

В.І. СОЛОВЙОВ

Компанія «Сілентіум Систем», Ванкувер, Канада, e-mail: *edemsvi@gmail.com*.

О.В. РИБАЛЬСЬКИЙ

Національна академія внутрішніх справ, Київ, Україна, e-mail: *rov_1946@ukr.net*.

В.В. ЖУРАВЕЛЬ

Київський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Київ, Україна, e-mail: *fonoscopia@ukr.net*.

О.М. ШАБЛЯ

Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, Одеса, Україна, e-mail: *alikhshablya@gmail.com*.

Є.В. ТИМКО

Київський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, Київ, Україна, e-mail: *e.tymko@kndise.gov.ua*.

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ АПАРАТУРИ ЦИФРОВОГО ВІДЕОЗАПИСУ ТА ЦИФРОВИХ ФОТОАПАРАТІВ

Анотація. Розглянуто метод побудови експертного інструментарію для криміналістичної ідентифікації апаратури цифрового відеозапису та цифрових фотоапаратів. Обґрунтовано потребу у створенні цього інструментарію. Запропоновано здійснювати ідентифікацію зазначеної апаратури за статистичними характеристиками власних шумів, що виділяються з цифрових зображень, записаних з її використанням. Описано особливості та основні джерела виникнення цих шумів у цифрових зображеннях. Для їхнього виділення та оброблення використано вейвлет-аналіз, побудований на основі вейвлета Хаара. Остаточний результат експертизи отримано із застосуванням нейронних мереж глибокого навчання. Одержані результати застосування створеної системи ідентифікації апаратури засвідчили її високу ефективність.

Ключові слова: апаратура цифрового відеозапису, апаратура цифрової фотографії, вейвлет-аналіз, вейвлет Хаара, криміналістична ідентифікація, нейронні мережі глибокого навчання, власні шуми, цифрові зображення, експертиза.

ВСТУП

Визнання матеріалів відео- та звукозапису як можливої доказової бази зумовило появу нового виду експертизи — експертизи матеріалів та засобів відеозвукозапису. Нині вона містить низку експертних спеціальностей, що визначають підвиди (напрями) цієї експертизи: технічне дослідження матеріалів і засобів відеозвукозапису; технічні дослідження диктора за фізичними параметрами мовлення, акустичних сигналів та середовищ; лінгвістичне дослідження мовлення [1]. Фактично цей поділ відбувся у 70-х роках минулого століття, коли весь відео- та звукозапис здійснювали з використанням аналогової апаратури магнітного запису, тому весь експертний інструментарій був розрахований саме на неї.

Запис сигналів у цифровій формі значно підвищив точність передачі інформації апаратурою відео- та звукозапису. Теоретично ця точність (за умови правильного проєктування) залежить лише від частоти дискретизації та розрядності аналого-цифрового перетворення (АЦП) вхідної інформації. Фактично вона обмежується рівнем власних шумів і роздільною здатністю сучасної електроніки, яка залежить від технологічного рівня виробництва електронних елементів і конструктивних компонентів апаратури. Внаслідок якісного стрибка у точності передачі цифровими фіксувальними пристроями виникла потреба у створенні адекватного інструментарію судової експертизи матеріалів та апаратури відео- та звукозапису. Зокрема, для цифрового звукозапису використано

фрактальний підхід до власних шумів досліджуваних фонограм і застосовано нейронні мережі глибокого навчання. На цій основі створено комплект інструментарію експертизи цифрових звукозаписів [2–7]. Він пройшов успішну апробацію у науково-дослідних інститутах судової експертизи України. Методики застосування програм, що увійшли до комплексу цього інструментарію, запроваджено до Реєстру методик проведення судових експертиз України [1].

Проте для цифрового відеозапису набір такого інструментарію донині був відсутній. Створений комплект має забезпечити ідентифікацію апаратури цифрового відеозапису (та відповідно встановлення оригінальності відеограм) і перевірку відсутності (або наявності) слідів монтажу у відеограмах, представлених на експертизу.

Строго кажучи, в основі автентичності цифрових зображень (ЦЗ) лежить перевірка цілісності інформації, яка міститься у часовій послідовності статичних кадрів. Тому відео можна розглядати як послідовність цифрових фотографій у часі.

Є декілька підходів до створення експертного інструментарію автентичності ЦЗ. Один з них зводиться до пошуку порушення сингулярності на окремих ділянках матриць, що описують кожен такий кадр. Це зі свого боку, дає змогу створювати вказаний інструментарій на основі підходу виявлення слідів стеганографічних перетворень, здійснених у статичній системі [8]. Слід зазначити, що цей підхід не реалізований в експертній практиці та залишається лише на рівні теоретичної розробки. Однак, його безумовна важливість полягає в тому, що у ньому теоретично доведено можливість виявлення слідів та точок монтажу у цифрових фото та відеоматеріалах, які подаються на експертизу.

Одним із недоліків, що обмежують можливості застосування цього підходу в експертизі, є його непридатність для проведення ідентифікаційних досліджень апаратури цифрового відеозапису (АЦВЗ) та цифрових фотоапаратів (ЦФА). Це не дає змоги виконувати діагностичні дослідження оригінальності матеріалів цифрового відеозапису та фотографій, що надаються на експертизу.

Мета статті — представити метод і створену на його основі систему криміналістичної ідентифікації АЦВЗ та ЦФА та, як наслідок, систему перевірки оригінальності ЦЗ.

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОВОГО ПІДХОДУ ДО СТВОРЕННЯ МЕТОДУ

Під час розроблення методу та подальшої побудови системи ми вважали, що найкраще задачам експертизи відповідає методологія, що ґрунтується на дослідженні власних шумів АЦВЗ чи ЦФА, зафіксованих на носії під час запису ЦЗ будь-якого виду. Запропонований підхід ґрунтується на виділенні та дослідженні фрактального складу власних шумів такої апаратури, зафіксованих у ЦЗ, та передбачає використання технології нейронних мереж глибокого навчання. Цей підхід до побудови експертного інструментарію вибрано, виходячи з таких міркувань.

Загальновідомо, що розрядність АЦП рівня сигналу, що припадає на кожний піксель світлоприймальної матриці (незалежно від кольору, що сприймається пікселем, і роздільної здатності матриці), становить зазвичай 8 розрядів для прямої імпульсно-кової модуляції. Таку кількість розрядів давно визначено як оптимальну, виходячи з роздільної здатності людського зору. Тому будь-які сигнали, що лежать нижче рівня мінус 48 дБ, є шумами квантування та їхній аналіз для виявлення будь-яких індивідуальних особливостей апаратури запису сенсу не має.

Доцільно досліджувати сигнали, що лежать лише на рівні мінус (36–42) дБ, бо вони становлять максимальну величину немонотонності та диференціальної нелінійності статичної характеристики квантувача АЦП. Ці спотворення завжди містяться в будь-якому перетворювачі, мають суто індивідуальний характер й утворюють мультифрактальні структури у сигналах, що перетворюються [9].

Другим джерелом походження індивідуальних мультифрактальних структур в АЦЗВ та ЦФА, що ідентифікуються, на нашу думку, є розкид рівнів світлочутливості матриці за її кожним окремим пікселем та використанням фільтром за кольором. При цьому слід відзначити дуже велику кількість пікселів, що припадають на один кадр будь-якого ЦЗ, характеристики власних шумів яких підлягають порівнянню під час проведення експертизи. Дослідження та порівняння параметрів цих характеристик не можна виконати без застосування методів автоматизації відповідних процесів. На нашу думку, оптимальним способом розв'язання цієї проблеми є застосування нейронної мережі глибокого навчання.

Наявність двох зазначених джерел індивідуальних ідентифікаційних ознак гарантувала створення експертного інструментарію, який забезпечує розв'язання поставлених експертних задач. Це й зумовило вибір методології побудови необхідного інструментарію.

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ АПАРАТУРИ ЦИФРОВОГО ВІДЕОЗАПИСУ

В основу методу покладено теорію криміналістичної ідентифікації. Згідно з нею об'єкт, що ідентифікується, може бути тотожним тільки самому собі. Відповідно до цього твердження, статистичні характеристики шумів відеоматриць, як і статистичні характеристики шумів АЦП, мають індивідуальні особливості для кожного конкретного записувального пристрою. Справедливість цієї гіпотези підтверджується всім попереднім досвідом побудови експертного інструментарію. Очевидно, що у вихідному сигналі ЦЗ змішані всі шуми від кожного джерела. Ця суміш має свої індивідуальні статистичні характеристики. Розділити її на окремі складові, що належать кожному з джерел, неможливо. Але це і не потрібно з огляду на строгу індивідуальність кожної складової, що фіксується у шумах ЦЗ.

У сучасних технологіях оброблення ЦЗ використовують для розв'язання різних задач спеціальні математичні фільтри. Зокрема, для виділення власних шумів із ЦЗ нами застосовано вейвлет-декомпозицію записаних сигналів за кожним рядком ЦЗ з розбивкою за кольорами фільтрів матриці [10]. Під час створення методу досліджено декілька типів вейвлетів, побудованих за принципами кусково-постійної апроксимації, зокрема вейвлети Добеші та Хаара. Виявлено, що використання певного вейвлета для декомпозиції сигналів не забезпечує суттєвих переваг порівняно з іншими. Тому далі застосовано вейвлети Хаара, що є простішими у реалізації. Вихідний сигнал кожного пікселя рядка розкладали на коефіцієнти апроксимації (сА) та деталізації (сD). При цьому коефіцієнти деталізації віднесено до власних шумів ЦЗ.

Цю операцію, наприклад, для рядка червоного кольорофільтра ЦЗ із застосуванням вейвлета Хаара можна представити як

$$[cA, cD] = \text{dwt}(\text{image_Red}, \text{'haar'}),$$

де сА — коефіцієнти апроксимації, сD — коефіцієнти деталізації, dwt — вейвлет-перетворення рядка частини відеосигналу певної кольоровості (Red), image_Red — рядок відеосигналу певного кольору, 'haar' — вейвлет Хаара, який можна записати у вигляді

$$\psi(t) = \begin{cases} -1, & \text{якщо } 0 \leq t \leq 1/2, \\ 1 & \text{якщо } 1/2 \leq t \leq 1, \\ 0 & \text{в інших точках,} \end{cases}$$

де t — час [10].

Порогові значення межі розділення сигналу ЦЗ на коефіцієнти апроксимації та деталізації задають, виходячи з наведених вище міркувань. Сигнали всіх пікселів нормують за рівнем за максимальною величиною сигналу ЦЗ.

Приклад результату деталізації під час виділення власних шумів для одного рядка ЦЗ з червоним та синім кольорофільтрами наведено на рис. 1.

Операцію декомпозиції слід виконувати за всіма рядками та кольорофільтрами ЦЗ. Для кожного кольорофільтра ЦЗ за всіма рядками будують нормований розподіл величини власних шумів.

Експерименти, проведені на десятках тисяч ЦЗ, записаних на різній апаратурі, показали близькість цих розподілів для ЦЗ, зроблених на одному пристрої запису, та їхню істотну відмінність для різних пристроїв. Це проілюстровано рис. 2 та рис. 3.

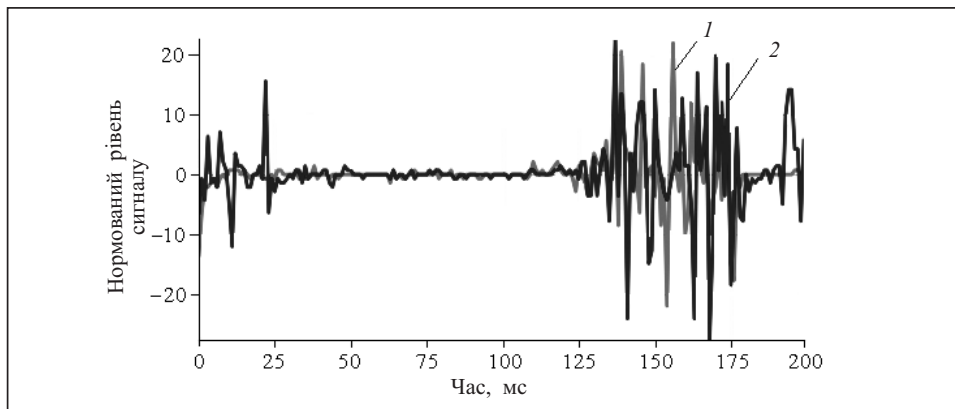


Рис. 1. Фрагмент виділених з рядка у 400 пікселів ЦЗ нормованих власних шумів за коефіцієнтами деталізації; 1 — червоний кольорофільтр; 2 — синій кольорофільтр

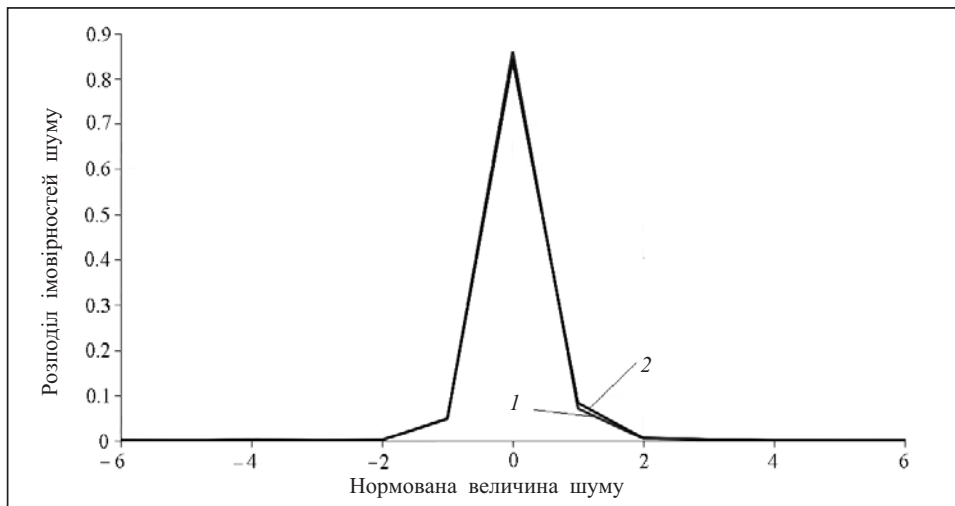


Рис. 2. Розподіл власних шумів за величиною для двох ЦЗ, отриманих з використанням одного й того самого пристрою запису: 1 — червоний кольорофільтр (frame0.jpg/1296/2304/0.8999/0.5505); 2 — синій кольорофільтр (frame486.jpg/1296/2304/0.8999/0.5505); характеристики однакові; ймовірність помилки менша ніж 0.9%

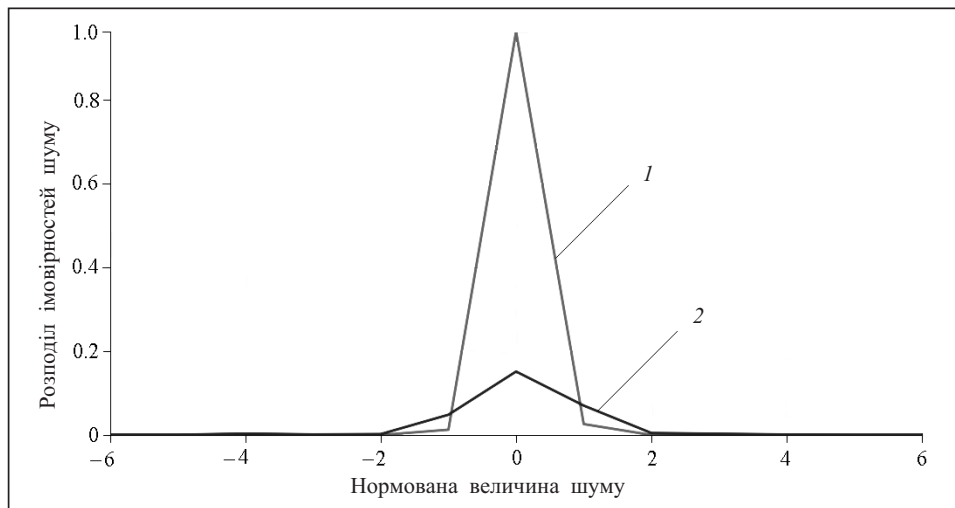


Рис. 3. Розподіл власних шумів за величиною для двох ЦЗ, отриманих з використанням різних пристроїв запису: 1 — червоний кольорофільтр (frame1.jpg/768/1024/0.3706/0.5505); 2 — синій кольорофільтр (frame2.jpg/1296/2304/0.3706/0.5505); характеристики відрізняються; ймовірність помилки менша ніж 6.1%

Для розроблення методу ідентифікації АЦВЗ та його експериментальної перевірки потрібно забезпечити високий ступінь автоматизації виконання операції порівняння розподілів власних шумів двох відеограм. Тому було застосовано класичний підхід до вибору критерію порівняння двох розподілів з визначенням порогу прийняття рішення та урахуванням великого обсягу статистичного матеріалу.

З огляду на різноманіття таких розподілів для різних типів і видів АЦВЗ і ЦФА цей статистичний матеріал повинен містити велику навчальну базу даних цифрових ЦЗ, де для кожного зображення за кожним рядком для кожного кольорофільтра розраховують розподіли власних шумів. Цю базу даних використано для навчання нейронної мережі глибокого навчання, призначеної для розв'язання задачі бінарної класифікації щодо розподілу власних шумів. Ця модель нейронної мережі призначена для того, щоб визначити, як здійснено запис двох ЦЗ — на одному й тому самому пристрої запису чи на різних. Водночас, спираючись на великий обсяг апріорної інформації, отриманої під час навчання нейронної мережі, модель визначає ймовірність помилки прийняття рішення щодо близькості характеристик двох конкретних ЦЗ. Під час ідентифікації АЦВЗ здійснюється порівняння двох відеограм за кожним порівнюваним кадром як за множиною порівнюваних ЦЗ.

У межах проведених досліджень побудовано графіки помилок першого та другого роду, отримані для великої кількості ЦЗ, записаних на ідентифікованій ЦФА. Ці графіки наведено на рис. 4.

Результати, одержані для ЦФА під час експериментальної перевірки методу, дають підстави стверджувати, що розроблена система має високу ефективність, яка цілком прийнятна для експертної практики. Слід зазначити, що ефективність ідентифікації АЦВЗ здебільшого є набагато вищою, оскільки величини ймовірності помилок першого та другого роду для такої апаратури мають тенденцію до зниження порівняно з ЦФА, як корінь квадратний із кількості порівнюваних ЦЗ у двох відеограмах. Проте при цьому збільшення кількості порівнюваних кадрів призводить до квадратичного зростання обсягу обчислень. Однак, технічний рівень сучасної обчислювальної техніки та науковий рівень математичного забезпечення сприяли створенню реального інструмента — програми FIVA, яку було передано на апробацію у спеціалізовані експертні підрозділи України.

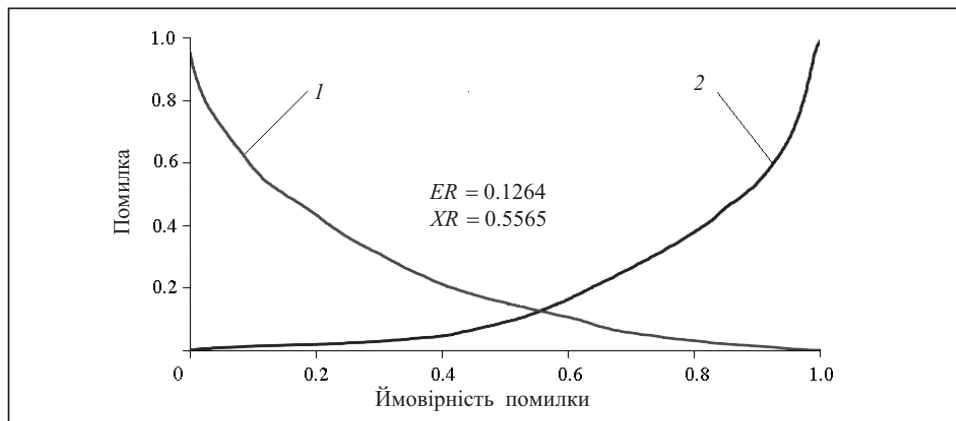


Рис. 4. Графіки помилок першого (ERR1) та другого (ERR2) роду, отримані під час ідентифікації ЦФА; 1 — ERR1; 2 — ERR2

ВИСНОВКИ

Розроблено метод та створено інструментарій для здійснення криміналістичної ідентифікації апаратури цифрового відеозапису та цифрової фотоапаратури за її власними шумами, що зафіксовані у цифрових зображеннях. При цьому принцип побудови цього інструментарію для обох видів апаратури є одним і тим самим та ґрунтується на порівнянні статистичних характеристик власних шумів, що виділяються із цифрових зображень, записаних на цій апаратурі.

У порівняльних експертних дослідженнях цифрових зображень для отримання міри їхньої близькості використано нейронні мережі глибокого навчання. Це забезпечує високу ефективність ідентифікації, яка відповідає вимогам експертизи. Високу ефективність досягнуто за рахунок великого обсягу апріорної інформації, отриманої під час навчання нейронної мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Реєстр методик проведення судових експертиз Міністерства юстиції України. URL: <http://rmpse.minjust.gov.ua/44> (дата звернення: 03.02.2022).
2. Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V., Semenova N.V. Analyzing the models of speech recognition on the basis of neural networks of deep learning for examination of digital phonograms. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, N 1. P. 133–138. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00336-y>.
3. Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V. Method of exposure of signs of the digital editing in phonograms with the use of neuron networks of the deep learning. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, Iss. 1. P. 22–28. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i1.30/>
4. Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V. Substantiating the fundamental fitness of deep learning neural networks for construction of a phonogram digital processing detection system. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 2. P. 326–330. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00249-2>.
5. Рыбальский О.В., Соловьев В.И., Журавель В.В., Шабля А.Н., Тимко Е.В. Экспертный инструментальный выявления следов обработки в цифровых фонограммах на основе нейронных сетей глубокого обучения. *Сучасна спеціальна техніка*. 2021. № 1. С. 101–111. [https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.1\(64\)](https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.1(64)).

6. Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V., Shablya A.N., Tymko E.V. Information redundancy in constructing systems for audio signal examination on deep learning neural networks. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 1. P. 8–15. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00429-2>.
7. Solovyov V., Rybalskiy O., Zhuravel V., Shablya A., Tymko Ye. Building of a speaker's identification system based on deep learning neural networks. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні системи та інформаційні технології»* (13–19 вересня 2021, Одеса, Україна). Одеса, 2021. P. 107–115.
8. Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis. *Transport and Telecommunication*. 2016. Vol. 17, N 2. P. 128–137. URL: <http://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-338-2018>.
9. Рыбальский О.В., Соловьев В.А. Модель проявления и выявления влияния немонотонности статической характеристики квантователя уровня в выходном сигнале системы аналого-цифро-аналогового преобразования. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2014. Т. 4, № 4. С. 337–341.
10. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press, 1999. 670 p.

V.I. Solovyov, O.V. Rybalskiy, V.V. Zhuravel, O.M. Shablya, Ye.V. Tymko
METHOD FOR IDENTIFICATION OF DIGITAL VIDEO RECORDING EQUIPMENT
AND DIGITAL CAMERAS

Abstract. A method for constructing expert tools for forensic identification of digital video recording equipment and digital cameras is considered. The necessity of creating such tools is substantiated. It is proposed to carry out the identification of this equipment by the statistical characteristics of its own noise, extracted from digital images recorded by such equipment. The features and main sources of such noise in digital images are shown. For its selection and processing, wavelet analysis based on the Haar wavelet is used. The final result of the examination is obtained by applying deep learning neural networks. The obtained results of the created identification system for such equipment showed its high efficiency.

Keywords: digital video recording equipment, digital photography equipment, wavelet analysis, Haar wavelet, forensic identification, deep learning neural networks, intrinsic noise, digital images, forensics.

Надійшла до редакції 07.02.2022