

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики
Факультет інформаційних технологій
Кафедра безпеки інформації та телекомунікацій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

студента Кучерявий Микола Борисович
академічної групи 172-20-1
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
спеціалізації¹
за освітньо-професійною програмою Телекомунікації та радіотехніка
на тему Дослідження методів стиснення телефонних сигналів

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Проф. Гусєв О. Ю.			
розділів:				
спеціальний	Проф. Гусєв О. Ю.			
економічний	к.е.н., доц. Романюк Н.М.			

Рецензент				
-----------	--	--	--	--

Нормоконтролер	Проф. Гусєв О.Ю.			
----------------	------------------	--	--	--

Дніпро
2024

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
безпеки інформації та телекомунікацій
_____ д.т.н., проф. Корнієнко В.І.

«_____» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

студенту _____ *Кучерявий М. Б.* _____ академічної групи **172-20-1**
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності _____ *172 Електронні комунікації та радіотехніка* _____

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою _____ *Телекомунікації та радіотехніка* _____

на тему _____ *Дослідження методів стиснення телефонних сигналів* _____

Затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ № _____

Розділ	Зміст	Термін виконання
Стан питання, постановка задачі	Цифрова обробка сигналів, перетворення сигналів з аналогового у цифровий і навпаки, огляд ДПФ, ШПФ та вейвлет перетворення	18.03.2024 – 24.04.2024
Спеціальна частина	Опис методів стиснення за допомогою спектрального кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші, написання коду для стиснення телефонного сигналу	24.04.2024 – 15.06.2024
Економічний розділ	Розрахунок капітальних витрат на підготовку та реалізацію проекту	15.06.2024 – 23.06.2024

Завдання видано _____ Гусев О.Ю.
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: _____

Дата подання до екзаменаційної комісії: _____

Прийнято до виконання _____ Кучерявий М.Б.
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64с., 28 рис., 2 табл., 5 додатки, 18 джерел

Об'єкт дослідження: процес стиснення телефонного сигналу

Предмет дослідження: стиснення телефонного сигналу методами спектрального кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші за рахунок інформаційної надмірності

Мета кваліфікаційної роботи: дослідження методів стиснення телефонного сигналу за рахунок інформаційної надмірності.

У першому розділі описано базову основу що таке звуковий сигнал та його види, основи цифрової обробки сигналу, алгоритми стиснення, основні методи стиснення як дискретне перетворення Фур'є, швидке перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.

У спеціальному розділі описується написання коду для стиснення телефонного сигналу методами спектрального кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші, виконано аналіз результатів стиснення.

В економічній частині наведений розрахунок капітальних витрат на проектування дослідів, збір і аналіз інформації, придбання програмного та апаратного забезпечення.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає у пошуку найбільш ефективних методів стиснення сигналу із найменшими втратами інформації

СТИСНЕННЯ ТЕЛЕФОННОГО СИГНАЛУ, ЦОС, ДИСКРЕТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ХААРА, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДОБЕШІ, СПЕКТРАЛЬНЕ КОДУВАННЯ

ABSTRACT

Explanatory note: 64p., 28 fig., 2 tab., 5 appendices, 18 sources

Object of study: the process of compressing the telephone signal

Subject of research: telephone signal compression using spectral coding methods, Haar and Daubechi wavelet transform due to information redundancy

The purpose of the qualification work: the study of methods of compressing the telephone signal due to information redundancy.

The first chapter describes the basic foundation of what an audio signal is and its types, the basics of digital signal processing, compression algorithms, the main compression methods such as discrete Fourier transform, fast Fourier transform and wavelet transform.

The special section describes the writing of the code for compressing the telephone signal using the methods of spectral coding, Haar and Daubechi wavelet transformation, and the analysis of the compression results is performed.

In the economic part, the calculation of capital costs for the design of the experiment, collection and analysis of information, and the purchase of software and hardware is given.

The relevance of the subject of the qualification work lies in the search for the most effective methods of signal compression with the least loss of information

COMPRESSION OF TELEPHONE SIGNAL, TSO, DISCRETE FUIER TRANSFORM, HAAR WAVELET TRANSFORM, DAUBECHI WAVELET TRANSFORM, SPECTRAL CODING

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

SNR – Signal-to-Noise Ratio;

PSNR – Peak Signal-to-Noise Ratio;

CR – Compression Ratio;

ЦОС – цифрова обробка сигналів;

ВКФ – взаємно-кореляційна функція;

АКФ – автокореляційна функція;

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;

АЦП – аналого-цифрове перетворення;

ЦАП – цифро-аналогове перетворення;

ЦП – цифровий процесор;

НДП – неперервно-дискретний перетворювач;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є;

ВПФ – віконе перетворення Фур'є;

НВП – неперервне вейвлет-перетворення;

ДВП – дискретне вейвлет-перетворення.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 СТАН ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	10
1.1 Характеристика звукових сигналів.....	10
1.2 Цифрова обробка сигналів.....	13
1.3 Аналого-цифрове та цифро-аналогове перетворення.....	15
1.4 Квантування.....	16
1.5 Відновлення цифрового сигналу.....	18
1.6 Основні методи аналізу та обробки сигналу.....	19
1.6.1 Дискретизація.....	19
1.6.2 Теорема Найквіста.....	21
1.6.3 Функції перетворення сигналів Фур'є.....	23
1.6.4 Вейвлет-перетворення.....	26
1.7 Фільтрація у ЦОС.....	28
1.8 Постанова задачі кваліфікаційної роботи.....	29
1.9 Висновки.....	30
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	31
2.1 Методика проведення дослідження методів стиснення та їх характеристики результатів стиснення.....	31
2.2 Стиснення за допомогою спектрального кодування.....	31
2.3 Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Хаара.....	32
2.4 Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Добеші.....	33
2.5 Інструментарій.....	35
2.6 Алгоритм програми.....	35
2.6.1 Початок коду та сигнал, що досліджується.....	36
2.6.2 Код для стиснення за допомогою спектрального кодування.....	37
2.6.3 Код для стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Хаара.....	39
2.6.4 Код для стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Добеші.....	40
2.6.5 Додатковий код для аналізу методів стиснення.....	41
2.7 Аналіз та порівняння стиснення відносно початкового сигналу.....	44

2.7.1 Стиснення сигналу із звуком голосу людини. Результати стиснення.....	44
2.7.2 Стиснення сигналу із звуком музикальних інструментів. Результати стиснення.....	48
2.8 Висновки.....	52
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	54
3.1 Визначення трудомісткості розробки коду, для стиснення телефонного сигналу.....	54
3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі телекомунікацій..	55
3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату.....	56
3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.....	56
3.5 Розрахунок капітальних витрат.....	57
3.6 Висновки.....	57
ВИСНОВОК	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59
ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи	61
ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії.....	62
ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу	63
ДОДАТОК Г. Відгук керівника кваліфікаційної роботи	64

ВСТУП

Із розвитком сучасних технологій, повсталала потреба у якісному стисненні та обробці сигналі. Зараз телефонні сигнали уточують нас усюди і вони проникли майже у всі сфери діяльності: медицина, телекомунікації, розваги, тощо. Прогрес у науці не зупиняється і тому продовжуються досліди нових методі стиснення та покращення старих. Тому з кожним новим таким дослідженням, вдається зберегти високу якість сигналу і при цьому зробити обсяг переданих даних все менше і менше.

На цей час, телекомунікації сильно розвинулись і в галузі передачі телефонних сигналів, проте все одно з'являються нові виклики стосовно ефективного використання ресурсів мережі. Один із важливих аспектів, на який звертають увагу, це зменшення обсягу даних без втрати необхідної інформації.

Тому дослідження і пошук нових методів стиснення телефонних сигналів набирає більші обороти. Мета даної роботи полягає у дослідженні трьох методів стиснення: спектральне кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші; також у пошуку найбільш підходящого методу для стиснення телефонного сигналу у вигляді голосу людини та музики.

Кожен з цих методів мають різний концепт роботи і тому це дозволяє легко вивести який з методів буде більш підходити під конкретний приклад. Метод спектрального кодування базується на аналізі частотного спектра сигналу. Видаляючи не потрібні або малозначущі для сприйняття слуховим апаратом людини високі частоти, сигнал стискається. Проте він може бути чутливим до шумів, що вплине на якість стиснення.

Вейвлети Хаара забезпечують достатньо швидке обчислення маючи просту структуру, а вейвлети Добеші надають кращу локалізацію сигналу як у часовій, так і в частотній областях, і це дозволяє більш якісно стиснути сигнал.

Для телекомунікацій, дослід методів стиснення сигналів важливий для подальшого розвитку цієї галузі. Якщо ефективно стиснути сигнал, це призведе до зменшення обсягу переданих даних, що зменшить навантаження на мобільні мережі. Також, із зменшенням обсягом даних, зменшаться витрати на збереження

та передавання інформації.

У даній роботі розглянуто методи стиснення телефонних, як спектральне кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші. Зроблено аналіз та порівняння якості стиснення за критеріями, як співвідношення сигнал/шум (SNR), пік сигнал/шум (PSNR), ступінь стиснення (CR) та інші. За результатами дослідження, можна зробити висновки, які зможуть допомогти для вдосконалення наявних методів стиснення чи навіть для розробки нових методів.

1 СТАН ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Характеристика звукових сигналів

Звук – це вид механічних коливань, створений голосовим апаратом, динаміком, музичним інструментом і т.д.. Поширюється звук як звукова хвиля.

Слуховий апарат людини має конкретний діапазон сприймання цих механічних коливань: за рівнем звукового тиску це від 0 дБ до 120 дБ, а за частотою від 20 кГц до 20000 Гц.

Звуковий сигнал може бути представлений у двох форматах: цифровому та аналоговому. Цифровий звуковий сигнал представляє собою послідовність дискретних числових значень, що відображають амплітуди звуку в певний момент часу. Ці числові значення можуть бути збережені та передані за допомогою цифрових пристроїв. Для цифрового збереження звукового сигналу використовується квантування, яке вимірює амплітуди сигналу у певний момент часу та перетворює їх у цифрові коди. [1]

Характеристики звукової хвилі:

- T – період коливань. Час між однаковими фронтами на однаковій фазі двох послідовних піків.
- λ – довжина хвилі. Відстань між однаковими фронтами на однаковій фазі двох послідовних піків.
- c – швидкість звуку. Швидкість поширення звукової хвилі. Вона буде різна у різних середовищах і тілах.

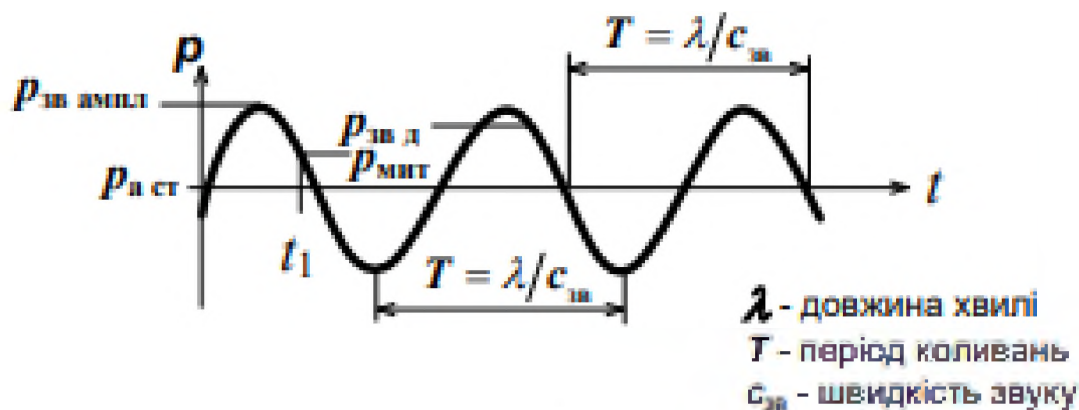


Рисунок 1.1 – Зображення звукової хвилі у вигляді синусоїди із позначеннями характеристик звукової хвилі

Для зрозумілості, ці характеристики звукової хвилі, можна порівняти з музично-психологічними характеристиками, і зрозуміти що, чому і як впливає на саму хвилю та розпізнавання звуку людиною.

1. Частота – Висота звуку;
2. Амплітуда коливання – Рівень гучності звуку;
3. Час звуку – Умовна тривалість звуку;
4. Спектр та його структура (амплітудні та частотні характеристики) – Тембр;
5. Структура нестационарних коливальних процесів – Характер звуковимови.

Усе це разом сприймається як одне ціле, як єдиний образ звуку. При цьому, кожна характеристика впливає на кінцевий результат. [2]

Звуковий сигнал також можна поділити на аналоговий та цифровий. Таке розподілення з'явилося через проблему впливу шуму на сигнал. Більшість сигналів генеруються в аналоговій формі. Для таких сигналів, їх амплітуди безперервно змінюються в часі.

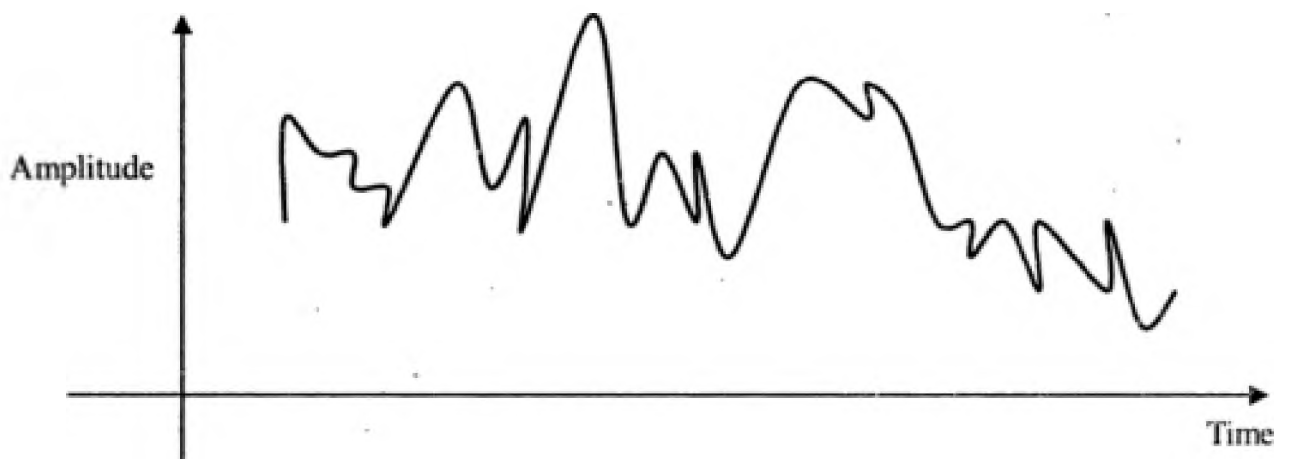


Рисунок 1.2 – Форма аналогового сигналу

На аналоговий сигнал легко впливає шум, бо шум генерується у формі коливань амплітуди. Тому, щоб зменшити кількість шуму у сигналі, треба обмежити його амплітуду. Але, якщо обмежити амплітуду такого сигналу, він буде просто обрізаний і це призведе до спотворень. Щоб обмежити кількість шуму і уникнути спотворень, використовуються цифрові сигнали.

Цифровий сигнал має імпульси фіксованої ширини, які мають тільки один з двох рівнів амплітуди, 0 або 1. На рисунку 1.3 зображено вигляд цифрового сигналу.

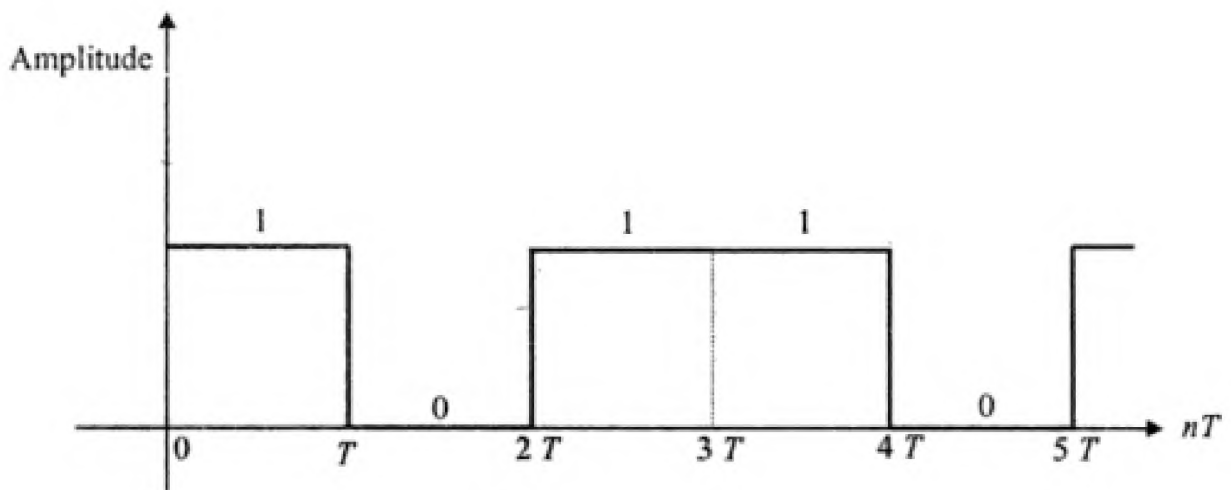


Рисунок 1.3 – Форма цифрового сигналу

Щоб отримати цифровий сигнал з аналогового, використовується аналогово-цифрове перетворення. Але щоб правильно цей сигнал перетворити, треба здійснити вибірку. Ця вибірка здійснюється на основі теореми Котельникова. [3]

1.2 Цифрова обробка сигналів

Цифрова обробка сигналів (ЦОС) – це процес використання різних методів для видалення шумів, модифікації чи перетворення сигналів у потрібну форму. ЦОС використовується в таких областях, як обробка зображень, мови/аудіо, відео, телекомунікації тощо. Також ЦОС є однією з основних технологій в сфері мобільного зв'язку і використовується для обробки сигналів як на станціях, так і на телефонах.

У ЦОС, в усіх його алгоритмів, використовуються однакові операції:

1. Згортка;
2. Кореляція;
3. Фільтрація;
4. Перетворення;
5. Модуляція.

Згортка. Згортка є основною операцією цифрової обробки. Є дві послідовності $x(n)$ та $h(n)$ з довжиною N_1 та N_2 і їх згортка виглядатиме так:

$$Y(n) = h(n) \oplus x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k), \quad (1.1)$$
$$n = \overline{0, 1, \dots, M-1}$$

де символ \oplus позначає згортку, $M = N_1 + N_2 - 1$.

Як і в частотній області, множення згортки у часових координатах буде схожою. На частоті f вихід системи дорівнюватиме:

$$Y(f) = H(f) X(f), \quad (1.2)$$

де $H(f)$ – частотна характеристика системи на частоті f , $X(f)$ – Фур'є-образ входу $x(t)$.

Кореляція. Якщо, під час переходу від точки до точки, обидва сигнали мають схожі зміни, то, для визначення міри їх кореляції, береться сума добутків відповідних пар точок.

Для двох сигналів використовується взаємно-кореляційна функція (ВКФ), показник збіжності або основних властивостей сигналів. Тобто, для послідовності

$x(k)$ та $y(k)$ із довжиною N з нульовим значенням ВКФ обчислюється за формулою

$$\rho_{xy}(n) = \frac{r_{xy}(n)}{\sqrt{r_{xx}(0)r_{yy}(0)}}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1.3)$$

де $r_{xy}(n)$ – оцінка взаємної коваріантності

$$r_{xy}(n) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-n-1} x(k)y(k+n), & n = 0, 1, 2, \dots \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N+n-1} x(k-n)y(k), & n = 0, -1, -2, \dots \end{cases} \quad (1.4)$$

$$r_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [x(k)]^2, r_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [y(k)]^2. \quad (1.5)$$

Для одного сигналу використовується автокореляційна функція (АКФ), що надає інформацію про склад, форму та поведінку сигналу у часі. Послідовність $x(k)$ з довжиною N і з нульовим середнім значенням, буде обчислюватись так

$$\rho_{xx}(n) = \frac{r_{xx}(n)}{r_{xx}(0)}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.6)$$

де $r_{xx}(n)$ – оцінка автоковаріантності

$$r_{xx}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-n-1} x(k)x(k+n), n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.7)$$

Цифрова фільтрація. Фільтрація – це процес перетворення сигналу з метою зменшення шуму, зміни спектрального складу, виділення корисних компонентів. Для зменшення спотворень внутрішньосмугових компонентів сигналу за часту використовують цифровий фільтр. Визначається така фільтрація так:

$$Y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k), n = \overline{0, 1, \dots, N-1}, \quad (1.8)$$

де $h(k)$ – коефіцієнти фільтра, $x(n)$ – вхід фільтра, $y(n)$ – вихід фільтра.

Дискретні перетворення. Основною ідеєю дискретного перетворення є можливість оглянути сигнал з часової області у частотній. Також це перетворення дозволяє отримати спектр, розділивши сигнал на частотні складові. І інформація про цей спектр дуже важлива, бо, наприклад, вона дозволяє визначити ширину смуги, що потрібна для передачі сигнали.

Одним з популярних видів дискретного перетворення є дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), і за його прикладом видно зміну між часовою та частотною координатою для опису цифрового фільтра.

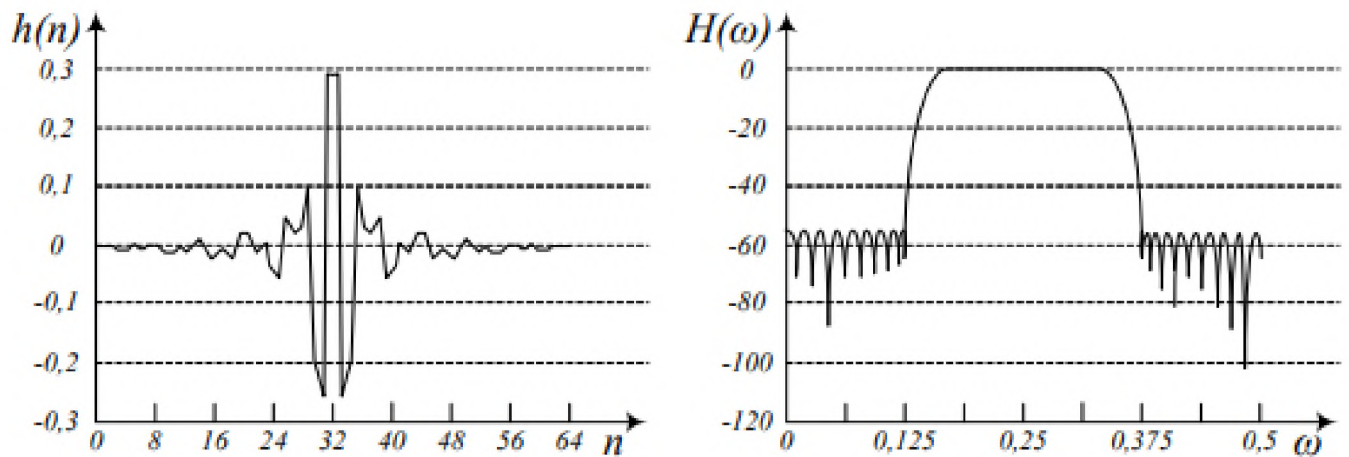


Рисунок 1.4 – Опис цифрового фільтра в часових та частотних координатах

Модуляція. Модуляція дозволяє обробити сигнал так, щоб його частотні характеристики були наближеними до засобів передачі. Це дозволяє зменшити ризики виникнення спотворень сигналу, а також надавати сигналу бажані властивості.

Серед різних видів цифрової модуляції, виділяються три найрозповсюджені з них:

- Амплітудна (англ. Amplitude shift keying – ASK);
- Фазова (англ. Phase shift keying – PSK);
- Частотна (англ. Frequency shift keying – FSK). [4]

1.3 Аналого-цифрове та цифро-аналогове перетворення

Аналого-цифрове перетворення (АЦП) – вид перетворення, коли аналоговий сигнал перетворюється на цифровий, і пристрій, який це робить, називається аналого-цифровий перетворювач. АЦП відбирає аналоговий сигнал через однакові інтервали часу та призначає цифрове значення кожному зразку. Цифрове значення з'являється на виході перетворювача у двійковому форматі. Значення отримується шляхом ділення вибіркової аналогової вхідної напруги на опорну напругу та їх множення на кількість цифрових кодів. Роздільна здатність конвертера встановлюється кількістю двійкових бітів у вихідному коді.

Цифро-аналогове перетворення (ЦАП) – перетворення, що робить теж саме,

що і АЦП, але в оберненому порядку. Пристрій, що виконує таке перетворення, називається цифро-аналоговий перетворювач.

Вхідний сигнал $S_{вх}(t)$ проходить АЦП, після чого він стає послідовністю чисел, який далі переходить до цифрового процесору (ЦП), який виконує потрібну обробку. Після обробки сигналу за допомогою ЦП, він переходить до ЦАП, де знову стає аналоговим сигналом, але напруга на виході ЦАП має форму ніби сходів, і тому, за необхідністю, сигнал проходить через фільтр і стає більш плавним і згладженим. Загальна структура такої обробки сигналу представлена на рис. 1.5.

[5]

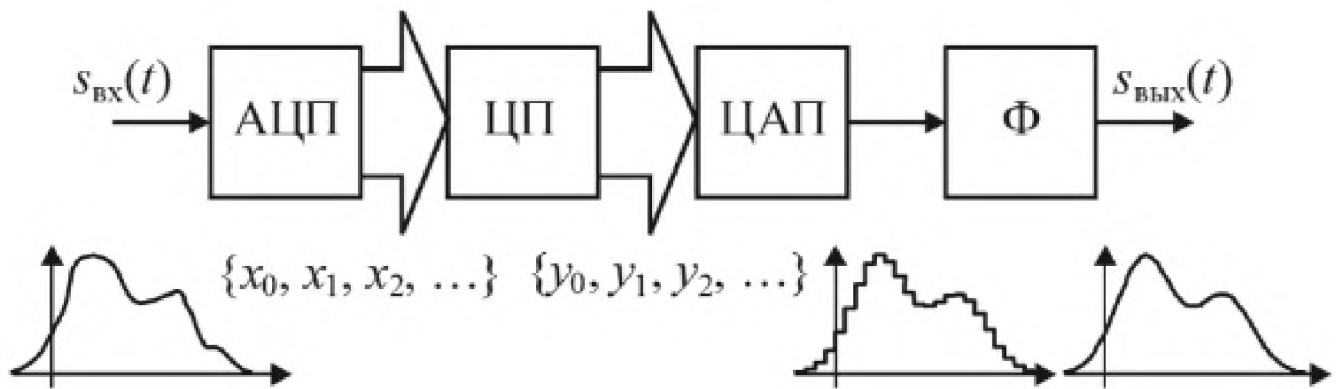


Рисунок 1.5 – Структурна схема системи цифрової обробки сигналів

1.4 Квантування

Квантування – це нелінійна операція, основною задачею якої є сформувати послідовності чисел. Весь діапазон відліків ділиться на якусь кількість дискретних рівнів. Кожному такому відліку надається значення одного з двох ближчих рівнів квантування. Такий спосіб квантування називається округлення. Таким чином, отримується послідовність чисел $x(nT) = x(n)$, представлений у двійковому коді. Розрядність b АЦП впливає на кількість рівнів, тому, якщо $b = 3$, то всього вийде $k = 2^b = 2^3 = 8$ рівнів квантування. Максимальна і мінімальна кількість відліків буде $0 \Leftrightarrow 000$ та $7 \Leftrightarrow 111$. Квантований відлік не буде тим самим, що і вибірка $x(nT)$, тому ця різниця виражається помилкою квантування і чим вона більше, тим

менше b . Максимальна ж помилка буде дорівнювати половині кроку квантування Q

$$\text{Max}|\varepsilon_{\text{кв}}| = \frac{Q}{2}, \text{ де } Q = q_1 = 2^{-b} \quad (1.9)$$

Тому, чим більше буде розрядність АЦП b , тим точніше представляється відлік. При цьому, сам АЦП буде дорожче. Сучасні АЦП мають розрядність від 8 до 20. [6]

На рис. 1.6, продемонстровано процес квантування декількох чисел. На рис. 1.6, а, пунктирною лінією показаний аналоговий сигнал, з якого отримані відліки дискретної послідовності, що відмічені точками на аналоговому сигналі. На рис. 1.6, б, вже зображений квантований сигнал. Його значення знаходяться на рівнях квантування.

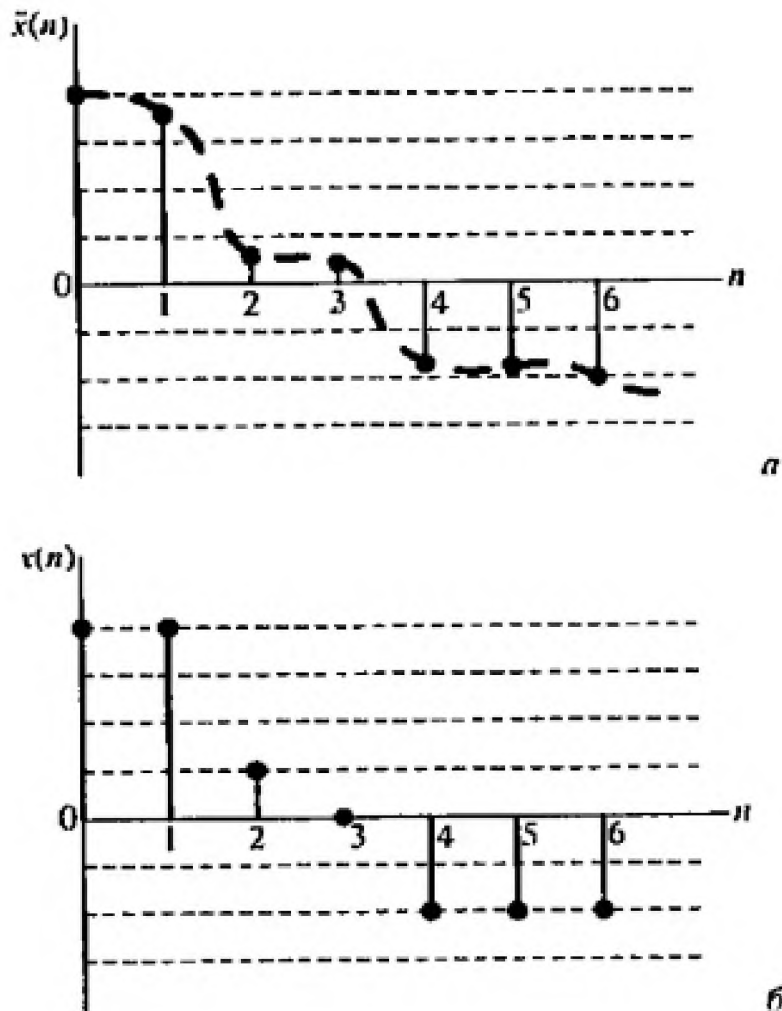


Рисунок 1.6 – Дискретний (а) та квантований (б) сигнали

Ще один спосіб квантування має назву усічення. При такому квантуванні,

розділення діапазону значення сигналу провадиться на відрізки нерівної довжини.
[7]

1.5 Відновлення цифрового сигналу

Відновлення сигналу відбувається за допомогою ЦАП. При найпростішому випадку, щоб відновити безперервний сигнал, ЦАП тримає його і чекає час періоду T , до поки не з'явиться наступне значення вхідного сигналу:

$$U(t) = u[t], k \leq t \leq (k+1) T. \quad (1.10)$$

Елемент, що тримає сигнал протягом цього періоду, називається екстраполятор нульового порядку. Принцип роботи зображений на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Принцип роботи екстраполятора нульового порядку

За таким способом працюють багато ЦАП, будучи доволі легким для реалізації.

Проте є ще один метод відновлення за допомогою екстраполятора першого порядку. Його принцип роботи полягає у виконанні лінійної екстраполяції на основі двох попередніх значень дискретного сигналу.

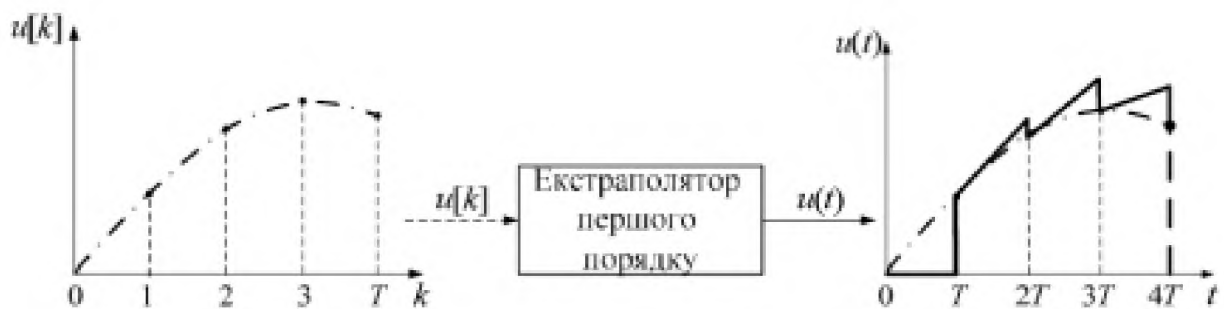


Рисунок 1.8 – Принцип роботи екстраполятора першого порядку

Тоді безперервний сигнал буде відновлюватись за законом лінійної

екстраполяції [8]

$$u(t) = u[k] + \frac{t-kT}{T}(u[k] - u[k-1]). \quad (1.11)$$

1.6 Основні методи аналізу та обробки сигналу

1.6.1 Дискретизація

Дискретизацією називають з'ясування значень неперервного сигналу в дискретні моменти часу. Послідовність відліків $x[n]$ визначаються за неперервним сигналом $x_c(t)$ за формулою:

$$X[n] = x_c(nT), \quad -\infty < n < \infty. \quad (1.12)$$

В даному випадку, T тут називається кроком дискретизації, а його обернена величина $f_s = 1/T$ – частотою дискретизації, що виміряється кількістю відліків в секунду.

Ідеальний неперервно-дискретний перетворювач (НДП) буде тим пристроєм, який виконує цю операцію. Взагалі, дискретизація проводиться за допомогою АЦП, однак НДП буде найближчим варіантом вираження процесу. На рис. 1.9 продемонстровано приклад застосування НДП, представлення неперервного сигналу $x_c(t)$ та його послідовність відліків $x[n]$.

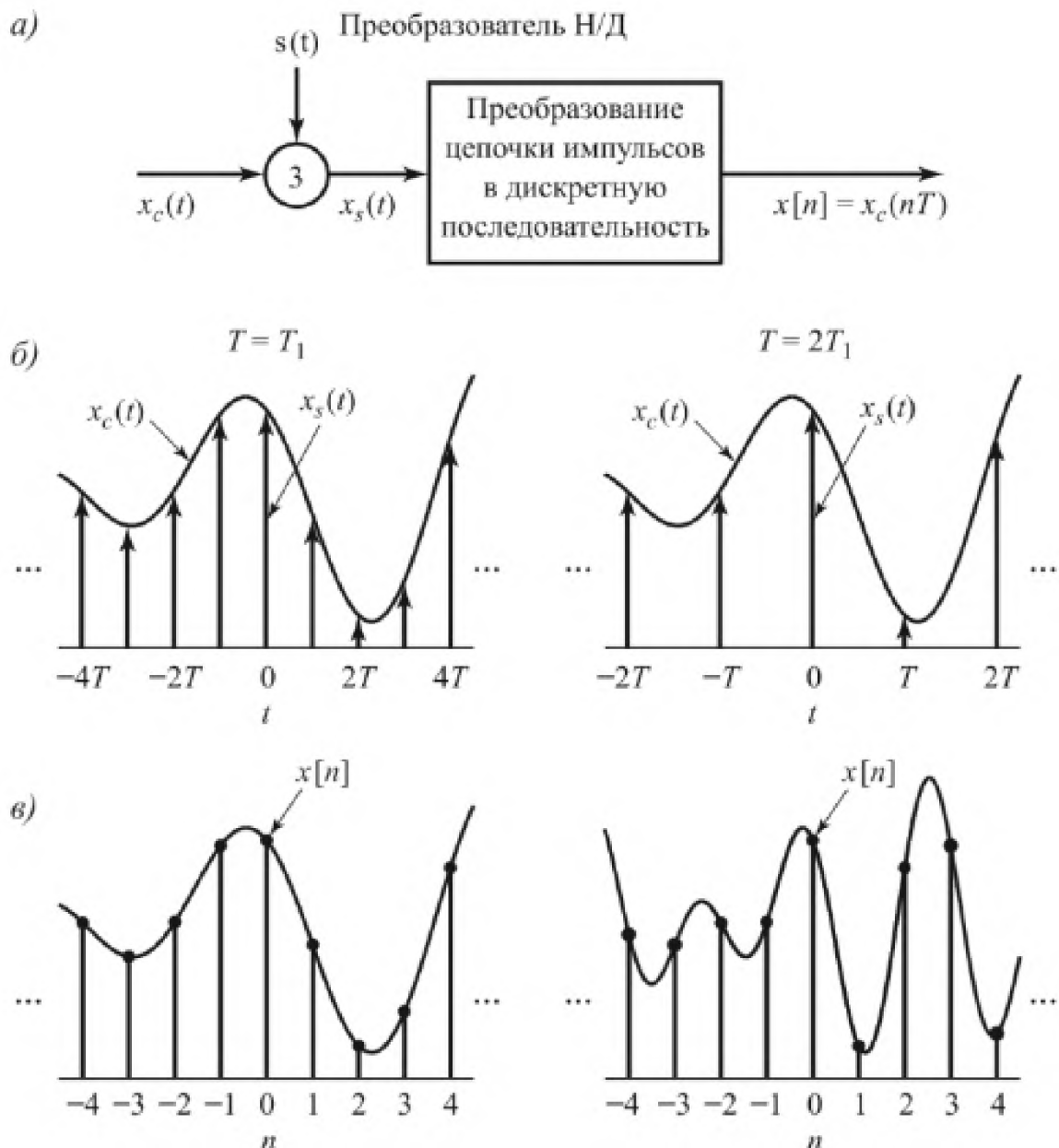


Рисунок 1.9 – Дискретизація неперервного сигналу: а) НДП; б) $x_c(t)$ для двох частот ; в) вихідні послідовності при двох різних частотах дискретизації

Дискретизація умовно розбивається на два етапи: модуляція послідовності імпульсів та перетворення послідовності імпульсів у послідовність чисел. Періодична послідовність імпульсів має такий вигляд:

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT), \quad (1.13)$$

де $\delta(t)$ – δ -функція Дірака. Якщо модулювати сигнал $x_c(t)$ за допомогою функції $s(t)$, то

$$x_s(t) = x_c(t) s(t) = x_c(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT). \quad (1.14)$$

Також це рівняння можна переписати використовуючи функцію дельта-

функції неперервного часу

$$X_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_c(nT)\delta(t - nT), \quad (1.15)$$

тобто розмір цього імпульсу під час дискретизації nT буде дорівнювати величині неперервного сигналу в цей момент часу.

На рис. 1.9, б, зображений неперервний сигнал $x_c(t)$ і послідовність імпульсів. Такий сигнал дорівнює нулю на не цілих кратних T . Відліки системи зображені на рис. 1.9, в. Тут послідовність нумерується цілою змінною n , яка, можна сказати, вводить нормалізацію часу. Послідовність чисел $x[n]$ не має ніякої інформації у собі про частоту дискретизації. [9]

1.6.2 Теорема Найквіста

Теорема Найквіста, або теорема Котельникова, або теорема відліків, висвітлює проблему дискретизації сигналів, що мають обмежений спектр. Щоб відновити дискретизований безперервний вихідний сигнал з якомога меншою кількістю похибок, необхідно правильно обрати крок дискретизації. Тому і виникає питання про величину кроку дискретизації Δt при перетворенні аналогового сигналу у дискретний.

Згідно теореми Найквіста, довільний сигнал $u(t)$ з обмеженим спектром частотою F_s , може бути відновлений за послідовністю своїх відлікових значень, що прямують з інтервалом часу [10]

$$\Delta t = \frac{1}{2F_B} \quad (1.16)$$

Теорема Котельникова для АЦП: для правильного перетворення сигналу, його спектру, на один період T_s верхньої частотної межі $f_s = 1/T_s$, повинно бути не менше двох відліків АЦП. Тобто частота квантування f_k повинна вдвічі перевищувати верхню частоту сигналу f_s .

$$F \geq f_s \Rightarrow S(f) = 0 \Rightarrow f_k \geq 2f_s \quad (1.17)$$

Теорема Котельникова достатня лише теоретично для відновлення сигналу і буде використовуватись лише для ідеального сигналу, тобто з обмеженим спектром.

Через неможливість існування ідеального сигналу, прийнято використовувати більшу частоту квантування по частоті. Якщо, наприклад, частота квантування буде $f_k = 40 \text{ кГц}$, то теоретично спектр вхідного сигналу не повинен мати компоненти з частотою більше $f_g = f_k / 2 = 20 \text{ кГц}$.

Хорошим вибором для відновлення неперервної функції по її дискретним значенням є апроксимація сигналу суперпозицією функцій виду $u_i(t) = A_i \sin x/x$, де $x = 2\pi f_g (t - iT_k)$ (рис. 1.10, рис. 1.11). Але зазвичай використовують шматково-лінійну інтерполяцію (рис. 1.12).

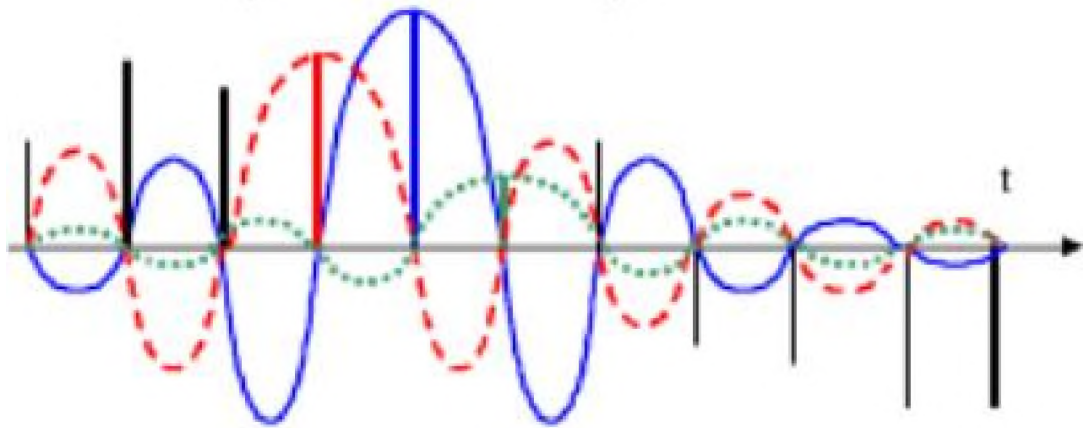


Рисунок 1.10 – Відновлення сигналу по відлікам. Вигляд апроксимуючих функцій

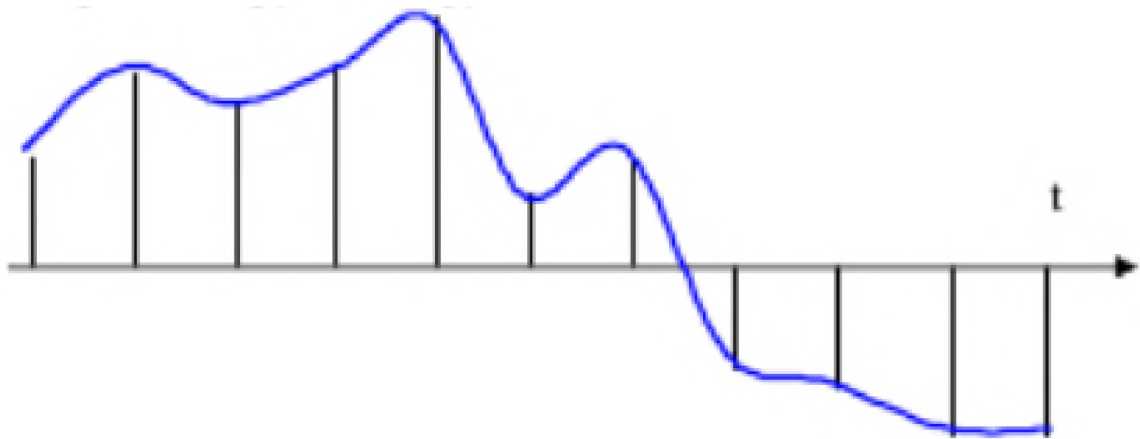


Рисунок 1.11 – Відновлення сигналу по відлікам. Результат відновлення у вигляді суми функцій.

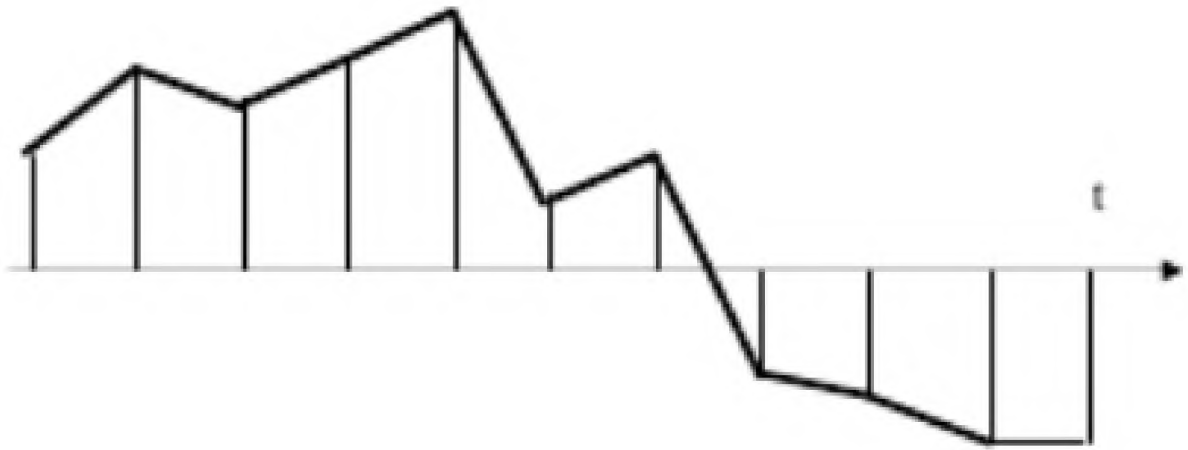


Рисунок 1.12 – Вигляд шматково-лінійного апроксимованого дискретного сигналу

Шматково-лінійна апроксимація має наявність помилки, яка обмежена по величині. Чим менше буде крок відліку, тим менше буде помилка. Якщо говорити за апроксимацію за допомогою гладких функцій, то помилка дорівнюватиме нулю. Тоді на рис. 1.11 зображено повністю точно відновлений сигнал.

Тоді, за теоремою Котельникова, можна сказати, що будь який сигнал, спектр якого не має частот більше F_{ϕ} , Гц, буде повністю відновлений при наявності відлікових значень цього сигналу, отримані через рівні проміжки часу $1/(2 F_{\phi})$, с. [11]

1.6.3 Функції перетворення сигналів Фур'є

Перетворення Фур'є є важливим інструментом в аналізі та обробці сигналів. Воно дозволяє перейти від часової області представлення сигналу до частотної області, що дає змогу детально аналізувати частотні компоненти сигналу.

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ)

Для дискретних сигналів використовується ДПФ, яке перетворює послідовність семплів у послідовність комплексних чисел, що представляють амплітуди та фази різних частотних компонентів.

Дискретний сигнал має вигляд послідовності значень сигналу $x_n = x(t_n)$ у фіксовані моменти часу $t_n = nT_s$. Значення x_n у періодичного дискретного сигналу,

періодично повторюється через певну кількість відліків N , тобто для будь якого n виконується $x_n = x_{n+N}$. Розкладений неперервний сигнал у ряд Фур'є буде виглядати так:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{i\omega_k t}, \quad \omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad (1.18)$$

Знайдемо значення цього ряду в момент часу t_n і врахуємо, що на періоді сигналу T знаходиться N відліків, тобто $T = NT_s$.

$$x_n = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{i\omega_k t} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{i\frac{2\pi k}{T} n T_s} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (1.19)$$

Використовуючи співвідношення $e^{\frac{2\pi i}{N}(k+mN)n} = e^{\frac{2\pi i}{N}kn}$, отримуємо

$$x_n = \sum_{k=0}^{N-1} A_k e^{\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad A_k = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} c_k + sN \quad (1.20)$$

Таким чином було отримано обернене дискретне перетворення Фур'є.

Для отримання прямого дискретного перетворення Фур'є, помножимо скалярний вираз для x_n на $e^{-\frac{2\pi i}{N}mn}$:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}mn} &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_k e^{\frac{2\pi i}{N}(k-m)n} = \\ \sum_{k=0}^{N-1} A_k \frac{1 - e^{\frac{2\pi i}{N}(k-m)N}}{1 - e^{\frac{2\pi i}{N}(k-m)}} &= \sum_{k=0}^{N-1} A_k N \delta_{km} \end{aligned} \quad (1.21)$$

З цього виходить, що:

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}nm} \quad (1.22)$$

Одна з основних галузь використання ДПФ є телекомунікації та радіозв'язок, проте таке перетворення можна зустріти і в медицині, інженерії, астрономії, звукозапису тощо.

Швидке перетворення Фур'є (ШПФ)

Швидкий алгоритм обчислення ДПФ дозволяє обчислити такий самий результат арифметичних операцій використовуючи $O(N \log N)$. Ця різниця може бути величезною, особливо для довгих наборів даних, де N може обчислюватись тисячами або мільйонами.

ШПФ використовується в програмному забезпеченні для цифрового запису, семплювання, адаптивного синтезу та корекції висоти тону.

Алгоритм ШПФ:

$$X_k = \sum_{m=0}^{N-1} x_m W^{mk}, k = 0, \dots, N-1; W = \exp(-j*2\pi/N) \quad (1.23)$$

Якщо $N=N_1N_2$, то індекси m і k можна перетворити наступним чином:

$$M = N_1 m_2 + m_1, m_1, k_1 = 0, \dots, N_1 - 1, \quad (1.24)$$

$$K = N_2 k_1 + k_2, m_2, k_2 = 0, \dots, N_2 - 1. \quad (1.25)$$

Підставивши (номери цих двох формул) у формулу (вище ота номер), вийде:

$$X_{N_2k_1+k_2} = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} W^{N_2m_1k_1} W^{m_1k_2} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} x_{N_1m_2+m_1} W^{N_1m_2k_2} \quad (1.26)$$

або, якщо вважати $W_1 = W^{N_2} = \exp(-j*2\pi/N_1)$ та $W_2 = W^{N_1} = \exp(-j*2\pi/N_2)$, то

$$X_{N_2k_1+k_2} = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} W_1^{m_1k_1} W^{m_1k_2} \sum_{m_2=0}^{N_2-1} x_{N_1m_2+m_1} W_2^{m_2k_2}, \quad (1.27)$$

і тоді виходить, що N_1N_2 -точкове ДПФ можна розглядати як ДПФ масиву $N_1 \times N_2$, за виключенням фазових множників $W^{m_1k_2}$. Тоді виходить, що обчислення X_k виконується в три етапи: спочатку обчислюються N_1 перетворень $Y_{m_1k_2}$, відповідних N_1 різним значенням m_1 :

$$Y_{m_1,k_2} = \sum_{m_2=0}^{N_2-1} x_{N_1m_2+m_1} W_2^{m_2k_2}. \quad (1.28)$$

Потім $Y_{m_1k_2}$ множиться на фазові множники $W^{m_1k_2}$ та X_k отримуються обчисленням N_2N_1 -точкових перетворень:

$$X_{N_2k_1+k_2} = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} Y_{m_1k_2} W_1^{m_1k_1} W^{m_1k_2}. \quad (1.29)$$

Це все також можна обчислити в оберненому порядку, тоді виконуються спочатку множення на фазові множники, а потім – два послідовних перетворень Фур'є. Тоді

$$X_{N_2k_1+k_2} = \sum_{m_2=0}^{N_2-1} W_2^{m_2k_2} \sum_{m_1=0}^{N_1-1} (x_{N_1m_2+m_1} + W^{m_1k_2}) W_1^{m_1k_1}. \quad (1.30)$$

Ефективність ШПФ-алгоритму полягає в тому, що він розбиває один великий ДПФ на декілька малих. І якщо, в простому випадку, пряме обчислення

N – точкового ДПФ, $N = N_1 N_2$, треба $N_1^2 N_2^2$ множень, то, за допомогою ШПФ-алгоритму, кількість множень зменшиться до

$$M = N_1 N_2^2 + N_2 N_1^2 + N_1 N_2 = N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1) \quad (1.31)$$

що менше, ніж $N_1^2 N_2^2$. [12]

1.6.4 Вейвлет-перетворення

Вейвлет – перетворення забезпечує частотно-часове представлення сигналу. Його було розроблено, щоб подолати недолік віконного перетворення Фур'є (ВПФ), яке також можна використовувати для аналізу нестационарних сигналів. У той час як ВПФ дає постійну роздільну здатність на всіх частотах, вейвлет - перетворення використовує техніку багаторазової роздільної здатності, за допомогою якої різні частоти аналізуються з різною роздільною здатністю. Хвиля є періодичною коливальною функцією часу або простору. Навпаки, вейвлети є локалізованими хвилями. Їх енергія зосереджена в часі або просторі, і вони підходять для аналізу перехідних сигналів. У той час як перетворення Фур'є та ВПФ використовують хвилі для аналізу сигналів, вейвлет-перетворення використовує вейвлети кінцевої енергії.

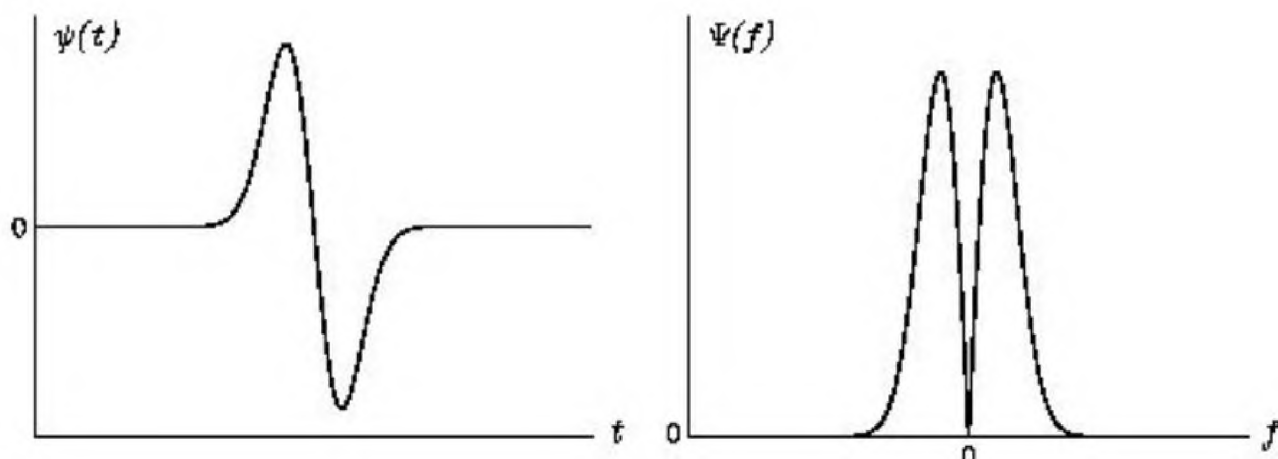


Рисунок 1.13 – Часове та спектральне представлення вейвлету

Вейвлет аналіз виконується подібно до аналізу ВПФ. Сигнал, що підлягає аналізу, множиться на вейвлет-функцію так само, як він множиться на віконну функцію в ВПФ, а потім перетворення обчислюється для кожного згенерованого сегмента. Однак, на відміну від ВПФ, у вейвлет-перетворенні ширина вейвлет-

функції змінюється з кожним спектральним компонентом. Вейвлет-перетворення на високих частотах дає хорошу роздільну здатність за часом і погану роздільну здатність за частотою, тоді як на низьких частотах вейвлет-перетворення дає хорошу роздільну здатність за частотою та погану роздільну здатність за часом.

Існує два основних типи вейвлет-перетворення:

Неперервне вейвлет-перетворення (НВП):

НВП можна продемонструвати формулою (...), де $x(t)$ – сигнал для аналізу, $\psi(t)$ – основний вейвлет або базова функція. Усі вейвлет-функції, що використовуються в перетворенні, походять від основного вейвлету через трансляцію (зсув) і масштабування (розширення або стиснення).

$$X_{WT}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (1.32)$$

Дискретне вейвлет-перетворення (ДВП):

Обчислення НВП може споживати значну кількість часу та ресурсів, залежно від необхідної роздільної здатності.

Встановлено, що дискретне вейвлет-перетворення (ДВП), яке базується на кодуванні підсмуги, забезпечує швидке обчислення вейвлет-перетворення. Це легко реалізувати та зменшує час обчислення та необхідні ресурси.

У НВП сигнали аналізуються за допомогою набору базисних функцій, які пов'язані одна з одною шляхом простого масштабування та трансляції. У випадку ДВП представлення цифрового сигналу в масштабі часу отримують за допомогою методів цифрової фільтрації. Сигнал, що підлягає аналізу, пропускається через фільтри з різними частотами зрізу в різних масштабах. [13]

$$T_{m,n} = \int x(t)\psi_{m,n}(t)dt \quad (1.33)$$

1.7 Фільтрація у ЦОС

Фільтрація у ЦОС застосовується, щоб зменшити наявність шумів у спектрі, який не перетинається з основним спектром сигналу. Також фільтрація застосовує лінійне перетворення, що надає змогу розрізнити функції, що лежать в основі спостережуваних явищ. Реалізація цифрового фільтру на практиці можлива як програмним, так і апаратним шляхом.

Серед плюсів такої фільтрації можна виділити:

1. Достатньо високу точність;
2. Легке налаштування;
3. Розмір, за рахунок не великих вимог зі сторони ємності конденсаторів;

Але є і недоліки:

1. Високочастотні сигнали складні у роботі;
2. Важкість роботи у реальному часі.

Серед видів фільтрів, виділяються два таких: нерекурсивний і рекурсивний фільтри.

Працездатність нерекурсивного цифрового фільтру полягає у застосуванні прямих передач. Математично задається цією формулою

$$Y_n = \sum_{i=0}^{P-1} a_i X_{n-i} \quad (1.34)$$

де X_n – вихідні відліки, P – довжина вхідної послідовності, a_i – коефіцієнти, що визначають амплітудно-частотні характеристики фільтра.

Рекурсивний цифровий фільтр застосовує і пряму передачу, і зворотну. Математично задається формулою

$$Y_n = \sum_{i=0}^{P-1} a_i X_{n-i} + \sum_{j=1}^M b_j Y_{n-j} \quad (1.35)$$

де a_i та b_j – коефіцієнти, що визначають амплітудно-частотні характеристики фільтра, P та M – довжини вхідних послідовностей.

На рис. 1.14 зображено структурну схему рекурсивного та нерекурсивного фільтрів.

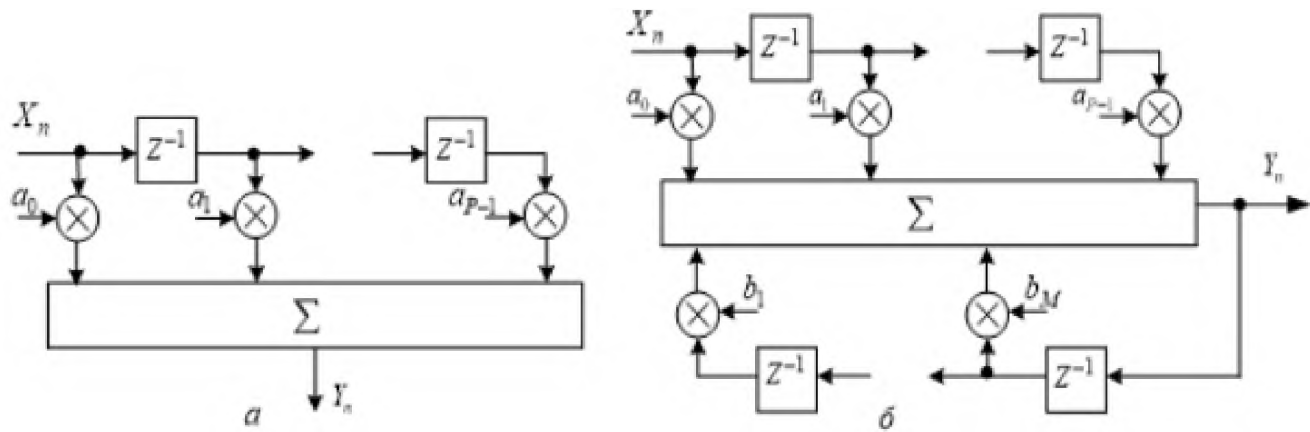


Рисунок 1.14 – Структурна схема: а) нерекурсивний цифровий фільтр; б) рекурсивний цифровий фільтр

Медіанний фільтр — це тип цифрового фільтра, який зазвичай використовується в ЦОС і зображенні для придушення нерегулярного шуму. Медіанна фільтрація є нелінійним методом обробки одно- та двовимірних послідовностей вибірок. У порівнянні з лінійною медіанною фільтрацією це має важливі переваги: підтримує різкі перепади сигналу; добре усуває імпульсні перешкоди. Алгоритм медіанної фільтрації заснований на повному або частковому сортуванні номерів пікселів у «вікні» розміром $N=2m+1$ і виборі центрального елемента в порядку сортування елемента з номером $m+1$. [14]

1.8 Постановка задачі кваліфікаційної роботи

Для досягнення мети дипломної роботи поставлено такі завдання:

- Розглянути методи стиснення телефонних сигналів: спектральне кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші;
- Написати код для реалізації стиснення сигналу;
- Зробити стиснення та порівняння сигналу із звуком голосу людини та звуком музичних інструментів;
- Проаналізувати отримані результати;
- Розрахувати капітальні витрати на проектування та реалізацію дослідження.

1.9 Висновки

У цьому розділі було розглянуто що таке звуковий сигнал, наведена різниця між аналоговим та цифровим сигналами, наведений опис алгоритму методів ЦОС, розглянуто поетапно стиснення телефонного сигналу починаючи з АЦП і закінчуючи фільтрацією сигналу.

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Методика проведення дослідження методів стиснення та їх характеристики результатів стиснення

При розробці систем стиснення телефонних сигналів важливо враховувати різноманітні фактори, такі як ефективність стиснення, збереження якості сигналу, обчислювальна складність методів та їх застосовність до реальних умов. Враховуючи ці фактори, для дослідження було обрано методи спектрального кодування, вейвлет-перетворення Хаара та вейвлет-перетворення Добеші. Кожен з цих методів має свої унікальні особливості та переваги, які роблять їх відповідними для різних сценаріїв стиснення телефонних сигналів.

2.2 Стиснення за допомогою спектрального кодування

Метод спектрального кодування є одним з базових методів стиснення. Принцип роботи цього методу полягає у аналізі частотного спектру сигналу, що дозволяє виділити діапазон частот, на якому знаходиться більше інформації. За допомогою ДПФ, сигнал перетворюється з часової у частотну область, що і надає можливість аналізувати спектральний склад сигналу.

Аналіз частотного спектру виявляє не потрібні або менш важливі частоти для слухового апарату людини, після чого їх видаляє, що призводить до стиснення сигналу. Таким чином вдається сильно зменшити обсяг переданих даних, що підвищить швидкість передачі, але за таким стисненням є більш імовірність наявності шуму. Після видалення частот, сигнал перетворюється з частотної у часову область за допомогою зворотного ДПФ.

Тож цей метод є доволі простим у реалізації, і тому буде потребувати менше витрат.

2.3 Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Хаара

Метод вейвлет-перетворення Хаара є одним з базових методів стиснення телефонних сигналів, який активно досліджується і розвивається в контексті сучасних комунікаційних систем. Основним принципом цього підходу є застосування вейвлет-перетворення до аудіосигналу, що дозволяє розкласти його на компоненти різних частотних діапазонів.

Вейвлет Хаара є послідовністю функцій квадратної форми, що разом утворює сімейство вейвлетів або базис. Послідовність Хаара була запропонована в 1909 році Альфредом Хааром. Хаар використав ці функції, щоб навести приклад ортонормальної системи для простору квадратно-інтегровних функцій на одиничному інтервалі $[0, 1]$.

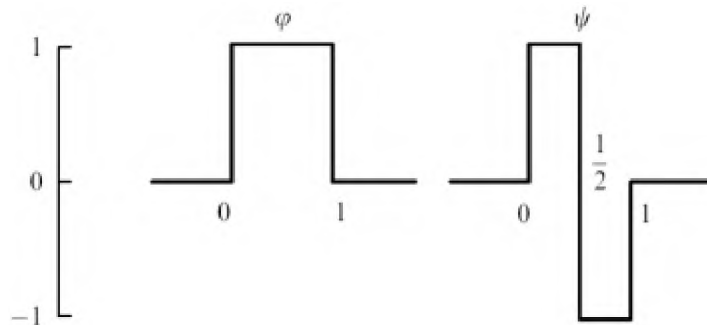


Рисунок 2.1 – Скейлінг та вейвлет функції вейвлета Хаара

Коефіцієнти перетворення Хаара $\{Y_n(k)\}$, відповідні вхідній послідовності $\{X_n(k)\}$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, отримуються в результаті обчислення перетворення:

$$Y_n = \frac{1}{N} H_n X_n, \quad (2.1)$$

де H_n – матриця Хаара розміром $(N \times N)$, $n = \log_2 N$, що отримується шляхом дискретизації системи функції Хаара.

Обернене перетворення Хаара має вигляд:

$$X_n = H_n^T Y_n, \quad (2.2)$$

де H_n^T – транспонована матриця Хаара.

Алгоритм стиснення сигналів перетворенням Хаара має такі етапи:

2. Виконується дискретне перетворення Хаара.

3. Обираються K коефіцієнтів дискретного перетворення, абсолютні значення яких більше заданого порогового значення. Всі інші коефіцієнти прирівнюються нулю.

4. Вичислюється обернене дискретне перетворення Хаара.

Вейвлет-функція Хаара, як одна з найпростіших вейвлет-функцій, відрізняється швидкістю обчислення і простотою реалізації. Технічний недолік цього вейвлета є те, що він не є безперервним, а тому не диференційованим. Метод Хаара аналізує компоненти сигналу, що дозволяє виявити ділянки сигналу з високою та низькою енергетичною цінністю. Після аналізу, незначущі компоненти з низькою амплітудою усуваються шляхом застосування порога.

Метод вейвлет-перетворення Хаара забезпечує ефективне стиснення, особливо для аудіо, що містить багато періодичних складових. [15]

2.4 Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Добеші

Метод вейвлет-перетворення Добеші названий в честь математика Інгрид Добеші, що побудувала таке сімейство ортогональних вейвлетів з компактним носієм, що обчислюється ітераційним шляхом. Його особливість полягає в застосуванні вейвлет-функції Добеші, яка дозволяє проводити складне та точне розкладання аудіосигналу на компоненти різних частотних діапазонів.

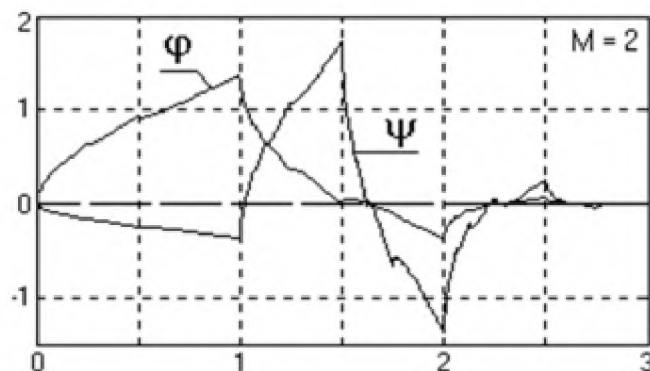


Рисунок 2.2 – Скейлінг та вейвлет функції вейвлета Добеші

Основні властивості цього вейвлета такі:

1) Функції мають кінцеве число нульових значень, тобто система вейвлетів Добеші володіє властивостями гладкості та виключення моментів;

2) Функції володіють властивостями компактності носія (тобто швидко наростають і швидко спадають) та ортогональність, що обумовлює можливість точного відновлення довільного сигналу;

3) Вейвлети мають як вейвлет-функцію, так і скейлінгову функцію, що робить можливим кратномасштабний і швидкий вейвлет-аналіз. Те, що вейвлети Добеші володіють властивістю виключати моменти, означає, що вони добре підійдуть для стиснення сигналів, які мають великі гладкі області. [16]

Для побудови вейвлетів використовується рівняння:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k) \quad (2.3)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k) \quad (2.4)$$

Компактність носія функції φ та ψ може бути досягнута, якщо буде обране кінцеве число таким чином, щоб була досягнута ортогональність та гладкість вейвлету, або щоб виконувались умови моментів.

Вейвлет-перетворення Добеші забезпечує високу якість стиснення завдяки своїй здатності розрізняти значущі та незначущі компоненти сигналу. Вибір порога дозволяє видалити незначущі компоненти, тим самим зменшуючи обсяг даних, які передаються або зберігаються, при збереженні високої якості звуку.

Зворотне перетворення Добеші дозволяє відновити стиснений сигнал з високою точністю, що важливо для подальшого використання. Цей метод забезпечує високу якість відновленого звуку та гнучкість у розкладанні сигналу, що робить його важливим інструментом у сфері сучасних комунікаційних технологій.

Застосування вейвлет-перетворення Добеші може бути корисним для різних типів аудіосигналів, включаючи мову, музику, та інші аудіосигнали. Він знаходить застосування у різних сферах, таких як аудіообробка, телекомунікації та

мультимедіа. [17]

2.5 Інструментарій

Для написання коду, що може стиснути сигнал за допомогою різних методів, використовувався MatLab – середовище та мова програмування для чисельних обчислень, моделювання та аналізу даних.

Також для написання коду використовувались наступні спеціальні бібліотеки:

- Signal Processing Toolbox – бібліотека, що надає функції для аналізу та обробки сигналів, включаючи спектральний аналіз, обробку в частотній області та інші методи.
- Audio Toolbox – ця бібліотека додає додаткові можливості для обробки аудіосигналів.
- Wavelet Toolbox – використовується для обробки вейвлет-перетворень і включає різні види вейвлет-функції, як, вейвлети Хаара та Добеші.

Для програвання аудіо-матеріалів на самому комп'ютері, використовувався застосунок Медіапрогравач від Microsoft останньої версії.

2.6 Алгоритм програми

Код програми, який використовувався для стиснення сигналу, побудований за алгоритмом зображеним на рис. 2.1. Сам код створений так, щоб він міг стиснути початковий сигнал за трьома методами: стиснення за допомогою спектрального кодування, вейвлет-перетворень Хаара та Добеші. Далі він виводить такі результати стиснення, як зображення сигналу, його спектрограми, код відтворює сам сигнал і аналізує по таким параметрам, як CR, SNR та PSNR.



Рис. 2.3 Алгоритм програми стиснення

2.6.1 Початок коду та сигнал, що досліджується

Для аналізу у дослідженні методів стиснення сигналів, було обрано два файли:

- ATTENTION.flac – запис голосу людини;
- Instrumental.flac – запис інструментальної музики.

Ці два записи було обрано таким чином, щоб перевірити різні методи стиснення на якість запису після обробки та обрати які саме методи підходять під голос людини, а які під музику.

Для того, щоб почати стиснення сигналу, треба його «загрузити» у Матлаб. Це робить команда *audioread*, вона зчитує аудіофайл у різних форматах і дозволяє завантажувати їх у робочу область MATLAB для подальшої обробки.

Щоб сигнал почати оброблювати, його треба нормалізувати. Ця нормалізація допомагає запобігти перевищення амплітудою допустимих значень, тобто його значення знаходяться в межах від -1 до 1 . Тобто, завдяки цьому, уникається перевантаження під час цифрової обробки сигналів. Також нормалізація повинна бути для стабільності алгоритмів обробки. Без цієї частини коду, не будуть працювати методи стиснення вейвлет-перетворень Хаара та Добеші.

А також, для подальшого аналізу, було вирішено додати виведення зображення сигналу початкового і, надалі, стиснутого для порівняння. Це все

робить функція *figure*, що дозволяє вивести зображення сигналу, а також, щоб зручно було порівнювати сигнали після стиснення, їх буде розташовано в одне вікно на різні позиції, і це дозволяє зробити функція *subplot* в якій зараз вказано, що початковий не оброблений сигнал буде розташований перший в матриці 2 на 2 (рис. 2.4).

Для відтворення кожного сигналу для порівняння якості звуку на слух, використовувалась функція *sound*.

```
% Імпортування даних у MATLAB
[y, fs] = audioread('Instrumental.flac');

% Нормалізація сигналу
y = y / max(abs(y));

% Відображення початкового сигналу
figure;
subplot(2, 2, 1);
plot((1:length(y)) / fs, y);
title('Початковий сигнал');
xlabel('Час [с]');
ylabel('Амплітуда');

% Відтворення початкового сигналу для порівняння звучання
disp('Відтворення початкового сигналу...');
sound(y, fs);
pause(length(y) / fs + 1);
```

Рисунок 2.4 - Початок коду, його завантаження та нормалізація

2.6.2 Код для стиснення за допомогою спектрального кодування

Частина коду на рисунку 2.5, відповідає за стиснення телефонного сигналу за допомогою спектрального кодування. Цей метод базується на використанні ДПФ, яке перетворює вихідний сигнал з часової області в частотну. У частотній області можна виділити частотні компоненти сигналу і усунути ті, які мають низьку потужність.

Тож, для початку, використовувалась функція *fft(y)*, що виконує ШПФ над аудіосигналом, тобто перетворює сигнал з часової області у частотну.

Задля встановлення порогу відсічення частотних компонентів,

використовується функція *threshold_fft*. Відсікаючи компоненти, амплітуди яких нижчі за цей поріг, можна зменшити кількість частотних компонентів, що зберігаються, тим самим стискаючи сигнал.

Для самого відсічення частотних компонентів, використовується функція *y_fft(abs(y_fft))*.

Далі іде етап ШПФ, щоб перетворити дані назад у часову область. Це виконується за допомогою функції *reconstructed_signal_fft*.

Щоб надалі було простіше відтворювати сигнал не запускаючи при цьому код, було вирішено його зберегти, і це робить функція *audiowrite*.

І, так само, як в попередньому підрозділі, сигнал виводиться на екран за допомогою *subplot* поруч із початковим сигналом, а також відтворюється за допомогою функції *sound*.

```

% ----- Стиснення за допомогою спектрального кодування -----
% Перетворення Фур'є
y_fft = fft(y);

% Поріг для відсічення
threshold_fft = 0.01 * max(abs(y_fft)); % Повернення порогу до 0.01

% Відсічення частотних компонентів нижче порогу
y_fft(abs(y_fft) < threshold_fft) = 0;

% Зворотне перетворення Фур'є
reconstructed_signal_fft = real(ifft(y_fft));

% Збереження стиснутого сигналу після спектрального кодування у форматі FLAC
audiowrite('compressed_signal_fft.flac', reconstructed_signal_fft, fs, 'BitsPerSample', 16);

% Відображення стиснутого сигналу після спектрального кодування
subplot(2, 2, 2);
plot((1:length(reconstructed_signal_fft)) / fs, reconstructed_signal_fft);
title('Стиснутий сигнал (спектральне кодування)');
xlabel('Час [с]');
ylabel('Амплітуда');

% Відтворення стиснутого сигналу після спектрального кодування
disp('Відтворення стиснутого сигналу (спектральне кодування)...');
sound(reconstructed_signal_fft, fs);
pause(length(reconstructed_signal_fft) / fs + 1);

```

Рисунок 2.5 – Код, який відповідає за стиснення методом спектрального кодування

2.6.3 Код для стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Хаара

Частина коду, на рис. 2.6, відповідає за стиснення телефонного сигналу за допомогою вейвлет-перетворень Хаара. Вейвлет-перетворення Хаара дозволяє розкласти сигнал на різні діапазони частот.

Для самого вейвлет-перетворення Хаара використовується функція *wavedec*. Вона дозволяє представити сигнал у вигляді вейвлет-коефіцієнтів, які містять інформацію про сигнал різних масштабах та частотах. Перетворення сигналу проходить з чотирма рівнями декомпозиції, тобто кожен рівень декомпозиції поділяє сигнал на два набори коефіцієнтів: наближення (низькочастотні компоненти) та деталі (високочастотні компоненти). Кожен наступний рівень декомпозиції працює на низькочастотних компонентах попереднього рівня, розкладаючи їх ще на два набори. Це все дозволяє виділити різні частотні компоненти сигналу, що корисно для аналізу та стиснення. Високочастотні компоненти можуть бути відфільтровані або стиснуті, якщо вони містять менше важливої інформації.

Визначається поріг для коефіцієнтів Хаара за допомогою функції *threshold_haar*, що дозволяє зменшити незначні коефіцієнти, що не мають істотного впливу на відновлений сигнал, тим самим зменшуючи об'єм даних.

Функція *wthresh*, відсікає вейвлет-коефіцієнти за визначеним порогом, зменшуючи їх кількість і тим самим стискаючи сигнал.

Для відновлення сигналу з оброблених вейвлет-коефіцієнтів Хаара використовується функція *waverec*.

Збереження стиснутого сигналу здійснюється функцією *audiowrite*, його відображення поруч з іншими сигналами за допомогою *subplot*, а його відтворення за допомогою *sound*.

```

% Вейвлет-перетворення Хаара
[c_haar, s_haar] = wavedec(y, 4, 'haar');

% Вибір порога для коефіцієнтів Хаара
threshold_haar = 0.02 * max(abs(c_haar)); % Вибір порогу для коефіцієнтів Хаара
c_thresh_haar = wthresh(c_haar, 's', threshold_haar);

% Відновлення сигналу з коефіцієнтів Хаара
reconstructed_signal_haar = real(waverec(c_thresh_haar, s_haar, 'haar'));

% Збереження стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Хаара у форматі FLAC
audiowrite('compressed_signal_haar.flac', reconstructed_signal_haar, fs, 'BitsPerSample', 16);

% Відображення стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Хаара
subplot(2, 2, 3);
plot((1:length(reconstructed_signal_haar)) / fs, reconstructed_signal_haar);
title('Стиснутий сигнал (Хаар)');
xlabel('Час [с]');
ylabel('Амплітуда');

% Відтворення стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Хаара
disp('Відтворення стиснутого сигналу (Хаар)...');
sound(reconstructed_signal_haar, fs);
pause(length(reconstructed_signal_haar) / fs + 1);

```

Рисунок 2.6 – Частина коду, який відповідає за стиснення методом вейвлет -перетворення Хаара

2.6.4 Код для стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Добеші

Цей розділ коду відповідає за стиснення телефонного сигналу за допомогою вейвлет-перетворень Добеші. Вейвлет-перетворення Добеші є складнішим варіантом вейвлет-перетворень, який може розкласти сигнал на компоненти з високою точністю.

За допомогою функції *wavedec*, виконується вейвлет-перетворення Добеші з чотирма рівнями декомпозиції. Вейвлет-перетворення Добеші забезпечує кращу локалізацію в частотній області порівняно з Хааром, що дозволяє більш ефективно стискати сигнал.

Поріг для вейвлет-коефіцієнтів Добеші визначається з допомогою функції *threshold_db*, і, аналогічно до порогу Хаара, це дозволяє зменшити незначні коефіцієнти.

Відсічення вейвлет-коефіцієнтів Добеші за порогом здійснюється функцією *wthresh*, що дозволяє зменшити кількість коефіцієнтів і стиснути сигнал.

Для відновлення сигналу з оброблених вейвлет-коефіцієнтів Добеші використовується функція *waverec*.

Збереження стиснутого сигналу здійснюється функцією *audiowrite*, його відображення поруч з іншими сигналами за допомогою *subplot*, а його відтворення за допомогою *sound*.

```
% Вейвлет-перетворення Добеші
[c_db, s_db] = wavedec(y, 4, 'db4');

% Вибір порога для коефіцієнтів Добеші
threshold_db = 0.02 * max(abs(c_db)); % Вибір порогу для коефіцієнтів Добеші
c_thresh_db = wthresh(c_db, 's', threshold_db);

% Відновлення сигналу з коефіцієнтів Добеші
reconstructed_signal_db = real(waverec(c_thresh_db, s_db, 'db4'));

% Збереження стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Добеші у форматі FLAC
audiowrite('compressed_signal_db.flac', reconstructed_signal_db, fs, 'BitsPerSample', 16);

% Відображення стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Добеші
subplot(2, 2, 4);
plot((1:length(reconstructed_signal_db)) / fs, reconstructed_signal_db);
title('Стиснутий сигнал (Добеші)');
xlabel('Час [с]');
ylabel('Амплітуда');

% Відтворення стиснутого сигналу після вейвлет-перетворень Добеші
disp('Відтворення стиснутого сигналу (Добеші)...');
sound(reconstructed_signal_db, fs);
pause(length(reconstructed_signal_db) / fs + 1);
```

Рисунок 2.7 – Частина коду, яка відповідає за стиснення методом вейвлет–перетворення Добеші

2.6.5 Додатковий код для аналізу методів стиснення

Для аналізу було обрано такі критерії, як SNR, PSNR, CR. Вони допоможуть визначити якість відновленого сигналу та ступінь зменшення розміру даних.

SNR – це відношення потужності сигналу до потужності шуму. Вимірюється у децибелах. Вищий SNR вказує на кращу якість відновленого сигналу.

PSNR – це відношення максимальної можливої потужності сигналу до

потужності шуму. Використовується для оцінки якості відновленого сигналу, зокрема для порівняння різних методів стиснення. Також вимірюється в децибелах.

CR – це відношення розміру оригінального сигналу до розміру стиснутого сигналу. Вищий CR означає більшу ступінь стиснення.

На початку цієї частини коду виводиться за допомогою функції *figure* та *subplot* зображення спектрограми кожного виду сигналу (початкового та стиснутого). Сама спектрограма створюється за допомогою функції *spectrogram*.

Обчислення ступеня стиснення CR виконується функцією *original_size*. Вона обчислює розмір оригінального сигналу в байтах. *Numel(y)* повертає кількість елементів у сигналі *y*, множиться на 64 (кількість бітів у кожному елементі) і ділиться на 8 для переведення в байти. Далі для кожного стиснутого сигналу так само обчислюється його розмір у байтах, наприклад, у метода спектрального кодування воно виглядає так:

$$compressed_size_fft = \text{sum}(\text{abs}(y_fft) \geq \text{threshold_fft}) * 64 / 8;$$

після чого *cr_value_fft* обчислює CR, як відношення розміру оригінального сигналу до розміру стиснутого.

Оцінка SNR та PSNR, наприклад у спектрального кодування, виконується функціями *snr_value_fft* та *psnr_value_fft*.

В кінці всі результати виводяться у командний рядок/консоль MATLAB за допомогою функції *fprintf*.

```

% Відображення всіх спектрограм у фігурному вікні
figure;
subplot(4, 1, 1);
spectrogram(y, 256, 128, 256, fs, 'yaxis');
title('Спектрограма початкового сигналу');

subplot(4, 1, 2);
spectrogram(reconstructed_signal_fft, 256, 128, 256, fs, 'yaxis');
title('Спектрограма стиснутого сигналу (спектральне кодування)');

subplot(4, 1, 3);
spectrogram(reconstructed_signal_haar, 256, 128, 256, fs, 'yaxis');
title('Спектрограма стиснутого сигналу (Хаар)');

subplot(4, 1, 4);
spectrogram(reconstructed_signal_db, 256, 128, 256, fs, 'yaxis');
title('Спектрограма стиснутого сигналу (Добеші)');

% Обчислення ступеня стиснення (CR)
original_size = numel(y) * 64 / 8; % Розмір оригінального сигналу в байтах

% Стиснення за допомогою спектрального кодування
compressed_size_fft = sum(abs(y_fft) >= threshold_fft) * 64 / 8; % Розмір стиснутого сигналу у байтах
cr_value_fft = original_size / compressed_size_fft;

% Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Хаара
compressed_size_haar = sum(abs(c_haar) >= threshold_haar) * 64 / 8;
cr_value_haar = original_size / compressed_size_haar;

% Стиснення за допомогою вейвлет-перетворень Добеші
compressed_size_db = sum(abs(c_db) >= threshold_db) * 64 / 8;
cr_value_db = original_size / compressed_size_db;

% Оцінка SNR та PSNR для всіх методів
snr_value_fft = snr(reconstructed_signal_fft, y);
psnr_value_fft = psnr(reconstructed_signal_fft, y);

snr_value_haar = snr(reconstructed_signal_haar, y);
psnr_value_haar = psnr(reconstructed_signal_haar, y);

snr_value_db = snr(reconstructed_signal_db, y);
psnr_value_db = psnr(reconstructed_signal_db, y);

% Виведення результатів порівняння
fprintf('\nПорівняння результатів:\n');
fprintf('SNR (спектральне кодування): %.2f dB\n', snr_value_fft);
fprintf('PSNR (спектральне кодування): %.2f dB\n', psnr_value_fft);
fprintf('SNR (Хаар): %.2f dB\n', snr_value_haar);
fprintf('PSNR (Хаар): %.2f dB\n', psnr_value_haar);
fprintf('SNR (Добеші): %.2f dB\n', snr_value_db);
fprintf('PSNR (Добеші): %.2f dB\n', psnr_value_db);
fprintf('\nСтупінь стиснення (CR, спектральне кодування): %.2f\n', cr_value_fft);
fprintf('Ступінь стиснення (CR, Хаар): %.2f\n', cr_value_haar);
fprintf('Ступінь стиснення (CR, Добеші): %.2f\n', cr_value_db);

```

Рисунок 2.8 – Частина коду, що відповідає за аналіз методів стиснення сигналу

2.7 Аналіз та порівняння стиснення відносно початкового сигналу

2.7.1 Стиснення сигналу із звуком голосу людини. Результати стиснення

Для початку проаналізуємо методи стиснення за такими параметрами, як CR, SNR та PSNR. За результатами, які видає MatLab (рис. 2.9), можна виділити:

SNR (відношення сигнал-шум):

- Спектральне кодування. SNR становить $-0,02$ дБ, що вказує, що рівень шуму майже дорівнює рівню сигналу.
- Вейвлет-перетворення Хаара. SNR становить $-0,62$ дБ, рівень шуму трохи більший за рівень сигналу.
- Вейвлет-перетворення Добеші. SNR становить $-0,5$ дБ, рівень шуму трохи більший за рівень сигналу.

PSNR (пікове відношення сигнал-шум):

- Спектральне кодування. PSNR становить $37,89$ дБ вказує на досить високу якість сигналу після стиснення, попри незначну різницю між сигналом і шумом.
- Вейвлет-перетворення Хаара. PSNR становить $31,3$ дБ показує найнижчу якість стиснення сигналу, порівняно з іншими методами стиснення
- Вейвлет-перетворення Добеші. PSNR становить $33,83$ дБ видає середній результат стиснення, порівняно з іншими методами.

CR (ступень стиснення):

- Спектральне кодування. CR становить $6,94$, що свідчить про непоганий ступінь стиснення. Таке стиснення може привести до деякої втрати деталей, але в цілому забезпечує економію обсягу даних.
- Вейвлет-перетворення Хаара. CR становить $6,46$, що трохи менше, ніж у спектральному кодуванні, тож в даному випадку не має великої різниці.
- Вейвлет-перетворення Добеші. CR становить $11,36$, що є найбільшим ступенем стиснення з трьох методів, забезпечуючи найкращу економію обсягу даних.

```

Порівняння результатів:
SNR (спектральне кодування): -0.02 dB
FSNR (спектральне кодування): 37.89 dB
SNR (Хаар): -0.62 dB
FSNR (Хаар): 31.30 dB
SNR (Добеші): -0.50 dB
FSNR (Добеші): 33.83 dB
|
Ступінь стиснення (CR, спектральне кодування): 6.94
Ступінь стиснення (CR, Хаар): 6.46
Ступінь стиснення (CR, Добеші): 11.36

```

Рисунок 2.9 - Результати аналізу стиснення сигналу голосу людини у MatLab

За допомогою відображення та відтворення сигналу (рис. 2.10), можна порівняти його за власними параметрами, як зір та слух, порівнюючи візуально сигнал та його звучання.

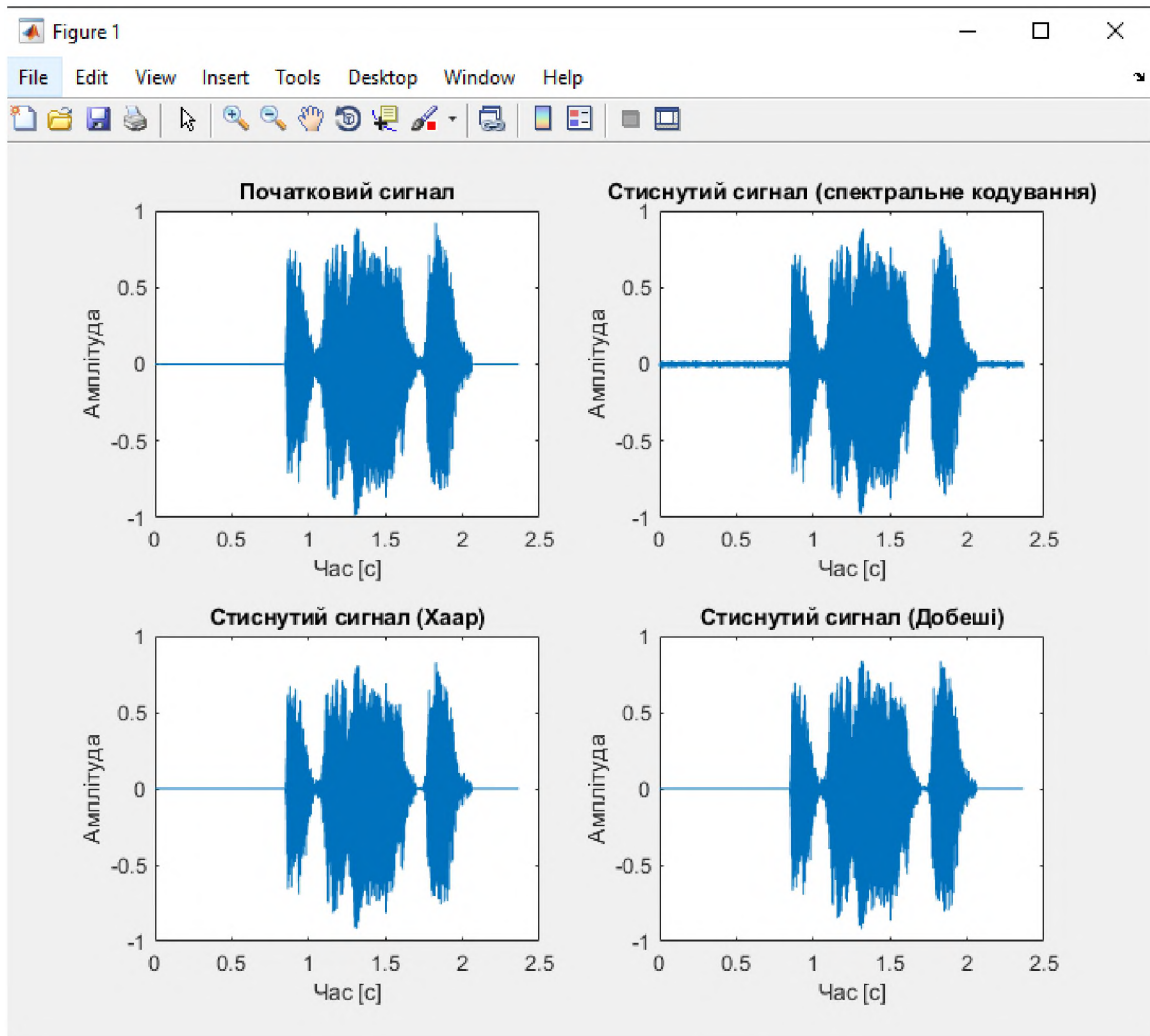


Рисунок 2.10 - Відображення початкового та стиснутих сигналів у середовищі MatLab

За зовнішнім виглядом, більше всього виділяється сигнал після стиснення за

допомогою спектрального кодування. У початковій версії на старті у діапазоні 0 - 1 с звуку не було, але після стиснення там наявний шум. За іншими методами, важко побачити велику різницю на вигляд.

За звучанням прекрасно чути наявність шуму у кожному сигналі після стиснення. Проте, в даному випадку, більше всього виділяється сигнал після стиснення за допомогою спектрального кодування через те, що хоч і наявний шум, проте сам голос на записі краще розпізнається і він є найменш спотвореним.

Метод спектрального кодування забезпечує кращу якість голосу завдяки точному виділенню та збереженню важливих частотних компонентів. Однак, він може вводити більше шумів через квантування та спектральне витікання. Вейвлет-перетворення Хаара та Добеші також ефективні, але можуть втрачати деякі деталі сигналу, що впливає на кінцеву якість

Майже так само, як і з відображенням та відтворенням сигналу, можна порівняти спектрограму сигналів початкового та стиснутих (рис. 2.11).

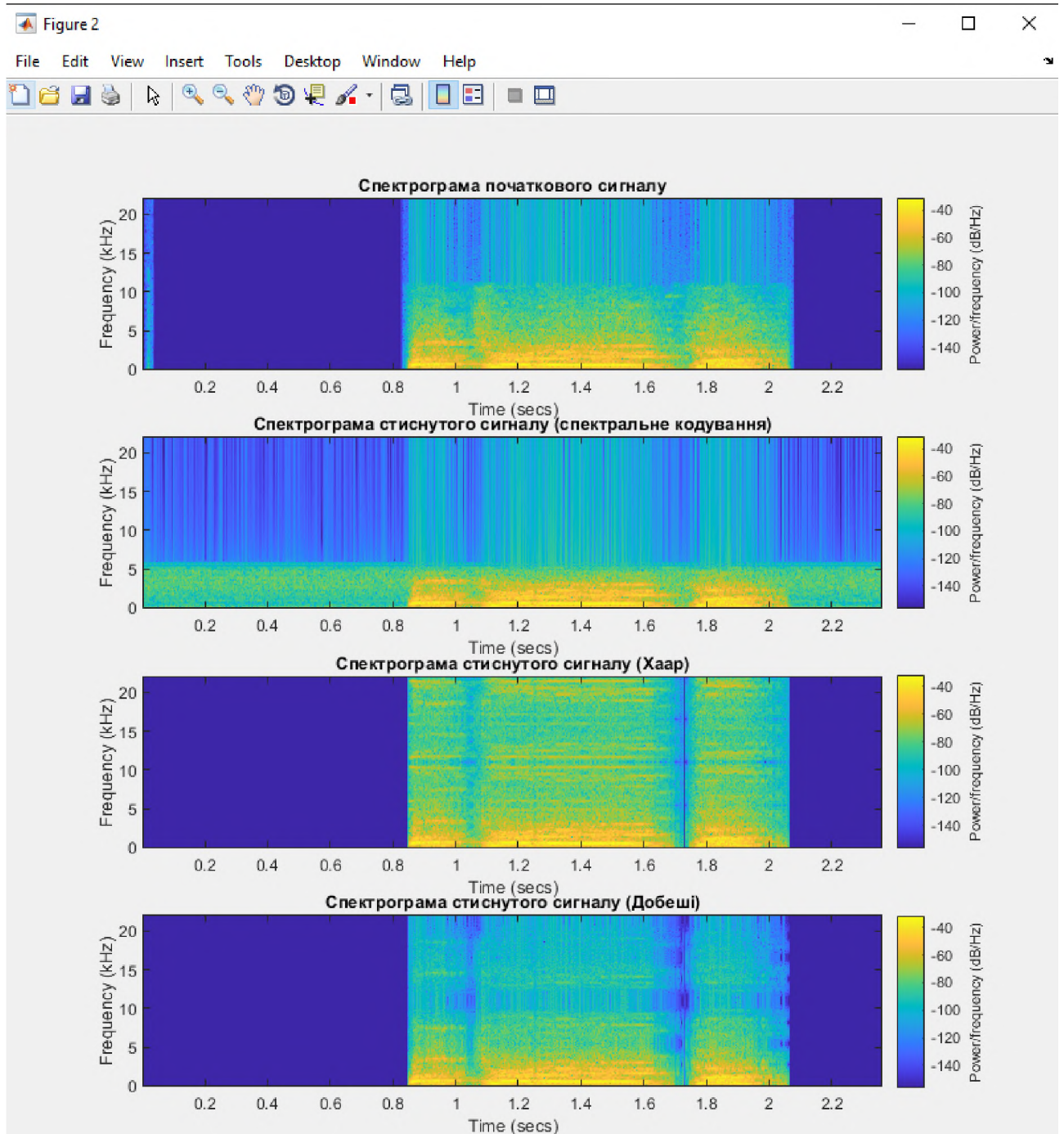


Рисунок 2.11 - Спектрограма початкового та стиснутих сигналів за допомогою середовища MatLab

Так само, як і у попередньому аналізі, видно, що у спектрограми стиснутого сигналу за допомогою спектрального кодування присутні шуми протягом усього запису, проте його спектрограма показує найменший вплив стиснення на сам сигнал.

2.7.2 Стиснення сигналу із звуком музикальних інструментів. Результати стиснення

Так само, для початку, перевіримо такі результати, як CR, SNR та PSNR:

- Спектральне кодування. SNR становить $-0,12$ дБ, що знову показує найкращий результат серед інших видів стиснення.
- Вейвлет-перетворення Хаара. SNR становить $-0,84$ дБ, що показує найбільший рівень шуму у сигналі серед інших методів стиснення.
- Вейвлет-перетворення Добеші. SNR становить $-0,78$ дБ, середній результат.

PSNR (пікове відношення сигнал-шум):

- Спектральне кодування. PSNR становить 30.42 дБ, що говорить про найнижчу якість стиснення сигналу.
- Вейвлет-перетворення Хаара. PSNR становить 30.65 дБ і має майже теж самий результат, що і спектральне кодування.
- Вейвлет-перетворення Добеші. PSNR становить 33.83 дБ видає найвищий результат стиснення.

CR (ступень стиснення):

- Спектральне кодування. CR становить 62.38 , що означає дуже високий ступінь стиснення, який дуже сильно відчувається.
- Вейвлет-перетворення Хаара. CR становить 10.64 , є не поганим результатом, враховуючи результати із попереднім дослідженням.
- Вейвлет-перетворення Добеші. CR становить 13.94 , що знову показує середній результат серед інших методів.

Порівняння результатів:
SNR (спектральне кодування): -0.12 dB
FSNR (спектральне кодування): 30.42 dB
SNR (Хаар): -0.84 dB
FSNR (Хаар): 30.65 dB
SNR (Добеші): -0.78 dB
FSNR (Добеші): 32.39 dB

Ступінь стиснення (CR, спектральне кодування): 62.38
Ступінь стиснення (CR, Хаар): 10.64
Ступінь стиснення (CR, Добеші): 13.94

Рисунок 2.12 - Результати аналізу стиснення сигналу із звуком музикальних інструментів у MatLab

Тепер порівняємо сам вигляд сигналу та його звук після стиснення:

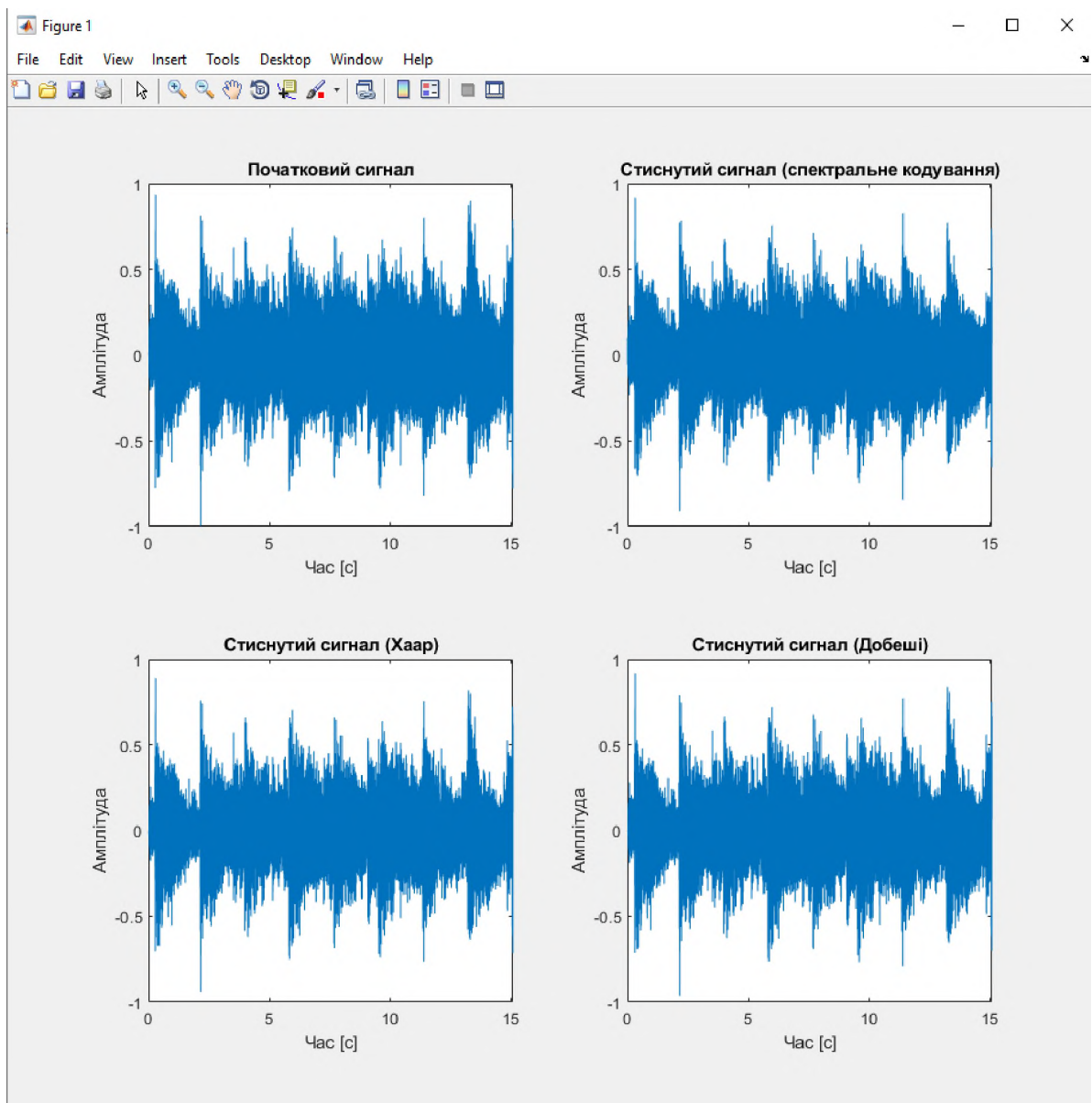


Рисунок 2.13 - Відображення початкового та стиснутих сигналів у середовищі MatLab

Можна зробити висновок, що, по зовнішньому вигляду, стиснуті сигнали не сильно відрізняються, але, за допомогою простої лінійки, виділено, що після стиснення вейвлет-перетворень Добеші, сигнал має більш високі піки.

Проте, не дивлячись на доволі хороші результати стиснення спектральним кодуванням, він є найгіршим по звучанню методом. Цей метод стискає сигнал так, що пропадають високі частоти, притаманні деяким інструментам. Наприклад, під час прослуховування стиснутого сигналу, майже не було помічено духові інструменти. Це показує те, що цей метод не дуже ефективний для стискання сигналу із звучання музичних інструментів, бо як раз принцип цього метода у вирізанні високих частот, що не сприймаються людським вухом, або є менш важливими для сприйняття звуку.

Метод стиснення вейвлет-перетворення Хаара показав знову середній результат і найдивніше, що після стиснення звук став схожий, ніби у «робота». Можливо це через те, що вейвлет Хаара використовує прямокутні імпульси і через це він не надає згладжування між частотними компонентами, що і призводить до додаткових високочастотних артефактів.

Також найкраще проявив себе метод стиснення вейвлет-перетворень Добеші, бо, хоч його звучання було ніби трошки «приглушеним», але цей сигнал має найкращу якість серед інших методів. Завдяки використанню більш складних вейвлетів, вейвлети Добеші можуть згладжувати переходи між частотними компонентами, що дозволяє уникнути появи зайвих високих частот та артефактів.

Перевіримо спектрограму сигналів:

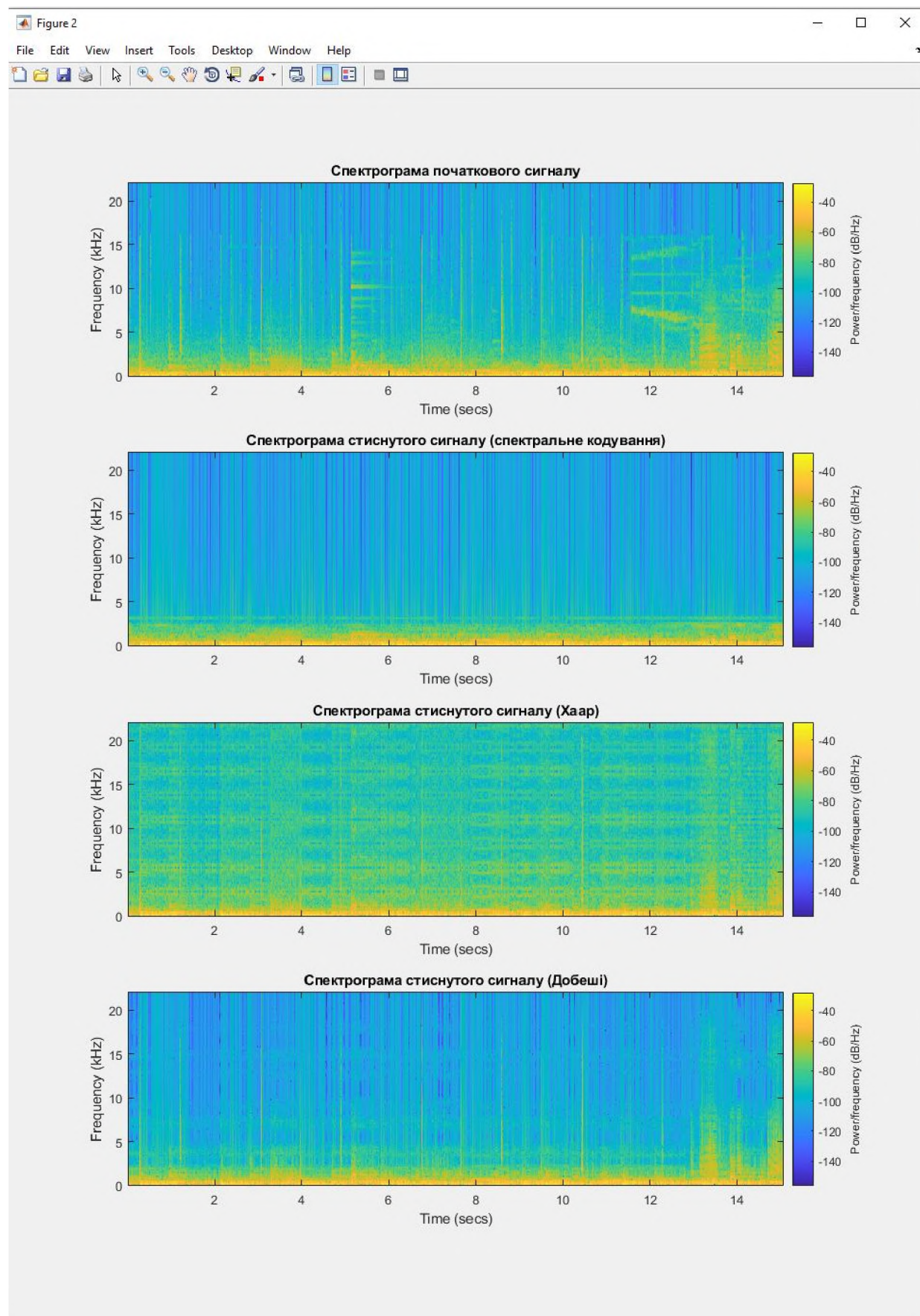


Рисунок 2.14 - Спектрограма початкового та стиснутих сигналів за допомогою середовища MatLab

За цією спектрограмою видно, що спектральне кодування «вирізало» дуже багато високих частот, що призвело до втрати якості звуку. Також вейвлет-перетворення Хаара показує навпаки дуже багато зайвих високих частот. І також за спектрограмою вейвлет-перетворень Добеші видно найкращий результат стиснення.

2.8 Висновки

Було розроблено код, який моделює стиснення сигналу за допомогою таких методів, як спектральне кодування, вейвлет-перетворення Хаара та вейвлет-перетворення Добеші. Також код дозволяє проаналізувати методи стиснення за допомогою таких параметрів, як аналіз самого середовища MatLab (CR, SNR, PSNR), аналіз за допомогою власного дослідження (порівняння сигналів, порівняння за спектрограмою), а також порівняння стиснутого сигналу за допомогою його звучання.

Стиснення сигналу із записом голосу людини.

За першими параметрами (CR, SNR, PSNR) можна сказати, що стиснення за допомогою спектрального кодування виграє по параметрам SNR та PSNR маючи найкращу якість сигналу після стиснення, проте програє по параметру CR методу Добеші, що має найвищу ступінь стиснення серед інших методів.

Так само за наступними параметрами, як зовнішній вигляд сигналу, його спектрограма та якість звуку, перевагу має стиснення за допомогою спектрального кодування, маючи найменшу спотвореність голосу на записі, проте цей метод має найбільшу кількість шумів.

Підводячи підсумки, краще всього за такими параметрами, як якість звуку, треба звернути увагу на метод стиснення спектральним кодуванням, проте якщо важливо мати більш стиснутий сигнал, то варто звернути увагу на метод стиснення вейвлет-перетворень Добеші, що показав так само не погану якість сигналу і саму високу ступінь стиснення.

Стиснення сигналу із записом інструментальної музики.

Найкращий результат стиснення по першим параметрам отримав метод

стиснення спектрального кодування, як і в попередньому результаті. Проте, для такого сигналу найбільш важливим фактором буде саме його звучання, тож по цьому параметру перемагає метод стиснення вейвлет-перетворень Добеші, який при цьому також має хороший показник ступня стиснення.

Отже, на мою думку, найкращий метод стиснення серед оглянутих є вейвлет-перетворення Добеші.

РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНІ РОЗДІЛ

3.1 Визначення трудомісткості розробки коду, для стиснення телефонного сигналу

Трудомісткість – один з показників продуктивності праці, він являє собою суму затрат живої праці на виробництво одиниці продукції. Трудомісткість обернено пропорційна показнику продуктивності праці (кількості продукції, що виробляється за одиницю робочого часу). Поняття трудомісткості тісно пов'язане з поняттям капіталоемності (показник, який характеризує обсяги основного капіталу або основних фондів для випуску продукції, послуг і визначається діленням вартості основних фондів на обсяг продукції у грошовому вираженні, випущеної за рік).

Трудомісткість при дослідженні та розробці коду, для стиснення телефонного сигналу, визначається тривалістю кожної робочої операції (таблиця 3.1), починаючи зі збору та аналізу необхідної інформації і закінчуючи оформленням документації (за умови роботи одного чоловіка):

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} \quad (3.1)$$

Оцінка витрат праці на збір і аналіз інформації залежить від конкретних умов і визначається на основі експертних оцінок. Представимо результати трудомісткості кожної операції в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість кожної робочої операції

Робоча операція	Тривалість
1.Збір і аналіз інформації	$t_1=24$ години
2. Постановка задачі	$t_2=2$ години
3. Складання технічного завдання	$t_3=6$ годин
4. Аналіз технічного завдання.	$t_4 =6$ годин
5. Дослідження загальних відомостей про види стиснення сигналів	$t_5=12$ годин

6. Загальні відомості про спектральне кодування	$t_6=9$ годин
7. Загальні відомості про вейвлет-перетворення Хаара та Добеші	$t_7=12$ години
8. Дослідження принципів роботи	$t_8=11$ години
9. Написання коду	$t_9=12$ годин
10. Аналіз результатів стиснення	$t_{10}=2$ годин
11. Підготовка документації по завданню	$t_{12}=19$ годин

Отже, трудомісткість при дослідженні і розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, що розраховується за формулою 3.1, складатиме:

$$t = 24+2+6+6+12+9+12+11+12+2+19=115 \text{ людино-годин.}$$

3.2 Визначення середньої заробітної плати спеціаліста в галузі телекомунікацій

Інженер з телекомунікацій забезпечує доступ користувачам в інтернет, "прокладає" оптико-волоконні мережі, надає послуги IP-телефонії, відповідає за налагодження, експлуатацію, моніторинг мережі, її розвиток, забезпечує якісну і надійну роботу систем. Встановлює на підприємствах системи відеоспостереження, охоронно-пожежної сигналізації, звукового оповіщення тощо.

Підрахунок середньої заробітної плати:

- Представимо суму заробітної плати в Україні за кожен місяць протягом одного року, з січня 2023 року по лютий 2024 року: $12645+12794+13423+13626+14109+16012+13996+13778+14518+14882+14983+16836=171602$ грн/рік

- Розрахуємо середню заробітну плату за один місяць за формулою:

$$ЗП_{\text{сер}} = ЗП_{\text{рік}} / 12 \quad (3.2)$$

$$ЗП_{\text{сер}} = 171602/12= 14300 \text{ грн/місяць}$$

- Розрахуємо середню заробітну плату за одну годину роботи, з урахуванням 8-ми годинного робочого графіку на добу і 5-ти денній робочій тиждень:

- Кількість робочих годин в місяць (підрахунок за місяць квітень (30 днів в

місяці)): 168 год/місяць;

- Середня заробітну плату за одну годину роботи становить: 85 грн/годину.

3.3 Розрахунок витрат на заробітну плату

Заробітна плата (оплата праці працівника) - винагорода за працю залежно від кваліфікації, складності, обсягу, якості та умов виконуваної роботи, а також компенсаційні та стимулюючі виплати. Заробітна плата - грошова компенсація, яку працівник отримує в обмін на свою працю.

Заробітна плата виконавця враховує основну і додаткову заробітну плату, а також відрахування на соціальні потреби (пенсійне страхування, страхування на випадок безробіття, соціальне страхування тощо) і визначається за формулою:

$$Ззп = t \cdot Зіт, \text{ грн}, \quad (3.3)$$

де t – загальна тривалість при дослідженні і розробці лабораторного макета лазерного каналу зв'язку для систем передачі інформації, годин;

$Зіт$ – середньогодинна заробітна плата інженера в галузі телекомунікацій, грн/годину.

$$Ззп = 115 \cdot 85 = 9775 \text{ грн.}$$

3.4 Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення

Розрахунок витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення при дослідженні і розробці коду, для стиснення телефонного сигналу, наведено в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Вартість необхідного програмного та апаратного забезпечення

Найменування	Вартість, грн
Ноутбук Lenovo IdeaPad Slim 3 15AMN8	18999,00
Миша Logitech G102 Lightsync USB Black	999,00
Клавіатура дротова Real-El 8700 Backlit USB	499,00

Операційна система Microsoft Windows 10 Домашня 64-bit	3885,00
Matlab 2018a (Signal Processing Toolbox, Audio Toolbox, Wavelet Toolbox)	6 000,00
Разом:	30382,00

Отже, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення становлять 30382 гривень.

3.5 Розрахунок капітальних витрат

Під капітальними витратами розуміють усі витрати, які забезпечують підготовку й реалізацію проекту, включаючи формування або збільшення основних та оборотних коштів. Вони не мають на меті дати прибуток принаймні протягом року і є довгостроковими вкладеннями. Залежно від виду і форм капітальних витрат значення їх показників матиме різний економічний сенс.

Це витрати на придбання довгострокових активів, які функціонують протягом тривалого періоду, з поступовою амортизацією ціни. До капітальних витрат звичайно відносять початкову вартість будівель та споруд (або крокові витрати на їх встановлення); вартість нових видів машин та механізмів; придбання обладнання та приладів (крім малокоштовних та швидкозношувальних); вартість придбаних нематеріальних активів (патентів, ліцензій), що належать до поступового списання тощо.

Таким чином, капітальні витрати на дослідження та розробку коду, для стиснення телефонного сигналу, є сумою витрат на заробітну плату і витрат на необхідне програмне та апаратне забезпечення.

$$9775 + 30382 = 40157 \text{ грн.}$$

3.6 Висновки

В економічному розділі було розраховано кількість часу, що необхідно для розробки коду, для стиснення телефонного сигналу, заробітну плату інженера, витрати на необхідне програмне та апаратне забезпечення, на основі чого було зроблено висновок, що сума капітальних витрат складає 40157 грн.

ВИСНОВКИ

У першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто принцип цифрової обробки сигналу та його алгоритмів. Здійснено огляд на загальну структуру перетворення аналогового сигналу у цифровий та навпаки, методи обробки цифрового сигналу між перетворення ми АЦП та ЦАП, а також розглянуто перетворення сигналів за допомогою ДПФ, ШПФ та вейвлет-перетворення.

У спеціальному розділі кваліфікаційної роботи розглянуто три методи, за якими велось дослідження: спектральне кодування, вейвлет-перетворення Хаара та Добеші. Приведене написання коду на базі платформи MatLab з реалізацією стиснення сигналу, а також виведення результатів стиснення порівняно з початковою версією сигналу, таких як вигляд сигналу, спектрограма, виведення звуку та по критеріям як SNR, PSNR та CR.

В економічному розділі розраховано капітальні витрати на підготовку та реалізацію проекту. В цей перелік входять: трудомісткість, розрахунок виплат на заробітну плату та вартість програмного та апаратного забезпечення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гребінь, Олександр Павлович, Володимир Борисович Швайченко, та Нінель Федорівна Левенець. "Основи звукотехніки. Навчальний посібник." (2023).
2. Шип, Сергій Васильович. *Музична форма від звуку до стилю*. Заповіт, 1998.
3. Nair, V. Somanathan. *Digital electronics and logic design*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2002.
4. Самборський, І. І., Шолохов, С. М., Юрченко, О. В., & Ніколаєнко, Б. А. (2021). *Основи цифрової обробки сигналів*.
5. Сергиєнко, Александр Борисович. *Цифровая обработка сигналов*. БХВ-Петербург, 2011.
6. Солонина, Алла Ивановна. *Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов*. БХВ-Петербург, 2001.
7. Солонина, Алла Ивановна. *Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. 2 изд.* БХВ-Петербург, 2012.
8. Пархомей, Ігор Ростиславович, and Наталія Володимирівна Цюпа. "Основи теорії інформаційних процесів. Частина 2. Системи обробки сигналів." (2020).
9. Оппенгейм, Алан, and Рональд Шафер. *Цифровая обработка сигналов*. Litres, 2012.
10. Нефедов В. І. "Теорія електрозв'язку" (2018).
11. Жмудь, Вадим Аркадьевич. "Теорема Котельникова-Найвиста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Теория Относительности." *Автоматика и программная инженерия* 1 (7) (2014): 127-136.
12. Нуссбаумер, Генри. "Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток." (1985).
13. Sripathi, Deepika. "Efficient implementations of discrete wavelet transforms using FPGAs." (2003).
14. Тотосько, Олег Васильович, and Петро Данилович Стухляк. "Цифрова

- обробка сигналів та зображень: навчальний посібник." (2016).
15. Кадена, Л., С. В. Кириллова, and К. В. Симонов. "Анализ сложных сигналов на основе вейвлет-преобразования." *КУБАТУРНЫЕ ФОРМУЛЫ, МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ* (2011): 59.
 16. Лавриненко, А. Ю., and А. И. Давлетьянц. "СЖАТИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ." *ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ ГОЛОВА* (2014): 65.
 17. Timoney, Richard M. "An introduction to wavelets." (2000).
 18. Рудий Є. М. Технології передачі дискретних повідомлень. Модуль 1: Стиснення телефонних сигналів: Навчальний посібник. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2013. – 102 с.

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

№	Формат	Найменування	Кількість листів	Примітки
<i>Документація</i>				
1	A4	Реферат	2	
2	A4	Список умовних скорочень	1	
3	A4	Зміст	2	
4	A4	Вступ	2	
5	A4	Стан питання. Постанова задачі	21	
6	A4	Спеціальна частина	23	
7	A4	Економічний розділ	4	
8	A4	Висновки	1	
9	A4	Перелік посилань	2	
10	A4	Додаток А	1	
11	A4	Додаток Б	1	
12	A4	Додаток В	1	
13	A4	Додаток Г	1	

ДОДАТОК Б. Перелік документів на оптичному носії

- 1 Електронна версія пояснювальної записки (Пояснювальна Записка Кучерявий.docx та Пояснювальна Записка Кучерявий.pdf)
- 2 Електронна версія демонстраційного матеріалу (Презентація Кучерявий.pdf)

ДОДАТОК В. Відгук керівника економічного розділу

ВІДГУК

Керівник розділу

(підпис)

Романюк Н.М.

ДОДАТОК Г. Відгук керівника кваліфікаційної роботи

ВІДГУК

на кваліфікаційну роботу бакалавра

**на тему: «Дослідження методів стиснення телефонного сигналу»
студента групи 172-20-1 Кучерявого Миколи Борисовича**

Керівник дипломної роботи,

**Професор _____ Гусєв О. Ю.
(підпис)**