

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ВАЛІДАЦІЇ МОДЕЛІ АМПЛІТУДНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ

L.Y. Mosiy

STATISTICAL METHODS FOR VALIDATION OF THE ECG SIGNAL AMPLITUDE VARIABILITY MODEL

Аналіз стаціонарності електрокардіографічних сигналів (ЕКС) є важливим напрямком досліджень у біомедичній інженерії. Сучасні методи включають авторегресійне моделювання для ідентифікації стаціонарних сегментів, детрендований флуктуаційний аналіз для дослідження мультифрактальних властивостей серцевого ритму, емпіричну модову декомпозицію та вейвлет-перетворення для врахування нестаціонарності, а також приховані марковські моделі для моделювання переходів між фізіологічними станами [1-5].

У попередніх роботах авторами розроблено математичну модель амплітудної варіабельності піків зубців ЕКС [6, 7]. Патологічні зміни в міокарді проявляються не лише в абсолютних значеннях амплітуд, але й у характері їхньої динаміки. Проте клінічне застосування моделі потребує статистичної валідації.

Для валідації використано ЕКС із бази PhysioNet [8]. Вибірка охоплює чотири категорії: ішемія міокарда (mi), надшлуночкова аритмія (sa), шлуночкова тахікардія (vt) та нормальний синусовий ритм (nr).

Функція амплітудної варіабельності (ФАВ) визначається як:

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

де $A_k(m)$ – амплітуда k -го типу піку в m -му кардіоциклі (мВ); $A_k(m-1)$ – амплітуда k -го типу піку в попередньому валідному кардіоциклі (мВ); $V_k(m)$ – значення ФАВ зубців ЕКС, що відображає зміну амплітуди зубця k -го типу між поточним m та попереднім кардіоциклом ($m-1$).

Метою роботи є тестування стаціонарності та нормальності розподілу ФАВ. Застосовано: розширений тест Дікі-Фуллера (ADF) для перевірки стаціонарності [9]; тест Андерсона-Дарлінга для нормальності розподілу [10]; аналіз статистичних моментів (μ , σ^2 , γ_1 , γ_2); двовибірковий тест Колмогорова-Смірнова для порівняння розподілів.

Для всіх ЕКС проведено обчислення ФАВ: для кожного валідного кардіоциклу розраховано значення згідно з формулою (1) та застосовано описані вище статистичні тести до отриманих значень функції. Порівняльний аналіз статистичних властивостей ФАВ представлений у табл. 1-2.

Таблиця 1. Результати статистичної валідації

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.

Таблиця 2. Дескриптивні статистики функції амплітудної варіабельності

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

Висновки. Статистична валідація моделі ФАВ на клінічних даних підтверджує її коректність. Тест Дікі-Фуллера засвідчив стаціонарність для всіх категорій ($p < 0,05$), що обґрунтовує застосування методів аналізу стаціонарних процесів. Тест Андерсона-Дарлінга підтвердив нормальність розподілу у 75% випадків ($A^2 < 0,712$), що дозволяє використовувати параметричну статистику.

Статистичні параметри ФАВ демонструють патологоспецифічні відмінності та можуть бути інтегровані у простір ознак для класифікаторів машинного навчання. Валідація на даних PhysioNet підтверджує можливість клінічного застосування моделі в автоматизованих системах ЕКГ-діагностики.

Література

1. 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>
2. 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>
3. Senay, S. (2018). Time-frequency BSS of biosignals. *Healthcare Technology Letters*, 5(6), 242–246. <https://doi.org/10.1049/htl.2018.5029>
4. Samar, K., Kas, O., & Nouredine, E. (2011). Using Hidden Markov Models for ECG Characterisation. In *Hidden Markov Models, Theory and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/13916>
5. 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>
6. 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>
7. 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>
8. 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>
9. 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>

10. 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>

УДК 004.932

А.А. Музичук, здобувач вищої освіти

(Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, Україна)

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ СОРТУВАННЯ ВІДЕОДАНИХ У ХМАРНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ МУЛЬТИМЕДІА

A.A. Muzychuk, higher education applicant

OPTIMIZATION OF METHODS FOR SORTING AND IDENTIFYING VIDEO MATERIALS IN CLOUD MULTIMEDIA SYSTEMS

У сучасну епоху цифрової трансформації обсяги медіаконтенту, особливо відеоматеріалів, зростають експоненційно, що створює надзвичайне навантаження на системи зберігання й передачі даних. Пандемія COVID-19 значно прискорила цей процес, за період жорстких карантинів кількість онлайн-активностей (стримінг, відеодзвінки, віддалена робота та ін.) зросла, що призвело до різкого вибуху інтернет-трафіку. Згідно зі звітом Sandvine за перше півріччя 2021 саме відео-стримінг домінував у глобальному інтернет-трафіку. На нього припадало 53,72 % від усього пропускового навантаження [1]. Така частка надзвичайно висока, і свідчить, що переважна більшість передачі даних у мережах тепер займає відеоконтент.

Ці дані підкреслюють, зростання відеоспоживання та перехід до «хмарних» і стримінгових сервісів приводить до суттєвого навантаження на зберігання та передачу медіаданих [2]. У такому контексті традиційні методи зберігання відео стають неефективними або надто ресурсомісткими, що актуалізує необхідність застосування оптимізованих підходів.

Сучасні дослідження у галузі відеообробки все частіше орієнтуються на застосування семантичного кодування, яке дозволяє виконувати попередню обробку відео без повного декодування, методів глибинного навчання для класифікації кадрів, пошуку сцен і визначення змістових характеристик, адаптивного кодування та транскодування, що зменшує обсяг передаваних даних залежно від пропускової здатності мережі [3]. Також відбувається використання edge-cloud архітектур [4], де частина обчислень переноситься на периферійні вузли з метою зменшення навантаження на центральні сервери.

Дослідження також показують ефективність алгоритмів інтелектуального сортування відео на основі контентних ознак [5], що дозволяє підвищити швидкість пошуку та оптимізувати структури сховищ у хмарному середовищі. Застосування таких підходів забезпечує скорочення часу ідентифікації відеоматеріалів, зниження витрат на обчислювальні ресурси та покращення масштабованості мультимедійних сервісів.

Література

1. Moina-Rivera, W., Garcia-Pineda, M., Gutiérrez-Aguado, J. et al. Cloud media video encoding: review and challenges. *Multimed Tools Appl* 83, 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18763-2>