

**Л.С. ФАЙНЗІЛЬБЕРГ**Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України, Київ, Україна, e-mail: *fainzilberg@gmail.com*.

## ФАЗОВИЙ ПОРТРЕТ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМИ ЯК ЗАСІБ БІОМЕТРІЇ

**Анотація.** Удосконалено підхід до побудови біометричних систем, що базується на аналізі фазового портрета одноканальної електрокардіограми (ЕКГ) особи, яка тестується. Запропоновано правила, що забезпечують розв'язання задач ідентифікації та верифікації (аутифікації) особи. Експериментальні дослідження показали, що запропоновані вирішувальні правила забезпечують 96.6% правильних рішень у процесі ідентифікації людини за 3133 записами ЕКГ у групі з 167 осіб та 99.5% правильних рішень у процесі верифікації людини за 204 записами ЕКГ 62 різних осіб. Визначено перспективи проведення подальших досліджень, спрямованих на розв'язання практичних задач біометрії.

**Ключові слова:** електрокардіограма, фазовий портрет, біометрична система, відстань Гаусдорфа, ідентифікація та верифікація особи.

### ВСТУП

Проблема біометричної ідентифікації людини базується на аналізі індивідуальних характеристиках особи і стає все більш актуальною. Сьогодні найпоширенішими є дактилоскопічні системи [1, 2], які розпізнають характерні особливості відбитків пальців. Загально визнаними також є системи біометричної ідентифікації, які ґрунтуються на розпізнаванні індивідуальних характеристик райдужної оболонки ока [3], голосу [4], обличчя [5] або його окремих частин.

Стрімкий розвиток засобів цифрової обчислювальної техніки і технології смартфонів сприяв створенню комерційних систем біометричної ідентифікації, що забезпечують достатньо високі показники. Водночас відомо, що унікальні характеристики, на яких базуються згадані засоби біометрії, можуть бути підроблені зловмисником. Наприклад, відбиток пальця можна підробити за допомогою спеціальної рукавички або муляжу (*spoofing in fingerprint*). Отже є потреба у спеціальних додаткових засобах захисту [6, 7]. Аналогічні підробки можливі і в системах біометрії, які базуються на розпізнаванні райдужної оболонки ока, обличчя і голосу.

Тож учені постійно шукають нові напрямки у побудові систем біометрії, що ґрунтуються на аналізі таких індивідуальних характеристиках людини, які важко підробити. Одна з таких характеристик — електрокардіограма (ЕКГ), що надає інформацію про електричну активність серця.

Мета статті — дослідити можливості ЕКГ для розв'язання задач ідентифікації і верифікації людини.

### ВЛАСТИВОСТІ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ЕКГ

Українські вчені вперше в [8] сформулювали гіпотезу про можливість ідентифікації особи за ЕКГ. У гіпотезі було враховано результати початкових експериментів, які демонстрували індивідуальні особливості графічного зображення ЕКГ. Однак лише через шість років з'явилася зарубіжна публікація [9], присвячена новому методу ідентифікації особи за ЕКГ.

Згодом метод активно розвивався в численних дослідженнях інших авторів [10–24]. У цих роботах аналіз ЕКГ-сигналів у часовій області проводився за допомогою віконного перетворення Фур'є (*short-time Fourier transformation*), вейвлет перетворення (*Wavelet transform*), перетворення Радона (*Radon transform*), калманівської фільтрації (*Kalman filter*) та інших математичних методів.

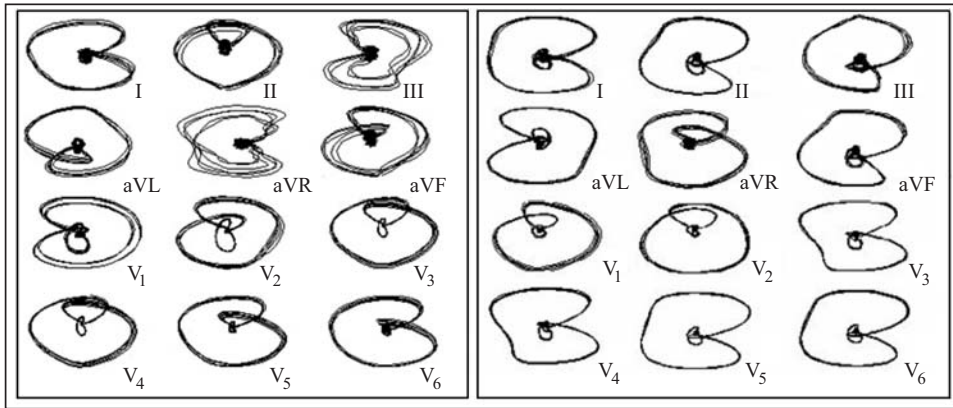


Рис. 1. Фазові портрети ЕКГ двох осіб у 12 традиційних відведеннях

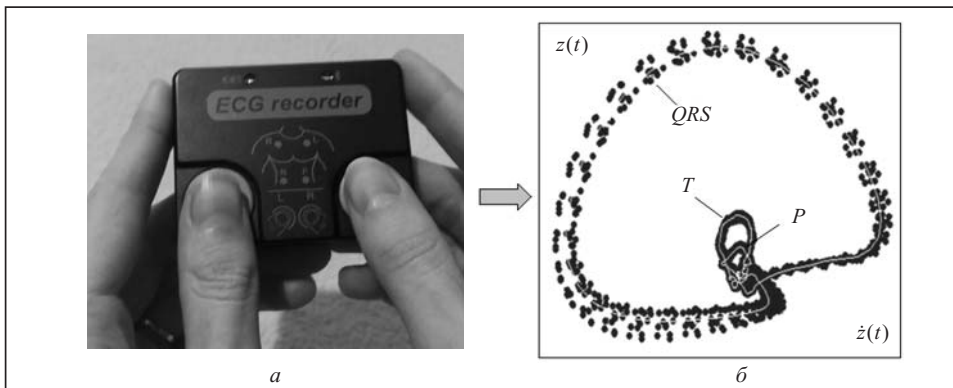


Рис. 2. Формування фазового портрета одноканальної ЕКГ на площині  $z(t), \dot{z}(t)$

Проведені дослідження показали, що індивідуальні особливості ЕКГ наочніше виявляються під час її відображення на фазовій площині  $z(t), \dot{z}(t)$  з координатами  $z(t)$  — сигналом про електричну активність серця та  $\dot{z}(t)$  — швидкістю зміни цього сигналу (рис. 1).

Оскільки реєстрація сигналу одночасно в декількох відведеннях (особливо в грудних відведеннях  $V_1, \dots, V_6$ ) незручна для розв'язання задач біометрії, розглянемо практичніший спосіб, яким передбачається реєстрація одноканальної ЕКГ лише в одному відведенні — першому стандартному (ліва та права руки).

За допомогою мікропроцесорного реєстратора з пальцевими електродами (рис 2, а) цифрова послідовність  $z(t_k)$  значень сигналу  $z(t)$ , що спостерігається в дискретні моменти часу  $t_k \equiv k\Delta, k = 1, \dots, K$  ( $\Delta$  — крок квантування), по каналу Bluetooth вводиться в комп'ютер і здійснюється попереднє оброблення, а саме вилучення дрейфу ізоелектричної лінії, частотно-вибіркова фільтрація та адаптивне згладжування. На базі процедури чисельного диференціювання з відповідною процедурою регуляризації вдається отримувати прийнятну оцінку похідної  $\dot{z}(t_k)$  у дискретні моменти часу  $t_k$ . У результаті формується фазовий портрет ЕКГ (ФП ЕКГ) — послідовність двовимірних векторів (точок)

$$(z(t_1), \dot{z}(t_1)), (z(t_2), \dot{z}(t_2)), \dots, (z(t_K), \dot{z}(t_K))),$$

що лежать на площині  $z(t), \dot{z}(t)$  у вигляді періодичного атратора, на якому відображаються характерні петлі відповідних фрагментів ЕКГ — зубців  $P, T$  і комплексу  $QRS$  (рис. 2, б).

Будемо розрізняти дві постановки задачі біометрії.

**Задача ідентифікації.** Існує обмежений список  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$  осіб, що тестуються. Потрібно з використанням автоматичного оброблення ФП ЕКГ однієї особи  $B_m \in B$  визначити її номер  $m=1, \dots, M$  у списку  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$ .

**Задача верифікації (аутентифікації).** Людина, яка тестується, повідомляє своє прізвище (login), що визначатиме її номер  $m=1, \dots, M$  у списку  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$ . Потрібно з використанням автоматичного оброблення ФП ЕКГ («інтелектуального» пароля) підтвердити або спростувати названий login. До того ж, допускається, що прізвища цієї людини може не бути в списку  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$ .

Багаторічні спостереження показали, що фазові портрети одноканальної ЕКГ як і відбитки пальців мають індивідуальні особливості (рис. 3), незмінні протягом великого проміжку часу (рис. 4), якщо, звичайно, в цей період не відбулися серйозні органічні ураження серця. З огляду на ці факти було побудовано біометричні системи, що базуються на аналізі ФП ЕКГ.

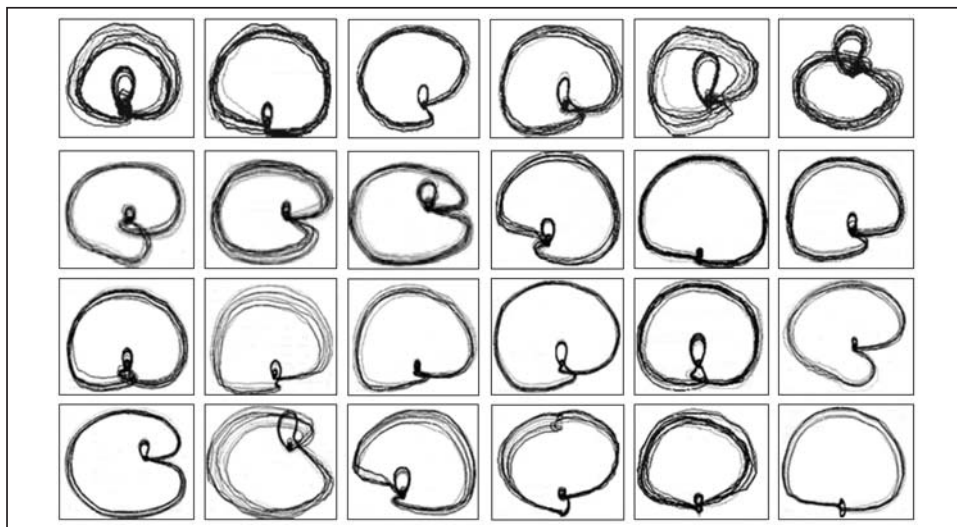


Рис. 3. Приклади фазових портретів одноканальної ЕКГ 24 осіб

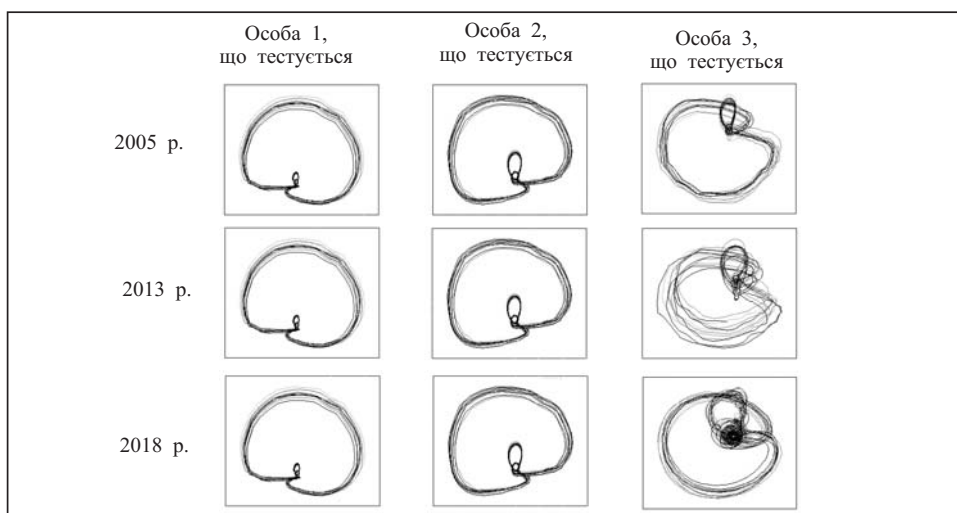


Рис. 4. Динаміка фазових портретів одноканальної ЕКГ трьох осіб

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛЮДИНИ ЗА ФАЗОВИМ ПОРТРЕТОМ ОДНОКАНАЛЬНОЇ ЕКГ

Розв'язування задачі ідентифікації ґрунтується на порівнянні фазового портрета поточної ЕКГ особи  $B_m$ , що тестується, із заздалегідь побудованими еталонами обмеженої групи  $B_1, \dots, B_M$  осіб. Оскільки під час фізичних або емоційних навантажень відбуваються зміни окремих ділянок ЕКГ, а зокрема, зубця  $T$ , далі будемо аналізувати найбільш стабільний фрагмент фазового портрета. Експерименти показали, що таким є фрагмент, відповідний шлунковому комплексу  $QRS$ .

Згідно з [25] для оцінювання близькості двох фазових портретів  $F_i$  і  $F_j$  будемо обчислювати відстані Гаусдорфа

$$L_H(F_i, F_j) = \max \left\{ \max_{q_k \in F_i} \min_{q_r \in F_j} \rho(q_k, q_r), \max_{q_r \in F_j} \min_{q_k \in F_i} \rho(q_k, q_r) \right\}, \quad (1)$$

де  $\rho(q_k, q_r) = \|q_k - q_r\|$  — Евклідова відстань між нормованими векторами  $q_k = (z_k, \dot{z}_k) \in F_i^{(QRS)}$ ,  $k = 1, \dots, K_i^{(QRS)}$ , та  $q_r = (z_r, \dot{z}_r) \in F_j^{(QRS)}$ ,  $r = 1, \dots, K_j^{(QRS)}$ , що належать  $QRS$ -фрагментам  $i$ -го та  $j$ -го фазових портретів.

Для побудови еталона ФП ЕКГ  $m$ -го ( $m = 1, \dots, M$ ) представника групи  $B_1, \dots, B_M$  зареєструємо  $W^{(m)}$  його ЕКГ у різний час доби і сформуємо матрицю  $W^{(m)} \times W^{(m)}$  Гаусдорфових відстаней (1) між парами  $QRS$ -фрагментів відповідних фазових портретів  $F_1^{(m)}, \dots, F_W^{(m)}$ . Номер рядка цієї матриці, сума елементів якої мінімальна, визначає еталонний фазовий портрет  $F_0^{(m)}$ , тобто

$$F_0^{(m)} = \arg \min_{1 \leq i \leq W^{(m)}} \sum_{j=1}^{W^{(m)}} L_H(F_i, F_j). \quad (2)$$

Рішення на користь  $m$ -го представника групи приймають лише в тому випадку, коли

$$L_H(F_t, F_0^{(m)}) = \min_{1 \leq \gamma \leq M} L_H(F_t, F_0^{(\gamma)}) \wedge L_H(F_t, F_0^{(m)}) < \lambda^{(m)}, \quad (3)$$

де  $L_H(F_t, F_0^{(\gamma)})$  — Гаусдорфові відстані між поточним фазовим портретом  $F_t$  особи, що тестується, та всіма еталонами  $F_0^{(1)}, \dots, F_0^{(M)}$ , визначеними згідно з (2), а  $\lambda^{(m)}$  — поріг, який визначається за максимальним елементом матриці Гаусдорфових відстаней, побудованих на етапі формування  $F_0^{(m)}$ . Поріг  $\lambda^{(m)}$  забезпечує необхідний компроміс між ймовірностями «пропуску цілі» та «хибної тривоги» в умовах ідентифікації  $m$ -го представника групи.

Для оцінювання надійності запропонованого підходу було побудовано експериментальну базу даних з 3133 ЕКГ 167 різних осіб. У 96.6 % випадків (3027 ЕКГ) ідентифікація осіб згідно з правилом (3) була правильною.

Незважаючи на високі результати, запропонований підхід має обмежені можливості. Річ у тім, що фазові портрети одноканальної ЕКГ деяких осіб мають лише незначні відмінності (див. рис. 3). Не є винятком ситуації, коли ФП ЕКГ різних людей взагалі практично тотожні, причому ймовірність таких збігів збільшується зі зростанням їхньої кількості в групі. З викладеного випливає, що побудову надійної системи ідентифікації конкретної людини за ФП ЕКГ у чималій групі виправдано розглядати лише як далеку мету.

Водночас, як ближню мету можна сформулювати простішу, але важливу задачу: зараховувати ФП ЕКГ конкретної людини до певних класів (кількість яких можна задати не дуже великою) і проводити верифікацію особи зіставленням її поточного ФП ЕКГ з відомим номером класу його ФП ЕКГ, який, як і

група крові, належить цій особі. У разі розбіжності класів з високою ймовірністю можна стверджувати про негативний результат верифікації і приймати відповідні рішення.

#### ВЕРИФІКАЦІЯ ЛЮДИНИ ЗА ФАЗОВИМ ПОРТРЕТОМ ОДНОКАНАЛЬНОЇ ЕКГ

Для розроблення системи верифікації визначимо характерні типи ФП ЕКГ за наявною навчальною вибіркою, що містить ЕКГ різних осіб, за якими побудовані відповідні фазові портрети

$$F = \{F_1, \dots, F_Q\}. \quad (4)$$

Будемо досліджувати можливість альтернативного підходу до оцінювання близькості фазових портретів  $F_i \in F$  та  $F_j \in F$ , який ґрунтується на аналізі їхніх зображень. Для цього обчислюватимемо абсолютну величину різниці між функціями  $\Psi_i(x, y)$  і  $\Psi_j(x, y)$ , які характеризують кількість чорних крапок у полі зображень фазових портретів  $F_i \in F$  і належать квадратним коміркам зі сторонами  $\varepsilon$  в координатах  $x$  і  $y$  фазової площини (рис. 5):

$$L_{ij} = \sum_{x,y} |\Psi_i(x, y) - \Psi_j(x, y)|. \quad (5)$$

Перед тим, як обчислювати відстані (5), проведемо нормування фазових координат за формулами

$$z^*(t_k) = \frac{z(t_k) - \min_{1 \leq k \leq K} z(t_k)}{\max_{1 \leq k \leq K} z(t_k) - \min_{1 \leq k \leq K} z(t_k)}, \quad k = 1, \dots, K,$$

$$\dot{z}^*(t_k) = \frac{\dot{z}(t_k) - \min_{1 \leq k \leq K} \dot{z}^*(t_k)}{\max_{1 \leq k \leq K} \dot{z}^*(t_k) - \min_{1 \leq k \leq K} \dot{z}^*(t_k)}, \quad k = 1, \dots, K,$$

що забезпечить виконання умов  $z^*(t_k) \in [0, 1]$  та  $\dot{z}^*(t_k) \in [0, 1]$ .

Сформуємо квадратну матрицю

$$\Lambda = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1Q} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2Q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{Q1} & L_{Q2} & \dots & L_{QQ} \end{pmatrix} \quad (6)$$

відстаней (5) між всіма парами зображень фазових портретів навчальної вибірки, за допомогою якої проведено кластеризацію ФП ЕКГ.

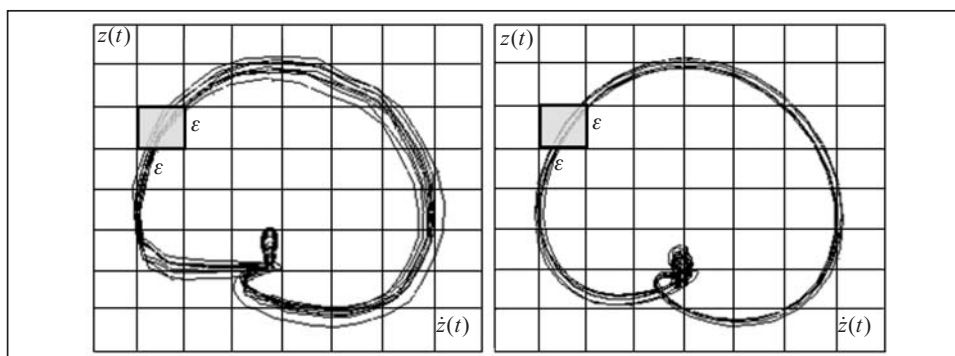


Рис. 5. Пояснення до методу оцінювання відстаней між зображеннями ФП ЕКГ

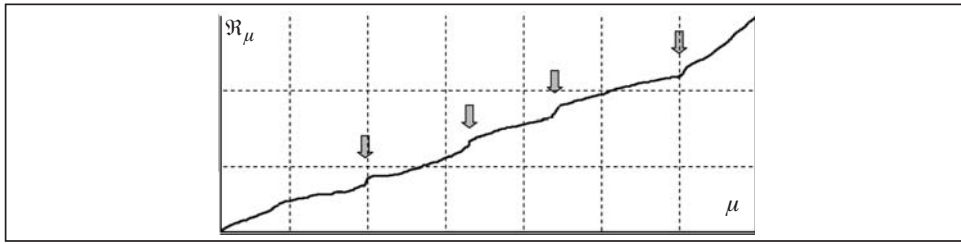


Рис. 6. Графік упорядкованих відстаней між кластерами ФП ЕКГ

Першу пару кластерів ФП ЕКГ визначає елемент матриці (6), що відповідає максимуму відстаней  $L_{ij}$ . Для визначення решти кластерів упорядкуємо за зростанням елементи рядка матриці (6), що відповідають першому кластеру. Наявність «стрибків» на послідовності  $\mathfrak{R}_\mu$ ,  $\mu = 1, \dots, Q$ , упорядкованих відстаней (рис. 6) визначає межі між кластерами ФП ЕКГ. Такі стрибки легко можна відшукати за допомогою нескладної обчислювальної процедури.

Експериментально встановлено, що за критерієм максимуму відношення міжкласової та внутрішньокласової відстаней оптимальний розмір комірок має бути  $\varepsilon = 0.125H$ , де  $H$  — розмір поля зображень ФП ЕКГ. У такому разі поле зображень накривають 64 квадратні комірки.

За аналізом 300 ЕКГ 115 різних осіб визначено  $J = 5$  характерних кластерів ФП ЕКГ (рис. 7).

Виокремимо з множини (4) підмножину фазових портретів, що відповідають  $\nu$ -му кластеру ( $\nu = 1, \dots, 5$ ), і визначимо еталон цього кластера у такий спосіб:

$$\mathfrak{Z}_0^{(\nu)} = \arg \min_{1 \leq i \leq Q_\nu} \sum_{j=1}^{Q_\nu} L_{ij}^{(\nu)}, \quad (7)$$

де  $L_{ij}^{(\nu)}$  — відстані (6) між парами ФП ЕКГ  $\nu$ -го кластера у навчальній вибірці, а  $Q_\nu$  — кількість ФП ЕКГ  $\nu$ -го кластера.

Верифікація особи проводиться за еталонами  $\mathfrak{Z}_0^{(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_0^{(5)}$ , побудованими згідно з (7). Таку інформацію (логін особи, що тестується) можна отримати під час сканування мікропроцесорного чипа біометричного паспорта, кредитної картки або іншого персонального документа.

Порівняння здійснюється за допомогою обчислення відстаней

$$L(F_t, \mathfrak{Z}_0^{(\nu)}) = \sum_{x,y} |\Psi^{(t)}(x, y) - \Psi^{(\nu)}(x, y)|, \quad \nu = 1, \dots, 5, \quad (8)$$

між зображенням  $\Psi^{(t)}(x, y)$  фазового портрета поточної ЕКГ особи, яка тестується, і зображеннями п'яти еталонів  $\mathfrak{Z}_0^{(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_0^{(5)}$ , що зберігаються в базі даних системи доступу.

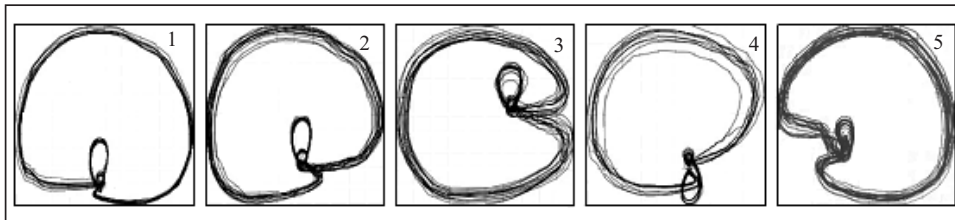


Рис. 7. Характерні кластери ФП ЕКГ

Система верифікації автоматично визначає номер еталона  $\mathfrak{Z}_0^{(t)}$ , який має мінімальну відстань (8) від зображення фазового портрета  $F_t$  поточної ЕКГ, тобто

$$\mathfrak{Z}_0^{(t)} = \arg \min_{1 \leq \nu \leq 5} L(F_t, \mathfrak{Z}_0^{(\nu)}). \quad (9)$$

Робимо висновок, що верифікацію вважають успішною лише тоді, коли визначений згідно з (9) еталон  $\mathfrak{Z}_0^{(t)}$  збігається з уведеним логіном  $\mathfrak{Z}_0^{(p)}$ , тобто  $\mathfrak{Z}_0^{(t)} = \mathfrak{Z}_0^{(p)}$ .

В іншому випадку верифікацію не вважають успішною.

Під час тестування запропонованого підходу на екзаменаційній вибірці, що містить 204 записів ЕКГ 62 різних осіб, мала місце лише одна неуспішна верифікація (0.5%).

#### ПЕРСПЕКТИВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Крім розглянутих методів оцінювання близькості ФП ЕКГ, які базуються на формулах (1) і (5), можна побудувати інші процедури, що мають властивості метрик. Тож виникає природне питання: яка з метрик ефективніша?

Розглянемо формальну схему обґрунтованого вибору міри близькості ФП ЕКГ за навчальною вибіркою, що містить  $G$  фазових портретів  $F_1, \dots, F_G$ . Вважатимемо, що кожен  $i$ -й фазовий портрет належить одній з різних  $M \geq 2$  осіб з групи  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$ , причому для кожної особи є декілька фазових портретів, тобто  $G \gg M$ .

Нехай маємо  $N \geq 2$  різних мір близькості  $S_1, \dots, S_N$ . Кожна  $n$ -та міра  $S_n$  ( $1 \leq n \leq N$ ) породжує власне вирішувальне правило  $R_n$ , за яким проаналізований фазовий портрет  $F_t \in \{F_1, \dots, F_G\}$  належить одному з представників групи  $B = \{B_1, \dots, B_M\}$ .

Розглянемо функцію

$$\Omega_t^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{якщо рішення правильне,} \\ 1, & \text{якщо рішення хибне,} \end{cases} \quad (10)$$

яка визначає втрати від хибного рішення, що приймається за фазовим портретом  $F_t$  з урахуванням міри  $S_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ . Використання функції (10) дає змогу оцінити якість кожного  $n$  вирішувального правила у такий спосіб:

$$\Omega^{(n)} = \sum_{t=1}^G \Omega_t^{(n)},$$

та вважати найкращою міру  $S_{n_0}$ ,  $1 \leq n_0 \leq N$ , яка задовольняє умову

$$n_0 = \arg \min_{1 \leq n \leq N} S^{(n)}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) надає можливість обрати найкращу з мір близькості ФП ЕКГ.

Доцільно також дослідити можливість підвищення достовірності прийнятих рішень з використанням переходу до ФП ЕКГ у тривимірному просторі з координатами  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$ ,  $\ddot{z}(t)$ . Перші експерименти показали, що навіть якщо двовимірні ФП ЕКГ різних людей майже збігаються (рис. 8, а), то під час переходу в тривимірний простір вдасться виявити деякі відмінності нібито тотожних фазових портретів для певних кутів проектування (рис. 8, б).

Результати досліджень цих задач на репрезентативній вибірці спостережень дадуть змогу розширити можливості біометричних систем для розв'язання практичних задач у різних сферах застосування.

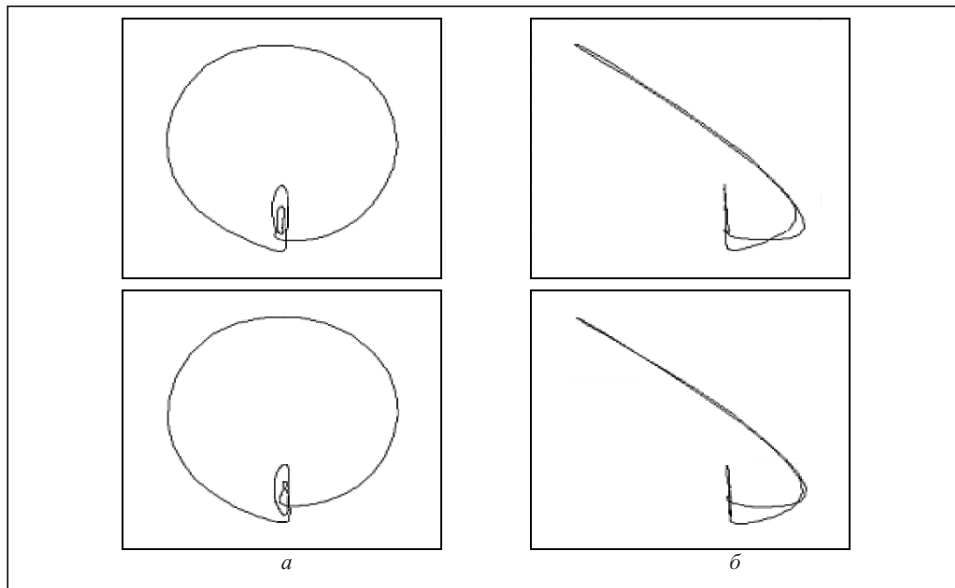


Рис. 8. Проекції на площину тривимірних фазових портретів двох осіб для різних кутів проектування

## ВИСНОВКИ

Удосконалено підхід до побудови біометричних систем, що базується на аналізі фазового портрета одноканальної електрокардіограми особи, що тестується. Багаторічні спостереження показали, що ФП ЕКГ як і відбитки пальців мають індивідуальні особливості (див. рис. 3), незмінні протягом досить великого проміжку часу (див. рис. 4).

Побудовано вирішувальні правила, що забезпечують ідентифікацію та верифікацію (аутентифікацію) особи. Результати випробувань підтвердили працездатність запропонованих підходів та порівняно високі показники достовірності прийнятих рішень: 96.6 % правильних рішень у процесі ідентифікації людини за 3133 записами ЕКГ у групі з 167 осіб та 99.5% правильних рішень у процесі верифікації людини за 204 записами ЕКГ 62 різних осіб.

Визначено перспективи подальших досліджень, які спрямовані на підвищення достовірності прийнятих рішень.

Біометричні системи, що базуються на аналізі фазового портрета одноканальної ЕКГ, можуть бути застосовані як для самостійного використання, так і у складі наявних систем. Наприклад, якщо в мікропроцесорний чип біометричного паспорта ввести інформацію про клас ФП ЕКГ власника, то під час перетину кордону можна здійснювати його верифікацію не тільки за відбитком пальця, як це роблять зараз, але і використовувати додаткову інформацію, що підвищить достовірність прийнятих рішень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhao Q., Jain A.K. On the utility of extended fingerprint features: a study on pores. *IEEE Computer Society Workshop on Biometrics, CVPR2010*, San Francisco, U.S., June 18, 2010. P. 46–57.
2. Bazen, A.M., Gerez, S.H. Segmentation of fingerprint images. *Proc. Workshop on Circuits Systems and Signal Processing (ProRISC 2001)*. 2001. P. 276–280.



3. Ma L. Personal identification based on iris texture analysis. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003. Vol. 25, N 12. P. 1519–1533.
4. Kumar P.M. A new human voice recognition system. *Asian Journal of Science and Applied Technology*. 2016. Vol. 5, N 2. P. 23–30. URL: <https://www.researchgate.net/publication/320673140>.
5. Kherchaoui S., Houacine A. Face detection based on a model of the skin color with constraints and template matching. *Proc. Int. Conf. on Machine and Web Intelligence*. Algiers, Algeria, 2010. P. 469–472.
6. Xia Z., Lv R., Zhu Y., Ji P., Sun H., Shi Y.Q. Fingerprint liveness detection using gradient-based texture features. *Signal, Image Video Process*. 2016. Vol. 11. P. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11760-016-0936-z>.
7. Arunalatha G., Ezhilarasan M. Fingerprint spoof detection using quality features. *Int. J. Secur. Its Appl*. 2015. Vol. 9, N 10. P. 83–94. <http://dx.doi.org/10.14257/ijisa.2015.9.10.07>.
8. Fainzilberg L.S., Potapova T.P. Computer analysis and recognition of cognitive phase space electro-cardio graphic image. *Computer Analysis of Images and Patterns: Proc. of the 6th Int. Conf. (CAIP'95)*. Prague, Czech Republic, 1995. P. 668–673.
9. Biel L., Pettersson O., Philipson L., Wide P. ECG analysis: A new approach in human identification. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2001. Vol. 50, N 3. P. 808–812.
10. Shen T.W., Tompkins W.J., Hu Y.H. One-lead ECG for identity verification. *IEEE Engineering in Medicine and Biology: Proc. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 24th Annual Conference and the 2002 Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society (BMES/EMBS)*. 2002. Vol. 1. P. 62–63.
11. Israel S.A., Irvine J.M., Cheng A., Wiederhold M.D. ECG to identify individuals. *Pattern Recognition*. 2005. Vol. 38, N 1. P. 133–142.
12. Zhang Z., Wei D. A new ECG identification method using Bayes' theorem. *Proc. of the IEEE Region 10 Conference (TENCON'06, Hong Kong)*. 2006. P. 1–4.
13. Wtibbeler G., Stavridis M., Kreiseler D., Bousseljot R.D., Elster C. Verification of humans using the electrocardiogram. *Pattern Recognition Letters*. 2007. Vol. 28, Iss. 10. P. 1172–1175. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.01.014>.
14. Chiu C.C., Chuang C., Hsu C.A. Novel personal identity verification approach using a discrete wavelet transform of the ECG signal. *International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering (Mue, 24–26 April 2008)*. IEEE, 2008. P. 201–206. <https://doi.org/10.1109/MUE.2008.67>.
15. Boumbarov O., Velchev Y., Sokolov S. ECG personal identification in subspaces using radial basis neural networks. *IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. 2009. P. 446–451.
16. Odinaka I., Lai P.-H., Kaplan A., O'Sullivan J., Sirevaag E., Kristjansson S., Sheffield A., Rohrbaugh J. ECG biometrics: A robust short-time frequency analysis. *IEEE International Workshop on Information Forensics and Security*. 2010. P. 1–6.
17. Ting C.M., Salleh S.H. ECG based personal identification using extended Kalman filter. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Information Sciences, Signal Processing and Their Applications*. 2010. P. 774–777.
18. Hegde Ch., Prannu H.R., Sagar D.S., Shenoy P.D., Venuopal K.R., Patnaik L.M. Human authentication based on ECG waves using Radon transform. *Security Technology, Disaster Recovery and Business Continuity: Proc. Communications in Computer and Information Science Series*. 2010. Vol. 122. P. 197–206.

19. Poree F., Gallix A. Carrault biometric identification of individuals based on the ECG. Which conditions? *Computing in Cardiology*. 2011. Vol. 38. P. 761–764.
20. Nouredine B., Amine N.A., Rґgis F., Fethi B.R. ECG based human authentication using wavelets and Random forests. *International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS)*. 2012. Vol. 2, N 2. P. 1–11.
21. Singh Y.N., Singh S.K. Evaluation of electrocardiogram for biometric authentication. *Journal of Information Security*. 2012. Vol. 3. P. 39–48.
22. Shen T-W., Tompkins W.J., Hu Y.H. Implementation of a one-lead ECG human identification system on a normal population. *Journal of Engineering and Computer Innovation*. 2011. Vol. 2(1). P. 12–21
23. Tseng K-K., Fu L., Liu L., Lee D., Wang C., Li L. Human identification with electrocardiogram. *Interprise Information Systems*. 2018. Vol. 12, Iss. 7. P. 798–819. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1450526>.
24. Hamza S, Yassine BenAyed Y. Svm for human identification using the ECG signal. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 176. P. 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.08.044>.
25. Fainzilberg L.S. New approaches to the analysis and interpretation of the shape of cyclic signals. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 4. P. 665–674. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00283-0>.

## **L.S. Fainzilberg**

### **PHASE PORTRAIT OF ELECTROCARDIOGRAPHY AS A MEANS OF BIOMETRY**

**Abstract.** The author develops an approach to constructing biometric systems based on the analysis of the phase portrait of a single-channel electrocardiogram (ECG) of the test subject. The rules providing the solution of the problem of identification and verification (authentication) of the person are proposed. Experimental studies have shown that the proposed decision rules ensure 96.6% reliability of identification in the analysis of 3,133 ECGs of 167 users and 99.5% reliability of verification in the analysis of 204 ECGs of 62 different individuals. Prospects for further research aimed at solving practical biometric problems are outlined.

**Keywords:** electrocardiogram, phase portrait, biometric system, Hausdorf distance, identification and verification of personality

*Надійшла до редакції 25.10.2021*