

## АНОТАЦІЯ

*Куцман В. В.* Динамічна ідентифікація підпису на основі спайкінгової нейронної мережі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 «Інформаційні технології»). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

В дисертаційній роботі розв'язана наукова задача розробки методів та засобів динамічної ідентифікації підпису з використанням спайкінгових нейронних мереж та динамічних параметрів підпису, робастних до внутрішньооперсональної варіабельності та чутливих до міжперсональної варіабельності підписів, що дозволило збільшити достовірність систем динамічної ідентифікації підпису,

Ідентифікація підпису має особливо важливе значення, оскільки вона є загальноприйнятим методом схвалення фінансових операцій. Аналіз рукописних підписів - одна з найпоширеніших методик визначення особи, з чим ми часто стикаємось у своєму повсякденному житті. Верифікація підпису людиною-оператором має багато «слабких сторін». Так, оператор може оцінити тільки статичне зображення підпису, наскільки воно відповідає еталону. При цьому існує загроза, що добре натренований зловмисник може дуже схоже підробити підпис особи, тобто зображення підпису, відтворене зловмисником, буде дуже схоже на справжній підпис особи.

Широке поширення комп'ютерної техніки та інформаційних технологій обробки даних дозволяє застосувати не тільки аналіз статичного зображення підпису (Offline ідентифікація), а також динамічних характеристик його написання (Online ідентифікація). Статична (Offline) ідентифікація підписів є менш перспективною, тому в рамках цієї роботи не розглядається. 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 не можливо підробити, оскільки вони не можуть бути відомі зловмиснику. Однак ідентифікація динамічних параметрів підпису має багато невирішених проблем та викликів. Однією з найбільших проблем є той факт, що підпис однієї особи не завжди є однаковим. Така внутрішньоперсональна варіабельність підпису створює низку проблем при побудові високодостовірних програмних засобів ідентифікації підпису. З іншого боку, потребують вдосконалення методи класифікації динамічних параметрів підпису в напрямку підвищення достовірності при класифікації сильно корельованих часових рядів. Саме вирішенню цих проблем і присвячено дане дослідження.

В дисертаційній роботі розглянуто співвідношення понять верифікація та ідентифікація підписів. Ідентифікація (розпізнавання) – це загальний процес виявлення власника підпису, яка є багатокласовим завданням класифікації. Верифікація - це загальний процес прийняття рішення щодо підпису, в результаті чого визначається чи справжній підпис, чи підроблений. Тому це двокласове завдання класифікації. Описано загальну схему динамічної ідентифікації підпису, проаналізовано процес отримання первинних динамічних ознак підпису та такі їх властивості як внутрішньоперсональна та міжперсональна варіабельність, сформульовано вимоги до визначення оптимального набору динамічних ознак підпису. Проведено класифікацію відомих методів та засобів динамічної ідентифікації підписів та сформульовано перспективи їх вдосконалення, що полягають у використанні динамічних класифікаторів на основі спайкінгових нейронних мереж та використанні динамічних параметрів підписів, стійких до внутрішньоперсональної варіабельності та чутливих до міжперсональної

варіабельності. Проведено аналіз баз даних підписів та показників достовірності, що використовуються при оцінці якості систем динамічної ідентифікації підписів. Виділено недоліки існуючих систем динамічної ідентифікації підписів, запропоновано напрямки їх вдосконалення та сформульовано задачі досліджень.

Обґрунтовано перспективність використання спайкінгових нейронних мереж для динамічної ідентифікації підписів, оскільки вони можуть без будь-якого перетворення форми інформації виконувати розпізнавання динамічних параметрів підпису, що виключає втрату корисної інформації та сприяє підвищенню достовірності ідентифікації. Проаналізовано моделі спайкінгових нейронів з точки зору використання їх у процесі динамічної ідентифікації підписів. Використана модель нейрона з роздільними входами збудження та гальмування, що дозволяє використовувати імпульси однакової полярності для передачі як збуджувальних, так і гальмівних сигналів.

Розроблено структуру та архітектуру спайкінгової нейронної мережі включно з принципами її побудови та функціонування з орієнтацією на застосування у процесі динамічної ідентифікації підписів. Особливістю розробленої структури є те, що вона має на кожний ідентифікаційний клас (на кожного підписанта) не 1 вихідний нейрон, а 2 вихідних нейрони (один - для індикації справжнього підпису, а другий - для індикації підробленого підпису). Це дозволяє точніше визначати майстерно підроблені підписи, підкреслюючи їх диференціацію від справжніх, оскільки вони представляються сильно корельованими сигналами.

Розроблено метод навчання спайкінгової нейронної мережі та принципи кодування вихідної інформації в процесі класифікації динамічних параметрів підписів. Особливістю процесу навчання є те, що для навчання використовуються не тільки оригінальні підписи особи, а також і майстерно підроблені підписи, що збільшує достовірність процесу ідентифікації підписів. Крім цього, застосовується спеціально розроблена процедура початкового закріплення вихідних нейронів за класами ідентифікації, що

пришвидшує процес навчання. Також розроблено метод динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгової нейронної мережі, який має ряд переваг перед відомими методами, зокрема, не вимагає попереднього перетворення у вектор статичних ознак, може ідентифікувати підписи з передбаченням, що підвищує швидкодію; використовувана нейронна мережа має спрощену процедуру навчання, а саме - не потребує перенавчання всієї мережі при необхідності додавання нових підписів; має підвищену завадостійкість.

Обґрунтовано вибір динамічних параметрів підпису, стійких до геометричної варіабельності, тобто зміни просторового масштабу, зсуву та повороту підпису відносно сторін планшету:  $l(t)$  - відстань від поточного часового відліку координат пера до наступного,  $XU(t)$  - добуток координат  $X(t)$  та  $U(t)$  координат пера,  $Z(t)$  - тиск пера на планшет. 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 внутрішньоперсональної варіабельності на основі статистичного аналізу параметрів розкиду окремих реалізацій підпису відносно усередненої залежності. Доведено обґрунтованість вибору параметрів  $l(t)$  та  $XU(t)$  (мала варіабельність – відповідно 6,44% та 8,04%) і необґрунтованість вибору параметру  $\Delta\alpha(t)$  (велика варіабельність – 25,37%) для використання у високодостовірному 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 підпису відносно усередненої залежності. Доведено обґрунтованість вибору параметрів  $l(t)$  та  $XU(t)$  (мала внутрішньоперсональна варіабельність – 6,44% та 8,04% відповідно, велика міжперсональна варіабельність – 12,92% та 15,91% відповідно) та необґрунтованість вибору параметру  $\Delta\alpha(t)$  (приблизно однакова

внутрішньоперсональна та міжперсональна варіабельність – відповідно 25,37% та 27.62%) для використання у високодостовірному методі динамічної ідентифікації підписів на основі спайкінгових нейронних мереж.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, що складається з двох незалежних компонентів. Перший компонент створений для дослідження внутрішньоперсональної та міжперсональної варіабельності динамічних параметрів підпису. Другий компонент призначено для комп'ютерного моделювання та оцінки достовірності запропонованого методу динамічної ідентифікації підпису на основі спайкінгової нейронної мережі. Описано програмну реалізацію методу динамічної ідентифікації підпису на основі спайкінгової нейронної мережі на мові Python у середовищі розробки Visual Studio Code з використанням бібліотек TensorFlow та Keras. Розглянуто методику оцінки достовірності методів динамічної ідентифікації підпису, що складається з таких етапів: вибір референсної бази даних підписів (було обрано БД DeepSignDB), аналіз показників якості систем ідентифікації підписів, розробка протоколу проведення експериментальних досліджень, Проведено експериментальні дослідження достовірності методу динамічної ідентифікації підпису на основі спайкінгової нейронної мережі.

При тестуванні тільки майстерно підробленими підписами розроблена система має достовірність 96,1%, влучність 93,1%, повноту 99,65%, оцінку F1 96,26%. Загалом, у відносних показниках, запропонована система за достовірністю краща за референсну на 9% при тестуванні на майстерних підробках і на 15% при тестуванні на випадкових підробках. Визначено перспективи подальших досліджень, які полягають як у аналізі та синтезі ефективних динамічних параметрів підпису та їх попередньої обробки, так і у пошуку нових та удосконаленні відомих методів та засобів класифікації часових рядів, якими є динамічні параметри підпису.

*Ключові слова:* динамічна ідентифікація підпису, спайкінгова нейронна мережа, динамічні ознаки підпису, внутрішньоперсональна варіабельність підпису, міжперсональна варіабельність підпису, достовірність ідентифікації.

## ABSTRACT

*Kutsman V. V.* Dynamic signature identification based on spiking neural network. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of a Philosophy Doctor in speciality 122 "Computer Sciences" (12 «Information Technologies»). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

The dissertation solves the scientific problem of developing methods and means of dynamic signature identification using spiking neural networks and dynamic signature parameters, robust to intrapersonal variability and sensitive to interpersonal variability of signatures, which increased the reliability of signature systems.

Signature identification is particularly important as it is a common method of approving financial transactions. Analysis of handwritten signatures is one of the most common methods of identifying a person, which we often encounter in our daily lives. Signature verification by a human operator has many "weaknesses". So, the operator can only evaluate the static image of the signature, how it corresponds to the standard. At the same time, there is a danger that a well-trained attacker may very similarly forge a person's signature, ie the image of the signature reproduced by the attacker will be very similar to a real person's signature.

The widespread use of computer technology and information technology in data processing allows us to apply not only the analysis of static image of the signature (Offline identification), but also the dynamic characteristics of its writing (Online identification). Static (Offline) signature identification is less promising, so it is not considered in this paper. Modern electronic tablets on which a person signs can form dynamic parameters of the signature (dynamics of changes in pen coordinates, pen pressure and pen angle). These dynamic parameters provide additional information about the signature and can be used for more accurate verification and identification of the signature. These dynamic parameters cannot

be analyzed by a human operator, but can easily be analyzed by electronic computer tools with appropriate software. Also, these dynamic parameters cannot be forged, as they cannot be known to the attacker. However, identifying dynamic signature parameters has many unresolved issues and challenges. One of the biggest problems is the fact that one person's signature is not always the same. Such intrapersonal variability of the signature creates a number of problems in the construction of highly reliable software for signature identification. On the other hand, the methods of classification of dynamic parameters of the signature in the direction of increasing reliability in the classification of highly correlated time series need to be improved. This study is devoted to solving these problems.

The dissertation considers the relationship between the concepts of verification and identification of signatures. Identification (recognition) is a general process of identifying the owner of a signature, which is a multi-class task of classification. Verification is a general process of deciding on a signature, which determines whether the signature is genuine or forged. Therefore, this is a two-class classification task. The general scheme of dynamic signature identification is described, the process of obtaining primary dynamic signature features and their properties such as intrapersonal and interpersonal variability are analyzed, requirements for determining the optimal set of dynamic signature features are formulated. The classification of known methods and means of dynamic identification of signatures is carried out and the prospects of their improvement are formulated, which are the use of dynamic classifiers based on spiking neural networks and the use of dynamic signature parameters robust to intrapersonal variability and sensitive to interpersonal variability. The analysis of signature databases and reliability indicators used in assessing the quality of dynamic signature identification systems is carried out. The shortcomings of the existing systems of dynamic identification of signatures are highlighted, the directions of their improvement are offered and the tasks of researches are formulated.

The prospects of using spiking neural networks for dynamic identification of signatures are substantiated, as they can perform recognition of dynamic signature

parameters without any transformation of the information form, which eliminates the loss of useful information and helps increase the reliability of identification. Models of spiking neurons from the point of view of their use in the process of dynamic identification of signatures are analyzed. A model of a neuron with separate inputs of excitation and inhibition is used, which allows to use pulses of the same polarity for the transmission of both excitation and inhibition signals.

The structure and architecture of the spiking neural network, including the principles of its construction and operation with a focus on application in the process of dynamic signature identification, have been developed. The peculiarity of the developed structure is that it has for each identification class (for each signatory) not 1 output neuron, but 2 output neurons (one - to indicate a real signature, and the second - to indicate a fake signature). This allows us to more accurately identify forged signatures, emphasizing their differentiation from the real thing, because they are highly correlated signals.

The method of learning the spiking neural network and the principles of coding the source information in the process of classification of dynamic parameters of signatures have been developed. The peculiarity of the learning process is that not only the original signatures of the person are used for learning, but also skillfully forged signatures, which increases the authenticity of the signature identification process. In addition, a specially designed procedure for the initial fixation of source neurons in identification classes is used, which speeds up the learning process. Also the method of dynamic identification of signatures based on spiking neural network has been developed, which has a number of advantages over known methods, in particular, does not require prior conversion into a vector of static features, can identify signatures with predictions that increase performance; the used neural network has a simplified learning procedure, no need to retrain the entire network if you need to add new signatures; has increased noise immunity.

The choice of dynamic parameters of the signature, resistant to geometric variability, ie changes in the spatial scale, shift and rotation of the signature



relative to the sides of the tablet is substantiated:  $l(t)$  - the distance from the current time sample of the pen coordinates to the next one,  $XY(t)$  - the product of the pen coordinates  $X(t)$  and  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  - the pen pressure on the tablet. The process of normalization of dynamic parameters of the signature which is carried out both on amplitude, and on time is developed and described. Formulas for the process of normalization of dynamic signature parameters have been developed. The stability of dynamic signature parameters to intrapersonal variability is studied on the basis of statistical analysis of scatter parameters of individual signature implementations relative to the average dependence. The validity of the choice of parameters  $l(t)$  and  $XY(t)$  (low variability - 6.44% and 8.04%, respectively) and the unreasonableness of the choice of the parameter  $\Delta\alpha(t)$  (high variability - 25.37%) for use in highly reliable method of dynamic signature identification based on spiking neural networks. The sensitivity of dynamic signature parameters to interpersonal variability was studied on the basis of statistical analysis of scatter parameters of individual signature implementations relative to the average dependence. The validity of the choice of parameters  $l(t)$  and  $XY(t)$  (low intrapersonal variability - 6.44% and 8.04%, respectively, large interpersonal variability - 12.92% and 15.91%, respectively) and unreasonableness of the choice of the parameter  $\Delta\alpha(t)$  (approximately the same intrapersonal and interpersonal variability - 25.37% and 27.62%, respectively) for use in a highly reliable method of dynamic signature identification based on spiking neural networks.

Specialized software has been developed, consisting of two independent components. The first component is designed to study intrapersonal and interpersonal variability of dynamic signature parameters. The second component is designed for computer simulation and evaluation of the proposed method of dynamic signature identification based on spiked neural network. The software implementation of the method of dynamic signature identification based on a spiking neural network in the Python language in the Visual Studio Code development environment using the TensorFlow and Keras libraries is described. The method of assessing the authenticity of dynamic signature identification

methods is considered, consisting of the following stages: selection of reference database of signatures (DeepSignDB database was selected), analysis of quality indicators of signature identification systems, development of experimental research protocol. spiking neural network. When testing only skilled forgery signatures, the developed system has an accuracy of 96.1%, precision of 93.1%, recall of 99.65%, F1 score of 96.26%. In general, in terms of relative indicators, the proposed system is 9% more reliable than the reference system when tested on skilled forgeries and 15% when tested on random forgeries. Prospects for further research are identified, which consist in the analysis and synthesis of effective dynamic parameters of the signature and their pre-processing, and in finding new and improving known methods and means of classifying time series, which are dynamic parameters of the signature.

*Key words:* dynamic signature identification, spiking neural network, dynamic signature features, intrapersonal signature variability, interpersonal signature variability, identification accuracy.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] В. В. Куцман, та О. К. Колесницький, «Верифікація та розпізнавання підпису як багатопараметричного процесу на основі спайкінгової нейронної мережі», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, том 50, № 1, с. 36–44, 2021.
- [2] В. В. Куцман, О. К. Колесницький, та І. К. Денисов, «Дослідження внутрішньоперсональної та міжперсональної варіабельності динамічних параметрів підпису у процесі їх ідентифікації», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, том. 40, № 2, с. 15-20, 2020.
- [3] V. Kutsman, and O. Kolesnytskyj, «Dynamic handwritten signature identification using spiking neural network», *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska – IAPGOS (Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection)*, Vol 11, No 3, pp. 34-39, 2021.
- [4] O. Kolesnytskyj, V. Kutsman, K. Skorupski, and M. Arshidinova, «Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation», *Proc. SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, vol. 11176, pp. 1117609, 2019. doi: 10.1117/12.2536607.
- [5] О. К. Колесницький, та В. В. Куцман, «Розпізнавання багатоканальних сигналів за допомогою спайкінгових нейронних мереж», на *Одинадцятій міжнародній науково-практичній конференції «ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2018»*, Вінниця, 2018, с. 212-213.
- [6] О. К. Колесницький, та В. В. Куцман, «Архітектурні принципи побудови спайкінгових нейрокомп'ютерів та варіанти їх апаратної реалізації», на *XII Міжнародній науковопрактичній конференції «ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2020»*, Вінниця, 2020, с. 105-106.

[Електронний ресурс]. Доступно:  
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allvntu/index/pages/view/zbirn2020>.

- [7] В. В. Куцман, А. О. Переродов, та О. К. Колесницький, «Класифікація банківських текстів на основі згорткової нейронної мережі», на *XXIV Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті»*, Харків, 2020, с.189-190.
- [8] В. В. Куцман, та О. К. Колесницький, «Динамічна ідентифікація підпису на основі спайкінгової нейронної мережі», в *Матеріалах конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем»*, Вінниця, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно:  
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/view/13851>.