

УДК 004.855

В.В. КУЦМАН, О.К. КОЛЕСНИЦЬКИЙ, І.К. ДЕНИСОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОПЕРСОНАЛЬНОЇ ТА МІЖПЕРСОНАЛЬНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПISУ У ПРОЦЕСІ ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, E-mail: kolesnytskiy@vntu.edu.ua

Анотація. Обґрунтовано вибір динамічних параметрів підпису, стійких до геометричної варіабельності, описано процес їх нормалізації як по амплітуді, так і по часу. Досліджено стійкість динамічних параметрів підпису до внутрішньоперсональної варіабельності на основі статистичного аналізу параметрів розкиду окремих реалізацій підпису відносно усередненої залежності. Досліджено чутливість динамічних параметрів підпису до міжперсональної варіабельності. Доведено обґрунтованість вибору параметру $l(t)$ та необґрунтованість вибору параметру $\Delta\alpha(t)$ для використання у високодостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгової нейронної мережі.

Ключові слова: динамічна ідентифікація підпису, внутрішньоперсональна варіабельність підпису, міжперсональна варіабельність підпису.

Аннотация. Обоснован выбор динамических параметров подписи, устойчивых к геометрической вариабельности, описан процесс их нормализации как по амплитуде, так и по времени. Исследована устойчивость динамических параметров подписи к внутриперсональной вариабельности на основе статистического анализа параметров разброса отдельных реализаций подписи относительно усредненной зависимости. Исследована чувствительность динамических параметров подписи к межперсональной вариабельности. Доказано обоснованность выбора параметра $l(t)$ и необоснованность выбора параметра $\Delta\alpha(t)$ для использования в высокостойком методе динамической идентификации подписей на основе спайкинговой нейронной сети.

Ключевые слова: динамическая идентификация подписи, внутриперсональная вариабельность подписи, межперсональная вариабельность подписи.

Abstract. The choice of dynamic parameters of the signature, steady against geometric variability is substantiated, the process of their normalization both on amplitude, and on time is described. The stability of dynamic signature parameters to intrapersonal variability is investigated on the basis of statistical analysis of scatter parameters of individual signature implementations relative to the average dependence. The sensitivity of dynamic signature parameters to interpersonal variability is investigated. The validity of the choice of the parameter $l(t)$ and the unreasonableness of the choice of the parameter $\Delta\alpha(t)$ for use in the highly reliable method of dynamic identification of signatures based on the spiking neural network are proved.

Keywords: dynamic signature identification, intrapersonal signature variability, interpersonal signature variability.

DOI: 10.31649/1681-7893-2020-40-2-5-15

ВСТУП

Інформаційні технології верифікації та розпізнавання підписів останнім часом набувають все більшої актуальності [1]. Широке поширення комп'ютерної техніки та інтелектуальних технологій обробки даних дозволяє застосувати аналіз не тільки статичного зображення підпису, а також динамічних характеристик його написання. Сучасні електронні планшети, на яких людина розписується, можуть

формувати динамічні параметри підпису (динаміку зміни координат пера, тиску пера та кута нахилу пера). Ці динамічні параметри дають додаткову інформацію про підпис і можуть бути використані для більш точної верифікації та ідентифікації підпису. Ці динамічні параметри не можуть бути проаналізовані людиною-оператором, однак легко можуть бути проаналізовані електронними комп'ютерними засобами з відповідним програмним забезпеченням. Також ці динамічні параметри неможливо підробити, оскільки вони не можуть бути відомі зловмиснику.

Незважаючи на великий обсяг досліджень за цією тематикою [1,2], створення систем динамічної (Online) ідентифікації підпису з потрібною достовірністю і якістю роботи лишається проблематичним [2]. Складності практичного застосування різних інформаційних технологій динамічної (Online) ідентифікації підпису викликані недоліками самого явища формування підпису, як об'єкту інформаційного процесу. Так, підпис однієї і тієї ж людини є нестабільно відтворюваним процесом. Причини нестабільності підпису можна розділити на 2 групи [3]:

- 1) природня варіабельність почерку людини (відмінність у написанні окремих літер, вензелів та ін.);
- 2) варіабельність геометричних параметрів, а саме:
 - варіабельність геометричних розмірів (просторового масштабу) різних реалізацій підпису,
 - варіабельність точки початку підпису відносно планшета (зсуву) різних реалізацій підпису,
 - варіабельність кута нахилу підпису відносно планшета (повороту) різних реалізацій підпису;
- 3) варіабельність часу написання (часового масштабу) різних реалізацій підпису.

Геометричну та часову варіабельність компенсують шляхом амплітудної та часової нормалізації динамічних параметрів підпису [4]. Природню варіабельність підпису важко подолати технічними засобами, але можна трохи компенсувати шляхом правильного підбору чи синтезу похідних динамічних параметрів підпису. Саме тому потрібно обирати або синтезувати такі похідні динамічні параметри підпису, які забезпечували б найменшу внутрішньоперсональну варіабельність підпису.

З іншого боку, ці динамічні параметри підпису повинні бути чутливі до підробок підпису, тобто до міжперсональної варіабельності.

Мета статті - кількісна оцінка внутрішньоперсональної та міжперсональної варіабельності різних динамічних параметрів підпису з тим, щоб обґрунтувати для подальшої обробки саме ті з них, які мають мінімальну внутрішньоперсональну варіабельність та максимальну міжперсональну варіабельність. Це дозволить збільшити точність динамічної ідентифікації підписів..

1. ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПISУ, СТІЙКИХ ДО ГЕОМЕТРИЧНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ

Такі динамічні параметри підпису як координати $X(t)$ та $Y(t)$ не є інваріантними до просторового та часового масштабу підпису, а також до нахилу написання. Тому пропонується [4] використовувати відстань від поточного часового відліку координат пера (x_i, y_i) до наступного (x_{i+1}, y_{i+1}) (див. рис. 1а). Тобто, згідно теореми Піфагора:

$$l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

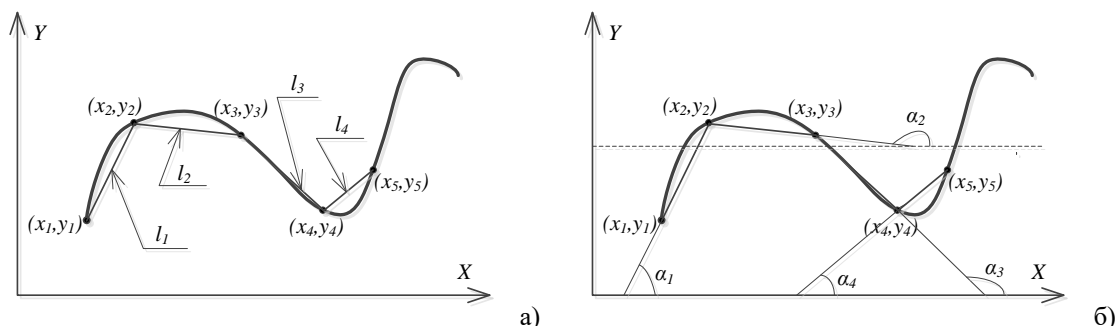


Рисунок 1 – Отримання динамічних параметрів підпису $L(t)$ та $\Delta\alpha(t)$

Залежність $l(t)$ буде інваріантна до кута нахилу підпису, але деякі неточності будуть мати місце через квадратну координатну сітку. Інваріантність залежності $l(t)$ до просторового та часового масштабів можна забезпечити її подальшою нормалізацією. Якщо взяти відношення $l_i/\Delta t$, то це буде швидкість пера на відрізьку між точками (x_i, y_i) та (x_{i+1}, y_{i+1}) . А поскільки всі Δt однакові, то l_i є пропорційною швидкості

пера на відрізку $[(x_i, y_i); (x_{i+1}, y_{i+1})]$. При $\Delta t \rightarrow 0$ величина l_i пропорційна миттєвій швидкості пера у точці (x_i, y_i) . Якщо миттєву швидкість пера розглядати як вектор (однозначно визначається довжиною та кутом нахилу до осі абсцис), то залежність його довжини $l(t)$ та залежність кута нахилу $\alpha(t)$ до осі абсцис будуть однозначно визначати намальований графічний образ з урахуванням динаміки його написання. Іншими словами, динаміка лінійної та кутової швидкості пера однозначно визначає не тільки намальовану фігуру, але і «особливості» її написання. Але залежність $\alpha(t)$ не буде інваріантна до нахилу всього підпису відносно осі абсцис. Саме тому краще брати різницю $\Delta\alpha_i$ сусідніх кутів α_{i+1} і α_i .

На основі вищесказаного другим динамічним параметром підпису оберемо різницю кутів $\Delta\alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i$ нахилу двох сусідніх відрізків, що з'єднують дискретні точки (просторові відліки) підпису (див. рис. 1б). Кут α_i знаходиться із прямокутного трикутника, катетами якого є різниці координат точок (x_{i+1}, y_{i+1}) та (x_i, y_i) . Залежність $\Delta\alpha(t)$ буде інваріантна до кута нахилу підпису, але деякі неточності будуть мати місце через квадратну координатну сітку. Інваріантність залежності $\Delta\alpha(t)$ до просторового та часового масштабу можна забезпечити її подальшою нормалізацією.

Третім динамічним параметром підпису оберемо тиск пера на графічний планшет $Z(t)$. Залежність $Z(t)$ є інваріантною до кута нахилу підпису. Інваріантність залежності $Z(t)$ до часового масштабу можна забезпечити її подальшою нормалізацією. Крім того, є гіпотеза, що можна буде забезпечити деяку інваріантність залежності $Z(t)$ до емоційного та фізичного стану людини при її подальшій нормалізації. Імовірно, що у спокійному і розслабленому стані середній тиск на перо буде менший, ніж у емоційно збудженому і напруженому стані. Але це потребує додаткових досліджень.

Таким чином, обрано три динамічних параметри: 1) $l(t)$ - відстань між сусідніми дискретними точками підпису, 2) $\Delta\alpha(t)$ - різниця кутів нахилу двох сусідніх відрізків, що з'єднують дискретні точки підпису, 3) $Z(t)$ - тиск пера на графічний планшет. Ці динамічні параметри характеризують підпис як багатопараметричний процес, який буде розпізнаватися спайкінговою нейронною мережею [5,6]. Розглянемо як здійснюється нормалізація цих динамічних параметрів.

2. НОРМАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПISУ

Нормалізація динамічних параметрів підпису має здійснюватись як по амплітуді, так і по часу [4]. Точніше, по часу має відбуватись приведення до єдиного часового інтервалу. Якщо конкретна реалізація підпису тривала час T , а необхідно приводити всі підписи до єдиного інтервалу T_0 , то потрібно відліки конкретного динамічного параметру подавати на вхід спайкінгової нейронної мережі не з кроком Δt дискретизації сигналів у планшеті, а з новим часовим кроком:

$$\Delta t_0 = \frac{T_0}{T} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

Нормалізація двох із обраних динамічних параметрів $l(t)$ та $z(t)$ по амплітуді буде здійснюватись за формулами:

$$\bar{l}_i = (l_i - l_{min}) / (l_{max} - l_{min}). \quad (3)$$

$$\bar{z}_i = (z_i - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}). \quad (4)$$

де \bar{l}_i та \bar{z}_i - нормалізовані значення l_i та z_i ; l_{min} та z_{min} - мінімальні значення l_i та z_i ; l_{max} та z_{max} - максимальні значення l_i та z_i відповідно.

Динамічний параметр $\Delta\alpha(t)$ не потребує нормалізації по амплітуді, тому що він вже нормалізований (є кутом) і завжди міняється в діапазоні $[-\pi, +\pi]$ радіан.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПISУ ДО ВНУТРІШНЬОПЕРСОНАЛЬНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ

Для доведення більшої робастності обраних параметрів $l(t)$ та $\Delta\alpha(t)$, ніж первинних параметрів $X(t)$ та $Y(t)$, проведемо дослідження їх внутрішньоперсональної варіабельності. Для цього скористаємось базою даних підписів МСУТ-330 [7], яка є частиною бази даних підписів DeepSignDB [8]. У базі даних підписів МСУТ-330 є 330 користувачів, для кожного з яких є 25 його оригінальних підписів та 25 майстерно підроблених підписів.

Внутрішньоперсональну варіабельність будемо оцінювати для нормалізованих по амплітуді і по часу динамічних параметрів підпису, оскільки саме вони підлягають подальшому процесу класифікації.

Кожен із початкових параметрів, наприклад, $X(t)$ є нічим іншим, як часовим рядом. Тобто може бути представлений вектором, що складається із окремих відліків залежності: $X=(x_1, x_2, \dots, x_{l_i}, \dots, x_n)$.

Довжина вектора n і вона не однакова для всіх реалізацій підпису. Відліки знімаються із часовим кроком Δt , який зазвичай дорівнює 10 мс (частота дискретизації 100 Гц). Коли здійснюється амплітудна та часова нормалізація динамічного параметру, то просто коригується часовий крок Δt за формулою (2), а амплітуда за формулою (3). Але все одно ми маємо вектор $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{li}, \dots, x_n)$ довжиною n , яка не однакова для всіх реалізацій підпису. Тобто, коли ми шукаємо усереднений часовий ряд \bar{X}^j , то нам потрібно усереднювати вектори різної довжини. Тому приведемо всі вектори \bar{X}^j окремих реалізацій підпису ($j=1 \dots 25$) до довжини $N=1000$ шляхом знаходження елементів цих нових векторів \bar{X}^j за допомогою кусочно-лінійної апроксимації. Далі для кількісного оцінювання внутрішньоперсональної варіабельності динамічних параметрів підпису, спочатку знайдемо усереднений часовий ряд кожного із параметрів по 25 (для МСУТ) відомим рядам справжніх підписів кожного користувача за формулою:

$$\bar{X}_i^j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_i^j, i = 1 \dots N, N = 1000 \quad (5)$$

Для прикладу, на рис. 2 показано графік усередненої залежності $\bar{X}(t)$ та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $X(t)$ для 25 оригінальних підписів трьох осіб. Прийемо гіпотезу, що для $\bar{Y}(t)$ характер залежності буде аналогічним, тому розглядати її не будемо.

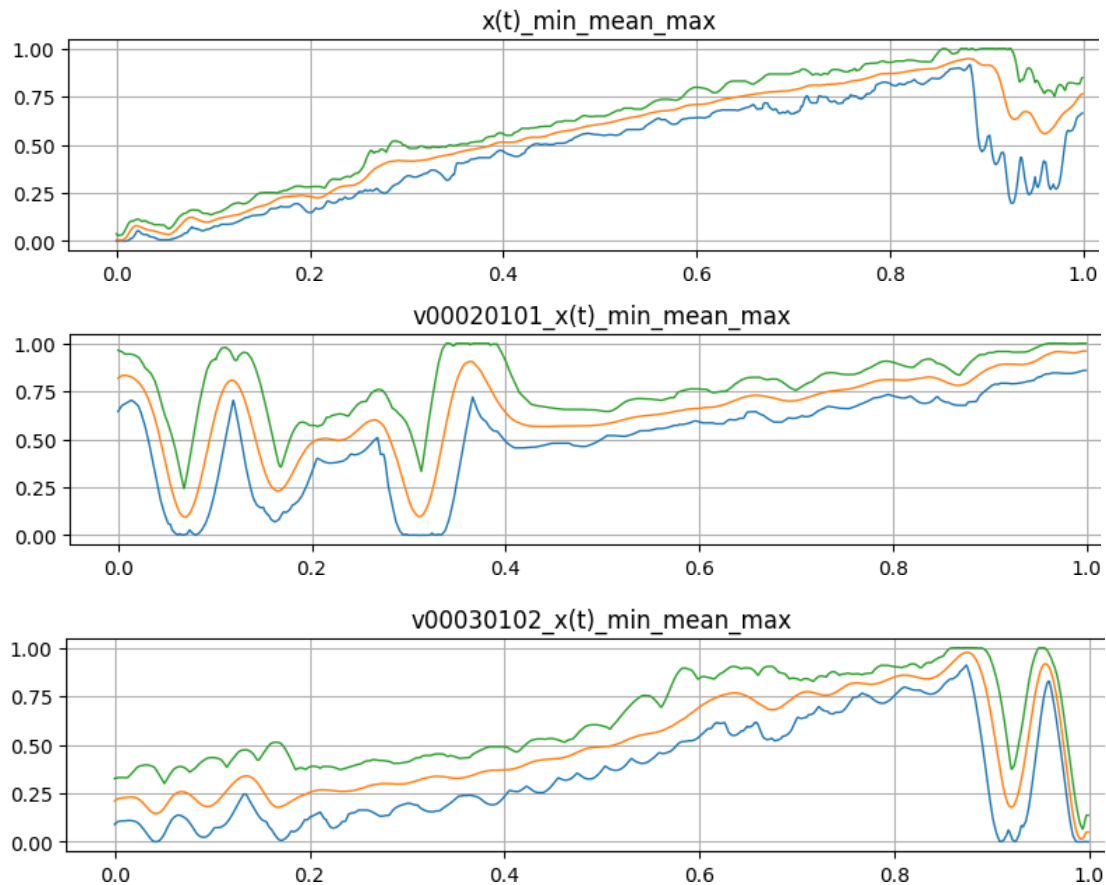


Рисунок 2 – Графіки залежності огинаючих параметрів $\bar{X}(t)$ та усередненого параметру $\bar{X}(t)$ для $m=25$ оригінальних підписів трьох осіб

На рис. 3 та 4 показано графіки усереднених залежностей $\bar{X}(t)$ та $\bar{Y}(t)$ та огинаючі їх максимальних та мінімальних значень для 25 оригінальних підписів трьох осіб. З рисунків 2-4 видно, що параметр $\bar{X}(t)$ та $\bar{Y}(t)$ мають невеликий діапазон розкиду відносно середньої залежності відповідно $\bar{X}(t)$ та $\bar{Y}(t)$, а параметр $\Delta\alpha(t)$, всупереч очікуванням, має великий діапазон розкиду відносно середньої залежності $\Delta\alpha(t)$. Це свідчить про те, що параметр $\Delta\alpha(t)$ не є робастним (стійким) до внутрішньоперсональної варіабельності, тому його не варто використовувати для ідентифікації підписів.

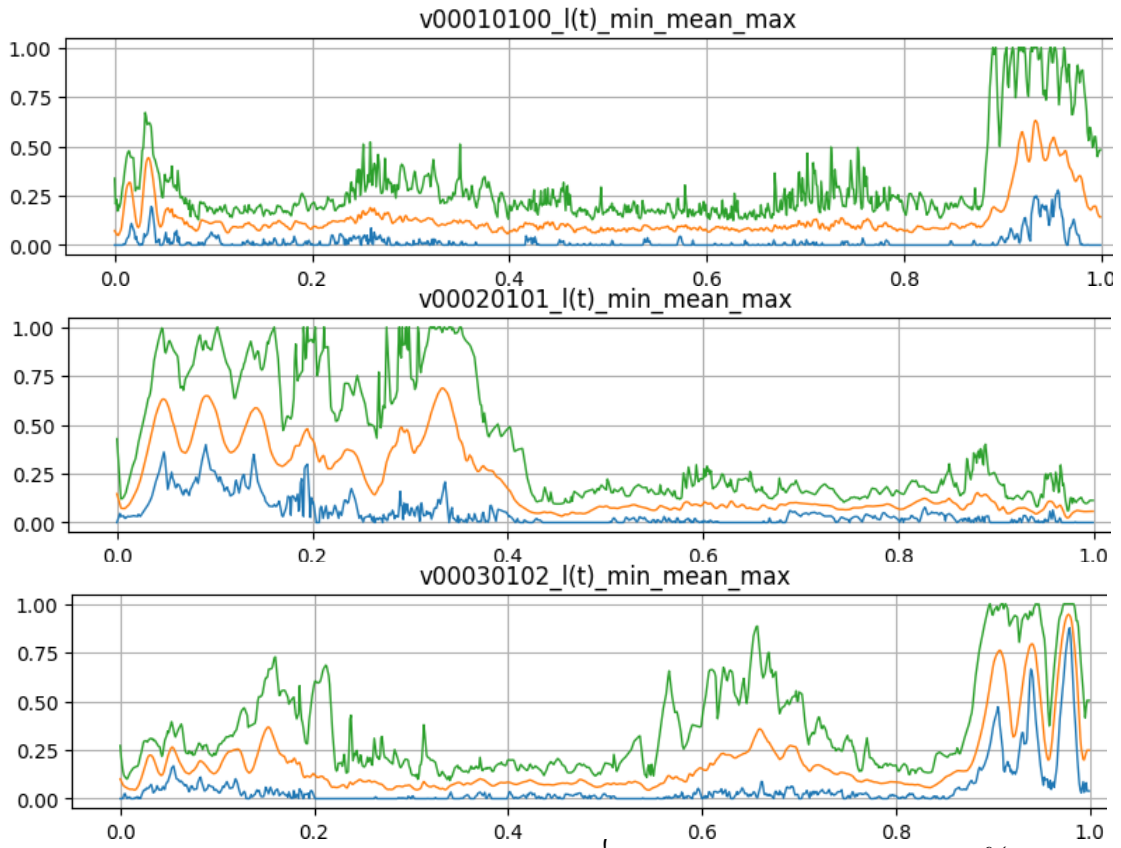


Рисунок 3 – Графіки залежності огинаючих параметрів $l(t)$ та усередненого параметру $\bar{l}(t)$ для $m=25$ оригінальних підписів трьох осіб

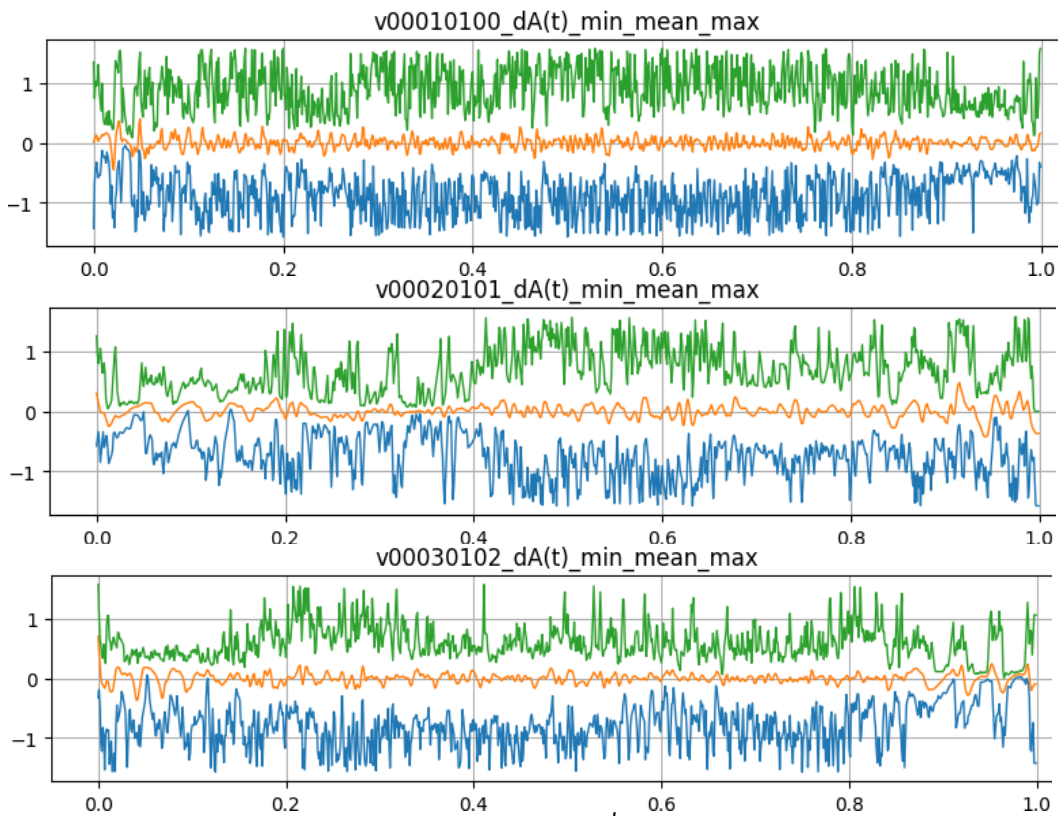


Рисунок 4 – Графіки залежності огинаючих параметрів $\Delta\alpha(t)$ та усередненого параметру $\bar{\Delta\alpha}(t)$ для $m=25$ оригінальних підписів трьох осіб

Для кількісної оцінки відмінності реального параметра конкретної реалізації підпису від усередненого застосуємо середнє відносне значення відхилення по всім $N=1000$ точкам X^j ($j=1 \dots m$):

$$\Delta x^j = 100\% \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i^j - \bar{x}_i^j|}{\bar{x}_i^j}, \quad (6)$$

Кількісні дані для оцінки внутрішньоперсональної варіабельності параметрів $X(t)$, $l(t)$ та $\Delta\alpha(t)$ для 1 користувача наведено у табл. 1

Таблиця 1 – Кількісні показники внутрішньоперсональної варіабельності параметрів $X(t)$, $l(t)$ та $\Delta\alpha(t)$ для користувача 1 БД МСУТ-330

№ підпису	Середнє відносне відхилення реалізації підпису, %		
	Для $X(t)$	Для $l(t)$	Для $\Delta\alpha(t)$
1	4,59	5,59	29,29
2	3,96	5,47	29,63
3	3,26	7,00	27,76
4	3,02	5,73	28,11
5	3,55	7,02	30,12
6	3,88	6,13	29,91
7	2,42	5,10	28,65
8	2,32	5,45	28,60
9	2,54	6,13	30,05
10	3,72	7,00	28,53
11	4,57	6,57	32,02
12	3,07	5,83	27,72
13	2,99	5,78	29,54
14	2,35	4,83	29,25
15	2,60	5,49	30,08
16	3,35	6,47	29,93
17	2,64	4,89	28,75
18	2,43	5,26	30,13
19	3,49	7,67	30,48
20	2,38	6,63	28,79
21	2,42	4,89	27,75
22	2,58	6,28	30,23
23	2,18	5,04	28,80
24	2,93	5,93	29,35
25	4,94	5,83	31,27
Середнє відхилення підписів користувача, %	3,13	5,92	29,39

Із табл. 1 видно, що для конкретного користувача внутрішньоперсональна варіабельність параметрів $X(t)$ та $l(t)$ чисельно є невеликою і складає відповідно 3,13% та 5,92%, а для параметру $\Delta\alpha(t)$, всупереч очікуванням, чисельно є великою і складає 29,39%. Це вже кількісно свідчить про те, що параметр $\Delta\alpha(t)$ не є робастним (стійким) до внутрішньоперсональної варіабельності, тому його не варто використовувати для ідентифікації підписів.. Справедливість такого висновку для всіх користувачів підтверджується даними табл. 2.

Таким чином, дані табл. 2 доводять обґрунтованість вибору параметру $l(t)$ (мала варіабельність – 6,44%) та необґрунтованість вибору параметру $\Delta\alpha(t)$ (велика варіабельність – 25,37%) для використання у високодостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгових нейронних мереж [9]. Замість параметру $\Delta\alpha(t)$ варто, скоріше всього, обирати добутток $X(t) \times Y(t)$, але це потребує додаткових досліджень.

Таблиця 2 – Кількісні показники внутрішньоперсональної варіабельності параметрів $X(t)$, $l(t)$ та $\Delta\alpha(t)$ для 230 користувачів БД МСУТ-330

№ користувача	$\%X(t)$		$\%l(t)$		$\Delta\alpha(t)$	
	МС середнього відхилення, %	МС діапазону відхилення, %	МС середнього відхилення, %	МС діапазону відхилення, %	МС середнього відхилення, %	МС діапазону відхилення, %
1	3,13	2.18-4.94	5,92	4.83-7.67	29,39	27.72-32.02
2	6,31	2.77-9.27	7,58	5.12-12.01	24,42	22.43-28.29
3	5,66	3.29-9.46	6,55	5.11-9.78	22,58	20.48-24.72
...						
228	5,14	3.03-9.12	6,21	4.97-9.12	23,16	20.63-25.06
229	3,71	2.67-5.31	5,64	4.17-7.21	28,42	27.11-31.24
230	6,23	2.45-9.11	7,12	5.01-11.89	23,75	22.09-27.88
Середнє значення	5,22	2,71-7,92	6,44	4,81-9,73	25,37	23,29-28,43

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДПISУ ДО МІЖПЕРСОНАЛЬНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ

Для дослідження чутливості динамічних параметрів підпису до міжперсональної варіабельності проаналізуємо відмінність параметрів майстерно підроблених підписів однієї особи від середньої залежності для оригінальних підписів цієї ж особи. На рис. 5 показано графік усередненої залежності $\%X(t)$ справжніх підписів та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $\%X_s(t)$ для 25 кваліфіковано підроблених підписів трьох осіб. Приймемо гіпотезу, що для $\%Y_s(t)$ характер залежності буде аналогічним, тому розглядати її не будемо. На рис. 6 та 7 показано графіки усереднених залежностей $\%l(t)$ та $\Delta\alpha(t)$ справжніх підписів та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $\%l_s(t)$ та $\Delta\alpha_s(t)$ для 25 кваліфіковано підроблених підписів трьох осіб.

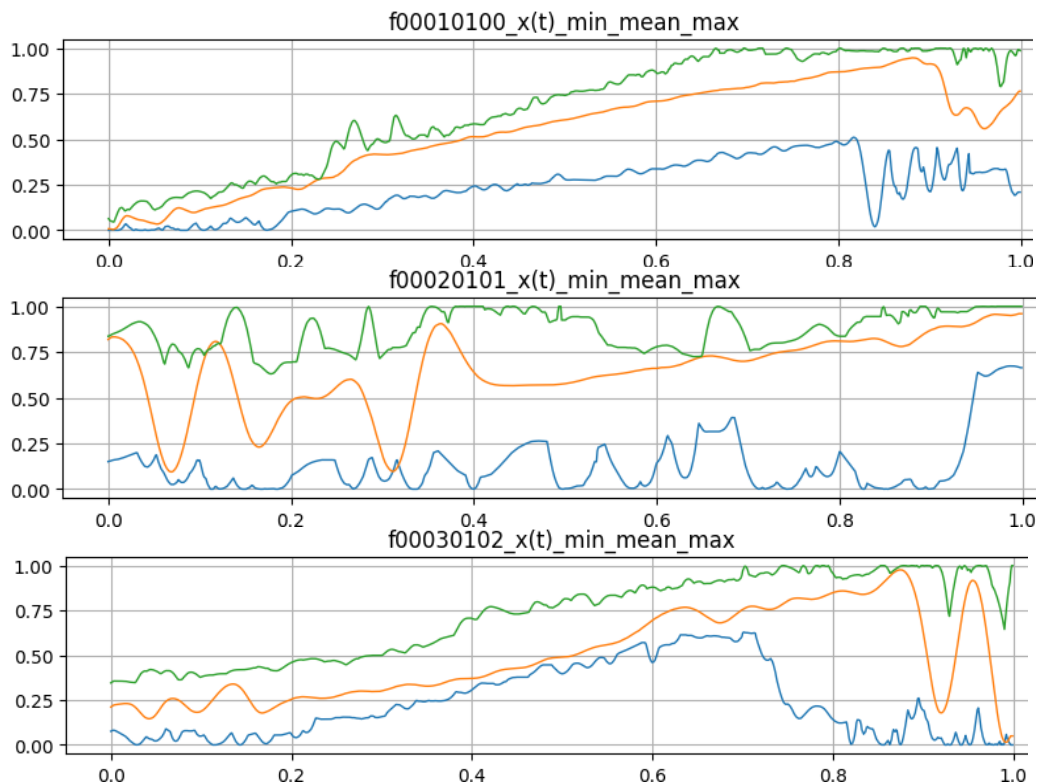


Рисунок 5 – Графік усередненої залежності $\%X(t)$ справжніх підписів та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $\%X_s(t)$ для 25 кваліфіковано підроблених підписів трьох осіб

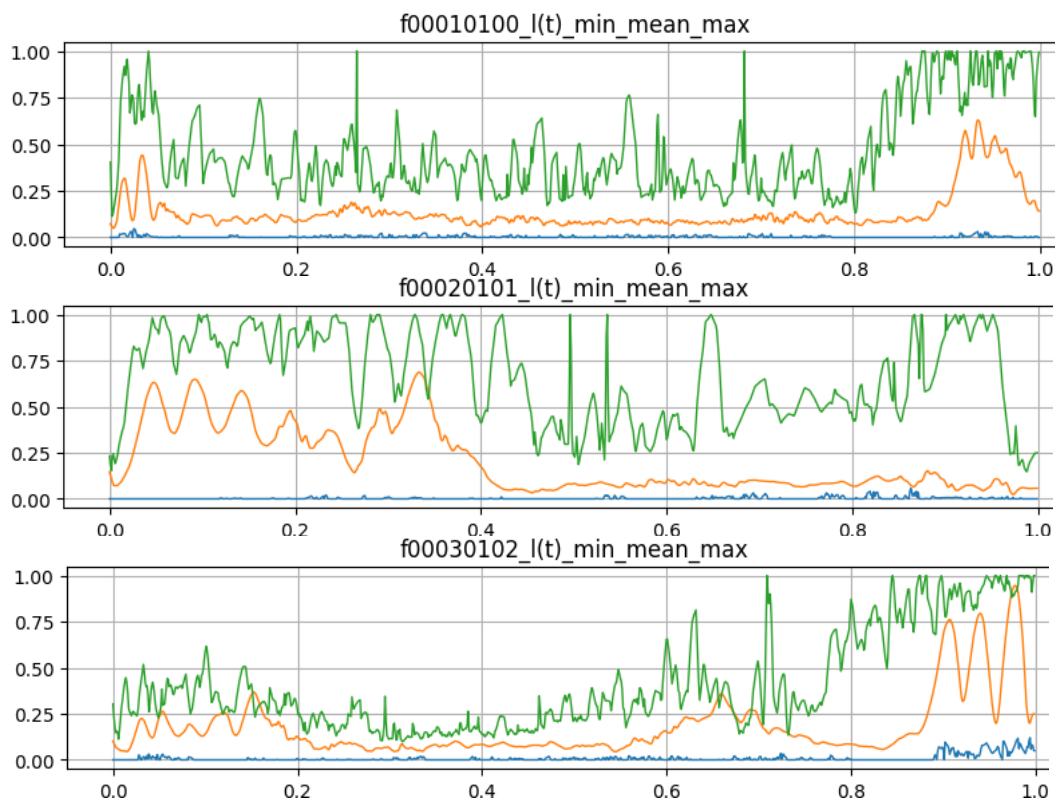


Рисунок 6 – Графік усередненої залежності $I_s(t)$ справжніх підписів та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $I_s(t)$ для 25 кваліфіковано підроблених підписів трьох осіб

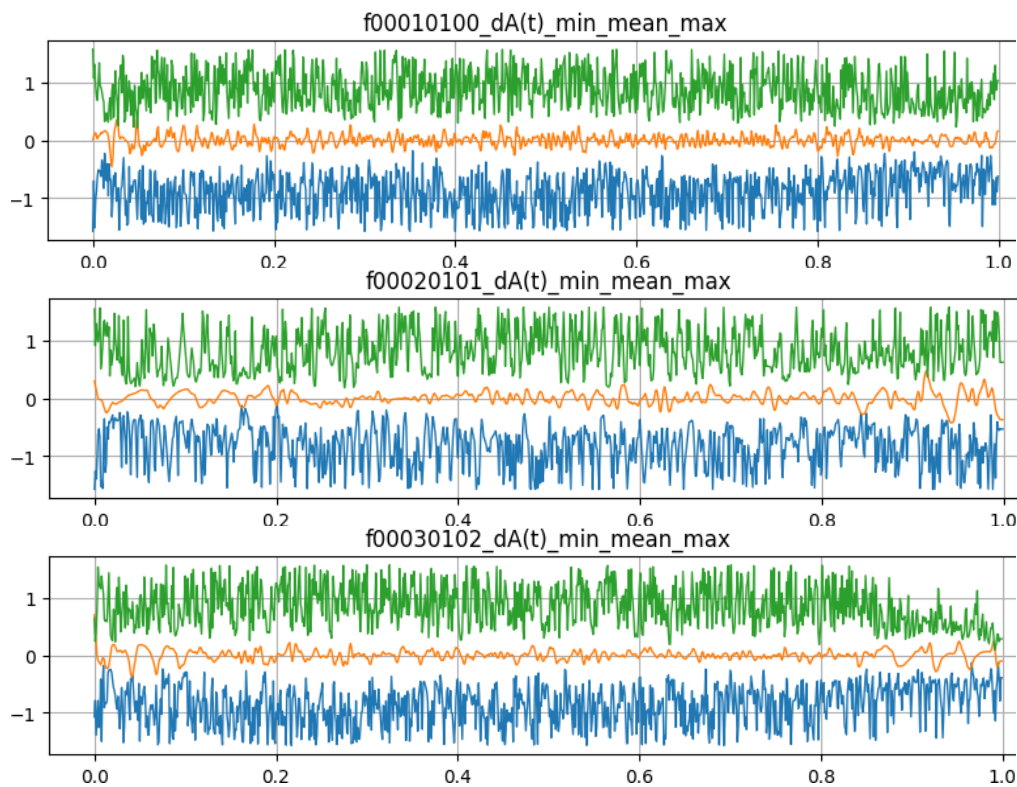


Рисунок 7 – Графік усередненої залежності $dI_s(t)$ справжніх підписів та огинаючі максимальних та мінімальних значень залежностей $dI_s(t)$ для 25 кваліфіковано підроблених підписів трьох осіб

Із попарного порівняння рисунків 2,3,4 та 5,6,7 видно, що параметри $\dot{X}_s(t)$ та $\dot{l}_s(t)$ підробних підписів мають більший діапазон розкиду, ніж параметри $\dot{X}(t)$ та $\dot{l}(t)$ справжніх підписів відносно середньої залежності відповідно $\dot{X}(t)$ та $\dot{l}(t)$. Крім того, з рисунків видно, що середні залежності $\dot{X}(t)$ та $\dot{l}(t)$ проходять не симетрично (не еквідистантно) огинаючим максимальних та мінімальних значень залежностей $\dot{X}_s(t)$ та $\dot{l}_s(t)$. Це означає, що дисперсія підробних підписів відносно усередненого справжнього підпису буде велика, що дозволить легко відрізнити підробний підпис від справжнього. Тобто динамічні параметри $X(t)$ та $l(t)$ є чутливими до міжперсональної варіабельності підпису.

А от параметр $\Delta\dot{\alpha}_s(t)$ підробних підписів, всупереч очікуванням, має такий само великий діапазон розкиду відносно середньої залежності $\Delta\dot{\alpha}(t)$, як і параметр $\Delta\dot{\alpha}(t)$ справжніх підписів. Це свідчить про те, що параметр $\Delta\dot{\alpha}(t)$ не є чутливим до міжперсональної варіабельності, тому його не варто використовувати для ідентифікації підписів.

Кількісні дані для оцінки міжперсональної варіабельності параметрів $\dot{X}_s(t)$, $\dot{l}_s(t)$ та $\Delta\dot{\alpha}_s(t)$ для 1 користувача наведено у табл. 3

Таблиця 3 – Кількісні показники міжперсональної варіабельності параметрів $\dot{X}_s(t)$, $\dot{l}_s(t)$ та $\Delta\dot{\alpha}_s(t)$ для користувача 1 БД МСУТ-330

№ підпису	Середнє відносне відхилення реалізації підпису,%		
	Для $\dot{X}_s(t)$	Для $\dot{l}_s(t)$	Для $\Delta\dot{\alpha}_s(t)$
1	5,33	9,29	29,39
2	4,03	8,06	28,38
3	5,78	8,79	28,85
4	4,26	8,28	29,55
5	6,24	10,24	30,54
6	12,32	9,86	27,14
7	13,05	8,52	27,37
8	17,93	11,05	26,98
9	9,42	12,10	25,67
10	9,04	7,94	26,99
11	5,46	7,27	30,73
12	4,87	7,87	29,49
13	6,22	7,46	31,51
14	7,98	7,48	32,07
15	6,84	6,06	31,60
16	11,67	10,85	26,62
17	9,36	10,14	27,88
18	7,28	9,10	24,44
19	28,70	12,24	26,67
20	10,03	8,71	26,07
21	11,40	7,51	28,90
22	9,91	7,67	32,77
23	10,54	9,35	28,49
24	7,29	8,76	31,03
25	9,56	10,64	29,63
Середнє відхилення підписів користувача,%	9,38	9,01	28,75

Із табл. 3 видно, що для конкретного користувача міжперсональна варіабельність параметрів $X(t)$ та $l(t)$ чисельно складає відповідно 9,38% та 9,01%, що більше відповідних значень 3,13% та 5,92% внутрішньперсональної варіабельності. Це кількісно підтверджує той факт, що параметри $X(t)$ та $l(t)$ є чутливими до міжперсональної варіабельності. А параметр $\Delta\dot{\alpha}(t)$ для підробних підписів 28,75%, всупереч очікуванням, кількісно не відрізняється від аналогічного параметра 29,39% справжніх підписів. Це вже

кількісно свідчить про те, що параметр $\Delta\alpha(t)$ не є чутливим до міжперсональної варіабельності, тому його не варто використовувати для ідентифікації підписів.. Справедливість такого висновку для всіх користувачів підтверджується даними табл. 4.

Таблиця 4 – Кількісні показники міжперсональної варіабельності параметрів $X_s(t)$, $l_s(t)$ та $\Delta\alpha_s(t)$ для 230 користувачів БД МСУТ-330

№ користувача	Для $X_s(t)$		Для $l_s(t)$		Для $\Delta\alpha_s(t)$	
	МС середнього відхилення,%	МС максимального відхилення,%	МС середнього відхилення,%	МС максимального відхилення,%	МС середнього відхилення,%	МС максимального відхилення,%
1	9,38	4,03-28,70	9,01	6,06-12,24	28,75	24,44-32,77
2	18,28	7,51-33,90	16,13	10,85-23,12	26,27	21,79-32,58
3	13,66	7,87-22,48	11,57	8,45-16,52	28,41	24,65-31,55
...						
98	17,16	7,92-34,82	17,98	11,63-24,45	27,41	20,92-33,67
99	14,24	8,21-23,31	12,74	9,02-17,38	29,54	25,16-32,23
100	10,09	4,79-29,33	9,87	6,69-13,07	25,98	23,52-30,56
Середнє значення	13,84	6,69-28,83	12,92	8,54-17,91	27,62	23,47-32,15

Таким чином, дані табл. 4 доводять обґрунтованість вибору параметру $l(t)$ (мала внутрішньо-персональна варіабельність – 6,44%, велика міжперсональна варіабельність – 12,92%) та необґрунтованість вибору параметру $\Delta\alpha(t)$ (приблизно однакова внутрішньоопераціональна та міжперсональна варіабельність – відповідно 25,37% та 27.62%) для використання у високостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгових нейронних мереж [10]. Замість параметра $\Delta\alpha(t)$ варто, скоріше всього, обирати добуток $X(t) \times Y(t)$, але це потребує додаткових досліджень.

ВИСНОВКИ

У статті обґрунтовано вибір динамічних параметрів підпису, стійких до геометричної варіабельності, тобто зміни просторового масштабу, зсуву та повороту підпису відносно сторін планшету. Розроблено та описано процес нормалізації динамічних параметрів підпису, який здійснюється як по амплітуді, так і по часу. Розроблено формули для здійснення процесу нормалізації динамічних параметрів підпису. Досліджено стійкість динамічних параметрів підпису до внутрішньоопераціональної варіабельності на основі статистичного аналізу параметрів розкиду окремих реалізацій підпису відносно усередненої залежності. Доведено обґрунтованість вибору параметру $l(t)$ (мала варіабельність – 6,44%) та необґрунтованість вибору параметру $\Delta\alpha(t)$ (велика варіабельність – 25,37%) для використання у високостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгових нейронних мереж. Досліджено чутливість динамічних параметрів підпису до міжперсональної варіабельності на основі статистичного аналізу параметрів розкиду окремих реалізацій підписів відносно усередненої залежності справжнього підпису. Доведено обґрунтованість вибору параметру $l(t)$ (мала внутрішньоопераціональна варіабельність – 6,44%, велика міжперсональна варіабельність – 12,92%) та необґрунтованість вибору параметру $\Delta\alpha(t)$ (приблизно однакова внутрішньоопераціональна та міжперсональна варіабельність – відповідно 25,37% та 27.62%) для використання у високостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгової нейронної мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. Diaz, M. A. Ferrer, D. Impedovo, M. I. Malik, G. Pirlo, and R. Plamondon, "A Perspective Analysis of Handwritten Signature Technology", *ACM Comput. Surv.*, Vol. 51, No. 6, Article 117, January 2019.
2. Al-banhawy N. H., Mohsen H., Ghali N. I. (2020) "Signature identification and verification systems: a comparative study on the online and offline techniques", *Future Computing and Informatics Journal*: Vol. 5 : Iss. 1 , Article 3.
3. I.M. El-Henawy, M. Z. Rashad, O. Nomir, and K. Ahmed, "Online Signature Verification: State of the art", *International Journal of Computers & Technology*, Volume 4, No. 2, March-April, 2013.
4. В. В. Куцман і О. К. Колесницький, «Верифікація та розпізнавання підпису як багатопараметричного процесу на основі спайкінгової нейронної мережі», *ІТКІ*, том 50, № 1, с. 36–

- 44, Квіт 2021.
5. W. Maass, "Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models", *Neural Networks*, 10:1659-1671, 1997.
 6. О. К. Колесницкий, and Самра Муавия Хассан Хамо, "Метод распознавания многомерных временных рядов при помощи импульсных нейронных сетей", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2006, №2(6), с. 86-93.
 7. J. Ortega-Garcia, J. Fierrez-Aguilar, and et al., "МСУТ Baseline Corpus: A Bimodal Biometric Database," *Proc. IEEE Vision, Image and Signal Processing, Special Issue on Biometrics on the Internet*, vol. 150, no. 6, pp. 395–401, 2003.
 8. R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, and J. Ortega-Garcia, "DeepSign: Deep On-Line Signature Verification", *Preprint in IEEE Transactions on Biometrics Behavior and Identity Science*, January 2021.
 9. О. К. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, and S. S. Yaremchuk, "Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices", *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol.19, №2, pp.154-165.
 10. О. К. Kolesnytskyj, V. V. Kutsman, K. Skorupski, and M. Arshidinova, "Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation", *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, 1117609 (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2536607.

Надійшла до редакції хх.хх.2021 р.

КУЦМАН ВЛАДИСЛАВ ВІКТОРОВИЧ – аспірант кафедри комп'ютерних наук, інженер-програміст ТОВ «УЛФ-ФІНАНС», тел: +380974672461, email: kutsmanvlad@gmail.com

КОЛЕСНИЦЬКИЙ ОЛЕГ КОСТЯНТИНОВИЧ – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна e-mail: kolesnytskyj@vntu.edu.ua.

ДЕНИСОВ ІГОР КОСТЯНТИНОВИЧ – викладач кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна e-mail: denysov@vntu.edu.ua