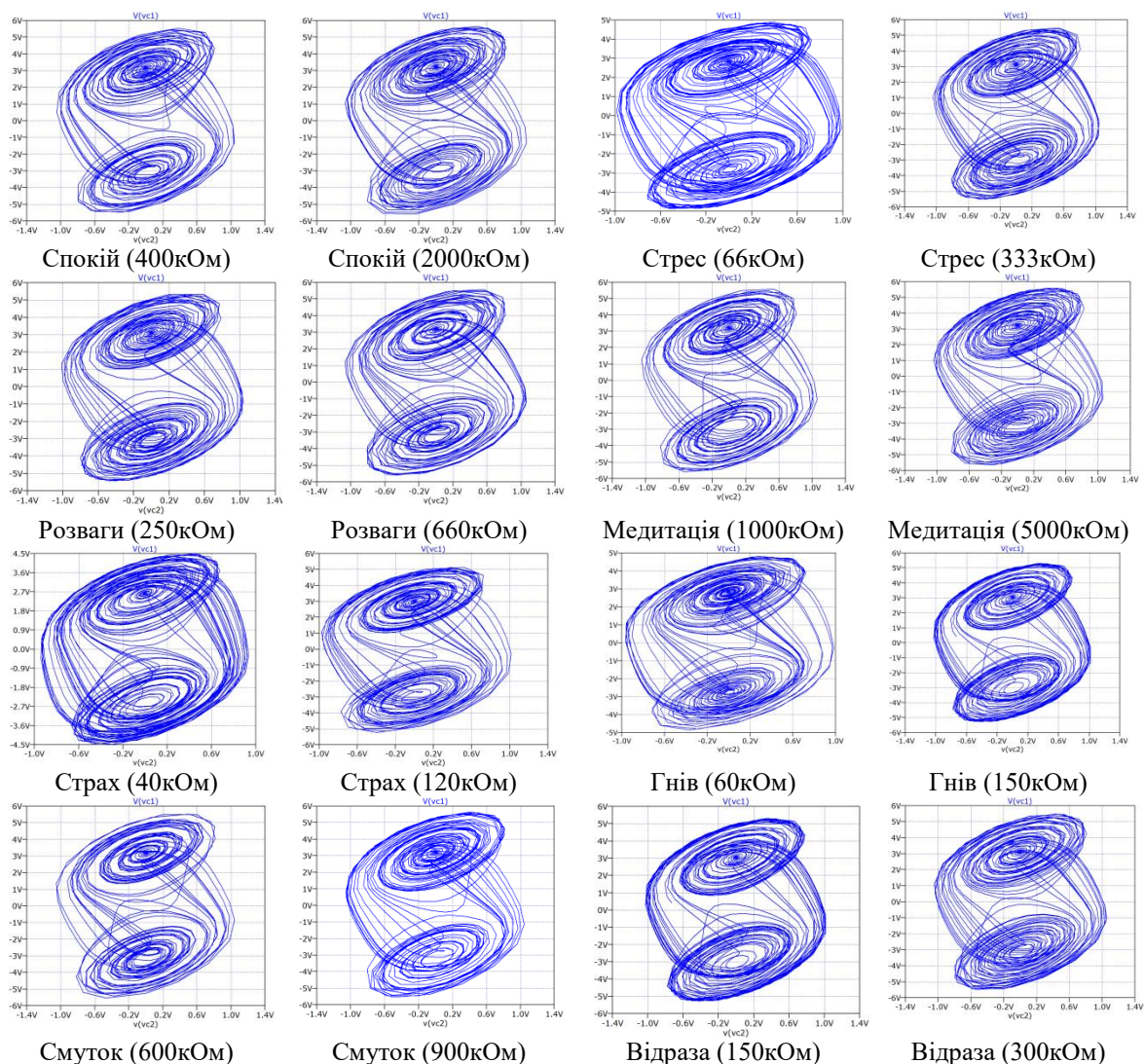


Рис. 6. Атрактори Чуа при різних психоемоційних станах

Для подальшої обробки сигналів можна застосувати частотний та часовий аналіз.

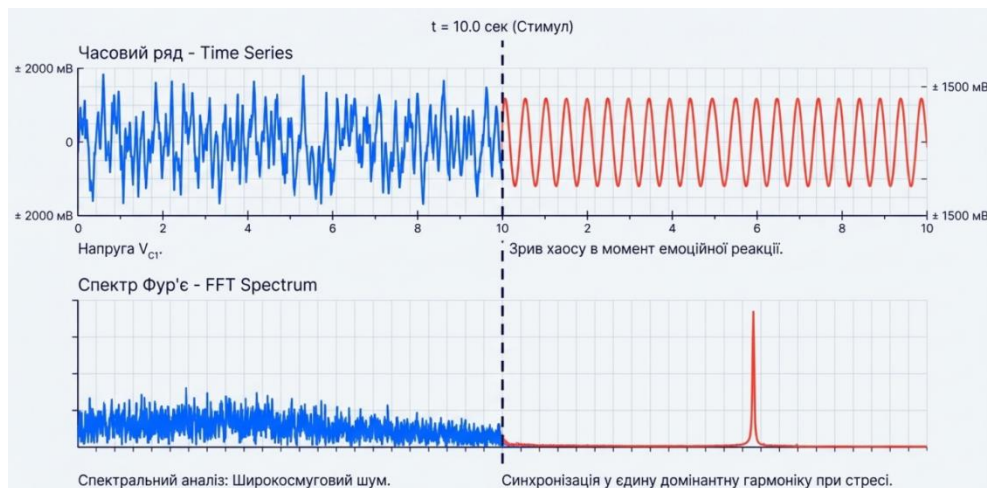


Рис. 7. Ілюстрація переходу схеми з режиму хаосу до гармонійних коливань при емоційних реакціях людини

На рисунку 7 проілюстровано поведінку системи при хаотичних коливаннях (стан спокою) та при подачі психоемоційних стимулів. Це показує нам можливість застосовувати різні методи обробки атракторів для виокремлення корисної інформації.

Використання схеми Чуа як біодатчика дозволяє фіксувати не просто зміну опору шкіри, а зміну інформаційної складності біологічного сигналу. Це набагато точніше за класичні методи, оскільки система реагує на мікроміні ємності та опору одночасно. Це дослідження може стати основою для створення нових методів детекції брехні, дослідження психоемоційного стану пацієнтів або моніторингу стресу, заснованих на аналізі складності сигналів.

**Висновки та перспективи дослідження.** У роботі запропоновано новий підхід до оцінювання психоемоційного стану людини, що базується на використанні хаотичної динаміки схеми Чуа як чутливого вимірювального перетворювача біоімпедансу шкіри. На відміну від класичних методів (GSR, HRV), запропонований підхід дозволяє аналізувати не лише амплітудні або часові характеристики сигналу, а його топологічну структуру, що значно підвищує інформативність та чутливість системи.

Встановлено, що хаотична система чутливо реагує навіть на незначні зміни біоімпедансу шкіри; різні психоемоційні стани відображаються у вигляді деформацій атратора; хаотична система виступає як підсилювач слабких біофізичних змін.

Проведене моделювання з використанням реальних даних (WESAD, DEAP, AMIGOS) підтвердило адекватність запропонованої моделі та її потенціал для створення нових типів біосенсорів.

Використання хаотичних систем як вимірювальних перетворювачів відкриває новий напрям у біомедичній інженерії, де складність та нелінійність сигналів розглядаються не як перешкода, а як джерело додаткової інформації.

Практичне значення роботи полягає у можливості створення інтелектуальних сенсорних систем нового покоління для моніторингу стресу, діагностики психоемоційних порушень, а також застосувань у нейроінтерфейсах та системах підтримки прийняття рішень у медицині.

Подальші дослідження спрямовані на апаратну реалізацію вимірювального приладу, проведення реальних вимірювань та порівняння запропонованої методики з відомими методами аналізу психоемоційного стану, формування власної бази даних для можливості застосування машинного навчання та побудови класифікаторів психоемоційних станів, визначення адекватних методів аналізу характеристик сигналів.

#### Список використаної літератури:

1. Сучасні методи і засоби для визначення і діагностування емоційного стресу : монографія / за заг. ред. О.П. Мінцера. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 228 с.
2. Основи реєстрації та аналізу біосигналів : навч. посібн. / О.Г. Аврунін, В.В. Семенець, В.Г. Абакумов та ін. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 400 с.
3. Muthuswamy B. Chua circuit: a paradigm for chaos / B.Muthuswamy, L.O. Chua // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2019. – Vol. 29, № 3.
4. Храпко С.М. Модифікований неавтономний генератор хаотичних сигналів на основі схеми Чуа / С.М. Храпко, П.М. Шпатар, Л.Ф. Політанський // Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – № 2 (46). – С. 90–97.
5. Control of Coexisting Attractors with Preselection of the Survived Attractor in Multistable Chua's System: A Case Study / Z.T. Njitacke, T.F. Fozin, C.T. Tchagpa and other // Complexity. – 2020. – Vol. 2020, № 1. – 16 p.

6. Li C. Multistability and hidden attractors in Chua's circuit / C.Li, J.C. Sprott // *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100, № 2. – P. 1455–1473.
7. Pham V.-T. A review of chaotic circuits and hidden attractors / V.-T. Pham, S.Jafari, C.Volos // *Entropy*. – 2021. – Vol. 23, № 5. – 532 p.
8. Synchronization of chaotic systems: recent advances : physics reports / S.Boccaletti, J.Kurths, G.Osipov and other. – 2020. – Vol. 544. – P. 1–122.
9. Wang X. Adaptive control and synchronization of chaotic systems / X.Wang, G.Chen // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*. – 2021. – Vol. 68, № 5. – P. 2013–2026.
10. Bao H. Parameter-dependent dynamics and bifurcations in Chua systems / H.Bao, A.Hu // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2022. – Vol. 158.
11. Liu H. Chaos-based weak signal detection: a review / H.Liu, Y.Wang, Z.Liu // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 162.
12. Rashid N. Stress detection using wearable biosensors and machine learning / N.Rashid, M.Ali, S.Khan // *MethodsX*. – 2024. – Vol. 12.
13. Yadav N. AI-integrated wearable sensors for health monitoring / N.Yadav, R.Kumar, S.Singh // *Nanoscale Advances*. – 2025. – Vol. 7. – P. 1234–1248.
14. Сніцар Є.В. Визначення життєздатності тканини вимірюванням електричних параметрів. Теоретичне дослідження / Є.В. Сніцар, І.Ю. Худецький // *Біомедична інженерія та технологія*. – 2022. – № 2. – С. 8–13.
15. Вимірювання імпедансу біологічних тканин [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://studfile.net/preview/5376428/>.
16. Сухолейстер О. Стратегії злиття фізіологічних сигналів та розпізнавання емоцій / О.Сухолейстер, А.Наконеchnий // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2023. – № 4. – С. 34–43.
17. The bioelectrical impedance analysis (BIA) international database: aims, scope, and call for data / A.M. Silva, F.Campa, S.Stagi and other // *Eur J Clin Nutr*. – 2023. – № 77. – P. 1143–1150.

#### References:

1. Mintser, O.P. (ed.) (2010), *Suchasni metody i zasoby dlia vyznachennia i diahnostuvannia emotsiinoho stresu*, VNTU, Vinnytsia.
2. Avrunin, O.H., Semenets, V.V., Abakumov, V.H. et al. (2019), *Osnovy reiestratsii ta analizu biosyhnaliv*, KhNURE, Kharkiv.
3. Muthuswamy, B. and Chua, L.O. (2019), «Chua circuit: a paradigm for chaos», *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 29, No. 3.
4. Khrapko, S.M., Shpatar, P.M. and Politanskyi, L.F. (2017), «Modyfikovanyi neavtonomnyi henerator khaotychnykh syhnaliv na osnovi skhemy Chua», *Naukovi zapysky UNDIIZ*, No. 2 (46), pp. 90–97.
5. Njitacke, Z.T., Fozin, T.F., Tchagpa, C.T. et al. (2020), «Control of coexisting attractors with preselection of the survived attractor in multistable Chua's system: a case study», *Complexity*, Vol. 2020, No. 1.
6. Li, C. and Sprott, J.C. (2020), «Multistability and hidden attractors in Chua's circuit», *Nonlinear Dynamics*, Vol. 100, No. 2, pp. 1455–1473.
7. Pham, V.-T., Jafari, S. and Volos, C. (2021), «A review of chaotic circuits and hidden attractors», *Entropy*, Vol. 23, No. 5, 532 p.
8. Boccaletti, S., Kurths, J., Osipov, G. et al. (2020), *Synchronization of chaotic systems: recent advances, physics reports*, Vol. 544, pp. 1–122.
9. Wang, X. and Chen, G. (2021), «Adaptive control and synchronization of chaotic systems», *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, Vol. 68, No. 5, pp. 2013–2026.
10. Bao, H. and Hu, A. (2022), «Parameter-dependent dynamics and bifurcations in Chua systems», *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 158.
11. Liu, H., Wang, Y. and Liu, Z. (2022), «Chaos-based weak signal detection: a review», *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 162.
12. Rashid, N., Ali, M. and Khan, S. (2024), «Stress detection using wearable biosensors and machine learning», *MethodsX*, Vol. 12.
13. Yadav, N., Kumar, R. and Singh, S. (2025), «AI-integrated wearable sensors for health monitoring», *Nanoscale Advances*, Vol. 7, pp. 1234–1248.
14. Snitsar, Ye.V. and Khudetskyi, I.Yu. (2022), «Vyznachennia zhyttiezdatnosti tkanyny vymiriuvanniam elektrychnykh parametriv. Teoretychne doslidzhennia», *Biomedychna inzheneriia ta tekhnolohiia*, Vol. 2, pp. 8–13.
15. «Vymiriuвання імпедансу біологічних тканин», [Online], available at: <https://studfile.net/preview/5376428/>
16. Sukholeister, O. and Nakonechnyi, A. (2023), «Strategii zlyttia fiziologichnykh syhnaliv ta rozpoznavannia emotsii», *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh*, No. 4, pp. 34–43.
17. Silva, A.M., Campa, F., Stagi, S. et al. (2023), «The bioelectrical impedance analysis (BIA) international database: aims, scope, and call for data», *European Journal of Clinical Nutrition*, No. 77, pp. 1143–1150.

**Коренівська** Оксана Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3735-7690>.

Наукові інтереси:

– дослідження, побудова та експлуатація вимірювальної та медичної апаратури.

E-mail: o.l.korenivska@gmail.com.

**Богоявленська** Юлія В'ячеславівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри фінансів та цифрової економіки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-4101-7127>.

Наукові інтереси:

- аспекти застосування теорії хаосу;
- міжнародні наукові, інвазійні та експертні проєкти.

E-mail: [bjv@ztu.edu.ua](mailto:bjv@ztu.edu.ua).

**Бенедацький** Василь Борисович – старший викладач кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-1623-1594>.

Наукові інтереси:

- технічні аспекти розробки вимірювальної апаратури та обробки сигналів.

E-mail: [vslbened@gmail.com](mailto:vslbened@gmail.com).

*The paper «Non-linear dynamics of biosignals: application of the Chua model for the analysis of psycho-emotional states» has been developed within the framework of the project «Widen performance in research and innovation capacity and competence Across EU» / «WIDE Across EU» 101 158 561 Horizon Europe program. Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*



**Korenivska O.L., Bogoyavlenska Yu.V., Benedytskyi V.B.**

**Non-linear dynamics of biosignals: application of the CHUA model for the analysis of psycho-emotional states**

The presented materials describe a method for analysing a person's psycho-emotional state using Chua's circle, which treats the skin as an element of a dynamic chaotic system. Unlike traditional resistance measurements, this approach captures topological changes in signals, where stress or arousal causes a transition from complex chaos to ordered periodic oscillations.

The paper develops a mathematical model of a modified Chua circuit, in which human skin impedance is integrated as a variable parameter affecting the circuit's conductivity. This approach allows minor changes in the skin's electrophysiological characteristics to be transformed into significant changes in the system's dynamic behaviour – specifically, transitions between chaotic and periodic oscillations, as well as the deformation of phase portraits.

To ensure the physiological validity of the model, an analysis was conducted of open biomedical datasets, specifically WESAD, DEAP, AMIGOS and PhysioNet, which contain records of electrodermal activity in various psycho-emotional states. Characteristic ranges of skin conductance were established: at rest – 100–2000 k $\Omega$ , under stress and emotional arousal – 10–300 k $\Omega$ . The obtained values were used to parameterise the model and perform simulations.

The simulation results demonstrate that even slight changes in skin impedance lead to significant changes in the attractor topology, enabling the proposed system to be used as a highly sensitive biosensor. It has been found that in a state of rest, the system is in a state of developed chaos, whereas under stressful influences, a transition to more ordered, quasi-periodic regimes is observed. Such behaviour can be utilised to develop new methods for classifying psycho-emotional states and to create highly accurate and sensitive stress detectors and systems for monitoring neural activity.

The practical application of the method allows the visualisation of the body's reactions through the deformation of attractors on an oscillograph, ensuring high sensitivity to the slightest biophysical changes.

**Keywords:** nonlinear dynamics; chaos theory; Chua circuit; skin impedance; psycho-emotional states; stress detectors.

Стаття надійшла до редакції 31.12.2025.