ISSN 2707-1898 (print)
ISSN 2786-9172 (online)

© the authors

Correspondence author
L. Y. Mosiy
lmosiy@gmail.com

Український журнал інформаційних технологій
Ukrainian Journal of Information Technology
http://science.lpnu.ua/uk/ujit
https://doi.org/10.23939/ujit2025.02.050
Article received 15.10.2025 p.
Article accepted 30.10.2025 p.
UDC 004.942

Л. Є. Мосій, М. Є. Фриз
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

СТАТИСТИЧНА ВАЛІДАЦІЯ МОДЕЛІ АМПЛІТУДНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ

У дослідженні здійснено комплексну валідацію математичної моделі дискретної функції амплітудної варіабельності для піків характерних хвиль електрокардіограми із використанням клінічних даних від пацієнтів з ішемією міокарда, суправентрикулярною аритмією, шлуночковою тахікардією та нормальним синусовим ритмом. Досліджено стаціонарність функції амплітудної варіабельності $V_k(m) = A_k(m) - A_k(m-1)$ за допомогою розширеного тесту Дікі – Фуллера та нормальність розподілу за допомогою тесту Андерсона – Дарлінга на записах електрокардіограм із бази даних PhysioNet. Застосовано аналіз статистичних моментів, зокрема середнього, дисперсії, асиметрії та ексцесу для характеристики патологоспецифічних патернів. Встановлено стаціонарність функції варіабельності для усіх діагностичних категорій ($p < 0{,}05$), що підтверджує відсутність систематичних часових трендів. Продемонстровано, що 75 % випадків відповідають нормальному розподілу ($A^2 < 0{,}712$). Математичне сподівання функції варіабельності близьке до нуля для всіх груп, що підтверджує теоретичні припущення моделі. Виявлено максимальні значення асиметрії та ексцесу для шлуночкової тахікардії ($\gamma_1 = 1{,}4334$, $\gamma_2 = 2{,}7315$), що вказує на наявність "важких хвостів" розподілу та епізодичні різкі зміни амплітуд. Для нормального синусового ритму характерна максимальна дисперсія функції варіабельності ($\sigma^2 = 0{,}0674$ мВ^2), що відображає природну варіабельність серцевого ритму. Валідована модель дає змогу інтегрувати метод аналізу функції амплітудної варіабельності в автоматизовані системи діагностики ЕКГ для виявлення серцево-судинних захворювань та забезпечує теоретичну основу для розроблення алгоритмів машинного навчання. Практична значущість результатів визначається можливістю використання виявлених статистичних маркерів у клінічній практиці для диференційної діагностики аритмій. Подальші дослідження повинні розширити аналіз на інші компоненти хвиль електрокардіограми та більшу кількість пацієнтів для підвищення статистичної потужності висновків.

Ключові слова: тест Дікі – Фуллера, тест Андерсона – Дарлінга, серцево-судинні патології, PhysioNet, автоматизована діагностика, нормальність розподілу, статистичні моменти.

Вступ / Introduction

Електрокардіографія залишається основним неінвазивним методом діагностики серцево-судинних захворювань (ССЗ), поширеність яких продовжує зростати у світі [1, 2]. У світовій науковій літературі широко досліджують методи аналізу стаціонарності ЕКГ-сигналів. Зокрема, авторегресійне моделювання [3] дає змогу визначати стаціонарні сегменти з точністю 99,3 %. Детрендований флуктуаційний аналіз [6] виявляє мультифрактальну поведінку серцевого ритму. Емпірична модова декомпозиція [7] та вейвлет-перетворення [8] ефективно враховують нестаціонарність сигналів. Приховані марковські моделі [9] моделюють переходи між фізіологічними станами, а формальні статистичні тести [10] верифікують стаціонарність сегментів ЕКГ.

Традиційний підхід до аналізу ЕКГ ґрунтується на якісній оцінці морфології характерних хвиль та міжінтервальних відстаней. Однак такий підхід не завжди враховує динамічні зміни амплітудних характеристик між послідовними серцевими циклами, які можуть містити важливу діагностичну інформацію. Незважаючи на численні дослідження, відсутня комплексна статистична валідація моделей амплітудної варіабельності на репрезентативних клінічних даних різних серцево-судинних патологій (ССП), що обмежує їх практичне застосування в автоматизованих системах діагностики.

У попередніх дослідженнях автори запропонували математичну модель амплітудної варіабельності піків характерних хвиль ЕКГ на основі дискретної функції [4, 5]. Теоретичне обґрунтування моделі передбачає, що патологічні зміни в міокарді відображаються не тільки в абсолютних значеннях амплітуд хвиль, але й у характері їх динаміки між послідовними серцевими циклами. Однак практичне застосування будь-якої математичної моделі в медичній діагностиці потребує ґрунтовної статистичної валідації на репрезентативних клінічних даних.

Об'єкт дослідження – процес аналізу стаціонарності сигналів електрокардіограм (ЕКГ) у пацієнтів із різними ССП.

Предмет дослідження – модель та засоби аналізу стаціонарності сигналів електрокардіограм (ЕКГ) у пацієнтів із різними ССП.

Мета роботи – виконати комплексну статистичну валідацію математичної моделі дискретної функції амплітудної варіабельності піків характерних хвиль ЕКГ на клінічних даних пацієнтів із різними ССП.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні *завдання дослідження*:

- перевірити гіпотезу про стаціонарність функції амплітудної варіабельності для чотирьох діагностичних категорій;
- оцінити відповідність розподілу функції варіабельності нормальному закону;
- виявити патологоспецифічні відмінності статистичних параметрів функції амплітудної варіабельності;
- обґрунтувати можливість клінічного застосування розробленої математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Авторегресійне моделювання та автокореляційний аналіз. Дослідники у праці [3] розробили модель, що використовує автокореляційні характеристики для визначення керуючих стаціонарних авторегресійних процесів, які покладено в основу аритмічних сигналів ЕКГ. Їхній підхід підтвердив, що різні аритмічні епізоди певною мірою відповідають стаціонарній авторегресійній поведінці, що сприяє виявленню аритмій із високою точністю (близько 99,3 %). Цей підхід дає змогу розділити часові ряди ЕКГ на стаціонарні сегменти, придатні для параметричної спектральної оцінки, підтримуючи клінічну діагностику.

Детрендований флуктуаційний аналіз та мультифрактальний детрендований флуктуаційний аналіз. Детрендований флуктуаційний аналіз забезпечує надійний метод виявлення довгодіючих кореляцій у нестаціонарних часових рядах за допомогою усунення трендів на різних масштабах. Мультифрактальний детрендований флуктуаційний аналіз розширює цей підхід для кількісної оцінки мультифрактальності, що вказує на складну фізіологічну динаміку. У роботі [6] виявлено, що динаміка серцебиття здорової людини демонструє мультифрактальну поведінку, яка порушується в патологічних станах, таких як застійна серцева недостатність.

Емпірична модова декомпозиція та аналіз миттєвої частоти. Емпірична модова декомпозиція адаптивно розкладає сигнал ЕКГ на внутрішні модові функції, кожна з яких представляє локально стаціонарні коливальні компоненти. Вчені у дослідженні [7] використовували емпіричну модову декомпозицію в поєднанні з миттєвою частотою для захоплення змінного в часі частотного вмісту, що стосується тонких особливостей, таких як альтернація Т-хвилі – відомого стратифікатора ризику раптової серцевої смерті. Ця техніка обходить обмеження традиційних спектральних методів, які передбачають стаціонарність, і продемонструвала точність класифікації понад 80 % як на синтетичних, так і на реальних наборах даних ЕКГ.

Вейвлет-перетворення та часо-частотні представлення. Методи на основі вейвлетів забезпечують одночасну локалізацію у часі та за частотою, ефективно враховуючи нестаціонарність сигналів ЕКГ. Науковець у роботі [8] подав перетворення Слепяна – часо-частотне представлення, яке узагальнює класичні спектральні визначення, пом'якшуючи недоліки білінійних підходів. Цей метод полегшує сліпе розділення джерел та виділення ознак зі складних біосигналів, ураховуючи нестаціонарні записи ЕКГ. Вейвлет-параметризація також широко визнана для виявлення сингулярностей та окреслення особливостей форми хвиль ЕКГ, сприяєи надійній автоматизованій сегментації [9].

Приховані марковські моделі для імовірнісної сегментації та моделювання. Приховані марковські моделі моделюють сигнали електрокардіограми як послідовності прихованих станів, що відображають фізіологічні або морфологічні стадії. Вчені у праці [9] обговорили інтеграцію прихованих марковських моделей із вейвлет-аналізом для використання статистичної регуляризації під час сегментації транзитних серцевих подій. Їхні багатостанові моделі враховують нестаціонарні переходи та фіксують динаміку форми хвилі з мірами довіри, отриманими із імовірнісних правдоподібностей, забезпечуючи точніше окреслення, ніж евристичні алгоритми.

Статистичні тести стаціонарності. Формальні статистичні тести, такі як розширений тест Дікі – Фуллера та тест Квятковського – Філіпса – Шмідта – Шина, застосовували до сегментів ЕКГ для виявлення стаціонарності. Дослідники [10] використали різні статистичні тести для оцінювання випадковості та стаціонарності до фетальних сигналів ЕКГ, отриманихіз абдомінальних записів, покращуючи виділення ознак та патологічне моделювання. Ці тести допомагають у прийнятті рішення щодо сфери застосування стаціонарних або нестаціонарних аналітичних методів, хоча їхня надійність залежить від ефективності попереднього оброблення та фільтрації шуму.

Нелінійні часові ряди та міри складності. Методи, основані на нелінійній динаміці, оцінюють стаціонарність через такі показники, як максимальний показник Ляпунова, фрактальні розмірності та міри ентропії. Дослідник у праці [11] підкреслив значення передумов детермінізму та стаціонарності для застосування моделей нелінійних часових рядів до ЕКГ, пропонуючи програмні інструменти для розрахунку цих мір. Вчені у дослідженні [12] запропонували новий фрактальний вимір, названий центральним інформаційним виміром, для описання аперіодичних, фрактальних властивостей сигналів ЕКГ пацієнтів із діабетом, демонструючи статистичну диференціацію від здорових контрольних груп.

Вітчизняні дослідження статистичних методів аналізу електрокардіограми. Дослідники у праці [13] розробили методи статистичної оцінки ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, моделюючи їх як вектори стаціонарних випадкових процесів

та підтверджуючи гіпотезу нормальності для компонентів розподілу. Розроблені статистичні методи можуть використовуватися в побудові спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованих кардіодіагностичних комплексах.

Вчені у роботі [14] продемонстрували застосування класичних статистичних методів, ураховуючи середнє значення, дисперсію, кореляційний аналіз та аналіз головних компонент для попереднього оброблення ЕКГ, успішно зменшивши розмірність даних у чотири рази та ідентифікувавши частотні характеристики перешкод.

Дослідження [15] містить огляд нелінійних методів аналізу сигналів, а саме: аналіз реконструйованого фазового простору, показники Ляпунова, кореляційний вимір, детрендований флуктуаційний аналіз, рекурентний графік, графік Пуанкаре, приблизної ентропії та вибіркової ентропії разом з їхніми недавніми застосуваннями в аналізі сигналів ЕКГ.

Вчені у праці [16] конкретно розглянули нестаціонарні сигнали ЕКГ із використанням фрактальних методів, застосовуючи аналіз масштабованого розмаху та мультифрактальний детрендований флуктуаційний аналіз для відрізняння здорових суб'єктів від тих, хто має ССЗ, через перевірку статистичної значущості та аналіз робочих характеристик приймача.

Матеріали та методи дослідження.

Клінічні дані. Для статистичної валідації моделі використано ЕКГ записи із загальнодоступної бази даних PhysioNet [17] – міжнародного репозиторію фізіологічних сигналів. Досліджувана вибірка охоплює чотири діагностичні категорії: ішемія міокарда (*mi*), надшлуночкова аритмія (*sa*), шлуночкова тахікардія (*vt*) та нормальний синусовий ритм (*nr*) в контрольній групі.

Математична модель амплітудної варіабельності. Функцію амплітудної варіабельності характерних зубців ЕКГ [4, 5] формалізовано у вигляді дискретної функції $V_k(m)\frac{1}{n}$:

$$V_k(m) = A_k(m) - A_k(m-1), \quad k \in \{P, Q, R, S, T\}, \quad m \in Z, \quad (1)$$

де $A_k(m)$ – амплітуда *k*-го типу піка в *m*-му кардіоциклі (мВ); $A_k(m-1)$ – амплітуда *k*-го типу піка в попередньому валідному кардіоциклі (мВ); $V_k(m)$ – значення функції амплітудної варіабельності зубців ЕКГ, що відображає зміну амплітуди зубця *k*-го типу між поточним *m* та попереднім кардіоциклом $(m-1)$.

$V_k(m)$ – стаціонарна випадкова послідовність із дискретним часом, яка має нормальний розподіл. Одним із завдань цієї статті є тестування властивостей стаціонарності та нормальності ймовірнісного розподілу моделі амплітудної варіабельності на основі використання методів перевірки статистичних гіпотез.

Статистичні методи

Для валідації моделі застосовано комплекс статистичних методів:

1. Розширений тест Дікі – Фуллера (ADF) для перевірки стаціонарності часових рядів [18]. Тест ґрунтується на гіпотезах:

- H_0: наявність одиничного кореня (процес нестаціонарниц);
- H_1: відсутність одиничного кореня (процес стаціонарний).

За рівня значущості $\alpha = 0{,}05$, якщо *p*-значення менше ніж 0,05, нульова гіпотеза відхиляється на користь альтернативної.

2. Тест Андерсона – Дарлінга для перевірки нормальності розподілу [19]. Тест є модифікацією критерію згоди Колмогорова – Смірнова із підвищеною чутливістю до відхилень у хвостах розподілу. Гіпотези:

- H_0: емпіричний розподіл відповідає нормальному розподілу;
- H_1: емпіричний розподіл не відповідає нормальному розподілу.

За рівня значущості $\alpha = 0{,}05$ критичне значення становить $A^2 = 0{,}712$.

3. Аналіз статистичних моментів:

- математичне сподівання (μ) характеризує центральну тенденцію розподілу;
- дисперсія (σ^2) відображає міру розсіювання значень;
- коефіцієнт асиметрії (γ_1) – третій стандартизований момент, $\gamma_1 = 0$ для симетричних розподілів;
- коефіцієнт ексцесу (γ_2) – четвертий стандартизований момент, $\gamma_2 = 0$ для нормального розподілу.

4. Двовибірковий тест Колмогорова – Смірнова для порівняння емпіричних функцій розподілу між різними діагностичними категоріями. Статистику тесту розраховують як максимальну відстань між двома емпіричними функціями розподілу.

Програмне забезпечення. Усі статистичні розрахунки виконано із використанням мови програмування Python (версія 3.x) з бібліотеками:

- NumPy (v1.21.0) – для числових обчислень;
- SciPy (v1.7.0) – для статистичних тестів;
- Statsmodels (v0.12.2) – для тесту Дікі – Фуллера;
- Matplotlib (v3.4.2) – для візуалізації результатів.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для усіх сигналів ЕКГ виконано обчислення функції варіабельності: для кожного валідного кардіоциклу розраховано значення $V_R(m)$ згідно з формулою (1) та застосовано описані вище статистичні тести до отриманих значень функції. Результати статистичного аналізу функції амплітудної варіабельності за ішемії міокарда: а) дискретна послідовність варіацій; б) автокореляційна функція – наведено на рис. 1.

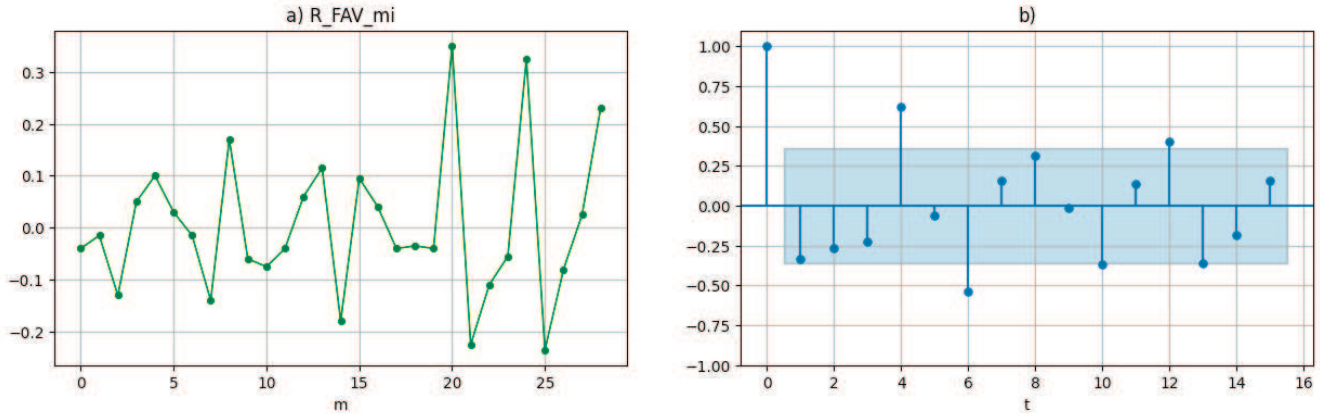

Рис. 1. Статистичний аналіз функції амплітудної варіабельності за ішемії міокарда: а – дискретна послідовність варіацій (по осі X – номер кардіоциклу m, по осі Y – $V_R(m)$, мВ); б – автокореляційна функція / Statistical analysis of amplitude variability function in myocardial ischemia: a – discrete sequence of variations (X-axis – cardiac cycle number m, Y-axis – $V_R(m)$, mV); b – autocorrelation function

Функція амплітудної варіабельності продемонструвала стаціонарність (p = 0,0111) та відповідність нормальному розподілу (A_2 = 0,5288 < 0,712). Математичне сподівання, близьке до нуля (μ = 0,0026 мВ), підтверджує теоретичне припущення про центрованість функції варіабельності та валідність розробленої математичної моделі. Дисперсія функції варіабельності (σ^2 = = 0,0202 мВ^2) перевищує дисперсію вихідних амплітуд, що пояснюється природою диференціального перетворення згідно з формулою (1).

Статистичні параметри розподілу (γ_1 = 0,7449, γ_2 = 0,6924) вказують на помірне відхилення від ідеально симетричного нормального розподілу, проте ці відхилення не є статистично значущими за критерієм Андерсона – Дарлінга.

Результати статистичного аналізу функції амплітудної варіабельності за надшлуночкової аритмії: а) дискретна послідовність варіацій; б) автокореляційна функція – наведено на рис. 2.

Функція варіабельності демонструє статистичну значущість стаціонарності серед усіх груп. Тест Андерсона – Дарлінга виявив відповідність нормальному розподілу (A^2 = 0,1634), що підтверджує теоретичну обґрунтованість моделі для цього типу патології. Статистичні параметри (μ = 0,0040 мВ, σ^2 = 0,0162 мВ^2, γ_1 = 0,1264, γ_2 = –0,5711) вказують на близькість до нормального розподілу.

Результати статистичного аналізу функції амплітудної варіабельності за шлуночкової тахікардії: а) дискретна послідовність варіацій; б) автокореляційна функція – наведені на рис. 3.

Функція варіабельності виявляє стаціонарні властивості (p = 0,0061), що підтверджує робастність запропонованого диференціального перетворення. Проте нормальність розподілу не підтверджено (A^2 = 0,8835 > 0,712).

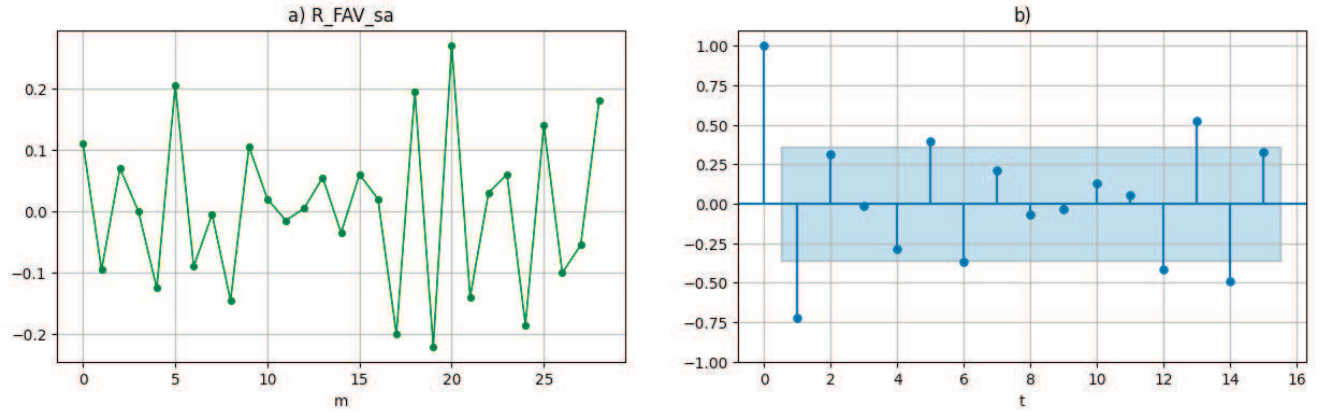

Рис. 2. Статистичний аналіз функції амплітудної варіабельності за надшлуночкової аритмії: а – дискретна послідовність варіацій (по осі X – номер кардіоциклу m, по осі Y – $V_R(m)$, мВ); б – автокореляційна функція / Statistical analysis of amplitude variability function in supraventricular arrhythmia: a – discrete sequence of variations (X-axis – cardiac cycle number, m, Y-axis – $V_R(m)$, mV); b – autocorrelation function

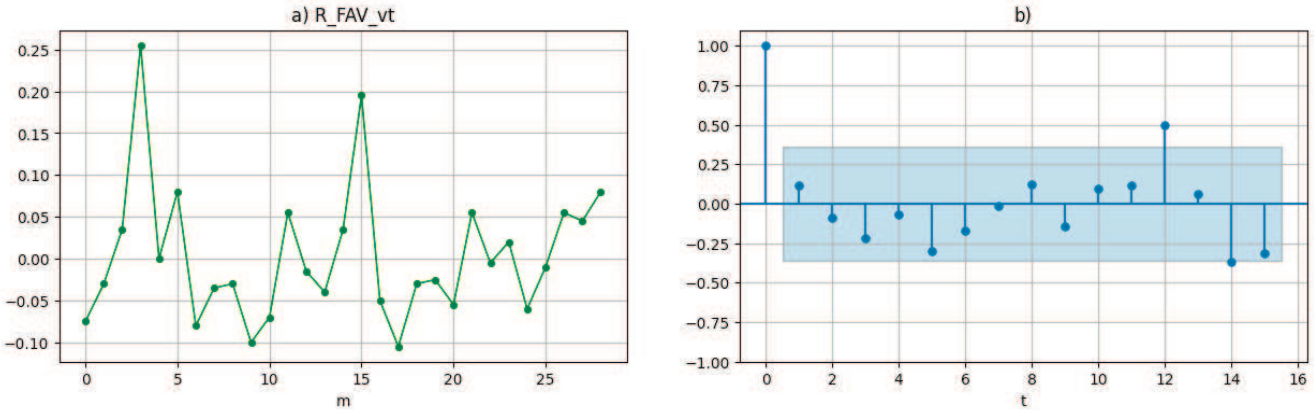

Рис. 3. Статистичний аналіз функції амплітудної варіабельності при шлуночковій тахікардії: а – дискретна послідовність варіацій (по осі X – номер кардіоциклу m, по осі Y – $V_R(m)$, мВ); б – автокореляційна функція / Statistical analysis of amplitude variability function in ventricular tachycardia: a – discrete sequence of variations (X-axis – cardiac cycle number m, Y-axis – $V_R(m)$, mV); b – autocorrelation function

Критично важливим є виявлення максимальних значень асиметрії ($\gamma_1 = 1{,}4334$) та ексцесу ($\gamma_2 = 2{,}7315$) у всій дослідженій вибірці. Такий високий позитивний ексцес вказує на наявність "важких хвостів" розподілу, що відображає епізодичні різкі зміни амплітуд, характерні для шлуночкової тахікардії. Ця статистична особливість має потенційну діагностичну цінність для автоматизованої класифікації аритмій.

Результати статистичного аналізу функції амплітудної варіабельності за нормального синусового ритму: а) дискретна послідовність варіацій; б) автокореляційна функція – наведено на рис. 4.

Функція амплітудної варіабельності демонструє стаціонарність ($p = 0{,}0031$) та нормальність розподілу ($A^2 = 0{,}3256 < 0{,}712$), що підтверджує адекватність математичної моделі для фізіологічного стану. Максимальна дисперсія функції варіабельності ($\sigma^2 = 0{,}0674$ мВ^2) відображає природну варіабельність серцевого ритму.

Статистичні параметри ($\mu = -0{,}0086$ мВ, $\gamma_1 = 0{,}0965$, $\gamma_2 = -0{,}5094$) свідчать про близькість розподілу до нормального.

Порівняльний аналіз статистичних властивостей функції амплітудної варіабельності подано у табл. 1, 2.

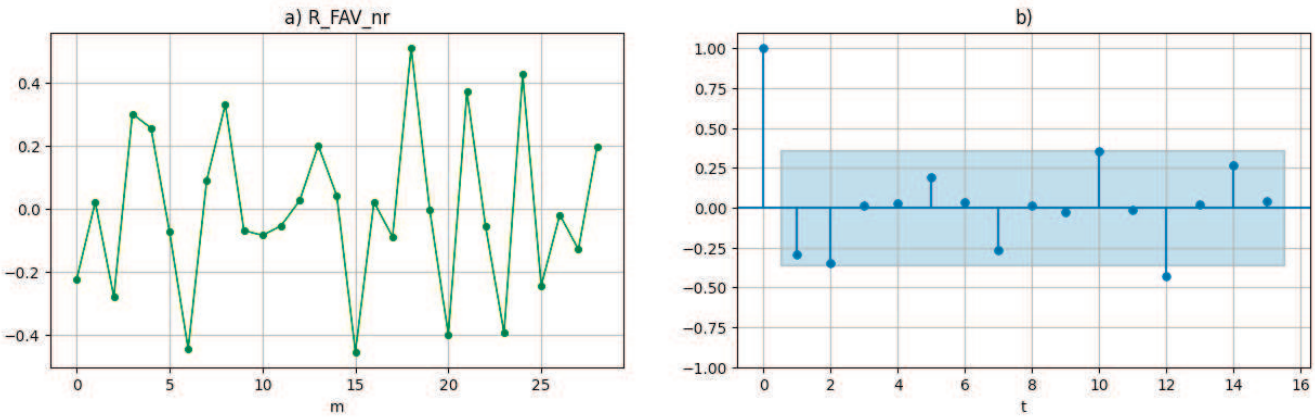

Рис. 4. Статистичний аналіз функції амплітудної варіабельності за нормального синусового ритму:
а – дискретна послідовність варіацій (по осі X – номер кардіоциклу m, по осі Y – $V_R(m)$, мВ);
б – автокореляційна функція / Statistical analysis of amplitude variability function in normal sinus rhythm:
a – discrete sequence of variations (X-axis – cardiac cycle number m, Y-axis – $V_R(m)$, mV); b – autocorrelation function

Табл. 1. Узагальнені результати статистичної валідації / Generalized results of statistical validation

Патологія	Функція варіабельності	
	Стаціонарність (p-value)	Нормальність (A^2)
mi	0,0111 (+)	0,5288 (+)
sa	< 0,0001 (+)	0,1634 (+)
vt	0,0061 (+)	0,8835 (–)
nr	0,0031 (+)	0,3256 (+)

(+) – гіпотеза підтверджена; (–) – гіпотеза відхилена.

Табл. 2. Дескриптивні статистики функції амплітудної варіабельності / Descriptive statistics of amplitude variability function

Параметр	*mi*	*sa*	*vt*	*nr*
μ, мВ	0,0026	0,0040	0,0033	–0,0086
σ^2, мВ^2	0,0202	0,0162	0,0065	0,0674
γ_1	0,7449	0,1264	1,4334	0,0965
γ_2	0,6924	–0,5711	2,7315	–0,5094

Обговорення результатів дослідження.

Порівняльний аналіз виявив три основні закономірності:

1. Універсальність стаціонарності функції варіабельності. Незалежно від типу патології, функція $V_k(m)$ демонструє стаціонарність у всіх випадках ($p < 0,05$), що підтверджує фундаментальну коректність запропонованої математичної моделі.

2. Патологоспецифічність статистичних моментів вищих порядків. Асиметрія та ексцес виявляють значну дискримінантну здатність для диференціації патологій, особливо для шлуночкової тахікардії. Максимальні значення цих параметрів для шлуночкової тахікардії ($\gamma_1 = 1,4334$, $\gamma_2 = 2,7315$) можуть слугувати додатковими діагностичними маркерами в алгоритмах автоматизованого розпізнавання аритмій.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розвинено математичну модель функції амплітудної варіабельності електрокардіосигналу у вигляді стаціонарної нормально розподіленої випадкової послідовності. На відміну від наявних, у запропонованій моделі враховано властивості стаціонарності та нормальності ймовірнісного розподілу, а також здійснено валідацію моделі методами перевірки статистичних гіпотез на підставі експериментальних даних, що відповідають станам норми та патології серцево-судинної системи.

Практична значущість результатів дослідження визначається можливістю інтеграції виявлених статистичних маркерів у системи автоматизованої діагностики ССЗ. Підтверджена стаціонарність функції варіабельності дає змогу застосовувати широкий спектр методів аналізу часових рядів для розроблення прогностичних моделей.

Обмеження дослідження – це порівняно невеликий обсяг вибірки для кожної діагностичної категорії та аналіз лише амплітуд R-зубців. Подальші дослідження повинні передбачати аналіз інших характерних хвиль ЕКГ (*P*, *Q*, *S*, *T*) та розширення вибірки для підвищення статистичної потужності висновків.

Висновок / Conclusions

Виконана комплексна статистична валідація математичної моделі дискретної функції амплітудної варіабельності $V_k(m) = A_k(m) - A_k(m-1)$ на клінічних даних пацієнтів із чотирма різними серцево-судинними станами підтверджує математичну коректність та практичну застосовність запропонованого підходу.

Стаціонарність функції амплітудної варіабельності, верифікована розширеним тестом Дікі – Фуллера для усіх досліджених діагностичних категорій ($p < 0,05$), вказує на відсутність систематичного часового тренду та обґрунтовує легітимність застосування методів аналізу стаціонарних випадкових процесів.

Відповідність розподілу функції варіабельності нормальному закону, підтверджена тестом Андерсона – Дарлінга у 75 % випадків ($A^2 < 0,712$), дає змогу використовувати класичний апарат параметричної статистики для побудови прогностичних моделей та систем класифікації.

Статистичні параметри функції амплітудної варіабельності (дисперсія, асиметрія, ексцес) демонструють патологоспецифічні відмінності та можуть бути інтегровані у простір ознак для класифікаторів машинного навчання ССП.

Результати валідації на даних міжнародної бази PhysioNet підтверджують можливість клінічного застосування розробленої математичної моделі як складової частини автоматизованих систем ЕКГ-діагностики та моніторингу пацієнтів із ССЗ.

Перспективи подальших досліджень охоплюють розширення моделі на інші характерні хвилі ЕКГ, розроблення алгоритмів машинного навчання із використанням виявлених статистичних маркерів та клінічну апробацію на більших вибірках пацієнтів.

References

1. Cardiovascular diseases (CVDs). World Health Organization (WHO). URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds) (date of access: 30.09.2025).
2. Virani, S. S., Alonso, A., Aparicio, H. J., Benjamin, E. J., Bittencourt, M. S., Callaway, C. W., Carson, A. P., Chamberlain, A. M., Cheng, S., Delling, F. N., Elkind, M. S. V., Evenson, K. R., Ferguson, J. F., Gupta, D. K., Khan, S. S., Kissela, B. M., Knutson, K. L., Lee, C. D., … Lewis, T. T. (2021). *Heart Disease and Stroke Statistics – 2021 Update. Circulation*, 143(8). https://doi.org/10.1161/cir.0000000000000950
3. Mandal, S., & Sinha, N. (2021). Arrhythmia diagnosis from ECG signal analysis using statistical features and novel classification method. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 21(03), 2150025. https://doi.org/10.1142/s0219519421500251
4. Sverstiuk A., & Mosiy, L. (2025). Mathematical modeling of electrocardiogram signal amplitude variability for information technology analysis of their morphological and rhythmic characteristics. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (59), 228–240. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-29

5. Mosiy, L., & Sverstiuk, A. (2025). Information technology for electrocardiographic signal analysis based on mathematical models of temporal and amplitude variability. *Computer Systems and Information Technologies*, (2), 36-44. https://doi.org/ 10.31891/csit-2025-2-4
6. Ivanov, P. Ch., Nunes Amaral, L. A., Goldberger, A. L., Havlin, S., Rosenblum, M. G., Stanley, H. E., & Struzik, Z. R. (2001). From 1/f noise to multifractal cascades in heartbeat dynamics. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 11(3), 641-652. https://doi.org/10.1063/1.1395631
7. Rahnama, N. (2021). Empirical Mode Decomposition and Analysis of Non-Stationary Cardiac Signals. *Ryerson University Library and Archives*. https://doi.org/10.32920/ryerson. 14664297.v1
8. Senay, S. (2018). Time-frequency BSS of biosignals. *Healthcare Technology Letters*, 5(6), 242-246. https://doi.org/10.1049/htl. 2018.5029
9. Samar, K., Kas, O., & Noureddine, E. (2011). Using Hidden Markov Models for ECG Characterisation. In Hidden Markov Models, Theory and Applications. *InTech.* https://doi.org/ 10.5772/13916
10. Dragu, M.-A., Frunzete, M.-C., & Zirna, B.-A. (2022). Extraction and Statistical Analysis of Fetal Electrocardiogram. In 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) (pp. 01-04). 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). *IEEE*. https://doi.org/10.1109/ehb55594.2022.9991673
11. Perc, M. (2005). Nonlinear time series analysis of the human electrocardiogram. *European Journal of Physic*s, 26(5), 757-768. https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/5/008
12. Ma, H., Wang, X., Zhao, T., Sun, H., & Liu, Z. (2019). The Research on Fractal Dimension of Diabetic Patients Based on ECG Signal. In Proceedings of the 2019 4th International Conference on Mathematics and Artificial Intelligence (pp. 204-208). ICMAI 2019: 2019 4th International Conference on Mathematics and Artificial Intelligence. ACM. https://doi.org/ 10.1145/3325730.3325766
13. Litvinenko, Y., Lupenko, S., Oniskiv, P., Trisnyuk, V., & Zozulya, A. (2020). Методи статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі його моделі у вигляді вектора стаціонарних випадкових послідовностей. *Системи управління, навігації та зв'язку. зб. наук. праць*, 2(60), 75-84. https:// doi.org/10.26906/sunz.2020.2.075
14. Pashko, A., Chaikovska, O., & Kharchenko, Y. (2023). Use of Statistical Analysis Tools for ECG Processing. *Digital Platform: Information Technologies in Sociocultural Sphere*, 6(2), 284-298. https://doi.org/10.31866/2617-796 x.6.2.2023.293593
15. Nayak, S. K., Bit, A., Dey, A., Mohapatra, B., & Pal, K. (2018). A Review on the Nonlinear Dynamical System Analysis of Electrocardiogram Signal. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, 1-19. https://doi.org/10.1155/2018/6920420
16. Gospodinova, E., Lebamovski, P., & Gospodinov, M. (2021). Automatic analysis of ECG signals based on their fractal and multifractal properties. In International Conference on Computer Systems and Technologies '21 (pp. 136-140). CompSysTech '21: International Conference on Computer Systems and Technologies '21. ACM. https://doi.org/10.1145/3472410. 3472421
17. Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. Ch., Mark, R. G., Mietus, J. E., Moody, G. B., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet. *Circulation*, 101(23). https://doi.org/10.1161/01. cir.101.23.e215
18. Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427. https://doi.org/10.2307/2286348
19. Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1952). Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Processes. *The Annals of Mathematical Statistics*, 23(2), 193-212. https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437

L. Y. Mosiy, M. Y. Fryz

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

STATISTICAL VALIDATION OF THE AMPLITUDE VARIABILITY MODEL OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL

This study conducted comprehensive validation of the mathematical model of the discrete amplitude variability function for characteristic electrocardiographic wave peaks using clinical data from patients with myocardial ischemia, supraventricular arrhythmia, ventricular tachycardia, and normal sinus rhythm. The research investigated the stationarity of the amplitude variability function using the Augmented Dickey – Fuller test and distribution normality using the Anderson – Darling test on electrocardiogram recordings from the PhysioNet database. Applied statistical analysis included moments calculation encompassing mean, variance, skewness, and kurtosis to characterize pathology-specific patterns. The mathematical model was formalized as the discrete function $V_k(m)=A_k(m)–A_k(m–1)$, where $A_k(m)$ represents the amplitude of the k-th type peak in the m-th cardiac cycle and $A_k(m)$ represents the amplitude in the previous valid cardiac cycle. Statistical testing was performed at significance level $\alpha = 0.05$ for stationarity assessment with null hypothesis of unit root presence, and critical value $A^2 = 0.712$ for normality verification. Results established stationarity of the variability function for all diagnostic categories with p-values of 0.0111 for myocardial ischemia, less than 0.0001 for supraventricular arrhythmia, 0.0061 for ventricular tachycardia, and 0.0031 for normal sinus rhythm, confirming the absence of systematic temporal trends and validating the fundamental correctness of the proposed mathematical model. Normality testing demonstrated that 75 % of cases showed correspondence to normal distribution, with Anderson – Darling statistics of 0.5288 for myocardial ischemia, 0.1634 for supraventricular arrhythmia, 0.3256 for normal sinus rhythm, while ventricular tachycardia showed deviation with $A^2 = 0.8835$. Statistical parameters revealed pathology-specific characteristics: ventricular tachycardia exhibited maximum skewness ($\gamma_1 = 1.4334$) and kurtosis ($\gamma_2 = 2.7315$) indicating heavy-tailed distribution and episodic amplitude variations, while normal sinus rhythm showed maximum

variance ($\sigma^2 = 0.0674$ mV^2) reflecting natural heart rate variability. The validated model enables integration into automated ECG diagnostic systems for cardiovascular disease detection, providing theoretical foundation for machine learning algorithms development. Practical significance includes potential application of identified statistical markers in clinical practice for differential arrhythmia diagnosis. Future research should expand the analysis to other electrocardiographic wave components including *P*, *Q*, *S*, and *T* waves, and incorporate larger patient populations to enhance statistical power and clinical applicability of the findings.

Keywords: Dickey – Fuller test, Anderson-Darling test, cardiovascular pathologies, automated diagnostics, PhysioNet database, statistical moments, normal distribution.

Інформація про авторів:

Мосій Любомир Євгенійович, аспірант, кафедра комп'ютерних наук.

Email: lmosiy@gmail.com; https://orcid.org/0009-0000-9778-331X

Фриз Михайло Євгенович, канд. техн. наук, доцент, кафедра комп'ютерних наук.

Email: mykh.fryz@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8720-6479

Цитування за ДСТУ: Мосій Л.Є., Фриз М.Є. Статистична валідація моделі амплітудної варіабельності електрокардіосигналу. *Український журнал інформаційних технологій*. 2025, т. 7, № 2. С. 50-57.

Citation APA: Mosiy, L. Ye., & Fryz, M. Ye. (2025). Statistical validation of the amplitude variability model of electrocardiographic signal. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 7(2), 50-57. https://doi.org/10.23939/ujit2025.02.50