

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

**ВАРЕР БОРИС ЮХИМОВИЧ**



Допускається до захисту:

в. о. завідувача кафедри

Прикладної математики,

\_\_\_\_\_ Трофименко О. Д.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ ЗА АКУСТИЧНИМИ  
СИГНАЛАМИ ЇЇ МЕХАНІЗМІВ**

Спеціальність 113 Прикладна математика

**Кваліфікаційна (бакалаврська) робота**

Керівник:

Ветров О. С., старший викладач

кафедри Прикладної математики

Оцінка: \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

(бали за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: \_\_\_\_\_

(підпис)

Вінниця - 2021

## АНОТАЦІЯ

**Варер Б. Ю. Ідентифікація вогнепальної зброї за акустичними сигналами її механізмів.** Спеціальність 113 “Прикладна математика”. Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2021.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджено задачу ідентифікації вогнепальної зброї за звуками роботи її механізмів. Показано, що таку задачу можна досить ефективно вирішити за допомогою машинного навчання. Встановлено ефективний метод ідентифікації типу операції, що здійснюється зі зброєю.

Ключові слова: вогнепальна зброя, ідентифікація, класифікація, звук, акустика, машинне навчання

37 с., 4 табл., 13 рис., 1 дод., 21 джерело

## ABSTRACT

**Varer B. Firearms identification by the acoustic signals of their mechanisms.** Specialty 113 “Applied mathematics”.

Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2021.

The bachelor work researches the problem of firearm identification based on the sound of their mechanisms. It proves the possibility to use the acoustic signals of firearms in forensic identification. The effective method of such identification is developed.

Keywords: firearms, identification, classification, sound, acoustic, machine learning

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП . . . . .  | 3  |
| РОЗДІЛ 1. ОБРОБКА АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ . . . . .                                | 5  |
| 1.1 Звук як природне явище . . . . .   | 5  |
| 1.2 Обробка сигналів . . . . .   | 8  |
| 1.3 Спектр сигналу . . . . .   | 16 |
| 1.4 Перетворення Фур'є . . . . .   | 19 |
| 1.5 Віконне перетворення Фур'є . . . . .                                       | 21 |
| 1.6 Дискретне перетворення Фур'є . . . . .                                     | 23 |
| 1.7 Швидке перетворення Фур'є . . . . .  | 23 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ . . . . .                                       | 26 |
| 2.1 Методи ідентифікації зброї за акустичними сигналами .                      | 26 |
| 2.2 Машинне навчання . . . . .   | 32 |
| РОЗДІЛ 3. ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВО-<br>ГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ . . . . . | 35 |
| 3.1 Метод . . . . .  | 35 |
| 3.2 Оцінка точності отриманої моделі . . . . .                                 | 38 |
| ВИСНОВКИ . . . . .   | 41 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ . . . . .  | 43 |
| ДОДАТКИ . . . . .  | 46 |

## ВСТУП

Технологічні розробки останнього десятиліття представили безліч різних пристроїв запису, серед яких є камери відеоспостереження. Ці камери з часом подешевшали і стали забезпечувати якісну картинку. Крім того, багато людей використовують мобільні пристрої, які мають високоякісні камери та мікрофони. Збільшення кількості різних записуючих пристроїв призвело до зростання кількості відео- та аудіозаписів у роботі поліції.

Мета криміналістичного розслідування — визначити, чи є об'єкт, що фіксується, вогнепальною зброєю, визначити її модель, калібр тощо. Аналіз відео- та зображувальних доказів добре вивчений та корисний у випадках ідентифікації людей або транспортних засобів. Однак у випадках ідентифікації вогнепальної зброї результати можуть бути менш ефективними через малі розміри об'єкта та розташування камер. Напроти, положення мікрофона мало впливає на якість запису звуків, що видаються зброєю під час її роботи. Акустичні докази у поєднанні із зовнішніми балістичними розрахунками також можуть допомогти визначити відстань стрільця та його положення. [15]

Окрім звуку розрядження або удару кулі, вогнепальна зброя виробляє кілька різних акустичних сигналів. Судові експерти з балістичної лабораторії німецького ВКА проаналізували записи акустичних сигналів операцій зі зброєю з місця замаху на вбивство [6]. Результати порівняння звукових спектрів записів використовувались при розслідуванні справи та у судовому процесі.



Незважаючи на те, що звукові записи використовуються для судових розслідувань, науковий метод застосування аналізу акустичних сигналів вогнепальної зброї розроблений недостатньо. [7]

**Метою** даного дослідження є розробка методу ідентифікації вогнепальної зброї за акустичними сигналами роботи її механізмів, який буде досить точним для практичного використання у криміналістичних розслідуваннях.

**Об'єктом дослідження** є ідентифікація вогнепальної зброї.

**Предметом дослідження** є ідентифікація вогнепальної зброї за акустичними сигналами її механізмів.

**Завдання дослідження:**

- Дослідити відомі методи аналізу та обробки сигналів, зокрема звукових
- Розробити метод ідентифікації вогнепальної зброї за акустичними сигналами роботи її механізмів
- Реалізувати метод у вигляді програми

Результати дослідження були опубліковані у статті "*Firearms identification by the acoustic signals of their mechanisms*" журналу *Forensic Science International*, Volume 306, 110099 (<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110099>)

## РОЗДІЛ 1. ОБРОБКА АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

### 1.1. Звук як природне явище

Фізично, звук — це коливання, тобто періодичне механічне обурення в пружних середовищах — газоподібних, рідких і твердих. Область фізики, яка розглядає питання виникнення, поширення прийому і обробки звукових хвиль, називається *акустикою*.

Обурення, що представляє собою деяку фізичну зміну в середовищі (наприклад, зміна щільності чи тиску, зміщення частинок), поширюється в ній у вигляді *хвилі*.

*Звукові хвилі* — це хвилі, в яких розповсюджуються ділянки згущення і розрідження повітря, тобто, змінюється (коливається) густина повітря. Тіло, що коливається, відхиляючись в один бік, утворює біля себе з цього боку згущення, а з протилежного — розрідження повітря. Далі молекули середовища, стикаючись між собою, сприяють розповсюдженню цього згущення по простору, а далі слідує наступне згущення і т.д. [8]

Звукові хвилі являють собою приклад *повздовжньої хвилі*, тобто хвилі, в якій частинки коливаються в напрямку її поширення (на відміну від поперечних хвиль, в яких частинки коливаються в напрямку, перпендикулярному до напрямку розповсюдження хвилі). Приклад звукової хвилі зображений на рис. 1.1

Звукові хвилі, що складаються лише з чистого тону (тобто такі, графіком яких є синусоїда), характеризуються:

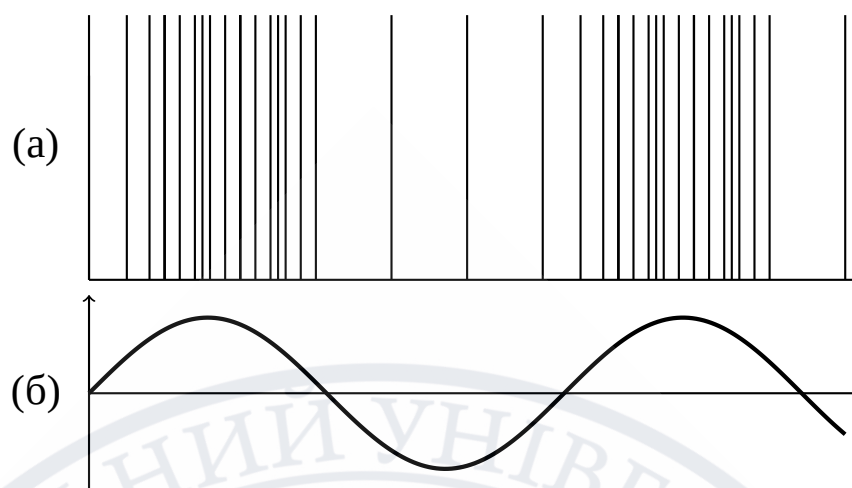


Рисунок 1.1 – Можливі представлення звукової хвилі.

(а) — стиснення та розрідження, викликані в повітрі звуковою хвилею;

(б) — графічне зображення змін тиску вище і нижче атмосферного.

- амплітудою змін тиску
- фазою, яка є кількісною характеристикою коливання, що визначає відмінність між двома подібними коливаннями, які починаються в різні моменти часу.
- довжиною хвилі, яка є найменшою відстанню між точками простору, в яких хвиля має однакову фазу;
- частотою, яка є кількістю циклів зміни тиску в середовищі за одиницю часу і виражається в герцах (Гц).

Швидкість поширення звукових хвиль пов'язана з характеристиками звуку наступним співвідношенням:

$$c = f\lambda \quad (1.1)$$



де  $c$  – швидкість поширення звуку

$f$  – частота

$\lambda$  – довжина хвилі

швидкість поширення звуку в повітрі становить 343 м/с, при 20°. Для інших температур та газів справедлива формула 1.2: [8]

$$c = \sqrt{\frac{8.314\gamma T_k}{M}} \quad (1.2)$$

де  $\gamma$  – показник адіабати

$T_k$  – температура в °K

$M$  – молярна маса

Сприйняття звуків людиною не є процесом чисто механічної реєстрації подразнень слухової системи. Значну роль у сприйнятті звуків, відіграє центральна нервова система. Дві подібні з фізичної точки зору послідовності звуків з різними частотними складовими сприймаються людиною по різному. [8]

У процесі сприйняття звуку людиною, можна виділити три етапи. Перш за все, енергія звукового сигналу, що досягає голови, має бути трансформована в енергію механічних коливань елементів вуха. Потім, механічні коливання мають бути перетворені у нервові імпульси, які вже може бути передано у мозок. І нарешті, переданий у мозок сигнал, аналізується центральною нервовою системою для оцінки одержаної інформації. Процеси, що відбуваються на перших двох етапах, визначаються фізіологічними (анатомічними) особливостями слухової системи людини і вивчаються у рамках фізіологічної акустики. Особливості сприйняття і аналізу нервових імпульсів мозку, є предметом досліджень у рамках психологічної акустики, або психоакустики.



Звук може бути нечутним для людини, якщо його частота лежить за межами чутливості людського вуха (в середньому, 16Гц–20 000Гц), або він поширюється в такому середовищі, як тверде тіло, яке не може мати прямого контакту з вухом, або ж його енергія швидко розсіюється в середовищі.

## 1.2. Обробка сигналів

*Обробка сигналів* — галузь прикладної математики, яка досліджує теорію перетворення сигналів. Це можуть бути такі сигнали як звук, електромагнітне випромінювання, зображення, покази датчиків, наприклад, в біологічних дослідженнях це електрокардіограма, сигнали систем управління, телекомунікаційні сигнали тощо. Під обробкою сигналів розуміють математичні, статистичні, обчислювальні і евристичні аспекти, формалізації і методи для представлення, моделювання, аналізу, синтезу, вияву, відновлення або судово-медичної експертизи.

*Сигнал* — в загальному сенсі, функція, що містить інформацію про стан або поведінку фізичної системи в залежності від іншої фізичної величини (наприклад, часу).

Залежно від кардиналу областей визначення та значень функції, що описує параметри сигналу, виділяють аналогові, дискретні, квантовані та цифрові сигнали. [1]

*Аналоговий (неперервний) сигнал* — сигнал, що може бути представлений функцією  $s(t)$ ,  $t \in (-\infty, +\infty)$ , що має неперервну області визначення та значень. Здебільшого, аналогові сигнали мають природне походження [18]. Приклад аналогового сигналу зображений на рис.

1.2.

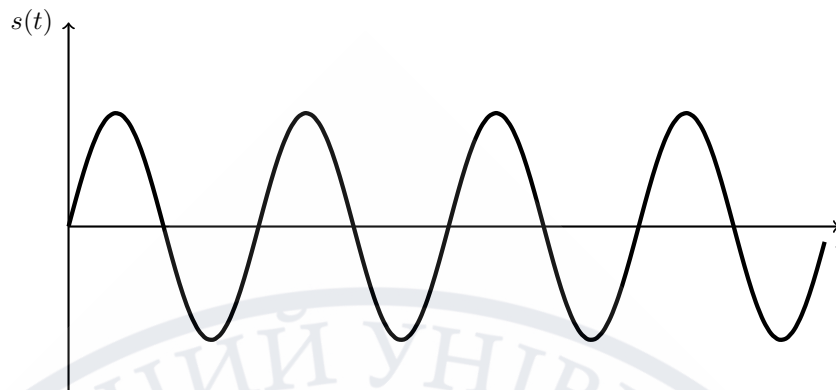


Рисунок 1.2 – Приклад неперервного сигналу, що описується функціями  $s(t) = A\sin(Bt)$

*Дискретний сигнал* — сигнал, визначений на дискретній множині аргумента, тобто такий, що його можна представити у вигляді

$$s[n] = x_n, n \in \mathbb{Z}$$

На практиці, дискретні сигнали мають скінченну область визначення (що пов'язано з обмеженістю обчислювальних ресурсів) та часто отримані з аналогових сигналів. Процес отримання дискретного сигналу з аналогового називається *дискретизацією*.

Дискретизація полягає у відборі значень сигналу у певні моменти часу [16]. Відібрані значення називаються *відліками*. Найпростішим та часто викростованим є відбір, у якому відлики беруться у рівновіддалені періоди часу. Такий період називається *інтервалом дискретизації*. Визначають також величину  $f$ , що називається частотою дискретизації. Вона пов'язана із інтервалом дискретизації наступним співвідношенням:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

Частота дискретизації вимірюється в герцах.

Загалом, дискретизація неперервного сигналу означає перетворення його на сигнал, що має дискретну область визначення та його значення відповідають значенням оригінального сигналу у моменти часу, кратні інтервалу дискретизації (відліки):

$$s_{\text{discrete}}[n] = s_{\text{analog}}(nT), n \in \mathbb{Z} \quad (1.4)$$

де  $n$  – номер відліку

$T$  – інтервал дискретизації

Із залученням деяких понять математичного аналізу, процес дискретизації можна описати наступною формулою:

$$s_{\text{discrete}}\left[\frac{t}{T}\right] = s_{\text{discrete}}(t) = s_{\text{analog}}(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \quad (1.5)$$

де  $\delta(\cdot)$  – дельта-функція

Приклад дискретизації аналогового сигналу зображений на рис. 1.3.

Окрім дискретної області визначення, сигнал може також мати дискретну область значень. Такий сигнал називається квантованим.

*Квантований сигнал* — сигнал з дискретною множиною значень. Аналогічно до дискретизованого, часто отримується з аналогового сигналу. Практична причина необхідності квантування полягає, зокрема, в обмеженості представлення чисел в пам'яті комп'ютера: значення вихідного сигналу часто представляється у вигляді 8-, 16- або 24-бітного числа [1]. Приклад квантованого сигналу зображений на рис. 1.4

*Цифровий сигнал* — дискретний квантований сигнал. Представле-

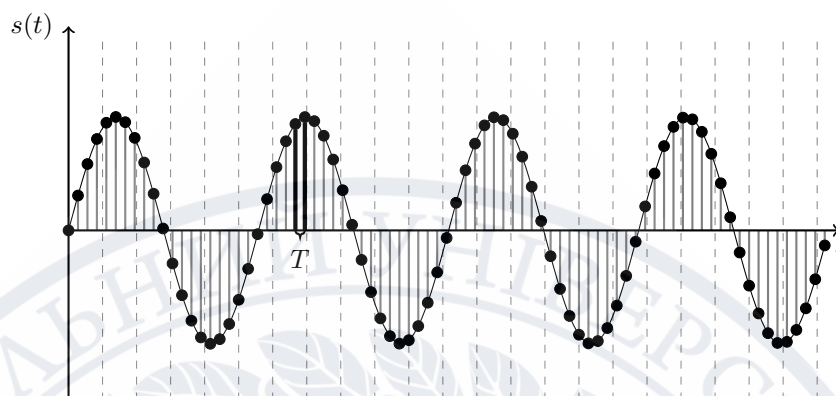


Рисунок 1.3 – Приклад результату дискретизації сигналу, зображеного на рис. 1.2, з інтервалом дискретизації  $T$ . Чорні точки відповідають окремим відлікам

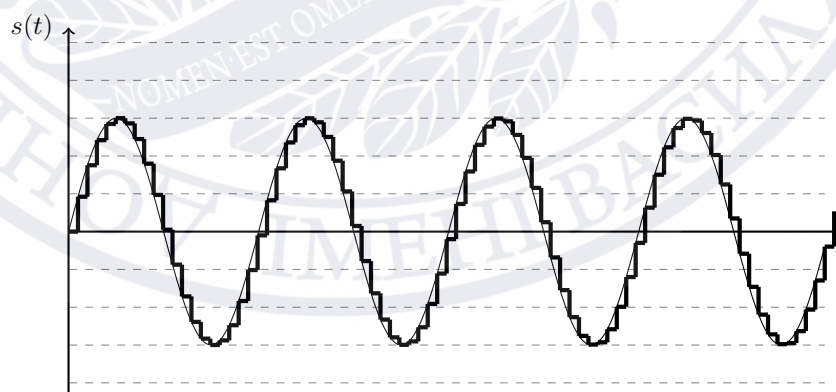


Рисунок 1.4 – Приклад результату квантування сигналу з рис. 1.2



ний таким чином, що на кожному заданому часовому проміжку відоме приблизне (квантоване) значення сигналу можна записати цілим числом. Якщо записати ці цілі числа у двійковій системі, отримається послідовність нулів і одиниць, яка також називається цифровим сигналом. Саме цифрові сигнали оброблюються сучасними цифровими пристроями (такими як, наприклад, комп'ютери, смартфони, мікроконтролери тощо). Приклад цифрового сигналу зображений на рис. 1.5

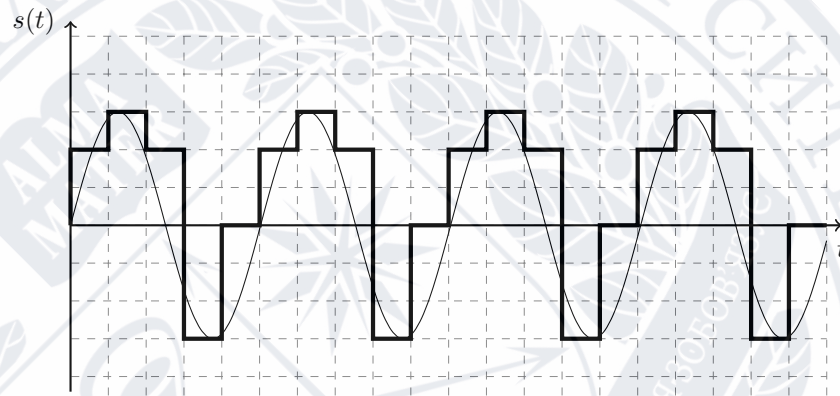


Рисунок 1.5 – Приклад цифрового сигналу

Під час дискретизації сигналу важливим є зберігання всієї інформації, що містить оригінальний аналоговий сигнал. Наприклад, “неправильний”, замалий вибір частоти дискретизації може призвести до “втрати” в сигналі високих частот – явище, відоме як *накладання спектру* або *аліасінг* (від англ. aliasing). Якщо ж частота дискретизації, навпаки, буде зовеликою, то це призведе до не ефективного використання обчислювальних ресурсів, бо буде зберігатись більше значень відліків, ніж потрібно. Ефект аліасінгу зображений на рис. 1.6.

У виборі такої частоти дискретизації, яка буде оптимальною з точки зору затрачених ресурсів та не призведе до втрати корисної інформації сигналу допоможе так звана *теорема відліків*.

**Теорема відліків** (також відома як *теорема Віттакера-Найквіста-Котельнікова-Шеннона*) стверджує, що аналоговий періодичний сигнал, який має кінцевий (обмежений по ширині) спектр, може бути однозначно відновлений без викривлення і втрат за своїми відліками, узятими з частотою, більшою або рівною подвоєній верхній частоті спектра, тобто:

$$f \geq 2F_{\max} \quad (1.6)$$

де  $F_{\max}$  – найвища частота спектру оригінального сигналу. При цьому подвійна верхня частота спектру  $F_{\max}$  називається частотою Найквіста.

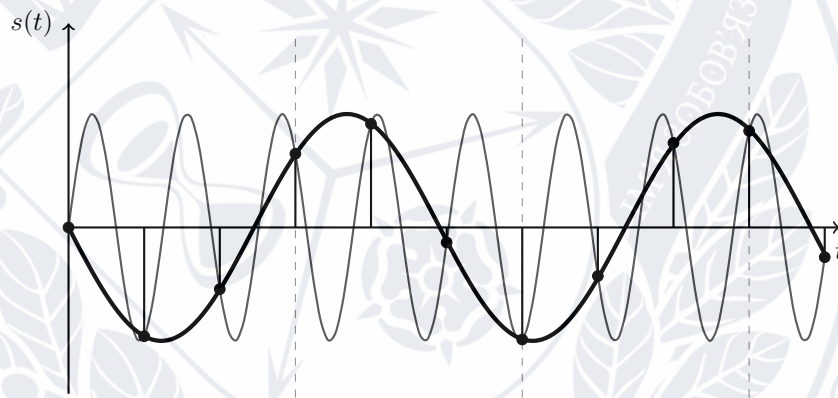


Рисунок 1.6 – Аліасінг. Початковий сигнал зображений сірим кольором на фоні, чорні точки відповідають відлікам, взятим із замалою частотою дискретизації. При спробі відтворити оригінальний сигнал, отримаємо синусоїду, зображену чорним. Вона має меншу частоту, ніж початкова

Сигнали також поділяють за природою фізичного явища, що їх породило. Наприклад:

- акустичні — утворені в результаті звукових коливань;
- електричні — пов'язані з електричними величинами;
- оптичні — утворені в результаті коливань електромагнітних хвиль, які можуть бачити люди
- тощо

*Акустичний сигнал* — сигнал, дієвою величиною якого є звуковий тиск в деякому середовищі. Збурювання пружного середовища проявляються у виникненні акустичних коливань різної форми і тривалості. Акустичними називаються механічні коливання часток пружного середовища, що поширюються від джерела коливань у навколишній простір у вигляді хвиль різної довжини.

Залежно від форми акустичних коливань розрізняють прості (тональні) і складні сигнали. Тональний — це сигнал, викликуваний коливанням, що відбувається за синусоїдальним законом. Складний сигнал включає цілий *спектр* гармонійних складових.

Означення сигналу включає в себе поняття інформації. Проте на практиці сигнали часто окрім корисної інформації містять шуми різноманітної природи.

*Шум* — це загальний термін для небажаних (і, загалом, невідомих) модифікацій, якими сигнал може постраждати під час захоплення, зберігання, передачі, обробки або перетворення. Поняття шуму залежно від задачі, що розглядається: те, що в одному випадку буде шумом, в іншому може слугувати корисною інформацією, і навпаки.

Існують різні способи класифікувати шуми, зокрема:



- За способом модифікації сигналу:
  - Адитивний — шум, що додається до основного сигналу
  - Мультиплікативний — шум, що перемножується з корисним сигналом
- За природою:
  - Шум квантування — шум, утворений в результаті похибок квантування.
  - Перехідний шум — складаються з відносно короткого імпульсу з подальшим зменшенням коливань низької частоти. Початковий пік часто обумовлений імпульсними перешкодами, а наступні коливання зумовлені резонансом на каналі, який прийняв початковий імпульс. Джерелом цих шумових імпульсів часто є завади каналів.
- За властивостями його спектру:
  - Білий шум — шум, спектральні складові якого рівномірно розподілені по всьому діапазону частот
  - Рожевий шум — шум, спектральна густина якого змінюється з частотою  $f$  за законом  $\frac{1}{f}$ . Іноді рожевим шумом називають будь-який шум, спектральна густина якого зменшується зі зменшенням частоти.
  - Синій шум — шум, спектральна густина якого збільшується на 3 дБ на октаву. Тобто його спектральна щільність збільшується зі зростанням частоти, і, аналогічно білому шуму, на практиці він повинен бути обмежений за частотою



- Сірий шум — шум, який має однакову суб’єктивну гучність для людського слуху на всьому діапазоні сприйманих частот.
- Броуновський (червоний) шум — шум, спектральна густина якого пропорційна  $\frac{1}{f^2}$ .

Мірою, що застосовується для визначення наскільки сильно сигнал спотворений шумом, є відношення сигнал-шум. Воно визначається як відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму та позначається SNR (англ. **S**ound-to-**N**oise **R**atio):

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (1.7)$$

Співвідношення понад 1:1 вказує, що сигнал більший за шум.

### 1.3. Спектр сигналу

Нехай маємо періодичний сигнал, що є зваженою сумою синусоїд, як показано у рівнянні 1.8:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1.8)$$

де  $A_n$  – амплітуда  $n$ -ї частоти

$\omega_n$  –  $n$ -та частота

$\phi_n$  – початкова фаза  $n$ -ї частоти

Такий сигнал можна повністю описати відповідністю частоти парі амплітуди та фази:

$$S(\omega_k) = \langle A_k, \phi_k \rangle$$

Ця функція  $S$  називається спектром сигналу  $s$ . Окремі компоненти  $S_A(\omega_k) = A_k$  та  $S_\phi(\omega_k) = \phi_k$  називаються відповідно амплітудним та фазовим спектрами сигналу  $s$  (рис. 1.7).

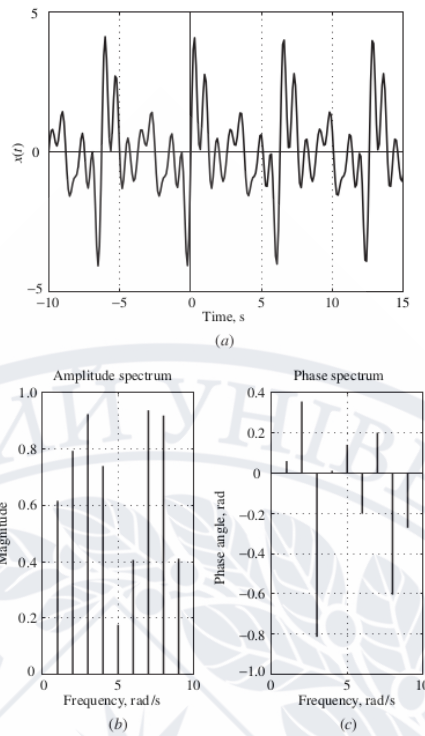


Рисунок 1.7 – Порівняння часового та спектрального представлень періодичного сигналу [1]

Спектр сигналу існує, якщо сигнал  $s(t)$  можна представити у вигляді суми гармонічних коливань. Таке представлення називають спектральним розкладом Фур'є. Гармонічні коливання різної частоти утворюють ортогональний базис – це є умовою єдиності розкладу [17]. Існують й інші ортогональні базиси, відмінні від гармонічного. Наприклад, базиси, утворені функціями Уолша, Котельнікова и т.д. [20]

Спектральний підхід лежить в основі цілих напрямків науки і техніки. Досить зазначити, що він широко використовується в техніці електро- та радіозв'язку, де поділ частот модульованих сигналів базується на відмінності їх спектрів. Спектральний підхід також широко використовується для створення аналогових і цифрових фільтрів, для оцінювання спотворень сигналів в ході їх перетворення тощо.

Схема застосування спектрального підходу наступна: сигнал представляється сукупністю гармонійних складових — гармонік — у вигляді тригонометричного ряду Фур'є. Для точного представлення сигналу потрібно нескінченне число гармонік, але на практиці воно завжди обмежене. Таке обмеження породжує хвилеподібний характер зміни сигналу і поява викидів, що відомо під назвою ефекту Гіббса (рис. 1.8).

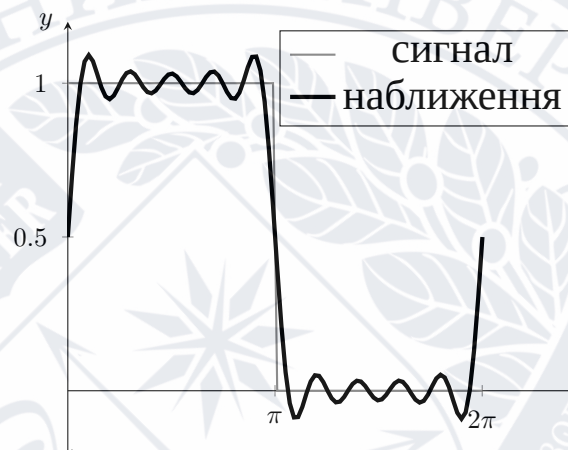


Рисунок 1.8 – Феномен Гіббса. У точках розриву функції, розкладеної в ряд Фур'є, скачки значень суми ряду Фур'є перевищують величину стрибків значень самої функції на однакові частки, рівні 17,9%. [21]

*Спектрограма* — це візуальне зображення спектру частот сигналу в часі. При застосуванні до звукового сигналу спектрограми іноді називають сонографами, голосовими відбитками або голосограмами. Коли дані представлені в тривимірному графіку, вони можуть називатися водоспадами

Найбільш поширеним представленням спектрограми є двовимірна діаграма: на горизонтальній осі представлено час, по вертикальній осі -



частота; третій вимір із зазначенням амплітуди на певній частоті в конкретний момент часу представлено кольором кожної точки зображення. (приклад на рис. 1.9)



Рисунок 1.9 – Спектрограма сигналів пістолету Jericho [7]

Дуже важливим інструментом в спектральному аналізі є перетворення Фур'є.

#### 1.4. Перетворення Фур'є

Рядом Фур'є (тригонометричним рядом) називається ряд вигляду

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \right) \quad (1.9)$$

Дослідженням того, як загальні функції можна розкласти на тригонометричні або експоненційні функції з певними частотами займається аналізом Фур'є. Однією з важливих теорем цього аналізу є теорема Діріхле, яке свідчить про те, що досить широкий клас функцій можна розкласти в ряд Фур'є. [13]

**Теорема Діріхле:** нехай функція  $f(t)$  періодична з періодом  $T = 2\pi$ , якщо:

1. Це функція на будь-якому відрізку, рівному періоду, неперервна або має кінцеве число точок розриву першого роду.



2. Ця функція на будь-якому відрізку, рівному періоду, має кінцеве число екстремумів.

Тоді ряд Фур'є, складений для цієї функції сходиться в функції  $f(t)$  у всіх точках неперервності, а в точках розриву  $t_0$  ряд Фур'є сходиться до числа [17]

$$\frac{f(t_0 - 0) + f(t_0 + 0)}{2} \quad (1.10)$$

$$\text{де } f(t_0 - 0) = \lim_{t \rightarrow t_0 - 0} f(t)$$

$$f(t_0 + 0) = \lim_{t \rightarrow t_0 + 0} f(t)$$

Коефіцієнти  $a_0, a_n, b_n$  ряду при розкладі періодичної функції  $f(x)$  знаходяться за формулами:

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx \quad (1.11)$$

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) dx \quad (1.12)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) dx \quad (1.13)$$

Із залученням апарату комплексного аналізу, ряд Фур'є можна також представити в експоненційній формі [13]:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{i2\pi nx}{L}} \quad (1.14)$$

де

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) e^{-\frac{i2\pi nx}{L}} dx \quad (1.15)$$

За теоремою, розклад у ряди Фур'є є допустимим лише для періодичних функцій. Для того щоб обійти це обмеження, розглянемо довільну функцію  $f(x)$  та вважатимемо її періодичною з періодом  $L \rightarrow \infty$ .

Маємо:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{i2\pi nx}{L}} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left( \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} f(x) e^{\frac{-2\pi nx}{L}} dx \right) e^{\frac{i2\pi nx}{L}}$$

Визначимо  $k = \frac{2\pi n}{L}$ . Тоді для послідовних значень  $n$  маємо, що  $k_{n+1} - k_n = \Delta k = \frac{2\pi}{L}$ . Тоді

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{ik_n x}{L}} \cdot 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{ik_n x}{L}} \cdot \left( \frac{L}{2\pi} \Delta k \right)$$

Враховуючи, що  $L \rightarrow \infty \Rightarrow \Delta k \rightarrow 0$ :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{\frac{ik_n x}{L}} \cdot \left( \frac{L}{2\pi} \Delta k \right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{L}{2\pi} C_n \right) e^{\frac{ik_n x}{L}} dk$$

де

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) e^{\frac{-2\pi nx}{L}} dx$$

Отже, маємо:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(k) e^{\frac{ikx}{L}} dk \quad (1.16)$$

де

$$C(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{\frac{-ikx}{L}} dx \quad (1.17)$$

Функція  $C(k)$  з формули 1.17 називається *перетворенням Фур'є* функції  $f(x)$ .

## 1.5. Віконне перетворення Фур'є

Класичне перетворення Фур'є враховує спектр сигналу, який взято у всьому діапазоні існування змінної. Найчастіше інтереси зосереджу-

ються тільки на локальному розподілі частот. У цьому випадку використовується узагальнене перетворення Фур'є, так зване *віконне перетворення Фур'є*.

*Віконне перетворення Фур'є* — це трансформація Фур'є, що застосовується для визначення синусоїдної частоти та вмісту фази локальної секції сигналу, що має властивість змінюватись в часі.

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) W(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.18)$$

де  $F(t, \omega)$  — віконне перетворення Фур'є

$W(t)$  — віконна функція

На практиці немає можливості отримати сигнал на нескінченному інтервалі, так як немає можливості дізнатися, який був сигнал до включення пристрою і який він буде в майбутньому. Обмеження інтервалу аналізу рівносильно множенню вихідного сигналу на прямокутну віконну функцію. Таким чином, результатом віконного перетворення Фур'є є не спектр вихідного сигналу, а спектр добутку сигналу і віконної функції. В результаті виникає ефект, який називається *розтіканням спектру* сигналу. небезпека полягає в тому, що бічні пелюстки сигналу більш високої амплітуди можуть маскувати присутність інших сигналів меншої амплітуди.

Для боротьби з розтіканням спектру застосовують більш гладку віконну функцію, спектр якої має більш широку головну пелюстку і низький рівень бічних пелюсток. Спектр, отриманий за допомогою віконного перетворення Фур'є, є згорткою спектра вихідного ідеального сигналу та спектру віконної функції.

При використанні віконного перетворення Фур'є неможливо одночасно забезпечити гарне розширення за часом і по частоті. Чим вуже вікно, тим вище розширення за часом і нижче розширення по частоті [9].

## 1.6. Дискретне перетворення Фур'є

Дискретне перетворення Фур'є (англ. *Discrete Fourier Transform, DFT*) — один з видів перетворення Фур'є, що широко застосовується в алгоритмах обробки цифрових сигналів, а також у інших областях, пов'язаних з аналізом частот у дискретному/цифровому сигналах.

Дискретне перетворення Фур'є отримує на вход дискретну функцію (послідовність)  $x_n$  та перетворює її у іншу дискретну функцію  $y_n$  згідно наступної формули:

$$y_n = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (1.19)$$

## 1.7. Швидке перетворення Фур'є

Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) є ефективним алгоритмом для обчислення DFT послідовності. Він був описаний в класичній роботі Дж. Кулі і Дж. Т'юкі в 1965 році [4], але насправді ідею можна простежити до неопублікованої роботи Гауса в 1805 році. Цей алгоритм відноситься до категорії алгоритмів “розділяй та володарюй” (англ. “divide and conquer”), який рекурсивно розбиває ДПФ на менші ДПФ, щоб мінімізувати обчислення. Як результат, він успішно зменшує асимптотичну



складність ДПФ від  $O(n^2)$  до  $O(n \log n)$ . Це скорочення часу обчислень є значним особливо для даних з великим  $n$ , отже, завдяки йому ШПФ широко використовується в техніці, науці та математиці і тому алгоритм ШПФ входить у 10 найкращих алгоритмів 20 століття за версією журналу *Computing in Science & Engineering* [5].

Алгоритм швидкого перетворення Фур'є має досить сильне обмеження, яке на практиці не є критичним. Аргумент прямого Фур'є-перетворення, тобто обсяг вибірки у  $(x_i)$ , повинен мати рівно  $2^n$  елементів. Відповідно, результатом роботи алгоритму швидкого перетворення Фур'є є вектор з  $1 + 2^{n-1}$  елементами. Якщо число даних не збігається зі ступенем 2, то для запуску алгоритму ШПФ досить доповнити відсутні елементи нулями.

Лістинг 1 – Реалізація алгоритму швидкого перетворення Фур'є  
мовою Python [10]

```
def fft(f):  
    exp = cmath.exp  
    pi = cmath.pi  
    def fft_dfs(f, k, w, wk):  
        N = len(f)  
        if N==1:  
            return [f[0], f[0]]  
        w2 = w**2  
        wk2 = wk**2  
        U = fft_dfs(f[0:N:2], k, w2, wk2)  
        V = fft_dfs(f[1:N:2], k, w2, wk2)  
        return [U[0] + V[0]*wk, U[0] - V[0]*wk]  
    N = len(f)  
    F = [0.0] * N  
    w = exp(-2j*pi/N)  
    for k in range(N/2):  
        F[k], F[k+N/2] = fft_dfs(f, k, w, w**k)  
    for k in range(N):  
        F[k] /= N  
    return F
```

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

### 2.1. Методи ідентифікації зброї за акустичними сигналами

На сьогоднішній день, існує декілька поширених методів аналізу звуку та ідентифікації зброї за допомогою такого аналізу:

#### **Порівняння на слух**

Перший і основний метод аналізу звуку заснований на відчутті сприйняття звуку. При цьому методі експерти слухають звук, що аналізується і порівнюють його з еталонним. Цей метод є методом експертної думки, а тому він є дуже суб'єктивним. Також він вимагає значної підготовки спеціалістів, які можуть почути, проаналізувати та запам'ятати сотні відомих акустичних сигнатур. Крім того, представлення результатів, отриманих цим методом, у судових показаннях може бути дуже проблематичним.

#### **Візуальне порівняння спектра**

Кожен звук може бути представлений графіком сигналу, який показує форму сигналу (у часовому домені). Графік спектрограми, який показує спектр різних частот в акустичному сигналі, може бути більш корисним для порівняння.

У методі порівняння спектру графічне представлення спектру тестового звуку порівнюється із спектром еталонних звуків. У процесі порівняння експерт намагається ідентифікувати елементи спектра, які повторюються для кожного сигналу одного і того ж типу тієї самої зброї.

Крім того, важливо визначити, які характеристики спектра відрізняються від інших сигналів чи зброї. Окрім джерела порівняних знаків, сам процес є дуже схожим на порівняння смугових знаків, що спостерігаються на кулях. Графік на рис. 2.1 ілюструє подібність та відмінності між різною зброєю та різними сигналами. На цьому графіку зелені квадрати позначають схожі ділянки спектра для однакових типів сигналів, що виробляються однією і тією ж зброєю. На графіку представлені три пари різних сигналів. Ліва пара показує звуки, що видаються спусковим гачком пістолета FN, що викликає повторне підключення курок-молот. Центральна пара показує звуки натискання спускового гачка пістолета FN, відпускання молотка та удару ударного штифта. Права пара - це також звук спуску спускового гачка, але він виробляється пістолетом Glock. На графіку чітко видно різницю між двома групами сигналів одного і того ж FN. У однотипних сигналах, поданих різною зброєю, можна знайти багато відмінностей. Однак також може спостерігатися деяка подібність. Одна з областей подібності позначена помаранчевим квадратом. Теоретично візуальне порівняння спектра може бути використано для ідентифікації типу сигналу та визначення конструкції зброї. Однак на практиці багато відмінностей між записами одного і того ж сигналу ускладнюють використання цього методу. Експерт повинен порівняти великі групи посилань для кожного типу порівнюваних сигналів, щоб знайти повторювані характеристики. Непросто вирішити, чи лінія на графіку спектра є унікальною для цього сигналу або типу зброї. Будь-який рядок на цьому графіку може представляти випадковий удар елемента зброї або навіть фоновий шум.



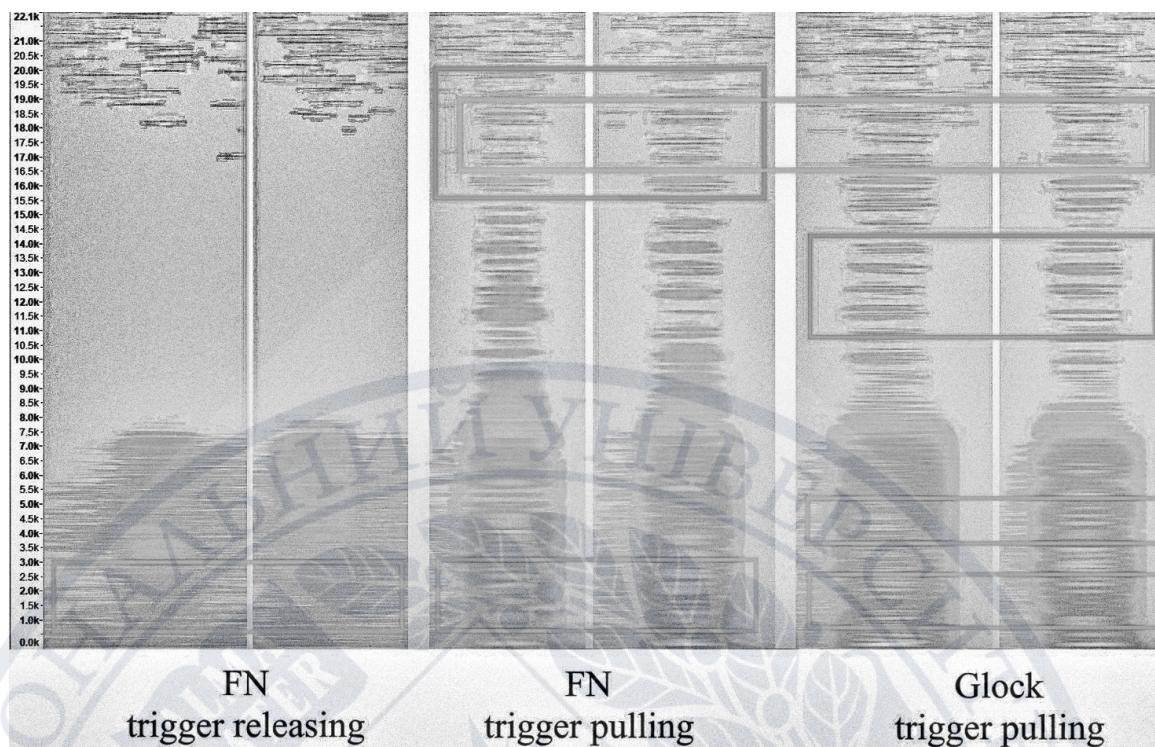


Рисунок 2.1 – Порівняння сигналів різних операцій та зброї [7]

### Частотний аналіз

Окрім візуального аналізу спектра, на практиці також використовуються частотний аналіз. Таким чином можна отримати та порівняти масив частот та значень сигналів для кожної частоти. Аналіз можна здійснити, використовуючи різні алгоритми та функції. Як правило, порівняння числових значень простіше і менш суб'єктивне, ніж порівняння кольорів на зображенні спектра. Більше того, використовуючи нормалізовані дані, отримані з кількох записів, можна розрахувати середнє значення для кожної частоти. Ці середні дані представлятимуть усі сигнали однієї групи. Для цього аналізу також можуть бути використані інші статистичні методи представлення наборів даних. Діаграми, показані на рисунках 2.2 і 2.3, показують порівняння середніх значень стандартної та вдосконаленої автокореляцій спектрів між трьома різними звуковими сигналами: активації ударно-спускового механізму пістолет-

тів FN та Glock та відновлення кінетичного зв'язку між спусковою деталлю та шептала, яка була розірвана роз'єднувачем після пострілу, пістолета FN. На графіках можна помітити деякі відмінності між двома різними сигналами. З іншого боку, аналіз спектра звукових сигналів, що виробляються під час спуску спускового механізму різної зброї (FN та Glock), виглядає схожим.

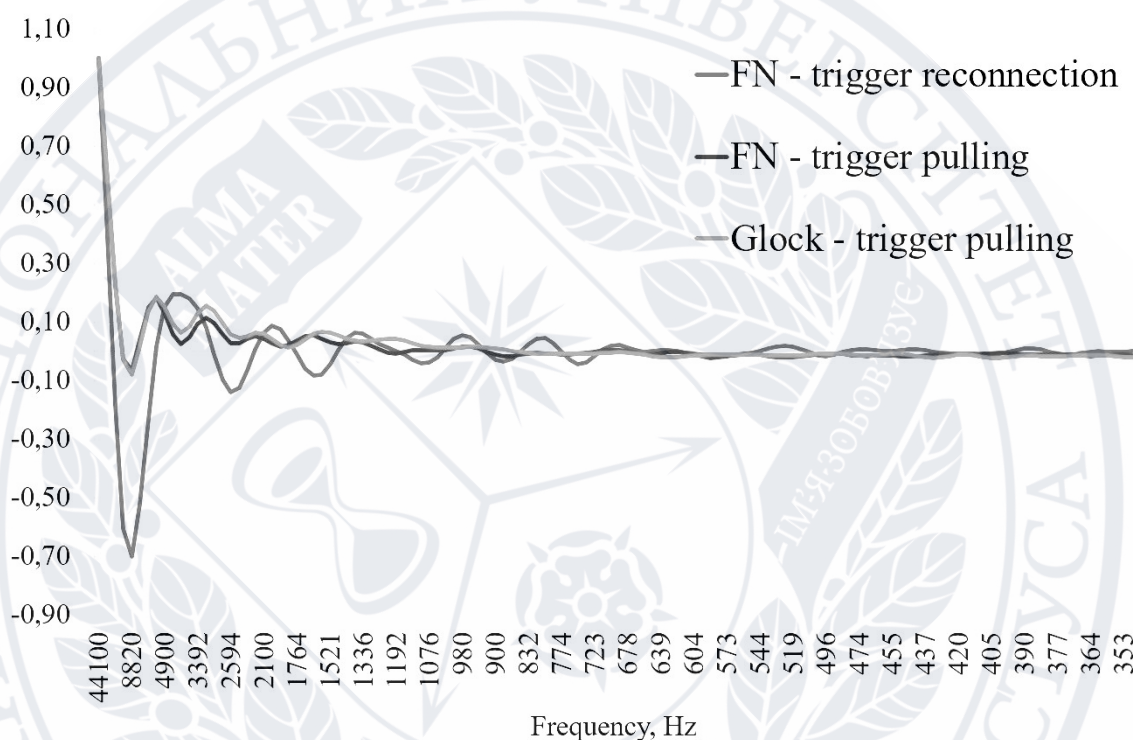


Рисунок 2.2 – Порівняння середніх значень стандартної автокореляцій спектрів [7]

Очевидно, не кожне середнє значення частоти представляє якусь індивідуальну особливість сигналу, тому можливо розрахувати такі параметри, як стандартне відхилення, дисперсія і т. д. Ці параметри покажуть рівень представлення даних за розрахунковими середніми значеннями і дозволять уникнути частот з великим розкидом значень. Незважаючи на всі переваги цього методу порівняння перед розглянутими раніше, його використання пов'язане з низкою проблем. Порівня-



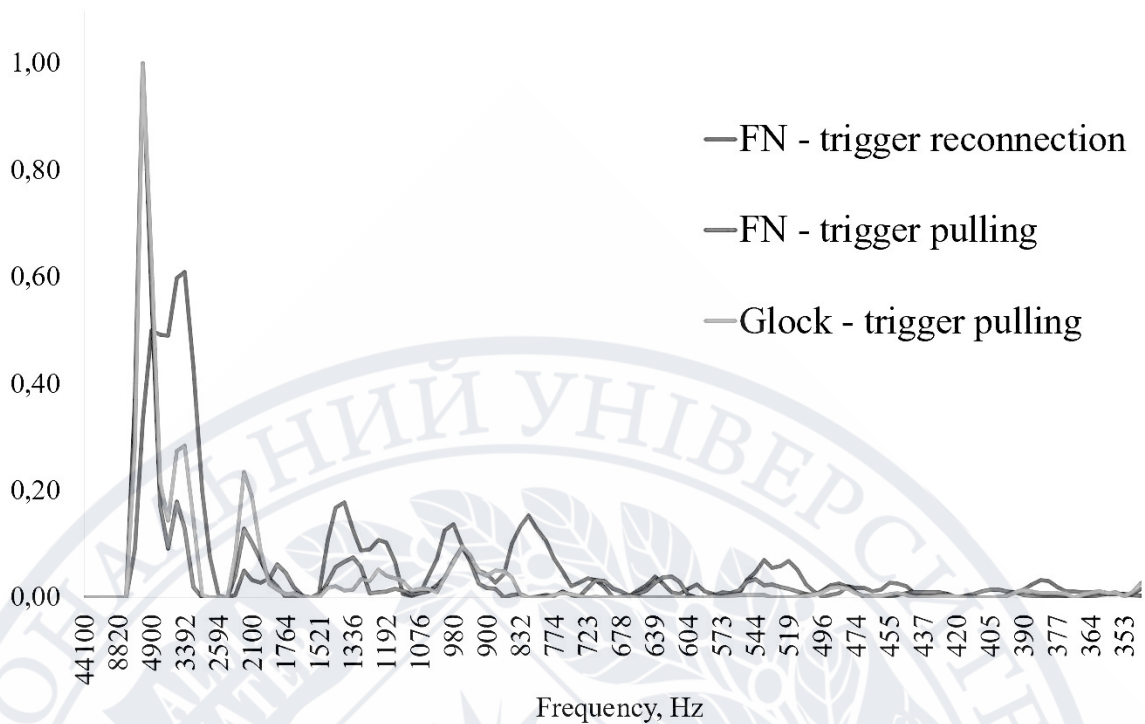


Рисунок 2.3 – Порівняння середніх значень вдосконаленої автокореляцій спектрів [7]

ння все ще є суб'єктивним, хоча порівнюються значення, а не кольори зображення. Статистична ймовірність результату та коефіцієнт помилок ще не вивчені. Більше того, у цьому методі взаємозалежності частот в сигналах та їх вплив один на одного не досліджувались і не входять в модель, оскільки їх аналітична формалізація ускладнена.

## Машинне навчання

Одним з найкращих наукових підходів до аналізу великих масивів даних, коли зв'язки між параметрами незрозумілі або невідомі, є машинне навчання. Це група математичних алгоритмів, методів та статистичних моделей, які зокрема можуть бути використані для вирішення задач класифікації. Для цього алгоритм навчання з вчителем будує ма-

тематичну модель на основі наборів «тренувальних даних» — даних, що представляють деякі категорії відомих процесів, об'єктів тощо. За допомогою цієї моделі невідомий набір даних можна віднести до однієї з груп, представлених «тренувальними даних». Чим більше тренувальних даних для кожної категорії, тим більш репрезентативною та наближеною до реальності буде модель. Результат застосування моделі, побудованої за допомогою машинного навчання, дасть «прогноз» належності до категорії та обчислену статистичну ймовірність цього прогнозу. Крім того, буде розрахована ймовірність належності і для інших категорій. Ще однією перевагою машинного навчання перед розглянутими раніше методами є його об'єктивність — кожний запуск одного алгоритму для одних і тих самих даних дасть однакові результати, вільні від суб'єктивної думки експерта.

Алгоритм класифікації може використовуватися кількома способами. Перший - це навчання алгоритму з усіма категоріями (багатокласний, багатозначний), у цьому випадку результат буде отриманий після одного запуску. Інший спосіб - використання бінарної ("одна проти решти") класифікації, де при кожному запуску алгоритму невідомі дані визначаються або як ті, що належать до однієї вибраної категорії, або до будь-якої з інших категорій разом. Для цього алгоритм буде навчений для кожної категорії окремо. Для кожної з них використовуються лише два набори тренувальних даних: перший – це дані, що відносяться до обраної категорії, а другий – усі інші дані. Алгоритм класифікації повинен виконуватися стільки разів, скільки є категорій. Після завершення всіх прогонів прогноз із найбільшою ймовірністю буде прийнятий як



кінцевий результат.

У випадку, що розглядається, тренувальні дані — це набори записаних акустичних сигналів, поданих відомою зброєю під час відомих механічних операцій. В якості даних ”перевірки” або ”тесту” записуються інші відомі звуки, які використовуються для вивчення алгоритму класифікації. У цьому дослідженні категоріями є конструкції зброї та тип сигналів (дія механізму, який подавав звуковий сигнал). Категорії можна вибрати різними способами, наприклад:

1. окрема категорія для кожного типу сигналу для кожної конструкції зброї;
2. тип сигналу (без поділу на скорочення зброї);
3. конструкція зброї (без поділу на тип сигналу);
4. група сигналів, які мають деяку схожість, навіть якщо вони подаються різними конструкціями зброї або різними діями.

## **2.2. Машинне навчання**

*Машинне навчання* — це підрозділ інформатики, який розвинувся в результаті дослідження розпізнавання образів та обчислювальної теорії навчання в галузі штучного інтелекту. Машинне навчання досліджує побудову та вивчення алгоритмів, які можуть вчитися та робити прогнози. Такі алгоритми працюють шляхом побудови моделі на прикладах вхідних даних для того, щоб робити прогнози чи рішення на основі них, а не слідувати строго статичним програмним інструкціям.

Одне з поширених визначень терміну «навчання» в контексті машинного навчання дав видатний дослідник Т. М. Мітчелл: "кажуть, що комп'ютерна програма навчається на основі досвіду  $E$  по відношенню до деякого класу задач  $T$  і міри якості  $P$ , якщо якість вирішення задач з  $T$ , виміряний на основі  $P$ , поліпшується з набуттям досвіду  $E$ ." [12]

Алгоритми машинного навчання зазвичай поділяються на два основних типи. [14]

- навчання із вчителем (англ. *supervised learning*), мета алгоритмів якого полягає в тому, щоб навчитися відображенню від входів  $x$  (що називаються "ознаки англ. *features*) до виходів  $y$  (що називаються "мітки англ. *labels*), отриманих на вхід алгоритма як набір пар вводу-виводу:

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$$

де  $D$  називається навчальним (тренувальним) набором;

$N$  - кількість навчальних прикладів.

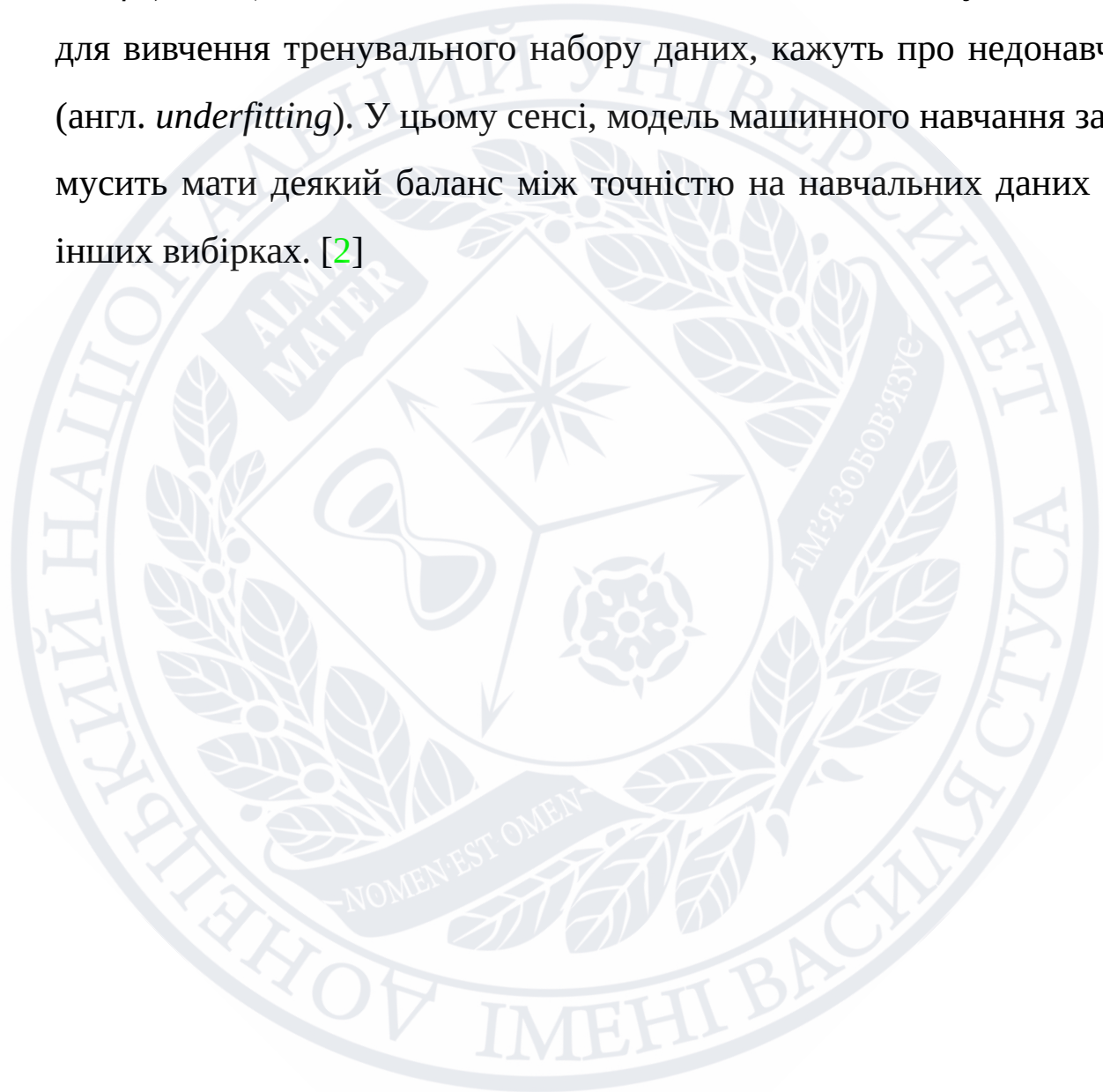
- навчання без вчителя (англ. *unsupervised learning*) — на відміну від навчання із вчителем, алгоритм навчання отримує лише дані без міток

$$D = \{x_i\}_{i=1}^N$$

Метою навчання без вчителя є знайти "щось цікаве" у даних (структурні закономірності, кореляції, подібність між елементами тощо)

Однією з важливих вимог до моделі машинного навчання є *узагальненість*, тобто можливість застосування даної моделі до інших даних

(які не входили в навчальний набір, але статистично належать до того ж самого розподілу) та отримання адекватних результатів. Про модель, яка недостатньо загальна та показує кращі результати на навчальних даних, ніж на інших наборах, кажуть, що вона *перенавчилася* (англ. *overfit*). Якщо ж модель навпаки не містить достатньо ступнів свободи для вивчення тренувального набору даних, кажуть про недонавчання (англ. *underfitting*). У цьому сенсі, модель машинного навчання завжди мусить мати деякий баланс між точністю на навчальних даних та на інших вибірках. [2]



## РОЗДІЛ 3. ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

### 3.1. Метод

У роботі був підготовлений та використаний набір даних, що складається з 540 записів зброї. Було використано по чотири екземпляра самозарядних пістолетів чотирьох різних конструкцій – *Glock 17/19*, *FN HP-35*, *Jericho 941 F* та *Beretta 951* (зображено на рис. 3.1) По три екземпляра були використані для створення набору навчальних даних (всього 60% від загальної кількості записів було використано для навчального набору) та один – для тестового набору.

Для кожної конструкції були проаналізовані наступні типи операцій:

1. удар затворної рами об корпус зброї при відтягуванні її в крайнє заднє положення
2. удар затворної рами об казенний зріз ствола чи деталі корпусу при поверненні в крайнє переднє положення
3. натискання спускового гачка і активація ударно-спускового механізму
4. відновлення кінетичного зв'язку між спусковою деталлю і шепталом, яка була розірвана роз'єднувачем після пострілу

Звукові сигнали для навчального та тестового набору даних були записані в звичайній робочій кімнаті (не в акустично ізольованій) за допомогою мікрофона ноутбука ASUS ZenBook. Кожен файл із записаними звуками було проаналізовано за допомогою спеціально підготовленої





Рисунок 3.1 – Екземпляри зброї, використані в дослідженні [7] програми з метою виділення ознак (feature extraction) для машинного навчання.

### **Процедура feature extraction:**

1. Програма шукала пік звуку для виділення фрагменту із операцією зі зброєю.
2. Коли пік був знайдений, брався деякий діапазон сигналу навколо нього (розмір та положення цього діапазону були обрані емпіричним шляхом після експериментального випробування різних значень).
3. З отриманих зрізів отримували ознаки у вигляді кепстральних коефіцієнтів (MFCC). Для розрахунку MFCC використовувався програмний пакет Librosa [11] для аналізу музики та звуку.

Алгоритм машинного навчання був навчений на базі ознак, виділених із сигналів. На основі цієї навчальної моделі були розраховані прогнози категорій та ймовірності належності до них. Для кожного типу категорії була підготовлена окрема модель.

Для всіх розрахунків у цьому дослідженні було обрано два популярні алгоритми машинного навчання: лінійний дискримінантний аналіз (LDA) та Extreme Gradient Boosting (XGBoost) [3]. Модель на основі XGBoost показала кращі результати

Лістинг 2 – Процедури виділення ознак із MFCC (feature extraction)

```
def featureExtracror_mfcc(name):
    win = 15
    delta_win = -2
    y, sr = librosa.load(name, sr=10000)
    s = librosa.feature.mfcc(y, hop_length=32, n_mfcc=
    m = np.argmax(s[0,:])
    s = s[1:,m+delta_win:m+delta_win+win]
    s = np.matrix(s)
    s = np.array(s)

    return s

def featureExtracror_mfcc_sum(name):
    win = 15
```

```

delta_win = -2
y, sr = librosa.load(name, sr=10000)
s = librosa.feature.mfcc(y, hop_length=32)
m = np.argmax(np.sum(s[1:], axis=0))
s = s[1:, m+delta_win:m+delta_win+win]
s = np.matrix(s)
s = np.max(s, axis=1)
s = np.array(s)

return s

```

### 3.2. Оцінка точності отриманої моделі

У першому експерименті модель класифікації тренувалася з використанням комбінацій категорій зброї та операції. Кожна категорія представляла одну з чотирьох операцій (типів сигналів) для кожної з чотирьох вибраних моделей пістолетів. Таким чином, усього було шістнадцять категорій (класів). Результати прогнозів для тестових (валідаційних) груп, зроблених обома моделями (LDA та XGBoost), наведені в Таблиці А.1. Ця таблиця містить передбачувані типи зброї та сигналу та ймовірність цих прогнозів. Неправильні передбачення в цій та інших таблицях друкуються жирним курсивом.

Для оцінки якості моделі може буде використана точність (accuracy). Точність визначається як частка прогнозів, які модель зробила правильно. Модель LDA зробила правильні прогнози для 30 записаних сигналів



із 48 сигналів у групі тесту, тому її точність становить 0,63. Ще для 8 сигналів правильно передбачався тип операції, але зброю було визначено неправильно. Модель XGBoost зробила 28 правильних прогнозів (точність 0,58), і для 13 сигналів прогноз операції був правильним, але прогноз зброї був помилковим.

Обидва методи, LDA та XGBoost, також використовувались для бінарної ідентифікації (результати наведені в Таблиці А.2), коли сигнал аналізували шістнадцять разів, кожен раз для іншої категорії. У кожному запуску отримана відповідь передбачає, чи належить тестовий сигнал до категорії, чи ні. Використовуючи двійкову ідентифікацію, модель LDA зробила лише 22 коректних прогнози (точність дорівнює 0,46), для 9 тестових сигналів не передбачалося жодної категорії, а для двох сигналів було передбачено більше однієї категорії з еквівалентною найбільшою ймовірністю. Модель XGBoost робила вірні прогнози лише для 17 сигналів (точність становить 0,35), а для 22 сигналів категорія взагалі не прогнозувалася. Окрім точності у випадку бінарної ідентифікації, для ілюстрації якості моделі можна розрахувати два додаткові параметри - precision (позитивні прогнозні значення) та recall (чутливість). Precision визначається як частка істинно-позитивних прогнозів від суми істинно-позитивних та кількості помилково-позитивних. Recall визначається як частка істинно-позитивних прогнозів від суми істинно-позитивних та помилково-негативних.

Для моделі LDA precision дорівнює 0,56, а recall - 0,71. Precision та recall для моделі XGBoost складають 0,65 та 0,44 відповідно.

Другий експеримент досліджував можливість класифікації за ти-



пом операції. Використовувались чотири типи сигналів (операцій), про які йшлося вище. Використовувались ті ж самі алгоритми (LDA та - XGBoost) та методи багатокласової і бінарної класифікації, як це було зроблено в першому експерименті. Прогнози та ймовірності моделей класифікації за типом сигналу (операції) наведені в Таблиці А.3. Для моделі LDA точність становить 0,79, модель зробила 38 справжніх прогнозів для групи перевірки з 48 сигналів. Для моделі XGBoost цей параметр становить 0,90, а кількість справжніх прогнозів - 43.

У випадку бінарної класифікації (результати наведені в Таблиці А.4) модель LDA зробила 38 правдивих прогнозів. Accuracy – 0,79, precision - 0,83, а recall - 0,95. Модель XGBoost вирішила ту ж проблему з accuracy 0,83 (40 правдивих прогнозів), precision - 0,89 та recall - 0,93.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження було встановлено, що під час різних операцій вогнепальної зброї відбуваються різні акустичні сигнали. Ці акустичні сигнали можна аналізувати та порівнювати за допомогою різних методів та одними з кращих можна вважати методи машинного навчання.

Був поставлений експеримент, в якому досліджувались чотири різні конструкції замозарядних пістолетів та чотири різних сигнали та він показав, що тип операції можна визначити за записаним акустичним сигналом. Прийнятий результат показує до 90% істинних прогнозів (ідентифікацій).

Дослідження довели, що можна використовувати акустичні сигнали вогнепальної зброї для судової ідентифікації. Результати дослідження можуть бути використані під час розслідування злочинів, а також у судових показаннях.

Обговорюваний метод потребує більш глибокого вивчення, що зробить його більш застосовним та ефективним у судово-медичній експертизі.

Майбутні дослідження включатимуть розглядання впливу різних параметрів, що використовуються для вилучення ознак із записаного звуку. Також буде досліджено широкий спектр різних видів зброї. Буде розроблена система класифікації акустичних сигналів. Ця система враховуватиме не тільки тип зброї та сигналу, але також конструктивні особливості механізму та характеристики виробленого звуку. На завер-

шальному етапі дослідження буде розроблена база даних та програмне забезпечення для аналізу.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Antoniou A.* Digital signal processing: signals, systems and filters. New York : McGraw-Hill, 2005. 965 с. OCLC: 254958437.
2. *Bishop C. M.* Pattern recognition and machine learning. New York : Springer, 2006. 738 с. (Information science and statistics).
3. *Chen T., Guestrin C.* XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16: The 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining). San Francisco California USA : ACM, 13.08.2016. С. 785—794.
4. *Cooley J. W., Tukey J. W.* An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. 1965. Трав. Т. 19, № 90. С. 297—297.
5. *Dongarra J., Sullivan F.* Guest Editors Introduction to the top 10 algorithms // Computing in Science & Engineering. 2000. Січ. Т. 2, № 1. С. 22—23.
6. *Eckert J.* Audio and Video Analysis in a German Attempted Murder Case // 25th Annu. Meeteng ENFSI Firearms/GSR Work. Taastrup, Denmark : Gr, 2018. С. 32.
7. *Giverts P., Sofer S., Solewicz Y., Varer B.* Firearms identification by the acoustic signals of their mechanisms // Forensic Science International. 2020. Січ. Т. 306. С. 110099.



8. *Hansen C.* Fundamentals of acoustics // American Journal of Physics - AMER J PHYS. 1951. Ci4. T. 19.
9. *Kaiser G.* Windowed Fourier Transforms // A Friendly Guide to Wavelets. Boston : Birkhäuser Boston, 2011. C. 44—59.
10. *Mahaffy J.* Numerical Analysis and Computing. 2010.
11. *McFee B., Raffel C., Liang D., Ellis D. P., McVicar M., Battenberg E., Nieto O.* librosa: Audio and music signal analysis in python // Proceedings of the 14th python in science conference. T. 8. 2015.
12. *Mitchell T. M.* Machine Learning. New York : McGraw-Hill, 1997.
13. *Morin D.* Fourier Analysis // Waves. 11.2009.
14. *Murphy K. P.* Machine learning: a probabilistic perspective. Cambridge, MA : MIT Press, 2012. 1067 c. (Adaptive computation and machine learning series).
15. *Paredes D. M., Apolinario J. A.* Shooter localization using microphone arrays on elevated platforms // 2014 IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV). IEEE, 11.2014.
16. *Qiu T., Guo Y.* 4. Discretization of Continuous-Time Signals and Reconstruction of Discrete-Time Signals // Signal Processing and Data Analysis. De Gruyter, 2018. C. 115—134.
17. *R. B.* The Fourier Transform and Its Applications. McGraw-Hills, 1986. C. 474.
18. *Smith S. W.* The scientist and engineer's guide to digital signal processing. San Diego (Calif.) : California Technical Pub., 1999. OCLC: 493473234.
19. *Smola A.* Introduction to Machine Learning.

20. V. R. V. Generalization of the eight known orthogonal bases of binary functions to surfaces.
21. В.С. Б. Явление Гиббса. 10.2012.







## ДОДАТОК А

Результати навчання моделі на парах зброя + операція

Таблиця А.1. Результати ідентифікації. Неправильні передбачення показані жирним курсивом. [7]

| Тестовий сигнал |          | Ідентифікований за LDA |                 |             | Ідентифікований за XGBoost |          |             |
|-----------------|----------|------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|----------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Зброя                  | Сигнал          | Ймовірність | Зброя                      | Сигнал   | Ймовірність |
| Glock           | Signal 1 | Glock                  | Signal 1        | 0.251       | Glock                      | Signal 1 | 0.972       |
|                 |          | Glock                  | Signal 1        | 0.276       | Glock                      | Signal 1 | 0.912       |
|                 |          | Glock                  | Signal 1        | 0.331       | Glock                      | Signal 1 | 0.971       |
|                 |          | Glock                  | Signal 2        | 0.166       | Glock                      | Signal 2 | 0.538       |
|                 | Signal 2 | <b>Beretta</b>         | Signal 2        | 0.166       | Beretta                    | Signal 2 | 0.776       |
|                 |          | <b>Jericho</b>         | Signal 2        | 0.171       | FN                         | Signal 2 | 0.877       |
|                 |          | <b>Beretta</b>         | Signal 3        | 0.335       | Jericho                    | Signal 3 | 0.443       |
|                 | Signal 3 | <b>Beretta</b>         | Signal 3        | 0.333       | Beretta                    | Signal 3 | 0.555       |
|                 |          | <b>Beretta</b>         | <b>Signal 2</b> | 0.168       | Beretta                    | Signal 3 | 0.954       |
|                 | Signal 4 | Glock                  | Signal 4        | 1.000       | Jericho                    | Signal 4 | 0.699       |
|                 |          | Glock                  | Signal 4        | 1.000       | Glock                      | Signal 4 | 0.636       |
|                 |          | Glock                  | Signal 4        | 1.000       | Glock                      | Signal 4 | 0.908       |
|                 | Signal 1 | <b>Glock</b>           | <b>Signal 2</b> | 0.998       | Jericho                    | Signal 3 | 0.457       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | <b>Signal 2</b> | 0.538       | Glock                      | Signal 2 | 0.873       |
|                 |          | FN                     | Signal 1        | 0.320       | FN                         | Signal 1 | 0.855       |
|                 |          | FN                     | Signal 2        | 0.192       | Jericho                    | Signal 2 | 0.700       |
| FN              | Signal 2 | FN                     | Signal 2        | 0.208       | FN                         | Signal 2 | 0.437       |
|                 |          | FN                     | Signal 2        | 0.243       | Jericho                    | Signal 2 | 0.901       |
|                 |          | FN                     | Signal 3        | 0.363       | FN                         | Signal 3 | 0.838       |
|                 | Signal 3 | <b>Jericho</b>         | Signal 3        | 0.740       | Jericho                    | Signal 3 | 0.964       |
|                 |          | FN                     | Signal 3        | 0.438       | FN                         | Signal 3 | 0.960       |
|                 |          | FN                     | Signal 4        | 0.333       | FN                         | Signal 4 | 0.988       |
|                 | Signal 4 | FN                     | Signal 4        | 0.251       | FN                         | Signal 4 | 0.988       |
|                 |          | FN                     | Signal 4        | 0.251       | FN                         | Signal 4 | 0.988       |

| Тестовий сигнал |          | Ідентифікований за LDA |                 |             | Ідентифікований за XGBoost |          |             |
|-----------------|----------|------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|----------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Зброя                  | Сигнал          | Ймовірність | Зброя                      | Сигнал   | Ймовірність |
| Jericho         |          | FN                     | Signal 4        | 0.200       | FN                         | Signal 4 | 0.950       |
|                 |          | Jericho                | Signal 1        | 0.304       | Jericho                    | Signal 1 | 0.856       |
|                 | Signal 1 | <b>Glock</b>           | <b>Signal 3</b> | 0.985       | Glock                      | Signal 1 | 0.482       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | <b>Signal 3</b> | 0.952       | Glock                      | Signal 2 | 0.540       |
|                 |          | Jericho                | Signal 2        | 0.211       | Jericho                    | Signal 2 | 0.722       |
|                 | Signal 2 | Jericho                | Signal 2        | 0.248       | Jericho                    | Signal 2 | 0.631       |
|                 |          | Jericho                | Signal 2        | 0.127       | Jericho                    | Signal 2 | 0.827       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | <b>Signal 1</b> | 0.998       | Glock                      | Signal 1 | 0.621       |
|                 | Signal 3 | <b>Glock</b>           | <b>Signal 1</b> | 0.719       | Glock                      | Signal 1 | 0.710       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | <b>Signal 1</b> | 0.939       | Glock                      | Signal 1 | 0.604       |
|                 |          | Jericho                | Signal 4        | 0.333       | Jericho                    | Signal 4 | 0.994       |
|                 | Signal 4 | Jericho                | Signal 4        | 0.333       | Jericho                    | Signal 4 | 0.991       |
|                 |          | Jericho                | Signal 4        | 0.334       | Glock                      | Signal 4 | 0.373       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | <b>Signal 4</b> | 1.000       | Beretta                    | Signal 1 | 0.573       |
|                 | Signal 1 | <b>FN</b>              | Signal 1        | 0.251       | Beretta                    | Signal 1 | 0.967       |
|                 |          | <b>Glock</b>           | Signal 1        | 0.320       | Beretta                    | Signal 1 | 0.341       |
| Beretta         |          | Beretta                | Signal 2        | 0.164       | Beretta                    | Signal 2 | 0.558       |
|                 | Signal 2 | Beretta                | Signal 2        | 0.191       | Beretta                    | Signal 2 | 0.558       |
|                 |          | Beretta                | Signal 2        | 0.184       | Beretta                    | Signal 2 | 0.574       |
|                 |          | Beretta                | Signal 3        | 0.252       | Beretta                    | Signal 3 | 0.639       |
|                 | Signal 3 | Beretta                | <b>Signal 2</b> | 0.206       | Glock                      | Signal 3 | 0.477       |
|                 |          | Beretta                | Signal 3        | 0.222       | Beretta                    | Signal 2 | 0.515       |
|                 |          | <b>Jericho</b>         | Signal 4        | 0.333       | Beretta                    | Signal 4 | 0.371       |
|                 | Signal 4 | Beretta                | Signal 4        | 0.333       | Jericho                    | Signal 4 | 0.460       |
|                 |          | Beretta                | Signal 4        | 0.333       | Beretta                    | Signal 4 | 0.426       |

Таблиця А.2. Результати ідентифікації при бінарній класифікації. [7]

| Тестовий сигнал |          | Ідентифікований за LDA |                 |             | Ідентифікований за XGBoost |          |             |
|-----------------|----------|------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|----------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Зброя                  | Сигнал          | Ймовірність | Зброя                      | Сигнал   | Ймовірність |
| Glock           |          | Glock                  | Signal 1        | 0.984       | Glock                      | Signal 1 | 0.932       |
|                 | Signal 1 | Glock                  | Signal 1        | 1.000       | Glock                      | Signal 1 | 0.954       |
|                 |          | Glock                  | Signal 1        | 1.000       | Glock                      | Signal 1 | 0.933       |
|                 |          | Glock                  | <b>Signal 3</b> | 0.875       | —                          |          |             |
|                 | Signal 2 | <b>Beretta</b>         | Signal 2        | 0.502       | Beretta                    | Signal 2 | 0.512       |
|                 |          | <b>Jericho</b>         | Signal 2        | 0.998       | FN                         | Signal 2 | 0.854       |
|                 |          | Beretta                | Signal 3        | 0.964       | —                          |          |             |
|                 | Signal 3 | Beretta                | Signal 3        | 0.995       | Beretta                    | Signal 3 | 0.956       |
|                 |          | Beretta                | Signal 2        | 1.000       | Beretta                    | Signal 3 | 0.985       |
|                 |          | Glock                  | Signal 4        | 0.999       | Jericho                    | Signal 4 | 0.586       |
|                 | Signal 4 | Beretta                | Signal 4        | 0.982       | —                          |          |             |
|                 |          | —                      |                 |             | Glock                      | Signal 4 | 0.661       |
|                 |          | Glock                  | Signal 2        | 0.982       | —                          |          |             |
|                 | Signal 1 | —                      |                 |             | Glock                      | Signal 2 | 0.934       |
|                 |          | FN                     | Signal 1        | 0.983       | FN                         | Signal 1 | 0.897       |
|                 |          | —                      |                 |             | —                          |          |             |
| FN              | Signal 2 | FN                     | Signal 2        | 0.958       | —                          |          |             |
|                 |          | FN                     | Signal 2        | 0.950       | Jericho                    | Signal 2 | 0.691       |
|                 |          | FN                     | Signal 3        | 1.000       | FN                         | Signal 3 | 0.816       |
|                 | Signal 3 | —                      |                 |             | Jericho                    | Signal 3 | 0.917       |
|                 |          | FN                     | Signal 3        | 1.000       | FN                         | Signal 3 | 0.942       |
|                 |          | FN                     | Signal 4        | 1.000       | FN                         | Signal 4 | 0.982       |
|                 | Signal 4 | FN                     | Signal 4        | 1.000       | FN                         | Signal 4 | 0.98        |
|                 |          | ***                    |                 |             | FN                         | Signal 4 | 0.939       |
|                 |          | Jericho                | Signal 1        | 0.652       | —                          |          |             |
|                 | Signal 1 | —                      |                 |             | —                          |          |             |



| Тестовий сигнал |          | Ідентифікований за LDA |          |             | Ідентифікований за XGBoost |          |             |
|-----------------|----------|------------------------|----------|-------------|----------------------------|----------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Зброя                  | Сигнал   | Ймовірність | Зброя                      | Сигнал   | Ймовірність |
|                 |          | Glock                  | Signal 3 | 0.720       | —                          |          |             |
|                 |          | —                      |          |             | —                          |          |             |
|                 | Signal 2 | Jericho                | Signal 2 | 0.877       | Jericho                    | Signal 2 | 0.504       |
|                 |          | —                      |          |             | Jericho                    | Signal 2 | 0.683       |
|                 |          | Glock                  | Signal 1 | 0.740       | —                          |          |             |
| Signal 3        |          | Jericho                | Signal 3 | 0.849       | —                          |          |             |
|                 |          | Jericho                | Signal 3 | 0.996       | —                          |          |             |
|                 |          | Jericho                | Signal 4 | 0.737       | Jericho                    | Signal 4 | 0.972       |
| Signal 4        |          | Beretta                | Signal 4 | 0.910       | Jericho                    | Signal 4 | 0.926       |
|                 |          | —                      |          |             | —                          |          |             |
|                 |          | Jericho                | Signal 4 | 1.000       | —                          |          |             |
| Signal 1        |          | FN                     | Signal 1 | 1.000       | Beretta                    | Signal 1 | 0.865       |
|                 |          | Glock                  | Signal 1 | 0.546       | —                          |          |             |
|                 |          | Beretta                | Signal 2 | 1.000       | —                          |          |             |
| Signal 2        |          | ***                    |          |             | Beretta                    | Signal 2 | 0.688       |
|                 |          | Beretta                | Signal 2 | 1.000       | Beretta                    | Signal 2 | 0.758       |
| Beretta         |          | Beretta                | Signal 3 | 1.000       | —                          |          |             |
| Signal 3        |          | —                      |          |             | Beretta                    | Signal 2 | 0.593       |
|                 |          | Beretta                | Signal 3 | 0.595       | —                          |          |             |
|                 |          | Jericho                | Signal 4 | 1.000       | —                          |          |             |
| Signal 4        |          | Beretta                | Signal 4 | 1.000       | —                          |          |             |
|                 |          | Beretta                | Signal 4 | 1.000       | —                          |          |             |

Таблиця А.3. Результати ідентифікації тільки за типом сигналу. [7]

| Тестовий сигнал |          | Ідентифікація за LDA |             | Ідентифікація за XGBoost |             |
|-----------------|----------|----------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Сигнал               | Ймовірність | Сигнал                   | Ймовірність |
| Glock           |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.997       |
|                 | Signal 1 | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.998       |
|                 |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.999       |
|                 |          | Signal 2             | 0.500       | Signal 2                 | 0.998       |
|                 | Signal 2 | Signal 2             | 0.500       | Signal 2                 | 0.995       |
|                 |          | Signal 2             | 0.519       | Signal 2                 | 0.893       |
|                 |          | Signal 3             | 0.971       | Signal 3                 | 0.997       |
|                 | Signal 3 | Signal 3             | 0.517       | Signal 3                 | 0.996       |
|                 |          | Signal 2             | 0.500       | Signal 3                 | 0.992       |
|                 |          | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.793       |
|                 | Signal 4 | Signal 4             | 0.999       | Signal 4                 | 0.994       |
|                 |          | Signal 4             | 0.996       | Signal 4                 | 0.990       |
|                 |          | Signal 3             | 0.992       | Signal 1                 | 0.878       |
|                 | Signal 1 | Signal 2             | 0.533       | Signal 1                 | 0.986       |
|                 |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.999       |
|                 |          | Signal 2             | 0.501       | Signal 2                 | 0.998       |
| FN              | Signal 2 | Signal 2             | 0.507       | Signal 2                 | 0.997       |
|                 |          | Signal 2             | 0.602       | Signal 2                 | 0.996       |
|                 |          | Signal 3             | 0.973       | Signal 3                 | 0.998       |
|                 | Signal 3 | Signal 2             | 0.715       | Signal 3                 | 0.980       |
|                 |          | Signal 3             | 0.502       | Signal 3                 | 0.977       |
|                 |          | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.998       |
|                 | Signal 4 | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.997       |
|                 |          | Signal 4             | 0.500       | Signal 4                 | 0.989       |
|                 |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.998       |
|                 | Signal 1 | Signal 3             | 1.000       | Signal 1                 | 0.650       |

|          |          |       |          |       |
|----------|----------|-------|----------|-------|
|          | Signal 3 | 0.777 | Signal 3 | 0.954 |
|          | Signal 2 | 0.528 | Signal 2 | 0.984 |
| Signal 2 | Signal 2 | 0.716 | Signal 2 | 0.995 |
|          | Signal 2 | 0.500 | Signal 2 | 0.999 |
|          | Signal 1 | 1.000 | Signal 1 | 0.889 |
| Signal 3 | Signal 1 | 1.000 | Signal 1 | 0.949 |
|          | Signal 1 | 1.000 | Signal 1 | 0.554 |
|          | Signal 4 | 1.000 | Signal 4 | 0.999 |
| Signal 4 | Signal 4 | 1.000 | Signal 4 | 0.997 |
|          | Signal 4 | 1.000 | Signal 4 | 0.999 |
|          | Signal 4 | 0.994 | Signal 1 | 0.998 |
| Signal 1 | Signal 1 | 1.000 | Signal 1 | 0.998 |
|          | Signal 1 | 1.000 | Signal 1 | 0.962 |
|          | Signal 2 | 0.500 | Signal 2 | 0.998 |
| Signal 2 | Signal 2 | 0.512 | Signal 2 | 0.998 |
|          | Signal 2 | 0.895 | Signal 2 | 0.997 |
| Beretta  | Signal 3 | 0.500 | Signal 3 | 0.641 |
| Signal 3 | Signal 3 | 0.501 | Signal 2 | 0.834 |
|          | Signal 3 | 0.514 | Signal 3 | 0.961 |
|          | Signal 4 | 1.000 | Signal 4 | 0.998 |
| Signal 4 | Signal 4 | 0.999 | Signal 4 | 0.999 |
|          | Signal 4 | 1.000 | Signal 4 | 0.999 |



Таблиця А.4. Результати ідентифікації тільки за типом сигналу  
(бінарна класифікація). [7]

| Тестовий сигнал |          | Ідентифікація за LDA |             | Ідентифікація за XGBoost |             |
|-----------------|----------|----------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| Зброя           | Сигнал   | Сигнал               | Ймовірність | Сигнал                   | Ймовірність |
| Glock           |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.996       |
|                 | Signal 1 | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.999       |
|                 |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.999       |
|                 |          | Signal 2             | 0.979       | Signal 2                 | 0.998       |
|                 | Signal 2 | Signal 2             | 0.891       | Signal 2                 | 0.995       |
|                 |          | Signal 2             | 1.000       | Signal 2                 | 0.969       |
|                 |          | Signal 3             | 1.000       | Signal 3                 | 0.997       |
|                 | Signal 3 | Signal 3             | 0.981       | Signal 3                 | 0.997       |
|                 |          | Signal 2             | 0.964       | Signal 3                 | 0.995       |
|                 |          | Signal 4             | 1.000       | —                        |             |
|                 | Signal 4 | Signal 4             | 0.999       | Signal 4                 | 0.752       |
|                 |          | Signal 4             | 0.999       | Signal 4                 | 0.803       |
| FN              |          | —                    |             | Signal 1                 | 0.872       |
|                 | Signal 1 | Signal 3             | 0.636       | Signal 1                 | 0.992       |
|                 |          | Signal 1             | 1.000       | Signal 1                 | 0.999       |
|                 |          | Signal 2             | 0.998       | Signal 2                 | 0.998       |
|                 | Signal 2 | Signal 2             | 1.000       | Signal 2                 | 0.995       |
|                 |          | Signal 2             | 1.000       | Signal 2                 | 0.987       |
|                 |          | Signal 3             | 1.000       | Signal 3                 | 0.997       |
|                 | Signal 3 | Signal 2             | 0.986       | Signal 3                 | 0.978       |
|                 |          | Signal 3             | 0.997       | Signal 3                 | 0.971       |
|                 |          | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.998       |
|                 | Signal 4 | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.998       |
|                 |          | Signal 4             | 1.000       | Signal 4                 | 0.945       |

|         |          |          |       |  |          |       |
|---------|----------|----------|-------|--|----------|-------|
|         |          | Signal 1 | 1.000 |  | Signal 1 | 0.998 |
|         | Signal 1 | Signal 3 | 0.999 |  | —        |       |
|         |          | —        |       |  | Signal 3 | 0.682 |
|         |          | Signal 2 | 0.999 |  | Signal 2 | 0.896 |
|         | Signal 2 | Signal 2 | 1.000 |  | Signal 2 | 0.990 |
|         |          | Signal 2 | 0.980 |  | Signal 2 | 0.998 |
| Jericho |          | Signal 1 | 1.000 |  | Signal 1 | 0.859 |
|         | Signal 3 | Signal 1 | 0.845 |  | Signal 1 | 0.811 |
|         |          | Signal 1 | 0.935 |  | Signal 1 | 0.675 |
|         |          | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.997 |
|         | Signal 4 | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.997 |
|         |          | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.997 |
|         |          | Signal 4 | 0.999 |  | Signal 1 | 0.998 |
|         | Signal 1 | Signal 1 | 1.000 |  | Signal 1 | 0.989 |
|         |          | Signal 1 | 1.000 |  | Signal 1 | 0.977 |
|         |          | Signal 2 | 1.000 |  | Signal 2 | 0.998 |
|         | Signal 2 | Signal 2 | 1.000 |  | Signal 2 | 0.997 |
|         |          | Signal 2 | 1.000 |  | Signal 2 | 0.997 |
| Beretta |          | Signal 3 | 0.825 |  | —        |       |
|         | Signal 3 | Signal 3 | 0.710 |  | Signal 2 | 0.739 |
|         |          | Signal 3 | 0.992 |  | Signal 3 | 0.969 |
|         |          | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.998 |
|         | Signal 4 | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.997 |
|         |          | Signal 4 | 1.000 |  | Signal 4 | 0.998 |