Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _ інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації_
(повна назва)

Кафедра _ медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем_____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____другий (магістерський)_____

_____Методи реставрації старих звукозаписів._____ _____ ___
_____
(тема)

Виконав:
студент _2_ курсу, групи ___МІм-22-1___
_____Подлєсний А.А. _____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та_____
_____радіотехніка_____
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми ___освітньо-професійна_____

Освітня програма _____Медіаінженерія_____
(повна назва освітньої програми)

Керівник _____доц. Посошенко В.О._____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ ___Володимир КАРТАШОВ__
(підпис)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 20 ___ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Подлєсному Артему Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи реставрації старих звукозаписів.

затверджена наказом по університету від "_20_"_____10_____ 2023 р. № ___1224 Ст____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____10.01.2024 р._____

3. Вихідні дані до роботи Тип запису – аналоговий. Тип носія – магнітний, механічний, фотографічний. Типи шуму – нестаціонарні змінні, переривчасті, імпульсні. Відношення сигнал-шум 20…24дБ. Провести аналіз особливостей запису-відтворення звуку з аналогових носіїв. Виконати аналіз шумів та перешкод в аналогових фонограмах та побудувати загальну модель процесу реставрації. Виконати практичну реставрація та ремастеринг звукозапису концерту з магнітофонної фонограми.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Вступ
1 Аналіз особливостей запису-відтворення звуку з аналогових носіїв.
2 Теоретичний аналіз шумів та перешкод в аналогових фонограммах та загальна модель процесу реставрації.
3 Практична реставрація та ремастеринг фонограм.
Висновки
Перелік посилань
Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов’язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Постановка задачі (1 аркуш А4).
2. Мета роботи (1 аркуш А4).
3. Класифікація методів запису (1 аркуш А4).
4. Шуми, перешкоди і спотворення (1 аркуш А4).
5. Вираз для процедур корекції (1 аркуш А4).
6. Алгоритм відновлення (1 аркуш А4).
7. Корекція стереопанорами (1 аркуш А4).
8. Mid-Side кодування (1 аркуш А4).
9. Денойзер (1 аркуш А4).
10. Декліпер (1 аркуш А4).
11. Відновлення магнітофонного запису (1 аркуш А4).
12. Оцифровка (1 аркуш А4).
13. Деклікер (1 аркуш А4).
14. Поєднання гістограми та хвильоформи (1 аркуш А4).
15. Поєднання гістограми та спектру (1 аркуш А4).
16. Динамічна обробка (1 аркуш А4).
17. Частотна обробка (1 аркуш А4).
18. Ремастеринг (1 аркуш А4).
19. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.23–27.09.23	
2	Теоретичний аналіз шумів і перешкод	28.09.23–11.10.23	
3	Оцифровка магнітного запису	12.10.23–10.11.23	
4	Відновлення і реставрація	11.11.23–03.12.23	
5	Обробка результатів	04.12.23–17.12.23	
6	Графічна частина роботи	18.12.23–17.12.23	
7	Перевірка керівником	18.12.23–30.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	02.01.24–05.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	06.01.24–09.01.24	

Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

Студент _____ Артем ПОДЛЄСНИЙ
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ПОСОШЕНКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 82 сторінки, 39 рисунків, 29 джерел.

АНАЛОГОВИЙ, АРТЕФАКТ, ВІДНОВЛЕННЯ, ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИЙ, ЗВУК, КРИТЕРІЙ ЯКОСТІ, МАГНІТНИЙ, МЕХАНІЧНИЙ, ЦИФРОВИЙ, НОСІЙ ЗАПИСУ, РЕСТАВРАЦІЯ, ФОНОГРАМА, ФОТОГРАФІЧНИЙ

Об’єкт дослідження – процеси реставрації та відновлення аналогових звукозаписів.

Предмет дослідження – методи реставрації та відновлення аналогових звукозаписів з метою наближення результату очищення до оригіналу як за об’єктивними характеристиками, так і за сприйняттям на слух.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні методів та засобів проведення реставраційних і відновлювальних робіт з аналоговими фонограмами, визначенні їх ефективності для подальшого застосування в різних сферах.

У першому розділі розглянуті фізичні принципи аналогового запису та відтворення звукових сигналів на різні типи носіїв, виявлені характерні спотворення, що виникають під час цих процесів і методи боротьби з ними. В другому розділі розглянуто шуми та перешкоди, що виникають при відтворенні аналогових звукозаписів. Складено загальний алгоритм дій при відновленні і реставрації. В третьому розділі виконано практична реставрація та ремастеринг магнітофонного запису живого концерту Віктора Цоя.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 82 pages, 39 figures, 29 sources.

ANALOGUE, ARTIFACT, RESTORATION, ELECTROACOUSTIC, SOUND, QUALITY CRITERION, MAGNETIC, MECHANICAL, DIGITAL, RECORDING MEDIA, RESTORATION, PHONOGRAPHIC, PHOTOGRAPHIC

The object of research is the processes of restoration and restoration of analog sound recordings.

The subject of the research is the methods of restoration and restoration of analog sound recordings with the aim of bringing the cleaning result closer to the original both in terms of objective characteristics and in terms of auditory perception.

The purpose of the qualification work is to research the methods and means of carrying out restoration and recovery works with analog phonograms, determining their effectiveness for further application in various fields.

In the first chapter, the physical principles of analog recording and reproduction of sound signals on different types of media are considered, characteristic distortions that occur during these processes and methods of combating them are identified. The second chapter deals with noises and interferences that occur during playback of analog sound recordings. A general algorithm of actions during recovery and restoration has been compiled. In the third section, the practical restoration and remastering of the tape recording of Viktor Tsoi's live concert was performed.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць,
скорочень і термінів……8
Вступ……..9
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАПИСУ-ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ
З АНАЛОГОВИХ НОСІЇВ……...……11
1.1 Класифікація фонограм та задач по їх відновленню……...……..11
1.2 Принципи магнітного звукозапису……...….13
1.3 Спотворення при магнітному звукозаписі……..15
1.4 Принципи грамзапису……..…….....20
1.5 Спотворення при грамзаписі……....23
1.6 Принципи фотографічного звукозапису…….……....25
1.7 Шуми і спотворення в фотографічних звукозаписах…….....26
1.8 Висновки по розділу 1…….…….29
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШУМІВ ТА ПЕРЕШКОД
В АНАЛОГОВИХ ФОНОГРАММАХ
ТА ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕСТАВРАЦІЇ……..……...31
2.1 Шуми та перешкоди при магнітному записі……..…31
2.1.1 Шум паузи…….……32
2.1.2 Модуляційні спотворення та шуми…….……32
2.1.3 Перехідні перешкоди……..……...35
2.1.4 Копіефект……..……...….35
2.2 Шуми та перешкоди при механічному записі……36
2.2.1 Грамофонний шум…….……...…….36
2.2.2 Клікер-шум (клацання)……..……...…….37
2.2.3 Нелінійні спотворення……..……37
2.2.4 Призвуки……..……...38
2.2.5 Резонанси…….……39
2.2.6 Обмеження частотного діапазону…….....39

2.3 Шуми та перешкоди при фотографічному записі……..39
2.4 Загальна модель відновлення
та реставрації аналогових звукозаписів……..……..41
2.5 Загальний алгоритм дій при відновленні і реставрації…….…....44
2.5.1 Придушення клацань……...…….44
2.5.2 Придушення crakle……44
2.5.3 Налаштування стерео балансу…….…….45
2.5.4 Мід-Сайд кодування…….…….46
2.5.5 Шумоочищення……..…..…..47
2.5.6 Боротьба з нелінійними спотвореннями……..……48
2.5.7 Загальний алгоритм реставрації
та відновлення фонограм……49
2.6 Висновки по розділу 2…….…….50
3 ПРАКТИЧНА РЕСТАВРАЦІЯ ТА РЕМАСТЕРИНГ ФОНОГРАМ…….52
3.1 Вибір програмного забезпечення…….……..52
3.2 Оцифровка з аналогового носія……...……53
3.3 Відновлення…….……54
3.3.1 Перший етап відновлення…….……54
3.3.2 Другий етап відновлення…….…….……60
3.3.3 Третій етап відновлення…….……...……71
3.4 Висновки по розділу 3…….……72
Висновки……75
Перелік джерел посилання……...79
ДОДАТКИ……..83
Додаток А. Графічний матеріал……...84
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....103

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифрове перетворення;

ВЧ – верхні частоти;

ВЧП – високочастотне підмагнічування;

ГВ – головка відтворення;

ГЗ –головка запису;

ГМ – гучномовець;

ГП – грамплатівка;

ГС – головка стирання;

ГСП – генератор стирання та підмагнічування;

ЕРС – електрорушійна сила;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ЗС – звуковий сигнал;

КД – компакт-диск;

МП – магнітна плівка;

НЧ – нижні частоти;

НЗ – носій запису;

СПМ – стрічкопротяжний механізм;

К1, К2 – котушки;

ПЗ – підсилювач запису;

ПВ – підсилювачем відтворення;

ПЗ – програмний засіб, програмне забезпечення;

PEAQ – Perceptual Evaluation of Audio Quality (перцептуальна оцінка якості аудіо);

PPM – Peek Program Meter (вимірювач пікових значень);

RMS – Root Mean Square (середньоквадратичне);

VU – Volume Unit (одиниця рівня).

ВСТУП

За більше ніж 140 років існування звукозапису людство накопичило дуже велику кількість аудіоінформації. Загальні обсяги звукового контенту, що зберігається на різноманітних носіях, важко оцінити точно в числовому представленні.

Звукозапис, як технологія, почався в 1877 р. Тоді американський вчений Т. Едісон розробив фонограф – пристрій звукозапису на циліндричний носій. До появи фонографа були спроби звукозапису, але без можливості відтворення з нього.

Пізніше, у 1887 р., американський винахідник німецького походження Е. Берлінер розробив і запатентував пристрій механічного запису звуку – грамофон. Головною відмінністю грамофона від фонографа був носій у вигляді диска, який пізніше назвали грамофонною платівкою. Саме з грамофонних платівок і почалась ера масової звукоіндустрії і, зокрема, звукозапису, адже платівки можна було легко тиражувати.

Така ситуація тривала до 60-70-х років XX століття, коли на зміну прийшов магнітний звукозапис. Ера масового магнітного звукозапису досягла піку у 80-х роках з масовим поширенням касет з магнітною плівкою. Перевагою магнітного запису була можливість неодноразового перезапису на носій, що зумовило появі великої кількості магнітних фонограм як професійного, так і побутового призначення.

Якість архівних магнітних фонограм дуже різниться – від високоякісних студійних, до поганих побутових. Основним недоліком магнітних фонограм є погіршення якості в процесі перезапису, зокрема збільшення структурного шуму магнітного носія.

Важливим моментом у розвитку звукозапису необхідно зазначити і звукозапис на фотографічну плівку, що широко використовували у кінематографії. Фотооптичний запис звукового супроводу кінофільмів бере свій початок з 1901 р., коли німецький фізик Е. Румер створив пристрій

запису на фотоплівці з назвою «Фотографофон». Для фотографічного запису звуку використовували фотоплівку, на якій звукова доріжка формувалась за рахунок зміни світлового потоку, що потрапляв на фоточутливий шар плівки.

Отже, аналоговий звукозапис як технологія сформувався за такими напрямками: механічний запис звуку на грамплатівці; магнітний запис на магнітній стрічці; фотографічний запис на кіноплівці.

На носіях фонограм за всі роки існування звукозапису накопичились великі обсяги архівних записів, що становлять велику цінність як з історичної точки зору, так і з технологічної та технічної сторін.

Якісні показники звукозапису за різними технологіями суттєво відрізняються. Більш того, суттєво можуть відрізнятися і якісні показники звуковідтворення фонограм після тривалого зберігання.

Сучасний підхід вимагає високої якості звуковідтворення при використанні комп‘ютерних технологій. Крім того, у масовому використанні на даний час майже не використовують аналогові фонограми. З точки зору історичної цінності фономатеріалів, що зберігаються на аналогових носіях існує необхідність переведення їх у сучасний вид, а саме на цифровий носій і, зокрема, у комп‘ютерне середовище. Тому для формування сучасного звукового контенту необхідна реставрація і відновлення аналогових фонограм.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні методів та засобів проведення реставраційних і відновлювальних робіт з аналоговими фонограмами, визначенні їх ефективності для подальшого застосування в різних сферах.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАПИСУ-ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ З АНАЛОГОВИХ НОСІЇВ

1.1 Класифікація фонограм та задач по їх відновленню

Фонограма (від грец. φωνή "звук" + γράμμα "запис") – звукові сигнали, отримані в результаті звукозапису і що містяться на аналоговому або цифровому носії, або записані в певному файлі.

В нашій роботі розглядаємо реставрацію аналогових фонограм. Фонограми класифікують відповідно принципу запису – зчитування;

Залежно від носія запису розрізняють [1]:

– фотографічні фонограми (на кіноплівках);

– магнітні фонограми (на магнітних стрічках);

– механічні фонограми (на грамплатівках).

Умовна класифікація аналогових фонограм показана на рис.1.1.

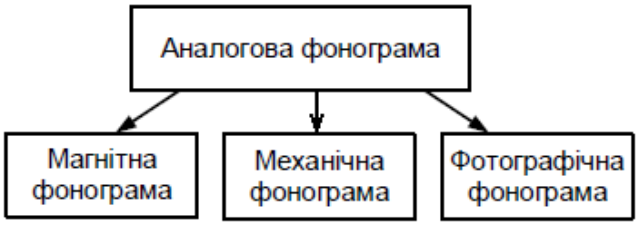


Рисунок 1.1 – Умовна класифікація аналогових фонограм

З урахуванням передбачуваних робіт з реставрації та відновлення фонограма може бути [2]:

– втраченою за рахунок присутності дефектів носія або умов зберігання. На жаль, така фонограма повному відновленню не підлягає;

– не мати помітних дефектів, обумовлених артефактами носія або умовами зберігання і в цьому випадку може бути перезаписана на інший, сучасний цифровий носій без зміни показників якості;

– без зміни показників якості, призначена для подальшого зберігання. Такі фонограми перезаписують на інший носій для продовження терміну

зберігання. Для таких фонограм можлива обробка тільки артефактів носія, наприклад, видалення шумів магнітної стрічки;

– з поліпшеними якісними показниками. Такі фонограми, в першу чергу, обробляють для покращення сприйняття їхнього звуку, наданню їм звучання, яке можна порівняти з сучасними стандартами;

– фонограма-ремастерінг – це фонограма зі зміною не тільки параметрів записаного сигналу, але й синтезом нових частотних складових, формуванням нового звучання фонограми, додавання нових інструментів в фонограму, перемікшування каналів для багатоканальної фонограми та інше;

– з поліпшеними якісними показниками для використання фонограм в сучасних мультимедійних додатках;

– з поліпшеними якісними показниками для використання фонограм в домашніх звукотехнічних комплексах, для індивідуального прослуховування.

На рис. 1.2 наведено класифікацію задач відновлення фонограм [3].

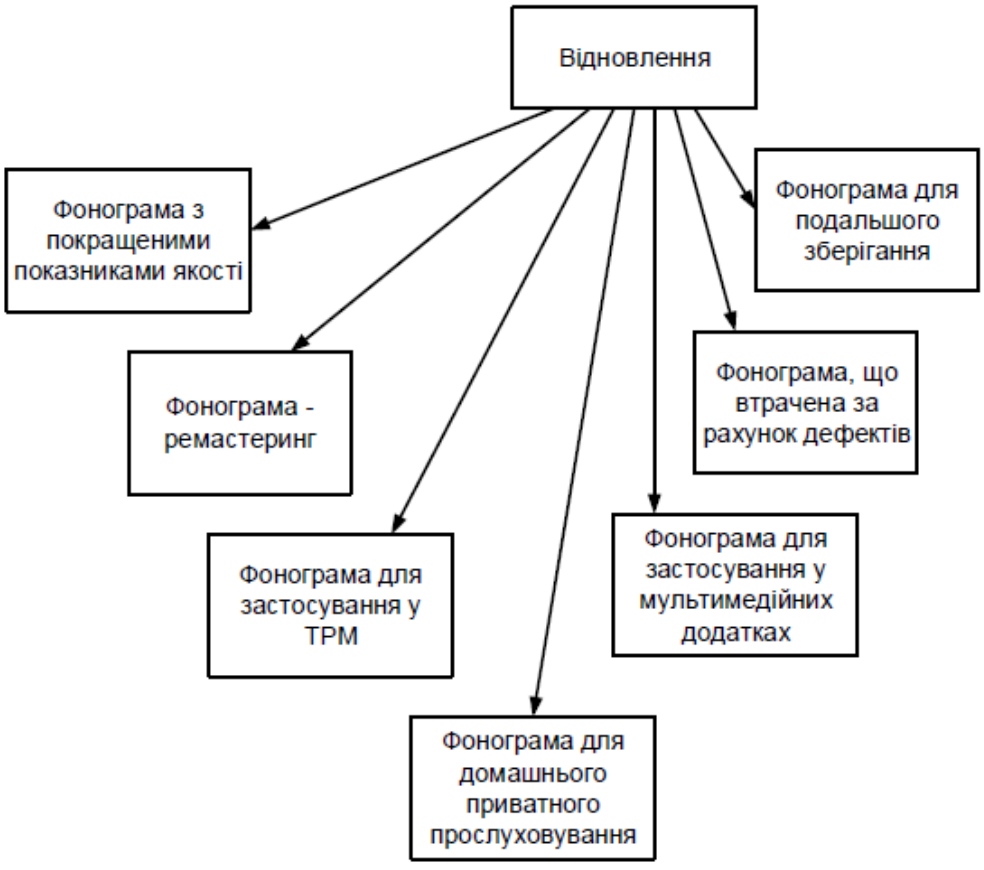


Рисунок 1.2 – Класифікація задач відновлювання фонограм

Якісні показники фонограм після реставрації і відновлення фонограм мають відповідати сучасним вимогам [4]. Оцінка якості відновлених після реставрації фонограм є важливим фактором для подальшого їх використання як сучасного аудіоконтенту в технологіях. Якість фонограм, в першу чергу, оцінюють наявністю, кількістю та помітністю артефактів у фонограмі, а, в другу чергу, якістю і характеристикам корисного сигналу.

Для контролю якості фонограм в процесі реставрації використовують суб'єктивні та об'єктивні методи, які можуть застосовувати як в оперативному, так і неоперативному режимах.

1.2 Принципи магнітного звукозапису

Магнітний запис звукових сигналів заснований на зміні ступеня намагніченості матеріалу, який утворює робочий шар носії інформації – зазвичай стрічці. Носій інформації переміщається відносно пристрою запису – головки, що створює, змінне магнітне поле пропорційне записуваному сигналу. При відтворенні магнітний потік носія інформації наводить ЕРС самоіндукції в обмотці головки відтворення. Потім цей сигнал підсилюється і за потреби коригується.

Узагальнена структурна схема пристрою магнітного запису та відтворення сигналів представлена на рис. 1.3 [5].

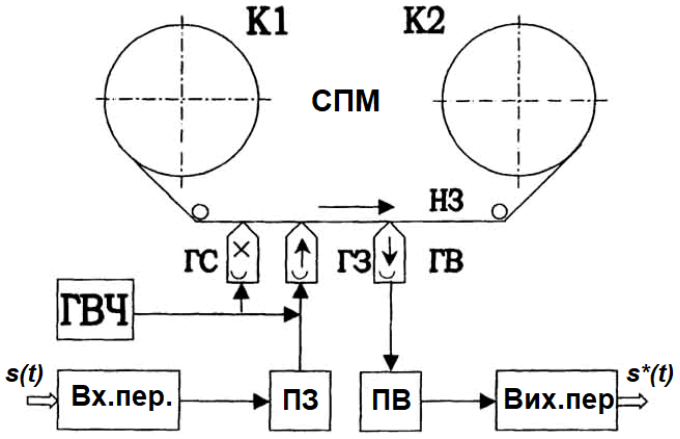


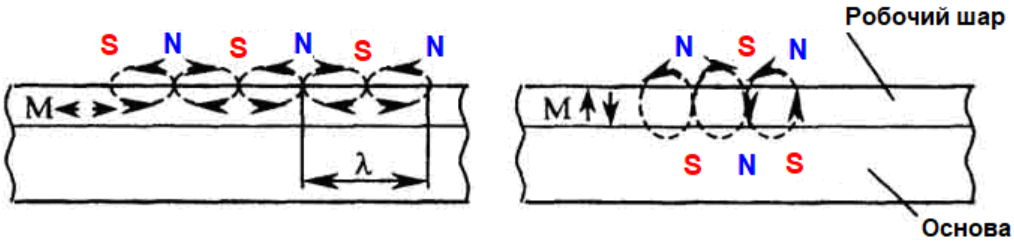
Рисунок 1.3 – Структурна схема пристрою магнітного запису та відтворення сигналів

Переміщення носія запису (НЗ) здійснює рушійний механізм, який у разі використання стрічки як НЗ називається стрічкопротяжним (СПМ). Стрічковий механізм перемотує носій запису з котушки К1 на котушку К2. Запис сигналу здійснює магнітна головка запису (ГЗ), а відтворення – головка відтворення (ГВ).

Вхідний сигнал подається в обмотку записуючої головки і створює в її сердечнику магнітний потік. Сердечник головки має робочий зазор, в районі якого виникає потік розсіювання, носій запису, що намагнічує. У процесі запису НЗ переміщається щодо ГЗ, отже зміни електричного сигналу у часі перетворюються на зміни намагніченості по довжині НЗ. При відтворенні НЗ транспортується біля ГВ, причому частина залишкового магнітного потоку носія протікає в сердечник ГВ і наводить ЕРС в її обмотці.

Сигнали, що записуються, посилюються підсилювачем запису ПЗ, а відтворювані – підсилювачем відтворення ПВ.

При записі носій запису може намагнічуватися вздовж напрямку запису (подовжньо), або під кутом 90° до носія (перпендикулярно) – рис. 1.4. Перпендикулярний запис дозволяє істотно збільшити щільність запису (більше 20000 на 1 мм довжини доріжки) і застосовується в основному для цифрового запису сигналів [5].



а) б)

Рисунок 1.4 – Продольний (а) і перпендикулярний (б) запис

Для запису НЗ необхідно підготувати, тобто. видалити з нього записані раніше сигнали. Процес видалення сигналів з НЗ називається стиранням та здійснюється за допомогою головки стирання (ГС), на яку подається високочастотний сигнал від генератора ГВЧ. Ці ж високочастотні коливання

подаються в головку запису разом з сигналом для поліпшення характеристик запису. Такий режим запису називається записом із високочастотним підмагнічуванням.

Тракт запису-відтворення, який розташовується від входу головки запису до виходу головки відтворення, має певні амплітудно-частотні, фазові та амплітудні характеристики, причому ці характеристики не ідеальні. Тому запис та відтворення сигналів супроводжуються спотвореннями, величина та характер яких залежать від режиму запису, властивостей стрічок, головок та особливостей їх взаємодії. Спотворення сигналів частково компенсуються шляхом внесення попередніх спотворень у записувані сигнали в вхідному перетворювачі (Вх. пер.), а сигнали, що відтворюються, піддають корекції в вихідному перетворювачі (Вих. пер.).

1.3 Спотворення при магнітному звукозаписі

Вираз (1.1) встановлює зв'язок між магнітним потоком Φ_{r0} в голівці та залишковим потоком доріжки Φ [6].

$$\Phi(x) = \Phi_{r0} \cdot K_\delta K_a K_d \sin \Omega x . \qquad (1.1)$$

З (5.4) видно, що потік у голівці менше потоку доріжки в $K_\delta K_a K_d$ раз. Коефіцієнти K_δ, K_a, K_d залежать від довжини хвилі і тому втрати, що їх описують, є хвильовими.

Кожен з коефіцієнтів визначається яким-небудь одним конструктивним фактором, тому

– K_δ носить назву коефіцієнта щілинних втрат,

– K_a – коефіцієнта контактних втрат,

– K_d – коефіцієнта шарових втрат.

Максимальне значення кожного з коефіцієнтів дорівнює 1. Вони не

визначають максимальну величину відтворюваного сигналу, а характеризують відмінність у рівнях при відтворенні сигналів з різною довжиною хвилі.

Щілинні втрати, що описуються коефіцієнтом K_δ, виникають через кінцеву ширину δ робочого зазору головки відтворення [6]:

$$K_\delta = \left| \sin\left(\frac{2\pi\delta}{0{,}88\lambda} \right) \right| / \frac{2\pi\delta}{0{,}88\lambda}, \qquad (1.2)$$

де коефіцієнт 0,88 враховує різницю між геометричною та ефективною шириною зазору.

Графік функції K_δ представлений на рис.1.5. З цього графіка видно, що функція має періодичний характер, причому, перший нуль (ЕРС відтворення дорівнює нулю) з'являється в тому випадку, коли довжина хвилі запису λ дорівнює ширині робочого зазору δ [6].

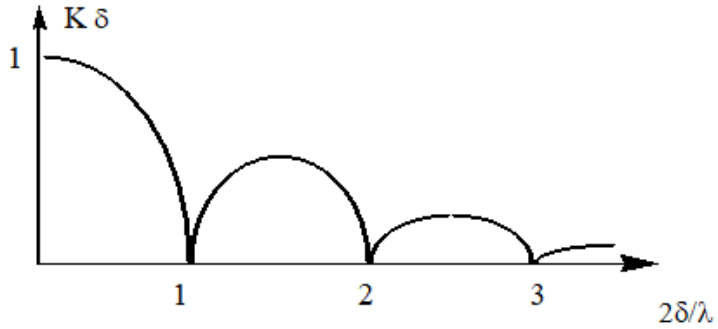
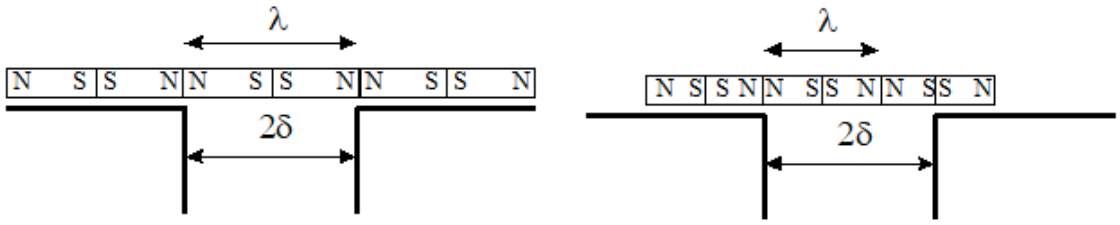


Рисунок 1.5 – Графік коефіцієнта щілинних втрат

Природно, що сигнал при цьому не може бути відтворений, тому що різниця магнітних потенціалів між полюсами головки дорівнює нулю. Це пояснює рис.1.6 [6], на якому в спрощеному вигляді показано розподіл елементарних магнітів для: а) $2\delta=\lambda$,б) $2\delta=1{,}5\lambda$.

Щілинні спотворення істотно впливають на частотну характеристику магнітофона. Так, для магнітофона, в якому використовується головка відтворення із шириною робочого зазору 5 мкм при швидкості руху носія 4,76 см/сек., частота першого нуля віддачі становить близько 9,5 кГц.



а) б)

Рисунок 1.6 – Розподіл елементарних магнітів для: а) 2δ=λ,б) 2δ=1,5λ

Щілинні втрати знижуються при зменшенні ширини робочого зазору та зі збільшенням швидкості руху стрічки. Необхідно, щоб максимальна частота, що відтворюється магнітофоном, була меншою за частоту, на якій з'являється перший нуль щілинної функції. Головку і швидкість протяжки звуконосія вибирають таким чином, щоб щілинні втрати на верхній робочій частоті не перевищували 4-6 дБ.

Поява контактних втрат пов'язана з тим, що стрічка не притиснута повністю до голівки і тому лише частина залишкового потоку замикається через осердя головки і створює корисний ефект. Для пояснення частотної залежності контактних втрат звернемося до рис.1.7 [6].

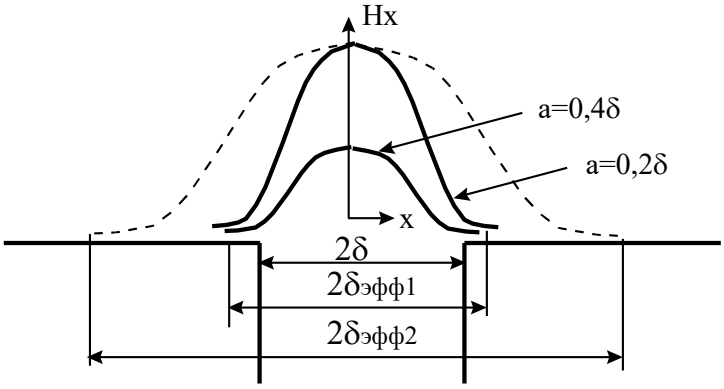


Рисунок 1.7 – Зміна статичного поля магнітної головки за різних відстаней стрічки від головки (неконтакт)

На підставі рис. 1.7 ми можна зробити висновок про те, що чим далі стрічка віддалена від головки, тим більша ефективна ширина зазору, що у свою чергу призводить до хвильових втрат на верхніх звукових частотах.

Розрахунок контактних втрат може бути зроблений за формулою [6]:

$$K_a = 20\lg\left|\frac{1}{e^{-2\pi a/\lambda}}\right| = 54{,}6\frac{a}{\lambda},\ \text{дБ}. \qquad (1.3)$$

При $a = \lambda$ віддача стрічки падає більш ніж у 500 разів у порівнянні з відтворенням при щільному контакті з голівкою. Оскільки мінімальна довжина хвилі запису близько 1 мкм, ясно, що контактні втрати є джерелом значних спотворень відтворюваного сигналу.

Фізичну породу шарових втрат можна пояснити наступним чином. Уявімо, що робочий шар носія запису кінцевої товщини розбитий на велику кількість тонких шарів. Кожен такий шар віддалений від головки на певну відстань і створює в осерді головки магнітний потік. Отже, для кожного елементарного шару створюваний ним потік залежатиме від того, наскільки він віддалений від головки. Ми можемо розглядати шарові втрати як окремий випадок контактних втрат. Таким чином, чим товстіший робочий шар стрічки, тим більша різниця між віддачею при відтворенні сигналів з довгими і короткими хвилями запису. Відповідно втрати зменшуються і абсолютне значення віддачі, що погіршує відношення сигнал/шум.

Розрахунок шарових втрат, виконується за формулою [6]:

$$K_d = 20\lg\frac{2\pi d/\lambda}{1-\dfrac{1}{2\pi d/\lambda}},\ \text{дБ} \qquad (1.4)$$

і показує, що при $d = 5\lambda$ шарові втрати знижують віддачу більш як у 30 раз.

Розглядаючи амплітудно-хвильову характеристику тракту відтворення, необхідно враховувати індукційний характер відтворення. Відповідно до закону електромагнітної індукції ЕРС в головці визначається зміною залишкового магнітного потоку [6]

$$\varepsilon = -n\frac{d\Phi_r}{dt}, \tag{1.5}$$

де n – кількість витків в обмотці головки.

Підставивши (1.1) у (1.5), отримаємо [6]

$$\varepsilon = \Phi_{r0} n\Omega K_\delta K_a K_d \sin \Omega t, \tag{1.6}$$

З останньої формули видно, що відтворюваний сигнал пропорційний частоті записаного сигналу. Таким чином, навіть для ідеального процесу відтворення частотна характеристика має нахил 6 дБ на октаву. Однак, починаючи з частот 11,5 кГц хвильові втрати перевищують приріст напруги за рахунок індукційного характеру відтворення.

Результуюча амплітудно-хвильова характеристика магнітного тракту відтворення представлена на рис.1.8 [7].

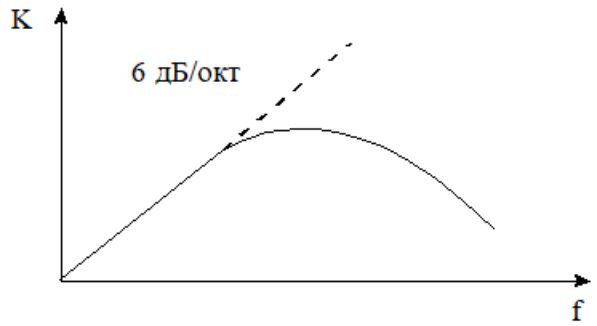


Рисунок 1.8 – Амплітудно-хвильова характеристика магнітного тракту відтворення

Амплітудно-частотні спотворення магнітного запису залежать від режимів запису, властивостей стрічок, головок та особливостей їхньої взаємодії.

Характерний вид АЧХ магнітної ланки магнітофона зображений на рис.1.9 кривою 1. Крива 2 зображує необхідну АЧХ кіл корекції, а крива 3. необхідну АЧХ наскрізного каналу запису-відтворення [7].

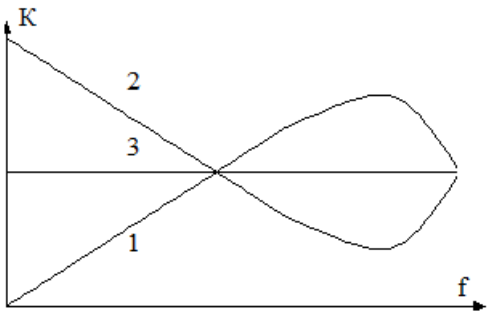


Рисунок 1.9 – Коригування АЧХ тракту запису-відтворення магнітофону

В принципі, компенсацію хвильових втрат відтворення та запису можна було б здійснити в одному з підсилювачів: запису або відтворення. Але здійснення компенсації тільки в підсилювачі запису призводить до надмірного збільшення струму запису на високих частотах, насичення стрічки та зростання нелінійних спотворень. Повна компенсація втрат в підсилювачі відтворення разом з посиленням ослаблених через втрати корисних сигналів викликає збільшення рівня шумів магнітної стрічки і самого підсилювача. Тому корекцію частотної характеристики розподіляють між каналами запису та відтворення.

1.4 Принципи грамзапису

Грамплатівка (частіше просто платівка) – аналоговий носій звукової інформації – диск, на одній або на обох сторонах якого тим чи іншим методом нанесена безперервна звивиста канавка (доріжка), форма якої (глибина та ширина) модульована звуковою хвилею [10].

При русі по доріжці грамплатівки, голка програвача починає вібрувати (оскільки форма доріжки нерівномірна в площині пластинки вздовж її радіусу і перпендикулярно до напрямку руху голки, і залежить від записаного сигналу, рис.1.10 [10]). При вібрації голки, електромагнітна котушка звукознімача виробляє електричний сигнал, який підсилюється підсилювачем і далі відтворюється динаміками, відтворюючи звук, записаний у студії звукозапису.

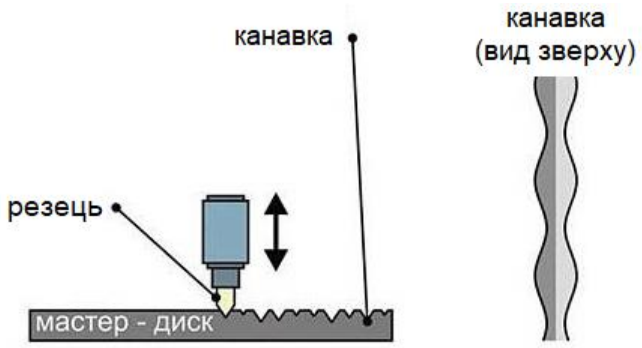


Рисунок 1.10 – Механічний запис звуку

Класично, звук з магнітної фонограми, за допомогою спеціальної апаратури, перетворюється на механічні коливання різця, який нарізає на шарі матеріалу концентричні звукові канавки. На зорі грамзапису фонографічні записи нарізалися на воску, згодом — на фонографічній фользі, покритій нітроцелюлозою, надалі фонографічна фольга була замінена мідною фольгою.

Нанесення доріжок на найтоншому шарі аморфної міді, що покриває ідеально рівну сталеву підкладку, дозволило значно підвищити точність відтворення записаного сигналу, що призвело до помітного поліпшення звучання фонографічних записів. Ця технологія, розроблена фірмою Teldec наприкінці 70-х років і відома під назвою DMM (Direct Metal Mastering), застосовується досі.

На рис.1.11 показана схема будови електромагнітної головки звукознімача [10].

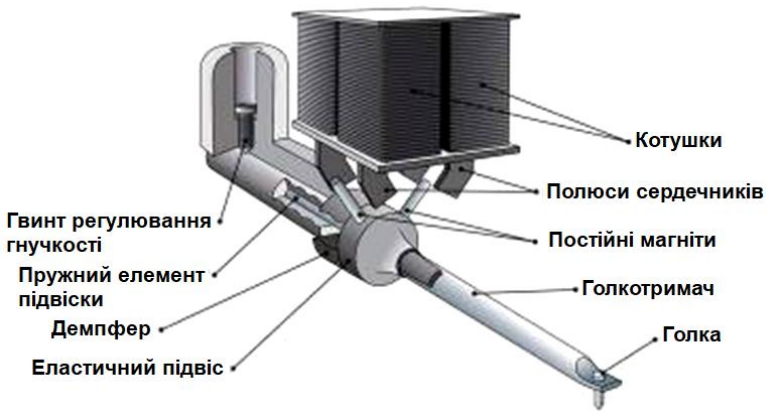


Рисунок 1.11 – Схема будови електромагнітної головки звукознімача

Головки звукознімачів із рухомим магнітом є найпоширенішими після п'єзоелектричних головок звукознімачів. Їхня проста і надійна конструкція придатна для великосерійного виробництва. У разі зношування голки, вставку з голкотримачем можна замінити без застосування будь-яких інструментів.

Вихідний сигнал, що відповідає механічним рухам голки, виникає в голівці відповідно до принципу перетворення, відомого під назвою магнітної індукції. Якщо змінюється кількість магнітних силових ліній, що пронизують котушку, що знаходиться в стані спокою, то в ній індукується змінна електрорушійна сила. У голівці звукознімача голка передає свої коливання дуже малому постійному магніту, що знаходиться перед нерухомою котушкою.

Якщо голку такої головки встановити на платівку, симетрія магнітного ланцюга, що була раніше, порушується, північний полюс магніту наближається до верхнього, а південний полюс до нижнього полюсного наконечника. Тому певна кількість силових ліній, які раніше замикалися через великий магнітний опір повітря, замкнеться через ланцюг з м'якого заліза, що має менший магнітний опір. Магнітний ланцюг з м'якого заліза оточують дві котушки. Доки магніт рухається між двох крайніх положень, видимих на середньому і нижньому малюнках, магнітний потік буде перетинати внутрішню частину котушок з частотою, що збігається з частотою коливань голки, і на висновках котушок виникає змінна напруга. Значення цієї напруги залежить немає від абсолютного значення записаної на платівці амплітуди, як від значення коливальної швидкості записи, т. е. від частоти і відхилення. Отже, головка з рухомим магнітом, як і всі магнітні перетворювачі, відноситься до групи швидкісних головок звукознімачів.

При постійній коливальній швидкості запису зміна магнітного потоку залежатиме від кількох факторів. Частина з них має геометричний характер, як, наприклад, відношення відстані між голкою та центром коливань до

відстані між магнітними полюсами і центром коливань, що становить передатне число (для відомості, це відношення може дорівнювати 5:1) або відстань між магнітом і полюсними наконечниками. Останнє слід вибирати якнайменшим для збільшення чутливості і якнайбільшим для зменшення спотворень, зумовлених намагнічуванням м'якого заліза (мю-металу). Зміна потоку в основному залежить від енергії, укладеної в магніті, тобто від магнітної сили, тому прийнято вибирати такий магнітний матеріал, який з малою масою (5-10 мг) здатний створити сильне магнітне поле.

При цій швидкості запису та встановленій вище зміні потоку вихідна напруга залежить від параметрів обмотки. Більше число витків означає вищу напругу, але збільшення витків без збільшення корпусу котушки може бути здійснено тільки шляхом подальшого зменшення діаметра і без того тонкого дроту. Кордон встановлюється, з одного боку, технологією намотування, з другого збільшенням власної ємності обмотки, яка несприятливо відбивається під час амплітудно-частотної характеристики у сфері високих частот. Тому, використовуючи провід з діаметром у кілька сотих міліметрів, можна намотати оптимальну котушку в 2500 витків [10].

На магнітопроводі поміщають дві з'єднані зустрічно котушки таким чином, щоб вихідні сигнали, що індукуються завдяки зміні магнітного потоку, складалися. У той же час обмотки пронизуються силовими лініями зовнішнього магнітного поля, що викликає перешкоди. Однак напруги шумів, що визначаються зовнішнім полем, взаємно компенсуються.

1.5 Спотворення при грамзаписі

Звукознімач є досить складною механічною коливальною системою, що складається з ряду ланок, кожна з яких має переважний вплив у відповідній області частот. Цей вплив характеризується небажаними резонансами, що псують відтворення. Число резонансних піків та їх величина залежать від конструкції та виконання звукознімача. Однак для будь-якого

звукознімача характерна наявність низькочастотного, високочастотного та проміжного резонансів.

Частотна характеристика запису для моно- і стереофонічних грампластинок ідентична. На рис. 1.12 [11] наведена частотна характеристика каналу запису (крива 1), яка являє собою виражену у дБ залежність амплітуди коливальної швидкості (добуток амплітуди зміщення канавки на кутову частоту записаного сигналу) різця рекордера від частоти сигналу, поданого на вхід каналу постійної амплітуді у всьому частотному діапазоні. Хід частотної характеристики з завалом на низьких звукових частотах і підйомом на високих вибраний з розрахунку найбільших допустимих рівнів запису, при яких голка звукознімача огинає модульовану канавку без втрати контакту. В області низьких частот рівень запису обмежується найбільшою амплітудою зміщення різця, що дорівнює 40 мкм для поперечного і 20 мкм для глибинного запису.

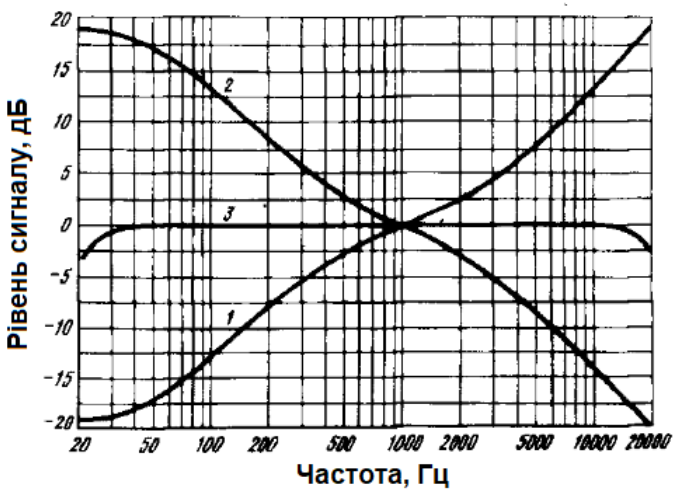


Рисунок 1.12 – Частотні характеристики грамофонного запису (1), відтворення (2) і результуюча характеристика (3)

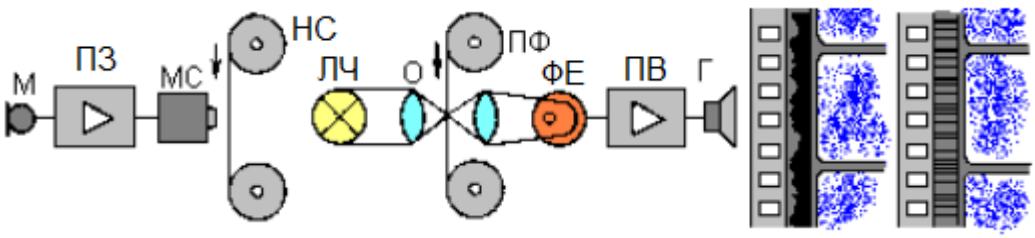
В області високих частот при записі з постійною швидкістю коливальної амплітуда зміщення канавки стає порівнянною зі своєю шорсткістю поверхні вінілової грамплатівки. Тому, враховуючи спад спектральної щільності реальних музичних сигналів в області високих частот, для зменшення відносного рівня шумів запис на частотах вище 1000 Гц виробляють з постійною амплітудою канавки.

На практиці необхідні ділянки запису з постійними швидкістю та амплітудою формують за допомогою частотної передкорекції запису. Така характеристика була запропонована Американською асоціацією виробників звуковідтворювальної апаратури (звідки і походить назва характеристики RIAA – Record Industry Association of America), рекомендована Міжнародною електротехнічною комісією та увійшла до національних стандартів більшості країн [12]. Реальна характеристика передкорекції формується відповідними RC-ланцюгами.

Для отримання лінійної результуючої частотної показники, тобто. звучання, що відповідає оригиналу, нерівномірність частотної характеристики каналів відтворення (рис. 1.12, крива 2) повинна компенсувати нерівномірність частотної характеристики каналу запису. Обидві частотні характеристики мають дзеркальне відображення відносно нульової лінії.

1.6 Принципи фотографічного звукозапису

Фотографічний запис заснований на впливі потоку світла на світлочутливий шар носія запису – кінострічки (рис. 1.13 [12]). Електричний сигнал від мікрофона (М) через підсилювач запису (ПЗ) подається на модулятор світла (МС). Промодульований світловий потік утворює на світлочутливому шарі негативної стрічки НС вузький штрих змінної ширини або змінної інтенсивності.



а) б) в)

Рисунок 1.13 – Схема фотографічного запису звуку (а) та оптичні фонограми змінної ширини (б) і змінної щільності (в)

Після фотохімічної обробки та копіювання утворюється позитивна фонограма (ПФ). При відтворенні джерело світла – лампа читання (ЛЧ) – за допомогою оптичної системи (ОС) створює в площині позитивної фонограми вузький штрих читання. Промодульований фонограмою світловий потік потрапляє на фотоелемент (ФЕ).

Розрізняють фонограму змінної ширини (рис. 1.13, б) та змінної щільності (рис. 1.13, в). У першому випадку ширина фонограми змінюється, а прозорість залишається незмінною, у другому – при постійної ширині фонограми змінюється її прозорість.

Перевага методу змінної щільності – ширша смуга частот, оскільки він менш критичний до точності установки штриха, що пише. Але за запису способом змінної щільності потрібно ретельний підбір режиму прояви, при відступі від цього збільшуються нелінійні спотворення. Крім того, віддача фонограми змінної густини менше віддачі фонограми змінної ширини. З вказаних причин у переважній більшості випадків використовують фонограму змінної ширини. Залежно від конструкції модулятора світла, фонограма виходить односторонньою (рис. 1.13, б), двосторонньою (симетричною) і навіть з кількома однаковими доріжками.

Ширину штриха, що пише, вибирають рівною приблизно 5 мкм, що дає можливість зменшити нелінійні спотворення запису і отримати освітленість штриха, що пише, порядку 106 лк. Це полегшує процес записування. Ширину штриха, що читає, беруть більше, приблизно 20 мкм, щоб збільшити світловий потік, що падає на фонограму, і відповідно збільшити фотострум.

Як модулятор світла використовують перетворювачі електромеханічного, електроскопічного та електронно-променевого типу.

1.7 Шуми і спотворення в фотографічних звукозаписах

У процесі виробництва та копіювання оптичної фонограми неминуче накопичення спотворень, пов'язаних із так званим запливанням фонограми

(«Доннер-ефект»). Причиною запливання є поява області змінної оптичної щільності («кайми») навколо різких кордонів доріжки змінної ширини, яка повинна бути штрихове, а не напівтонове зображення. Запливання призводить до появи гармонійних спотворень і про «шумів запливання».

Для зменшення ефектів, пов'язаних із запливанням використовується компенсаційний режим запису та копіювання фотографічної фонограми, що передбачає внесення попередніх викривлень у записуваний сигнал та оптимізацію режимів копіювання та фотографічної обробки. Крім того, підбирається оптимальна компенсаційна щільність негативу фонограми, що забезпечує взаємну компенсацію запливання негативу та позитиву під час друку фільмокопій.

Багатодоріжкова фонограма змінної ширини також знижує спотворення запливання. Один із способів зменшення запливання фонограми, що використовувався у чорно-білих кіноплівках, передбачав друк звукової доріжки ультрафіолетовим випромінюванням. На кольорових кіноплівках у цих цілях фонограма друкувалася тільки у верхньому пурпуровому шарі через зелений світлофільтр. У такий спосіб зводилося до мінімуму вплив світлорозсіювання в нижніх емульсійних шарах.

Під час виготовлення аналогової оптичної фонограми до шумів електронного каналу посилення додаються шуми, утворені зерном кіноплівки, оскільки зображення фонограми будується зернами металевого срібла. У процесі експлуатації фільмокопії до зернистої структури фонограми додаються механічні пошкодження підкладки та емульсії кіноплівки. Тому для покращення відношення сигнал/шум при виготовленні фонограм та друку фільмокопій застосовуються спеціальні дрібнозернисті кіноплівки та спеціальні технології знешумлення. Останнє досягається штучним звуженням у звукових паузах світлих ділянок позитиву фонограми, що викликають найбільше шумів [13].

Практичне застосування знайшли два основних способи знешумлення: за допомогою заслінок та «зміщенням середньої лінії». Однак, власні шуми

фонограми на кіноплівці неминучі і, у поєднанні з відносно невеликою шириною доріжки звукозапису, це накладає строгі обмеження на максимальний динамічний діапазон, що становить більшість аналогових фотографічних фонограм трохи більше 45…50 дБ. Тому, крім оптичного знешумлення, найчастіше використовуються різні системи компандерного шумоподавлення, що розширюють динамічний діапазон до 60 дБ. Цифрові оптичні фонограми мають динамічний діапазон, що задається при кодуванні і не залежать від кіноплівки.

Частотний діапазон класичної аналогової фотографічної фонограми обмежений роздільною здатністю використовуваного фотоматеріалу та можливостями записуючого світломодулюючого пристрою [13].

Для аналогової оптичної фонограми 35-мм фільмокопії, безперервна швидкість руху якої становить 456 мм/сек, максимальна частота, що відтворюється, не перевищує 8…9 кГц.

На сучасних кіноплівках частотний діапазон аналогової оптичної фонограми вбирається у 40 Гц – 10 кГц.

Для 16-мм фільмів, швидкість руху яких становить 183 мм/сек, частотний діапазон ще вже: оптична фонограма таких фільмів не може відтворювати звук із частотою більше 6…6,3 кГц.

Поліпшити частотні характеристики оптичної фонограми можна при її запису ультрафіолетовим випромінюванням, яке розсіюється емульсією значно меншою мірою, ніж біле світло. Подібний ефект досягається використанням синього світлофільтра перед штрихом, що пише. У сучасній апаратурі оптичного звукозапису використовуються світломодулятори на основі лазера, що дозволяють довести частотний діапазон аналогової 35 мм фонограми до 16 кГц.

Значне погіршення частотних характеристик відбувається при тиражуванні фільмокопій шляхом контактного друку через взаємне прослизання негативу фонограми та позитивної кіноплівки, що мають різний ступінь усадки. Для зменшення цього ефекту в кінокопіювальних машинах

застосовуються спеціальні компенсатори прослизання. При використанні цифрових фонограм частотний діапазон залежить від фотографічних властивостей кіноплівки, а визначається частотою дискретизації. Сучасні цифрові фонограми зазвичай передають смугу частот від 20 Гц до 20 кГц [13].

1.8 Висновки по розділу 1

В даному розділі з’ясовано, що аналогові фонограми, які мають підлягати реставрації та відновленню, залежно від носія запису поділяються на фотографічні фонограми (на кіноплівках), магнітні фонограми (на магнітних стрічках), механічні (на грамплатівках).

Розглянуті фізичні принципи запису та відтворення звукових сигналів на вказані типи носіїв, виявлені характерні спотворення, що виникають під час цих процесів і методи боротьби з ними.

Розглянуті спотворення характерні для нетривалого зберігання фонограм. В разі тривалого зберігання дані спотворення можуть посилюватися, а також можуть з’являтися нові типи спотворень, що потребує додаткових обробок при відновленні.

Об’єкт дослідження – процеси реставрації та відновлення аналогових звукозаписів.

Предмет дослідження – методи реставрації та відновлення аналогових звукозаписів з метою наближення результату очищення до оригіналу як за об’єктивними характеристиками, так і за сприйняттям на слух.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні методів та засобів проведення реставраційних і відновлювальних робіт з аналоговими фонограмами, визначенні їх ефективності для подальшого застосування в різних сферах.

Кваліфікаційна робота виконується на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та

розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [14-17], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль [18-21]. Цілий ряд студентських доповідей [22-25] і атестаційних робіт магістрів минулих років [26-28] присвячені дослідженню систем звукозапису. Отже, дослідження в даній роботі пов’язані і ґрунтуються на традиційному напрямку робіт колективу і студентів кафедри МІРЕС.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШУМІВ ТА ПЕРЕШКОД В АНАЛОГОВИХ ФОНОГРАММАХ ТА ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕСТАВРАЦІЇ

2.1 Шуми та перешкоди при магнітному записі

Основним джерелом шуму при магнітному записі є звуконосій. Класифікувати шуми носія запису можна за різними ознаками. Наприклад, з погляду причини виникнення шум поділяють на структурний та контактний.

Робочий шар магнітної стрічки складається з великої кількості дрібних частинок феромагнітного порошку, розподілених у зв'язуючій речовині. Неоднорідність частинок, і навіть нерівномірні розподілу в шарі призводить до того, що з магнітної стрічки, навіть повністю розмагніченої, виходять мікроскопічні поля розсіяння. Під час відтворення вони створюють шумовий сигнал у головці відтворення.

Неоднорідність носія пов'язана також з коливаннями товщини та ширини магнітного шару стрічки. Шум, що виникає внаслідок магнітної неоднорідності, називається структурним. Рівень структурного шуму тим більше, що більше розміри феромагнітних частинок і тим менше, що більший розмір зазору головки відтворення.

Другою причиною шуму є хаотична зміна механічного контакту стрічки з головками як у процесі відтворення, так і в процесі запису. Нерегулярні зміни контакту між стрічкою та головкою запису викликають зміни намагніченості, які при відтворенні створюють сигнал шуму. Це так званий контактний шум.

Шуми можна також класифікувати залежно від стану звуконосія. За такої класифікації розрізняють три види шумів: шум розмагніченої стрічки, шум паузи та модуляційний шум.

Шум розмагніченої стрічки - це структурний шум. Для стрічок стандартної товщини величина цього шуму становить -65…-70 дБ.

2.1.1 Шум паузи

Шумом паузи називається шум розмагніченої стрічки, підданої дії поля підмагнічування, створюваного голівкою запису. Відносний рівень шуму паузи входить до числа найважливіших показників магнітофона, так як визначає динамічний діапазон сигналів, що записуються.

Існує ціла низка факторів, що викликають паразитну намагніченість стрічки. Однак, навіть при повному усуненні причин, що викликають паразитне намагнічування стрічки, шум паузи залишається на 3…7 дБ вище шуму розмагніченої стрічки.

Шуми підсилювачів у порівнянні з власним шумом стрічки невеликі і практично не відбиваються на загальному показнику магнітофону.

2.1.2 Модуляційні спотворення та шуми

Модуляційні спотворення та шуми є особливого роду перешкоди, що виникають у системах запису та відтворення інформації. Ці перешкоди обумовлені нестабільністю руху носія запису і неоднорідністю його структури. Математично вони описуються виразами, в яких корисний сигнал і завада перемножуються, тому такі перешкоди називають мультиплікативними.

У магнітофонах мультиплікативні перешкоди викликаються коливаннями швидкості магнітної стрічки, її змінним контактом з магнітними головками, нерівномірною структурою робочого шару і фізико-механічними властивостями.

Зазначені причини призводять до паразитної модуляції корисного сигналу-частотної (ПЧМ) і амплітудної (ПАМ), які змінюють спектр сигналу, доповнюючи його новими складовими.

Паразитна амплітудна модуляція виникає через змінний контакт стрічки з магнітними головками і неоднорідності структури стрічки. На

відміну від ПЧМ, що визначається, в першу чергу, властивостями стрічкопротяжного механізму, ПАМ в основному залежить від властивостей стрічки та сигналу. Так, при ПАМ діє більшість причин, що зумовлюють шум намагніченої стрічки, а зі збільшенням частоти, точніше з укороченням довжини хвилі запису, ПАМ зростає через вплив контактних втрат.

Слух найбільш чутливий до ПАМ в області частот найкращого сприйняття. Тому модуляційні спотворення від ПАМ вимірюють на частоті 3150 Гц. Сприйняття цих спотворень при прослуховуванні сигналу характеризується хрипкістю звучання, а залежність чутності від частоти модулюючих збурень приблизно така сама, як і від ПЧМ.

Поріг чутності ПАМ на гармонійному сигналі дорівнює приблизно 1%, а при записі музики і мови знаходиться вище 15%. У багатодоріжкових магнітофонах з вузькими доріжками запису ПАМ може досягати 25…30%. Паразитна амплітудна модуляція також сильно проявляється, якщо стрічка, яка використовується в магнітофоні, має механічні дефекти: підвищену шабельність, короблення, потягнуті краї.

За наявності сигналу виникають модуляційні шуми звуконосія. Записавши синусоїдальний сигнал (рис.2.1, а), при відтворенні отримуємо сигнал, модульований шумом (рис.2.1, б).

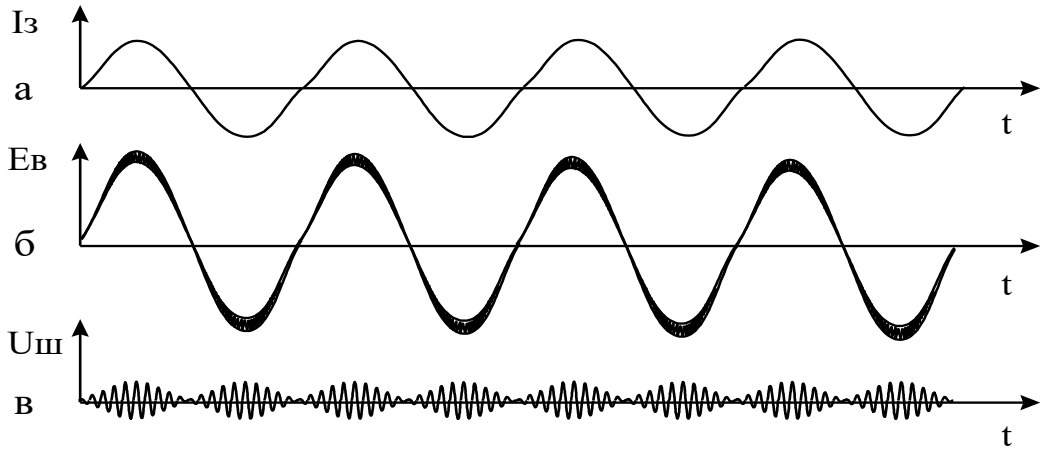


Рисунок 2.1 – Вплив модуляційного шуму на сигнал: а – записуваний сигнал; б – відтворюваний сигнал, модульований шумом; в – шум

Відфільтрувавши вихідний сигнал, можна на екрані осцилографа спостерігати напругу шуму (рис.2.1,в), модульована частотою сигналу.

Основною причиною появи модуляційного шуму є наявність постійної складової миттєвих значеннях струму запису (рис.2.2).

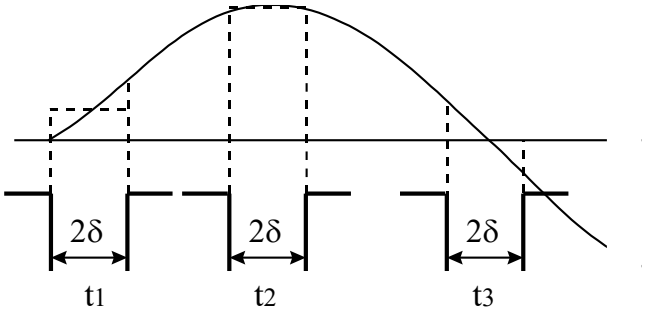


Рисунок 2.2 – Причина появи модуляційного шуму

З рисунка видно, що рівень постійної складової в миттєвих значеннях сигналу залежить від амплітуди сигналу, що записується. Він максимальний в момент часу t_2 і дорівнює нулю при зміні полярності сигналу, що записується (t_3). Раніше зазначалося, що наявність постійної складової збільшує рівень шумів.

Природно, що модуляційний шум найбільше проявляється при великих довжинах хвиль запису.

На відміну від модуляційних спотворень, модуляційний шум по сприйняттю діє подібно до адитивної перешкоди і чутний відповідно до своєї величини та законів маскування слабких сигналів сильними. У зв'язку з цим максимальна чутність модуляційного шуму спостерігається під час відтворення сигналів, що у області зниженої чутливості слуху, тобто. на найнижчих або найвищих частотах. У цьому випадку маскуючий ефект корисного сигналу найменший, а складові шуму, навпаки, тягнуться в область підвищеної чутливості слуху.

Якщо, наприклад, на вхід магнітофона подати гармонійний сигнал дуже низької або дуже високої частоти, який майже не сприймається на слух, то на виході магнітофона присутність цього сигналу виявиться по різко зростаючому рівню шуму.

У практиці звукозапису модуляційний шум найчастіше чутний при низькочастотних сигналах – звуках літавр, контрабаса, фортепіано і т.п.

2.1.3 Перехідні перешкоди

Якщо на одному носії запису розміщено кілька паралельних доріжок, то частина магнітного потоку з однієї з них може потрапляти в відтворювальні голівки інших доріжок і створювати перешкоду, що називається перехідною. Рівень цієї перешкоди залежить від довжини хвилі запису, зростаючи з її збільшенням.

Перехідна перешкода може виникати також через взаємні впливи головок у багатодоріжкових блоках головок. Для усунення цієї складової перехідних перешкод застосовують електромагнітні екрани, що розташовуються між головками.

2.1.4 Копіефект

Сутність копіефекту полягає в тому, що окремі ділянки магнітної фонограми, що мають велику залишкову намагніченість, при згортанні стрічкового носія в рулон намагнічують найближчі до них ділянки сусідніх витків носія, особливо, якщо останні зовсім не намагнічені (пауза між сигналами) або слабо намагнічені під час запису. При відтворенні такої фонограми прослуховуються кілька випереджаючих і запізнюваних по відношенню до основного сигналів-копій або луна (рис.2.3), які є перешкодами звуковому сприйняттю. Особливо неприємні для слуху випереджаючі ехо-сигнали, коли гучні звуки, відтворені з магнітної стрічки, чергуються з паузами.

Відношення між рівнем основного запису та його копії або різниця їх значень у децибелах визначає відносний рівень копіефекту.

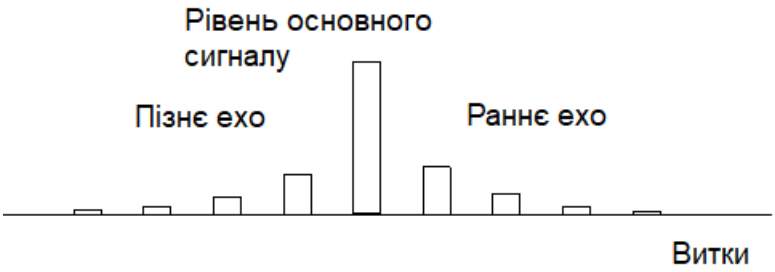


Рисунок 2.3 – Діаграма рівнів копір ефекту

Рівень ехо-сигналу, що має максимальне значення на певних частотах, при довжині хвилі запису в три-чотири рази перевищує товщину стрічки. Відповідно при малих швидкостях руху стрічки копіефект більше позначається на низьких частотах. Зі збільшенням часу зберігання та температури рівень копіефекту зростає.

Відносний рівень копіефекту у поширених магнітних стрічок становить -57…-58 дБ.

2.2 Шуми та перешкоди при механічному записі

2.2.1 Грамофонний шум

Шум, який ми відчуваємо, прослуховуючи стару грамплатівку, має випадковий характер. Найбільша його потужність зосереджена на частотах вище 5 кГц та нижче 100 Гц. Суб'єктивно він сприймається як високочастотне шипіння. Першопричиною його прийнято вважати шорсткості, інакше кажучи, відхилення форми канавки грамплатівки від геометрично правильної. Ці шорсткості утворюються, насамперед, через неоднорідність складу маси пластинки, наявність у ній великих частинок твердого наповнювача.

Найменший шум мають грамплатівки фірм Victor (Red Seal) і Columbia. Рівень шуму в грамзаписах цих фірм не набагато більше, ніж у LP [1]. Грампластинки фірми "HMV" мають більш помітний, за характером

хрусткий шум [1]. Найгіршими з погляду шуму є грамплатівки, вироблені в СРСР.

Здатність слухача суб'єктивно відокремлювати шум від музики – виключно чіткий індикатор того, чи доводиться до підсвідомості музичне повідомлення. Якщо шум у записі починає турбувати, значить аудіоапаратура передає музичне повідомлення з втратами.

2.2.2 Клікер-шум (клацання)

Клацання виникають при проходженні голкою звукознімача дрібних бульбашок, сколів та подряпин, добре помітних на поверхні грамплатівки. Кількість та амплітуда клацань визначаються станом платівки. Багато дрібних бульбашок і сколів зустрічається на грампластинках, випущених у СРСР 1930…1945 роках [1].

2.2.3 Нелінійні спотворення

У минулі часи до нелінійних спотворень ставилися менш серйозно, ныж зараз. Мікрофони, підсилювачі, рекордери мали нелінійні спотворення, які вимірювалися одиницями відсотків. І все-таки основним джерелом таких спотворень було і досі залишається невідповідність форми кінчика формі різця, що відтворює голки, що нарізає канавку. Ці спотворення, названі геометричними, у своєму складі мають неприємні для слуху непарні гармоніки сигналу – 3, 5 і т. д.

При відтворенні грамзаписів на 78 об/хв геометричні спотворення приблизно в 3 рази більше, ніж при відтворенні LP (при відтворенні LP вони сягають 30%). Спотворення виникають в області найбільшої кривизни канавки. Найбільша кривизна канавки зустрічається наприкінці грамзапису, тому вони найбільш помітні.

Як і у випадку з шумом, нелінійні спотворення турбують слухача, коли музика не несе в собі жодного змісту або коли аудіоапаратура, що відтворює, не може його передати. Захоплення аудіофілів апаратурою з мізерно малими нелінійними спотвореннями можна пояснити лише беззмістовністю музики, що прослуховується.

2.2.4 Призвуки

Призвуки при відтворенні грамзапису сприймаються як високочастотний “звір” або окремі різкі звуки, хрипи тощо. Навіть кілька програвань грамплатівки на патефоні – має важку мембрану зі сталевою голкою – викликає "помітні на слух" ушкодження канавки. Практично немає грамплатівок, які пролежали б 60…80 років, і її ніхто ніколи не програв на радянському патефоні.

Призвуки часто супроводжують звуки, найбільш важливі для точної передачі музичного змісту. Тому вони викликають у слухачів почуття сильного психологічного дискомфорту. Чим коротший шлях музичного сигналу від старої грамплатівки до цифрового запису, чим ширший діапазон високих частот, тим більше нюансів оригінального грамзапису доходить до слухача. Але, на жаль, тим помітнішими є призвуки, спричинені пошкодженням канавки грамплатівки.

Прибрати призвуки можна лише "обрізавши" частоти вище 3 кГц, проте таке втручання у фонограму суперечить ідеології Hi-Fi. Ця проблема має лише одне рішення: при складанні програми відбирати грамплатівки з мінімальною кількістю пошкоджень канавки.

Суттєвими завжди вважалися основний резонанс рухомий системи рекордера (чи пишучої мембрани), який розташовувався на частоті від 1 до 2 кГц, і резонанс високої частоти цієї системи на частоті від 7 до 10 кГц. Чи помітні вони на слух, залежало виключно від мистецтва техніків студії звукозапису.

2.2.5 Резонанси

Якщо не контролювати ланки тракту “запис-відтворення” негативним зворотним зв'язком, резонанси можуть з'явитися будь-де: у пишучій мембрані (рекордері), записувальному та відтворювальному рупорі, у мікрофонах та інших місцях. У давні часи резонанси прибирали за допомогою механічних демпферів або спеціальних електричних кіл корекції.

2.2.6 Обмеження частотного діапазону

Перші акустичні звукозаписи мали діапазон частот від 250 Гц до 4 кГц, пізніше нижня межа опустилася до 150 Гц. Акустичні записи фірм “Fonotipia”, “Victor” та “HMV” початку 1920-х років мали частотний діапазон від 100 до 7000 Гц.

Частотний діапазон європейських та американських грамзаписів, що з'явилися після 1926 року, був прийнятним, навіть за нинішніми мірками. Він становив 30…10000 Гц, а найбільш досконалих записах верхня межа досягала 12 кГц. Радянські грамплатівки 1930…40-х років мали спад високих частот починаючи з 6…7 кГц.

При обмеженні діапазону частот, що відтворюються, насамперед страждають фарби музики – індивідуальність і краса тембрів музичних інструментів і співочих голосів. При обмеженні високих частот (коли ця межа опускається нижче 7 кГц) помітно погіршується передача характеру звучання. Крім того, стають помітними втрати в найсуттєвішому для слухача – у змісті музики.

2.3 Шуми та перешкоди при фотографічному записі

Перешкоди фотографічного запису значною мірою визначаються зернистістю фотографічної емульсії. Вона викликає випадкові зміни пропускання фонограми. Зміни пропускання оцінюють величиною

$$T_n = \sqrt{\frac{a}{q}\tau_0(1-\tau_0)}\,, \qquad (2.1)$$

де a – площа зерна,

q – площа штриха читання,

τ_0 – середнє значення коефіцієнта пропускання в межах читаючого штриха.

Приймемо довжину і ширину штриха читання 2,15. Тоді q=0,043 мм^2. Нехай a=4…10^{-6} мм2. Для оптичної фонограми змінної ширини коефіцієнти світлопропускання на світлому і темному $\tau_{св}$=0,8, τ_m=0,03, Тому коефіцієнт модуляції

$$k_{\text{mod}} = \frac{\tau_{св} - \tau_m}{\tau_{св} + \tau_m} = 0{,}9\,. \qquad (2.2)$$

Такі припущення приводять до значення відношення сигнал-перешкода

$$T_c = k_m(\tau_{св} - \tau_m)/2 = 0{,}9 \cdot 0{,}415 = 0{,}38\,;$$

$$T_n = \sqrt{\frac{a}{q}\tau_0(1-\tau_0)} = \sqrt{\frac{4\cdot 10^{-6}}{4{,}3\cdot 10^{-2}}\,0{,}415(1-0{,}415)} = 5{,}74\cdot 10^{-3}; \qquad (2.3)$$

$$c/n = T_c/T_n = 0{,}415/5{,}74\cdot 10^{-3} = 80 \ \text{(38 дБ)}.$$

Подряпини та бруд зменшують відношення *c/n* до 33...35 дБ. Для фонограми змінної щільності *c/n*=30дБ. Шляхом застосування шумоподавлювача відношення *c/n* покращують приблизно в 2,5 рази (на 8 дБ).

Принцип дії шумоподавлювача: випрямлена напруга сигналу управляє положенням заслінки (маски) модулятора світла так, що ширина доріжки в паузі або сигналах невеликого рівня мінімальна. Завдяки цьому шум у паузі

та при сигналах малого рівня зменшується. Щоб автоматичне регулювання ширини доріжки не створювало відчуття спотворень, тривалість переходу від мінімальної ширини доріжки до максимальної (відкриття) повинна становити 15...20 мс, а тривалість зворотного переходу (час закриття) 0,15...0,25 с.

2.4 Загальна модель відновлення та реставрації аналогових звукозаписів

Під аналоговим маються на увазі запис звуків на фізичний носій таким чином, щоб пристрій відтворення продукував коливання і створював звукові хвилі аналогічні тим, що були отримані при збереженні.

Загальна структура аналогової системи звукозапису наведена на рис.2.4.

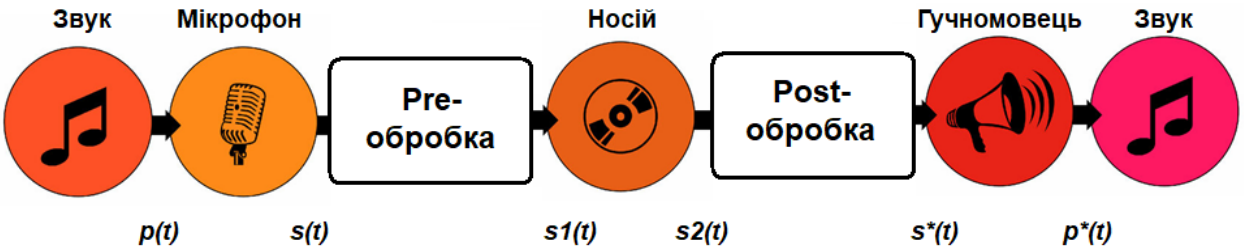


Рисунок 2.4 – Загальна структура аналогової системи звукозапису

Звукова хвиля, яка характеризується звуковим тиском $p(t)$, надходить на мікрофон, що характеризується просторово-частотною характеристикою чутливості $M(\theta, f)$, де θ – кут на джерело звука відносно акустичної осі, f – частота.

Сигнал на виході мікрофона при цьому можна описати формулою:

$$s(t) = M(\theta, f) \cdot p(t). \qquad (2.4)$$

Перед записом на фізичний носій здійснюється попередня обробка сигналу (Pre-processing). Задачею попередньої обробки є компенсація

спотворень і шумів, що виникають при записі на фізичний носій. Їх характер і величина $K_1(f, A)$ може залежати як від частоти f, так і від амплітуди A сигналу $s(t)$, і обирається в залежності від принципу запису і конкретного фізичного носія.

Сигнал, що записується на фізичний носій описується формулою

$$s_1(t) = K_1(f, A) \cdot s(t). \tag{2.5}$$

В процесі зчитування до сигналу добавляються шуми (адитивні $n(t)$ та мультиплікативні $N(t)$), а також спотворюється його частотна і амплітудна характеристика ($K_2(f, A)$). При цьому відтворений сигнал описується виразом

$$s_2(t) = N(t) \cdot K_2(f, A) \cdot s_1(t) + n(t). \tag{2.6}$$

Недоліки, що виникли при зчитуванні намагаються прибрати в блоці постобробки (Post-processing). Характеристика постобробки $K_3(f, A, t)$ може залежати як від частоти f, так і від амплітуди A сигналу, так і від часу (наприклад, експандер або шумоподавлення в паузах).

Відновлений сигнал при цьому описується виразом

$$s^*(t) = K_3(f, A, t) \cdot s_2(t). \tag{2.7}$$

Під реставрацією розуміють відновлення чого-небудь в первісному (або близькому до нього) вигляді. Для фонограм реставрація передбачає відновлення інформаційної складової запису з максимальним збереженням всіх якісних показників, закладених в процесі запису фонограми [8].

Тобто, процедура реставрації має виконувати наступне перетворення:

$$s^*(t) \to s(t). \qquad (2.8)$$

Об'єдуючи вирази (2.3 – 2.8), можемо записати

$$K_3(f, A, t) \cdot \left[N(t) \cdot K_2(f, A) \cdot K_1(f, A) \cdot s(t) + n(t)\right] \to s(t). \qquad (2.9)$$

У виразі (2.9) добуток $K_2(f, A) \cdot K_1(f, A)$ описує процес компенсації спотворень при записі на конкретний фізичний носій. В разі правильної компенсації можна вважати, що

$$K_2(f, A) \cdot K_1(f, A) = 1. \qquad (2.10)$$

В разі недостатньої або надмірної компенсації

$$K_2(f, A) \cdot K_1(f, A) \neq 1, \qquad (2.11)$$

тобто частина цієї задачі перейде на етап постобробки (множник $K_3(f, A, t)$). Розкриваючи квадратні дужки в (2.9), запишемо

$$K_3(f, A, t) \cdot N(t) \cdot K_2(f, A) \cdot K_1(f, A) \cdot s(t) + K_3(f, A, t) n(t) \to s(t). \qquad (2.12)$$

З виразу (2.12) слідує, що задачу реставрації можна поділити на 4 складові:

– компенсація спотворень АЧХ;

– компенсація амплітудних спотворень (декомпресія);

– подавлення мультиплікативного шуму;

– подавлення адитивного шуму.

Тоді множник $K_3(f, A, t)$ можна розділити на декілька складових:

– $K_{post1}(f)$ – компенсатор спотворень АЧХ;

– $K_{post2}(f, A, t)$ – декомпресор; частота f входить в цей множник тому, що декомпресія може бути різною в різних частотних смугах;

– $K_{post3}(t)$ – мультиплікативний шумоподавлювач;

– $K_{post4}(f, A, t)$ – адитивний шумоподавлювач (може працювати зі спектрограмою звуку).

Отже, завдяки проведеному теоретичному аналізу можна побудувати загальну модель реставрації та відновлення аналогових фонограм.

Припустимо, що матеріал платівки вже "знятий", оцифрований з максимальною якістю. Встановимо послідовність дій щодо реставрації.

2.5 Загальний алгоритм дій при відновленні і реставрації

2.5.1 Придушення клацань

Перше, з чим ми стикаємося у такому записі – це придушення клацань. Для платівок, особливо старих, пошарпаних – це найбільш помітна перешкода, яка, у свою чергу, заважає придушувати інші перешкоди, такі як шум, наведення мережі.

Для цього існує багато програмних продуктів, з кращих: iZotope RX. Починати роботу з фонограмою платівки треба з автоматичного деклікера. Він у реальному часі знаходить клацання та пригнічує все, що зміг знайти.

При обробці запису деклікером рекомендується зробити пару проходів, тому що іноді виявляється так, що на першому проході після придушення одного потужного натискання можуть виявитися кілька дрібних клацань поблизу нього, тому що деклікер їх не помітив. Тому два чи навіть три проходи можуть покращити якість очищення.

2.5.2 Придушення crakle

Crakle – це не окремі клацання, а безперервний потік клацань, що зливаються за часом, які звучать вже майже як шум, але все-таки не рівний

шум, а такий "пісок", тобто дрібні-дрібні клацання, що йдуть дуже часто за часом.

Для crakle є автоматичний процес De-Crackler. Він аналогічно деклікер очищає дуже дрібні клацання, які деклікер міг пропустити. Однак деклікер і декраклер засновані на різних принципах роботи і тому можуть доповнити один одного, якщо одному методу щось виявилося не під силу, тоді інший може прийти на допомогу.

2.5.3 Налаштування стереобалансу

Після того, як пригнічені клацання та дрібний "пісок", рекомендується перевіряти запис на стереобаланс. Часто буває так, що запис на вінілі – монофонічний, а грає платівка на стереопрогравачі. Якщо голка програвача підібрана добре, то таке відтворення – скоріше гідність, тому що подряпини в канавці не симетричні і клацання опиняються в різних каналах, тоді як корисний запис буде звучати центром стереопанорами. Це дозволяє ефективніше придушити як клацання, і стаціонарний шум.

Насамперед потрібно переконатися, що корисний сигнал звучить центром стереопанорами. Якщо це не так, тобто канали не зовсім збалансовані або голка не цілком вертикальна (це можуть бути недоліки програвача або підсилювача-фонокоректора), то слід вирівняти баланс по амплітуді.

Ще одним важливим моментом узгодження каналів є вирівнювання азимуту. Це поняття прийшло з магнітофонного запису, і означає вирівнювання затримки між лівим та правим каналами, щоб запис корисного сигналу виявився по центру не лише за амплітудою, але й за часом.

Можна, звичайно, вручну підбирати затримку, можна використовувати стереогоніометр або вектороскоп, які покажуть, центрований запис чи ні, але можна скористатися програмним інструментом, який називається азимут-коректор. Він є у розділі канальних операцій.

Азимут-коректор дозволяє автоматично на основі аналізу фонограми підібрати як рівні каналів, так і зсув часу. Вирівнювання завдяки ресемплінгу та оверсемплінгу проводиться з точністю до однієї сотої відліку (семплу), чого неможливо досягти вручну. Тому коли доріжки будуть складені моно, не виникне завалу високих частот.

2.5.4 Мід-Сайд кодування

Після того, як ми вирівняли канали, можна застосувати MS-кодування, тобто скласти доріжки і отримати моно, і відняти їх один від одного і отримати різницевий канал і обробити їх незалежно.

$$M = (L + R)/2, \quad S = L - R. \tag{2.13}$$

Якщо відомо, що запис моно, можна Side-канал відкинути, в ньому тільки шуми та тріск, а Mid-канал, тобто напівсума лівого та правого каналів, містить корисний сигнал.

Якщо ми застосовуємо просто MS-кодування, то в M-каналі ті шуми та клацання, які були в S-каналі, зменшуються на 3-6 дБ, а за допомогою спеціального інструменту для вилучення центрального каналу рівень клацань можна зменшити приблизно на 20 дБ. Цей інструмент розроблений для вилучення з пісні вокалу, що знаходиться в центрі.

Можна просто скласти у протифазі дві доріжки, але тоді акомпанемент знизиться приблизно на 3 дБ, а за допомогою цього інструменту можна придушити звуки не по центру стереобази значно значніше.

2.5.5 Шумоочищення

Для шумоподавлення існує кілька інструментів. Найочевидніший – це денойзер. Він добре працює в тих випадках, коли шум є стаціонарним або

постійним за часом, не змінюється за потужністю та спектром. У цьому випадку денойзер "навчається" по фрагменту шуму з фонограми і застосовується до всього запису.

Якщо ж на носії є фрагменти, які пошкоджені сильніше за інших або з якими не впорався деклікер на першому етапі, необхідні додаткові операції. Наприклад, для погано пригнічених або довгих клацань слід застосовувати інструмент Spectral Repair (спектральне відновлення). Там є кілька режимів, що дозволяють як зменшити амплітуду виділеного звуку до злиття з навколишнім фоном, так і повністю ресинтезувати виділений фрагмент на підставі навколишнього матеріалу, замінивши його на синтетичну латку, яка в багатьох випадках звучить цілком реалістично.

Спектральне відновлення ефективно працює не лише над фрагментами, виділеними за часом, а й за частотою та часом, коли перешкода обмежена за спектром певним діапазоном частот.

Якщо виявляється, що шум на носії суттєво змінюється в часі, то денойзер у цьому випадку буде не дуже ефективним і доведеться попрацювати вручну. До тих ділянок, де шум підвищується за рівнем, можна застосувати денойзер із вищим порогом. У розширеній (advanced) версії RX 3 є функція Dialog Denoiser. Він відрізняється від звичайного денойзера більш простим керуванням та зручною автоматизацією. Він дозволяє в реальному часі змінювати шумовий профіль, і якщо автоматизувати шумовий профіль відповідно до того, як змінюється рівень шуму в платівці, наприклад, намалювати періодичну зміну шумового профілю, то можна акуратніше придушити цей шум.

Ще один засіб, яким можна користуватися, якщо шум змінюється за часом – це модуль Deconstructor. Він поділяє сигнал на тональні та шумові складові. На відміну від денойзера, він дозволяє розділити їх не лише за рівнем, але відокремлюючи тональні від шумових складових. Наприклад, якщо у нас є запис флейти у приміщенні, то денойзер, проаналізувавши шум приміщення, видалить його із запису, а Deconstructor не звертає уваги на

рівень сигналу, тому він з флейти вибере лише гармоніки та дозволить придушити, наприклад, шум дихання чи звук повітря, що виходить із клапанів.

2.5.6 Боротьба з нелінійними спотвореннями

Якщо це особливість конкретної стрічки або касети протягом усього запису, з цим навряд чи можна поборотися, якщо зашкалювання має місце лише на окремих ділянках, слід використовувати декліпер.

У Isotope RX в декліпері були зроблені деякі поліпшення як алгоритму інтерполяції, так і інтерфейсу користувача. Тепер можна автоматично проаналізувати гістограму рівнів звукового файлу та програма запропонує за допомогою кнопки Suggest рівень, на якому відбувається кліпування, причому цей рівень можна встановити як різним як для позитивної, так і для негативної напівхвилі. Це важливо для тих випадків, коли стрічка по-різному насичується для позитивних та негативних рівнів намагніченості. За допомогою такого незалежного порогу кліпування можна більш акуратно зберегти ту інформацію, яка ще не спотворена та проінтерполювати лише ті ділянки, які знаходяться за точкою кліпування.

Але бувають спотворення, які виникли не від перевантаження за рівнем, а з якихось інших причин і перебувають на невисоких рівнях – всякі гарчання, хрипоту, каламутність.

Це складна операція і доведеться працювати вручну. Можна порекомендувати два інструменти – Deconstruct і Spectral Repair. Deconstruct дозволяє загалом відрізнити гармонійні складові від негармонічних і придушити їх, хоча іноді негармонічні складові є частиною корисного сигналу і їх погано розрізняє. Але в цілому Deconstruct дозволяє "проредити" спектр і зробити його трохи менш "захараченим" дрібними звуковими артефактами і залишити більші основні гармоніки.

2.5.7 Загальний алгоритм реставрації та відновлення фонограм

Загальний алгоритм відновлення фонограм показаний на рис.2.5.

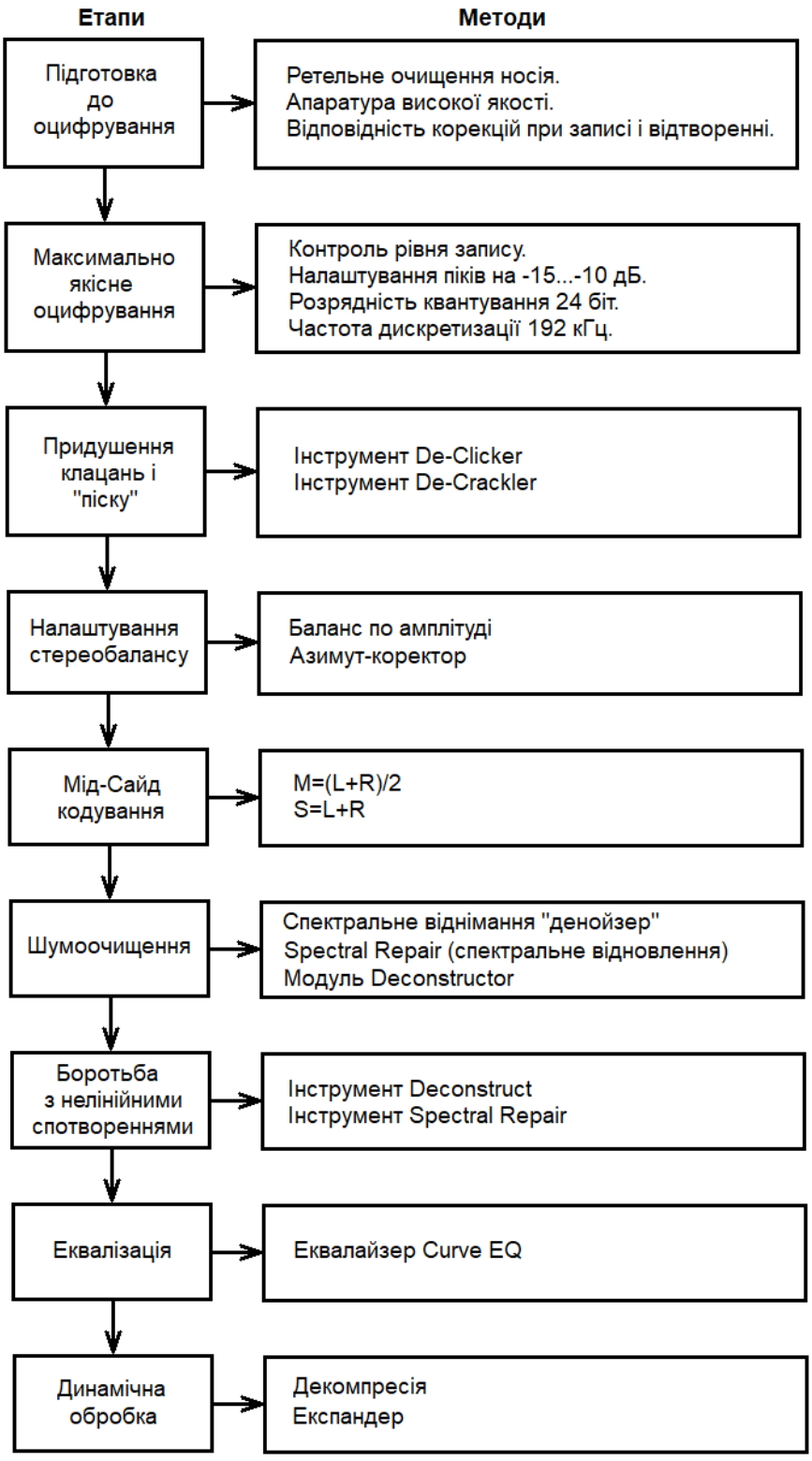


Рисунок 2.5 – Загальний алгоритм відновлення фонограм

На рис. 2.5 відсутні методи боротьби з детонацією. Ц пов’язано з тим, що хороших автоматичних засобів поки що немає. Компанія Celemony випустила програму Capstan. Вона намагається, спираючись на зміни висоти власне музичного тону, виділити найбільш ймовірну характеристику детонації і далі застосувати її до запису, щоб скасувати детонацію.

Програмі найскладніше зрозуміти, яка ж детонація була. Як відрізнити вібрато струнного інструменту від сповзання всього оркестру. Якщо є проблеми з усім оркестром, факт і характер детонації встановити легше, а у випадку з сольним інструментом відрізнити вібрато від детонації важко.

За відгуками, поки ця програма не дуже добре справляється в автоматичному режимі, але цей напрямок перспективний.

2.6 Висновки по розділу 2

Було розглянуто шуми та перешкоди, що виникають при відтворенні аналогових звукозаписів. В усіх аналогових методах – магнітному, механічному, фотографічному – всі шумі і перешкоди можна поділити на 2 типи: адитивні та мультиплікативні. Перші додаються до корисного сигналу, другі – модулюють його. Враховуючи ще амплітудні, частотні і фазові спотворення в процесі запису-відтворення, отримано загальний вираз для процедур корекції звукозапису. З отриманого виразу слідує, що задачу реставрації можна поділити на 4 основні складові: компенсація спотворень АЧХ; компенсація амплітудних спотворень (декомпресія); подавлення мультиплікативного шуму; подавлення адитивного шуму.

Складено загальний алгоритм дій при відновленні і реставрації . Він включає придушення клацань. Для цього використовується деклікер, рекомендується зробити пару проходів Другий етап – налаштування стерео балансу. Причому сучасні інструменти враховують не тільки різність амплітуд, але й різність запізнень каналів, так званий азимут-коректор.

Третій етап – Мід-Сайд кодування. Якщо запис моно, можна Side-канал відкинути, в ньому тільки шуми та тріск, а Mid-канал, тобто напівсума лівого та правого каналів, містить корисний сигнал. Якщо запис стерео, то в М-каналі ті шуми та клацання, які були в S-каналі, зменшуються на 3-6 дБ, а за допомогою вилучення центрального каналу рівень шуму можна зменшити приблизно на 20 дБ.

Для шумоподавлення існує денойзер на методі спектрального віднімання. Він добре працює в тих випадках, коли шум є стаціонарним. Денойзер "навчається" по фрагменту шуму з фонограми і застосовується до всього запису.

Якщо на носії є фрагменти, пошкоджені сильніше за інших, є інструмент Spectral Repair (спектральне відновлення). Він дозволяє ресинтезувати виділений фрагмент на підставі навколишнього матеріалу, замінивши його на синтетичну латку, яка в багатьох випадках звучить цілком реалістично.

Боротьба з нелінійними спотвореннями зводиться до використання декліпера, тобто відновлювача перевантажень. Корекція спектру і динамічного діапазону виконується еквалайзером і експандером відповідно.

3 ПРАКТИЧНА РЕСТАВРАЦІЯ ТА РЕМАСТЕРИНГ ФОНОГРАМ

3.1 Вибір програмного забезпечення

На сьогоднішній день існує багато звукових редакторів, які умовно можна поділити на продукцію іменитих фірм та маловідомих. Програми перших відрізняються якіснішими алгоритмами перетворення звуку, великою різноманітністю модулів, що підключаються – плагінів, що виконують часом складні обробки (наприклад, NaturalVerb програми WaveLab), ширшими можливостями редагування.

До них слід зарахувати Sound Forge, Adobe Audition, WaveLab, Samplitude, SAWstudio. Вони підтримують VST та Direct-плагіни, а плагінів у них досить багато. На мій погляд, вибирати редактор тут можна виходячи із зручності користування та інтерфейсу. Краще встановити кілька, при цьому плагіни встановленого раніше прописуються в наступному або при установці з виведенням відповідного запиту, або це можна зробити після установки у відповідному пункті меню. Зазвичай я працюю в Adobe Audition і мені доступні всі модулі WaveLab і Sound Forge, що підключаються (рис. 3.1).

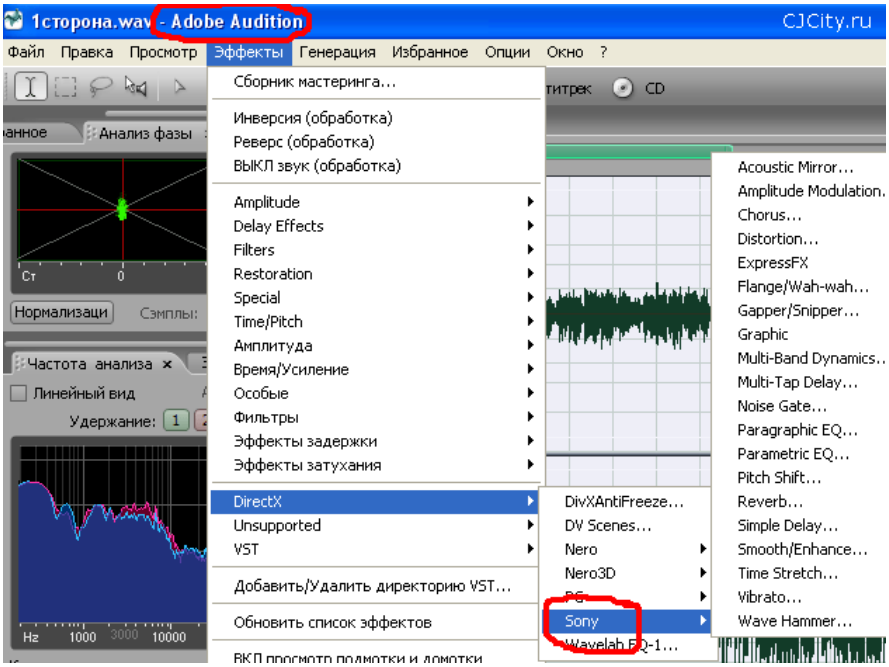


Рисунок 3.1 – Виклик плагінів Sound Forge у програмі Adobe Audition

3.2 Оцифровка з аналогового носія

На мій погляд, це зручніше зробити у програмі WaveLab, тому що тут є наочні аналізатор спектру та вимірювач рівня сигналу.

Sample rate (частота дискретизації) вибирається з продуктивності комп'ютера і максимальної частоти, підтримуваної звуковою картою. Вибирається між 44,1 кГц та 192 кГц, чим вище, тим краще.

Bit resolution – бітова роздільна здатність, розрядність, вибирається також, виходячи з вищесказаного, в інтервалі від 16 до 32 біт.

Дані два параметри безпосередньо впливають на якість одержуваного файлу, чим їх значення вище, тим якісніший файл. Що стосується розрядності. З кожною операцією обробки запис «забруднюється» сторонніми шумами – артефактами (з'являється шарудіння, скрегіт, дзвін, брязкіт та ін) через т.з. операції округлення. 16 біт – це мінімум, при якому запис виходить якісним, нижче вже не можна. Обробляти такий запис не рекомендується. Отже, обираємо частоту дискретизації 192 кГц і 32 біт/відлік.

До речі, деякі плагіни підтримують лише 24 біти, тому перед початком роботи слід вивчити документацію програм і звукової карти з цих питань і вибудувати коло: вхід звукової карти-> програми-> кінцевий файл так, щоб не було зайвих перетворень у плані зменшення розрядності.

Налаштовуємо рівень. Подаємо сигнал з аналогового джерела, але ще не пишемо. Встановлюємо повзунки приблизно посередині і мікшером звукової карти виставляємо рівень так, щоб не спалахувала червона шкала перевантаження і максимальний рівень припадав на -6…-10 дБ (рис.3.2).

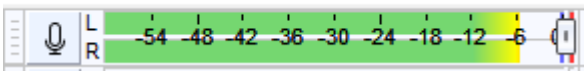


Рисунок 3.2 – Налаштування рівня

Для більшої наочності з головного меню викликаємо Analysis – Level Pan Meter (вимірювач рівня / панорами) і Spectrum Meter (спектроаналізатор).

Записувану фонограму спочатку прослуховуємо, бажано остаточно. Виявляємо всі піки, коригуємо рівень, звертаємо увагу на ділянки фонограми з характерними спотвореннями, проводимо слуховий аналіз.

Записуємо всю фонограму разом з паузами, що містять шум, що відноситься до цього запису від початку до кінця.

Якщо на стрічці міститься кілька записів:

– виконаних різних магнітофонах;

– від різних джерел;

– з різними рівнями,

записуємо їх окремо в різні файли і надалі обробляємо окремо.

3.3 Відновлення

Подальшу обробку розділимо умовно на три етапи:

– на першому очистимо запис тільки від клацань і все; якщо нам потрібно зберегти всі нюанси оригіналу, тобто «дух того часу» з усіма шумами, шерехами, скрипами, відчуттям просторовості тощо – то на цьому й закінчимо;

– другий етап – очищення від усіх шумів, виділення саме самої звукової доріжки. Сюди включимо операції з корекції динамічного та частотного діапазону;

– на третьому етапі зробимо покращення звучання фонограми: поділ моно на стерео або розширення стереобази, додавання високих частот, додавання прозорості, насиченості, легкості тощо – додавання складових, що спочатку не містяться у вихідному музичному матеріалі.

3.3.1 Перший етап відновлення

Коригування зміщення DC (постійної складової). Перша операція після оцифрування – усунення зміщення постійного струму.

Завжди під час запису з аналогових джерел та у деяких випадках під час програмної обробки файлу з'являється зміщення постійного струму. Форма хвилі при цьому зсунута щодо нульової осі в той чи інший бік. Під час обробки деякими ефектами такої хвилі з'являються спотворення. Також при операціях вирізування, копіювання, вставці тощо в місці з'єднання частин з'явиться нерівність і як наслідок – клацання. Зазвичай відсоток зсуву становить 1-2% в межах всього запису і непомітний візуально, але вже і цього достатньо для появи помітних спотворень на слух при подальших обробках. На рис.3.3 показано приклад фрагменту хвилі з сильним зміщенням, яке з'явилося на початку запису.

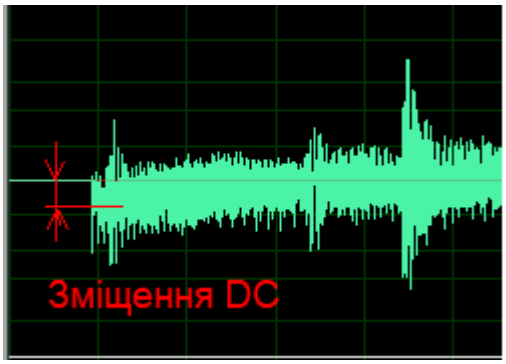


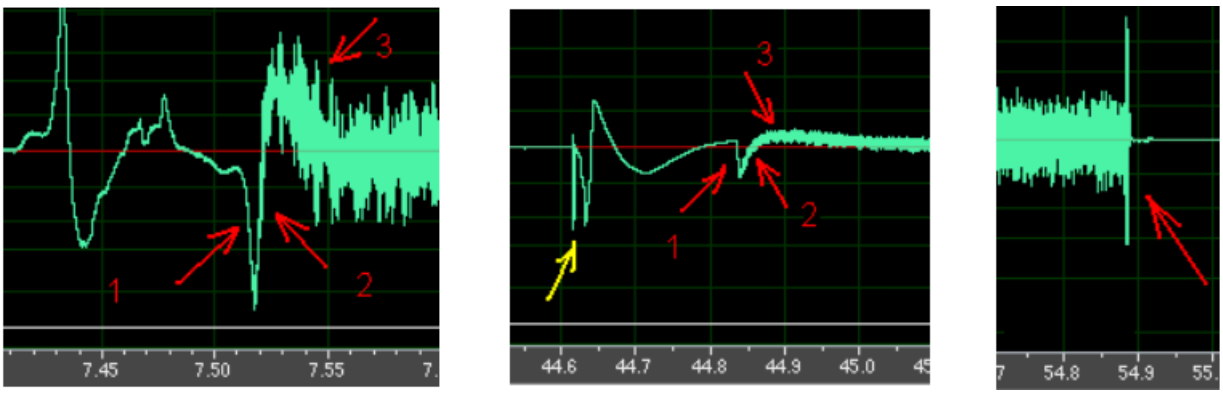
Рисунок 3.3 – Зміщення постійного струму на початку запису

Програма обчислює значення постійного усунення всього файлу, потім коригує його. У нашому випадку початкову ділянку бажано вирізати, щоб не ввести програму в оману нестандартно великим зміщенням, після цього відкоригувати її.

Зміщення постійного струму усувається в WAVELAB: пункт меню Process->Eliminate DC Offset; в AdobeAudition: Effects->Amplitude->Normalize->DC Bias Adjust.

Усунення кліків. Друга операція після оцифрування – це видалення різноманітних клацань, імпульсних перешкод, які у іноземній літературі називаються «Click».

Зазвичай на початку запису на хвильовій формі присутній такий кидок напруги (рис 3.4, а, б).



а) б) в)

Рисунок 3.4 – Імпульси початку запису фонограми на стрічку (а) і в кінці запису фонограми на стрічку (в)

Кінець запису має також характерну особливість – вертикальна лінія, рис. 3.4, в. Якщо ж увімкнення та відключення проводити клавішею «Пауза», то таких піків не буде. Спотворення такого роду вирізаємо.

Хвильоформа файлу цілком показана на рис. 3.5.

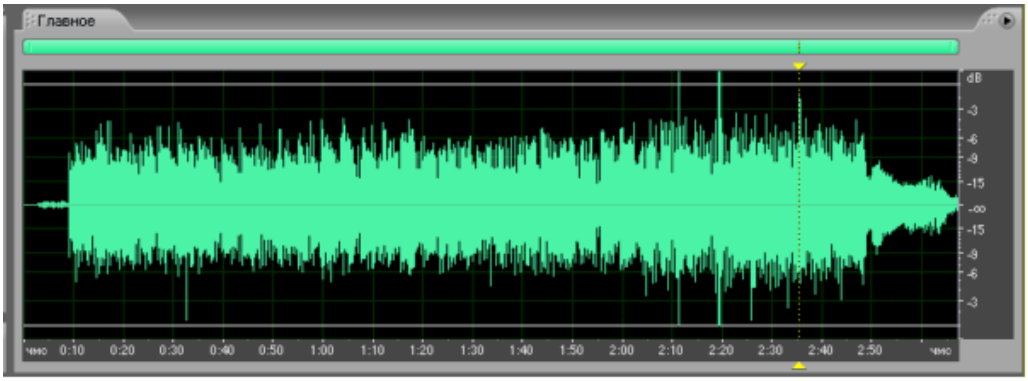


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд записаної фонограми

Помітні різкі викиди на 32”, на 2'11”, на 2'19” і далі. Розглянемо перші з них. При збільшенні бачимо наступне, рис 3.6.

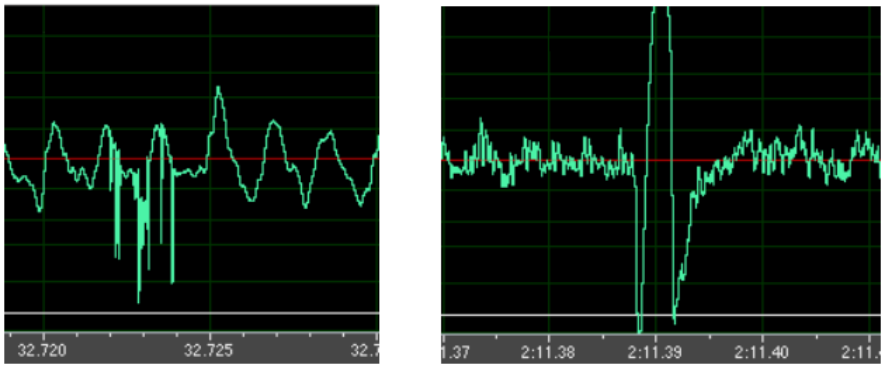


Рисунок 3.6 – Викиди на 32” та на 2'11”

Зазвичай такі викиди легко знайти зі збільшенням. Вони різко виділяються із загальної картини своєю нестандартною формою, мають сплеск амплітуди, їх «зубчики» несиметричні відносно нульової осі та здебільшого розташовані по один бік від осі. При відтворенні прослуховуються як перешкоди: різке клацання або тріск.

У більшості звукових редакторів звуковий файл можна також у вигляді спектрограми, де по горизонтальній осі відкладається час, по вертикальній – частота, колірною формою представлена амплітуда.

Перевага спектрограми в тому, що вона показує одночасно частоту і амплітуду. Отже, перешкода – це звуковий фрагмент з широким динамічним діапазоном (від мінус нескінченності і до рівня, порівнянного з рівнем корисного сигналу) і широким частотним діапазоном, тобто це просто короткий відрізок «білого» шуму. То на спектрограмі він різко виділяється саме з цих ознак: різкий вертикальний, яскраво забарвлений стовпчик, рис. 3.7.

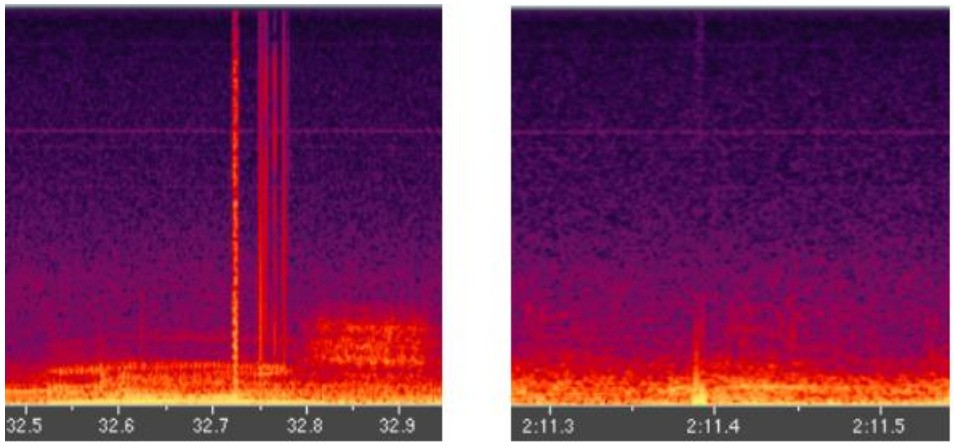


Рисунок 3.7 – Спектрограми запису на 32” та на 2’11”

Спочатку шукаємо сплески, що виділяються на загальній картині, потім, поступово збільшуючи масштаб, переглядаємо заново. Потім переводимо вигляд у сонограму та переглядаємо її. Усі перешкоди вирізаємо.

У програмі WAVELAB є зручна функція пошуку кліків (клацань) «Audio error detection and correction». У ній є три режими пошуку, які використовують різні алгоритми. У даній композиції вона знайшла, з

налаштуваннями за умовчанням, відповідно, 38, 36 та 30 помилок (error). Причому, якщо в першому та другому випадках кліки розташовані приблизно по всій області файлу, то в останньому зосереджені в одному місці, рис.3.8, позначені червоними маркерами.

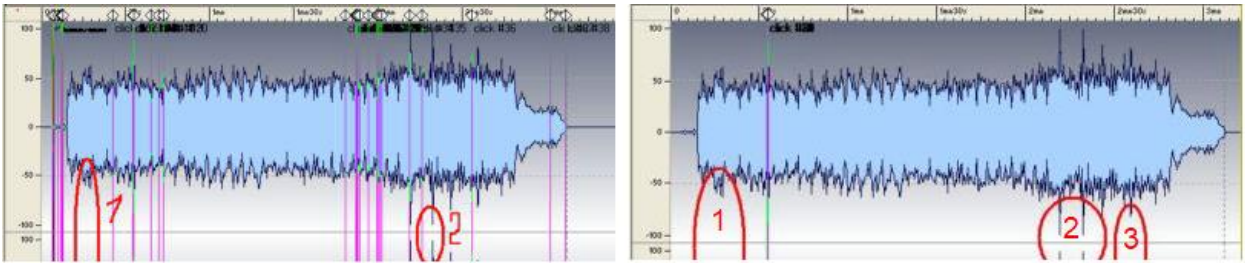


Рисунок 3.8 – Результат використання режиму Digital Click Detection

Червоними кружками виділено кліки, які програма «не побачила». Близько 70% всіх знайдених програмою кліків не виділяються на слух. Це пояснюється тим, що ці 70% помилок знаходяться на рівному місці хвильової форми. Кожну помилку програма позначає маркером, виправляти їх можна як у ручному режимі, переходячи від маркера до маркеру, і автоматично.

Сказане також стосується і функцій Auto Click/Pop Eliminator і просто Click/Pop Eliminator в AdobeAudition, покликаних також боротися зі клацаннями. Обидві не помітили клацань на 2' 11” , 2' 19” та інших, чітко визначених на слух.

Такі перешкоди вирізаємо. Відповідно до психоакустики, людське вухо не виявляє спотворення звуку тривалістю до 5 мс, тобто у музичному фрагменті воно виявить клацання, а клацанні – музичний фрагмент, тому така операція для перешкод подібної тривалості непомітна. Якщо перешкода набагато довше, то імпульс просто нормалізуємо. Рівень нормалізації зручніше виставити у децибелах за сусідніми значеннями відліків.

Кліпування. Кліпування – це перевищення сигналом допустимого для даної розрядності динамічного діапазону. З'являється в процесі оцифрування зазвичай при підвищеному рівні запису і далі перетворення амплітуди. При цьому сигнал, що перевищив максимум, просто обрізається. Якщо

подивитися на обрізаний сигнал, рис. 3.9, а і б, то на хвильовій формі, наприклад, під лінією «0 дБ» буде рівна горизонтальна площадка.

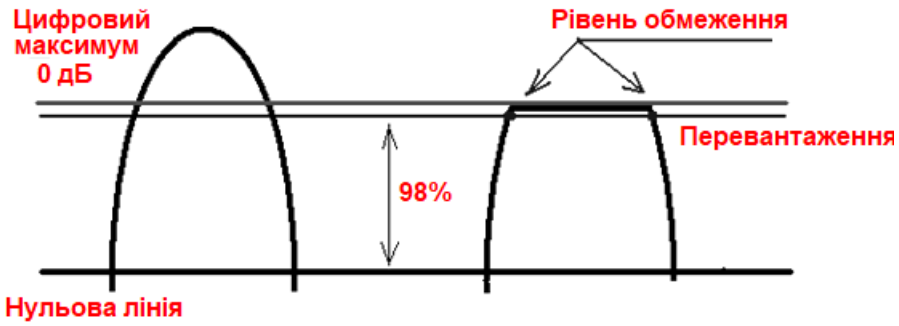


Рисунок 3.9 – Кліпування сигналу

Кліпування – джерело сильних, ріжучих слух, спотворень.

Число кліпованих відліків можна дізнатися в AdobeAudition, викликавши в пункті меню Analyze функцію Amplitude Statistics, рис. 3.9. У вкладці General та пункт Possibly Clipped Samples – кількість кліпованих відліків. У нашому файлі їх 197 у лівому та 111 у правому каналах, рис. 3.10.

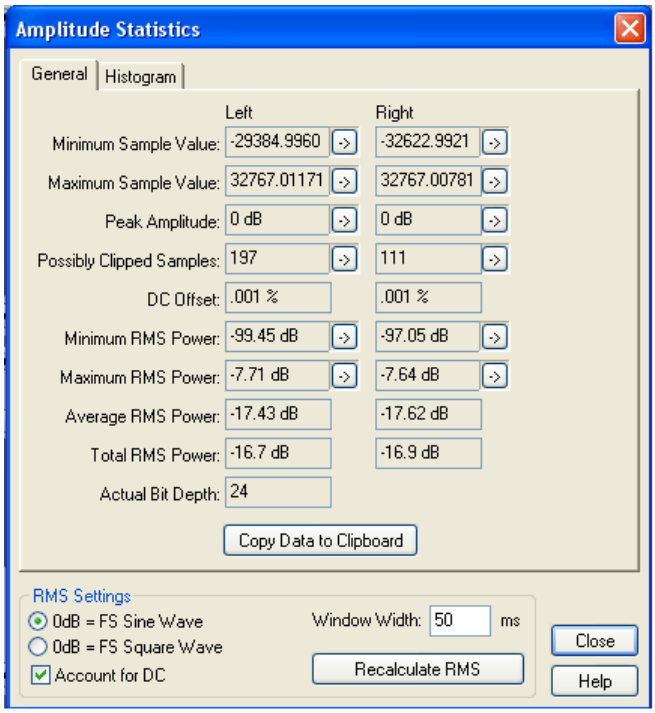


Рисунок 3.10 – Вікно Amplitude Statistics

З пункту Effects меню відкриваємо розділ Restoration та викликаємо функцію Clip Restoration. Налаштування такі:

– Input Attenuation (посилення входу) – 0 дБ;

– Overhead (рівень кліпованих відліків у % від рівня амплітуди) – 97,72%. або 0,2 дБ;

– Minimum Run Size – мінімальна кількість відліків, що перевищили значення Overhead, при якому ці відліки приймаються за кліповані. Виставляємо 1. Є три передустановки: легке кліпування, нормальне та значне. Вибираємо одну з них та натискаємо ОК. Якість відновлення контролюємо параметром Possibly Clipped Samples.

Кліпування також може бути присутнім і на плівці (і воно часто є) в результаті перевищення рівня сигналу ще при записі на магнітофон. Але властивості магнітної стрічки такі, що воно не таке помітне на слух. Природно, що якщо при оцифруванні ми чітко контролювали рівень запису, програма не побачить кліпування на плівці і не дізнається його.

При малій кількості кліпованих відліків його можна і не проводити.

Нормалізація. Нормалізація – це процес зазвичай збільшення (іноді зменшення) амплітуди (гучності) сигналу до певного рівня за певним значенням – у найпростішому випадку, що встановлюється звукорежисером як норма, причому завжди без спотворення сигналу, тобто переповнення розрядної сітки. У програмах нормалізація може бути проведена за піковими рівнями або середньоквадратичним значенням сигналу RMS.

Стандарт нормалізації компакт-дисків -0,2дБ або у відсотках 97,72%, але вважається прийнятним і 99% та 100% (0 дБ). WAVELAB і AdobeAudition проводять нормалізацію за піковими рівнями за командами відповідно: Process->Normalize та Effects->Amplitude->Normalize. Тут є пункт Normalize L|R Equally (нормалізувати лівий та правий канали однаково).

3.3.2 Другий етап відновлення

Аналіз. Спочатку проведемо аналіз. Всі наступні операції будемо проводити у програмі AdobeAudition. Файл виглядає цілком, як показано на рис. 3.7.

Це запис живого концерту Віктора Цоя. Він був виконаний на звичайну "бюджетну" касетну магнітолу SONY шляхом безпосереднього підключення до звукового моновиходу телевізора. Касета звичайна, стрічка BASF. Пісня «Зірка на ім'я Сонце». Концерт проходив у закритому приміщенні, співали та грали наживо; мікрофони на сцені фонували щохвилини, глядачі репетували і верещали, чути їх окремі вигуки; у перервах між піснями можна розібрати фрази музикантів, що перемовляються.

Тобто запис являє собою інтерес і його варто відновлювати. Звук на касету записувався без пауз; на комп'ютер теж в один прийом для збереження атмосфери того, що відбувається. Для наочності та простоти прикладу ми вирізали одну з пісень цілком з невеликою ділянкою паузи наприкінці.

Над нашим матеріалом ми вже зробили три дії: усунули зсув по постійному струму; вирізали імпульсні перешкоди (з побічним результатом – усуненням кліпування); нормалізували звукову хвилю.

AdobeAudition має функцію аналізу динамічного діапазону. Викликавши в пункті меню Analyze функцію Amplitude Statistics на вкладці General бачимо вікно, показане на рис. 3.11.

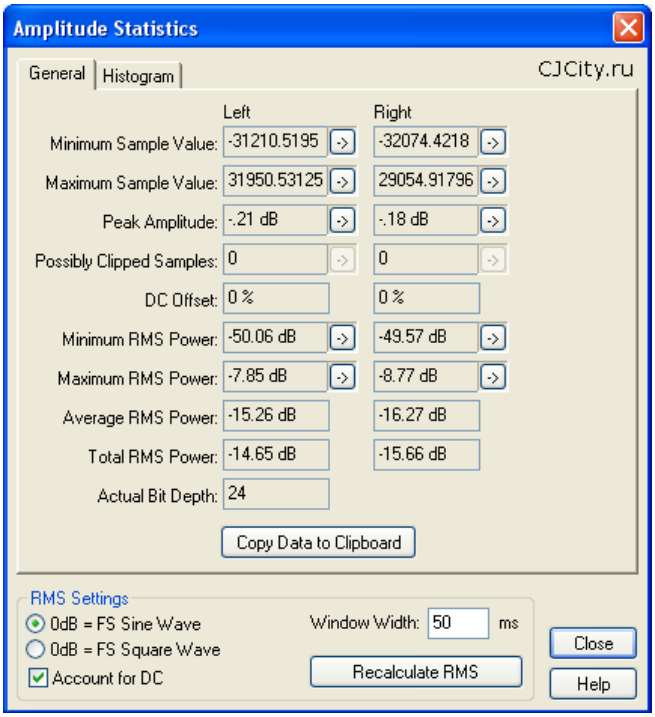


Рисунок 3.11 – Вкладка General

– Peak Amplitude (амплітуда максимального піку) – (-0,21) та (-0,18);

– Possibly Clipped Samples – кліпованих відліків немає;

– DC Offset - дорівнює нулю; Total RMS Power (середньоквадратичний рівень сигналу, а середня гучність, що просто цікавить нас) - (-14,65 дБ) і (-15,66 дБ);

– Actual Bit Depth вказана дійсна розрядність звукових даних, тобто реальна розрядність, з якою була зроблена оцифровка;

– Minimum RMS Power – мінімальний середньоквадратичний рівень сигналу, Maximum RMS Power – максимальний середньоквадратичний рівень сигналу.

Всі інші відліки розташовані між ними із середнім рівнем гучності Total RMS Power. Відкриваємо вкладку Histogram, об'єднаємо разом гістограму та хвильову форму, рис. 3.12.

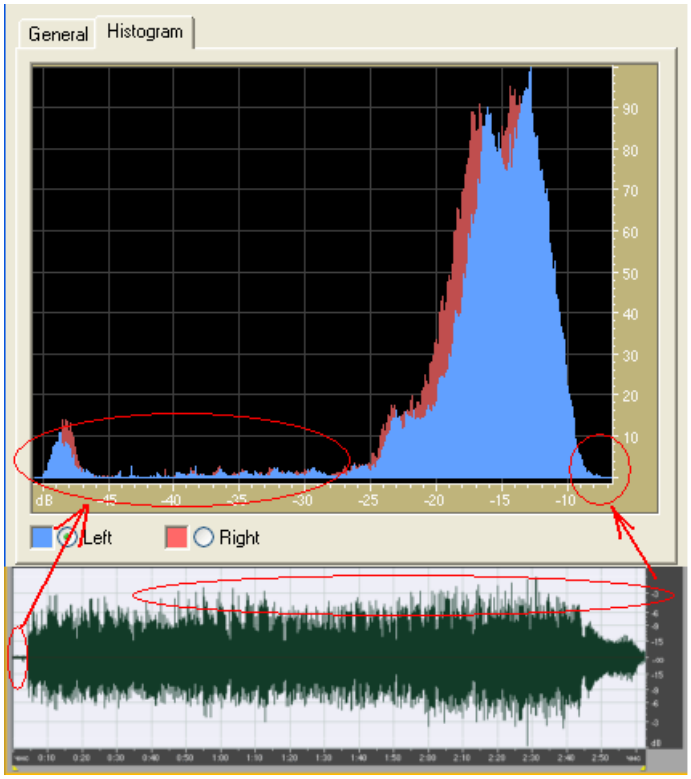


Рисунок 3.12 – Поєднані гістограма та хвильова форма.

Видно, що основний розподіл відліків знаходиться в інтервалі від -8 дБ до -25 дБ. У районі -8 дБ та правіше зосереджені піки хвильової форми. Від -25 дБ і ліворуч – зазвичай шуми, які на хвильовій формі окремо представлені на початку файлу.

Зазвичай шум на фонограмах динамічного діапазону розташований на 15-30 дБ нижче, ніж основний музичний матеріал і має частотний діапазон від 2кГц і до межі чутності, тобто в області високих частот.

Гістограма надає суттєву допомогу під час проведення динамічної обробки. Отже, робимо висновки:

– середній рівень гучності становить приблизно 15 дБ, що все-таки замало. Зазвичай у фабричних звукозаписах цей параметр знаходиться в межах -12…-7 дБ Одна з можливих дій – жорстке лімітування на рівні 8 дБ з подальшим підсиленням сигналу на 8 дБ;

– корисний динамічний діапазон -8-(-25)=17 дБ деяким може здатися недостатнім – концерт живий. Тому можна, не виконуючи дії п. 1, застосувати жорстке лімітування до -8 дБ, потім експандування в 1,5 – 2 рази з огляду на те, що середня гучність повинна залишатися нормальному рівні;

– застосувавши лімітування до -8 дБ, розширити діапазон в область цієї ділянки, що «звільнилася». Таким чином, збільшиться і середня гучність та динамічний діапазон.

Частотний спектр оцінюється на панелі Frequency Analysis, що з меню Analyze, рис. 3.13.

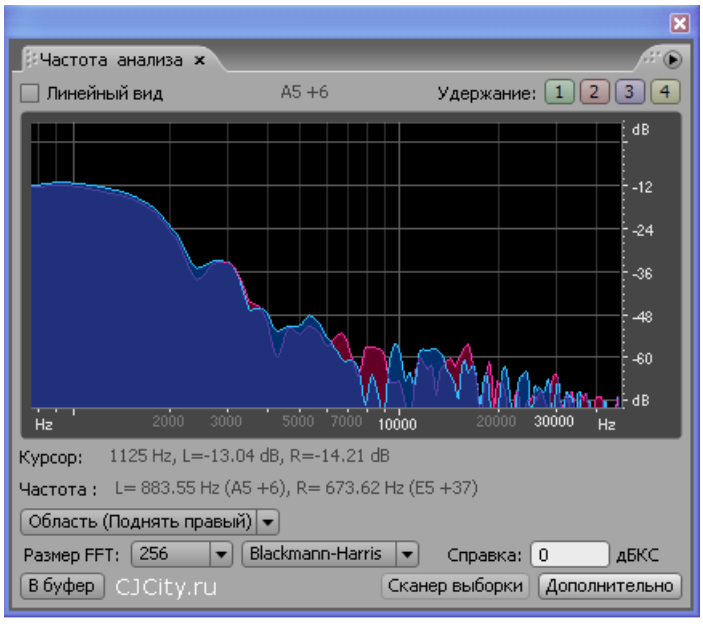


Рисунок 3.13 – Панель Frequency Analysis

Найкраще встановити такі налаштування: вид графіка – логарифмічний, FFT Size – 256...1024. В даному випадку за великими значеннями гнатися не варто: збільшується час оновлення спектру і зникає наочність.

Сумістимо гістограму та аналізатор спектру і проаналізуємо їх разом, рис. 3.14. Наприклад, можна дізнатися частотні складові тієї чи іншої ділянки динамічного діапазону.

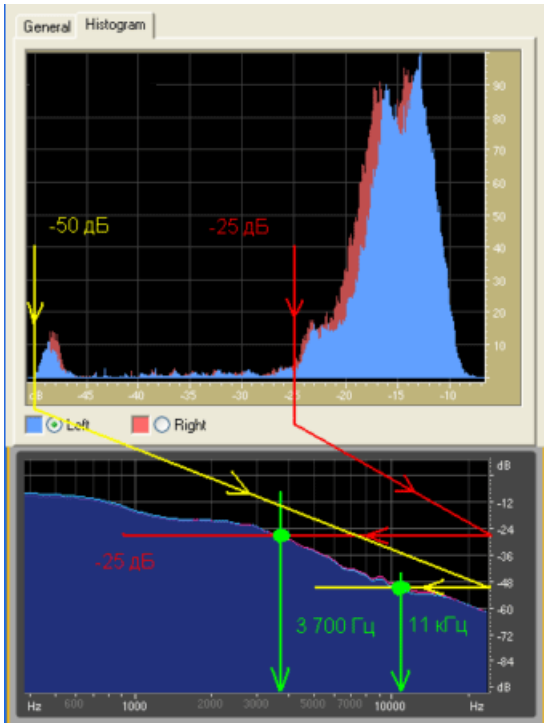


Рисунок 3.14 – Поєднані гістограма та аналізатора спектру

Отже, ми припустили, що область нижче -25 дБ це шуми. Поглянувши на аналізатор спектра, бачимо: починаючи приблизно з 3300 Гц графік у випадку має плавний спад остаточно. Нижче лінії -25 дБ є тільки високі частоти, що підтверджує, що це складові шуму.

Видалення шуму. Захоплюємо шум, програма його аналізує, вибираємо весь файл, ставимо на передпрослуховування, якщо результат задовольнив – запускаємо виконання.

Налаштування цього вікна для отримання найкращої якості. Значення FFT Size – 24000 – максимальне; Reduce by – 40 дБ; Precision Factor – 10; Smoothing Amount – 1; Transition Width – 0; Spectral Decay Rate – 0.

Повзунком Noise Reduction Level виставляємо рівень видалення шуму. Рекомендований від 60% до 90%. Річ у тім, що з перевищенні значення 60% у фонограмі починаються виявлятися сторонні призвуки – артефакти, з'являється своєрідне «металеве» звучання. Але знову ж таки не завжди і не для всіх фонограм. Для оброблюваного файлу обрали параметри, показані на рис.3.15.

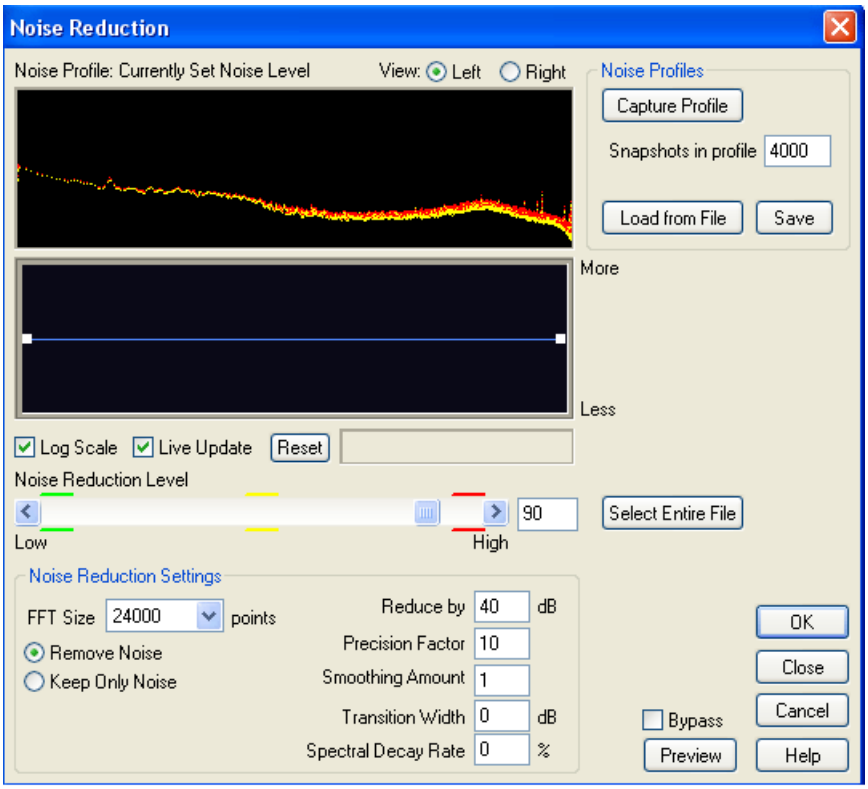


Рисунок 3.15 – Вікно Noise Reduction

Під графіком Noise Profile знаходиться ще один графік, рис 3.15. З його допомогою можна видалити рівень шуму тільки на певному частотному діапазоні. Якщо шуми зосереджені у високочастотній області, то поекспериментувавши, можна знайти його оптимальну форму саме для високочастотної області спектру. При цьому суттєво зменшується час обробки та знижуються спотворення.

Якщо ми знайшли хоча б невеликий шматочок шуму для зразка, а програма видає, що для аналізу його занадто мало, то чинимо наступним чином: виділяємо його і копіюємо кілька разів поспіль на початок або в кінець пісні, потім відправляємо загальний шум на аналіз.

Третій спосіб вилучення шуму. В AdobeAudition, викликаємо пункт меню Analyze, далі Amplitude Statistics та вкладку Histogram, рис. 3.16.

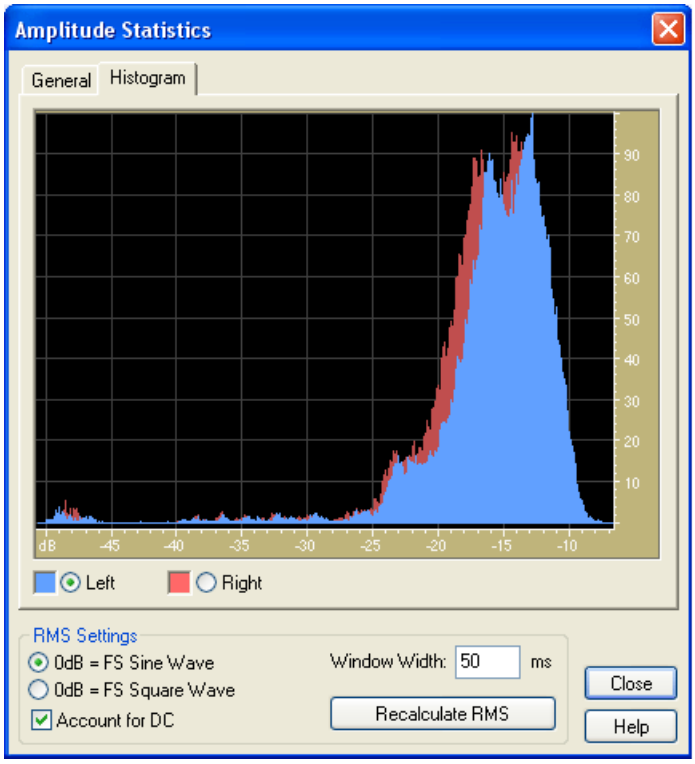


Рисунок 3.16 – Гістограма фрагмента в якому шум не присутній у явному вигляді

У нашому випадку «пила» тягнеться від 25 до 50 дБ. Це і є шум. Для того щоб використовувати цей шум надалі, потрібно його відокремити. Це виконується за допомогою динамічної обробки.

З метою збереження вихідного матеріалу при подальших операціях робимо проміжне збереження і ще раз відкриваємо файл у новому вікні. У пункті меню Effects вибираємо Amplitude та відкриваємо вікно Dynamics Processing. На вкладці Graphic встановлюємо графік придушення ділянки від 25 до 0 дБ, рис. 3.17.

Отриманий результат ми використовуємо як зразок шуму, але спочатку прослуховуємо його: чи це справді тільки шум і нічого більше. Якщо це так, то захоплюємо його та зберігаємо в передустановках програми шумовидалення. Повертаємося у попереднє вікно до вихідного файлу, знову

викликаємо Noise Reduction, знаходимо в налаштуваннях наш шум і запускаємо на виконання.

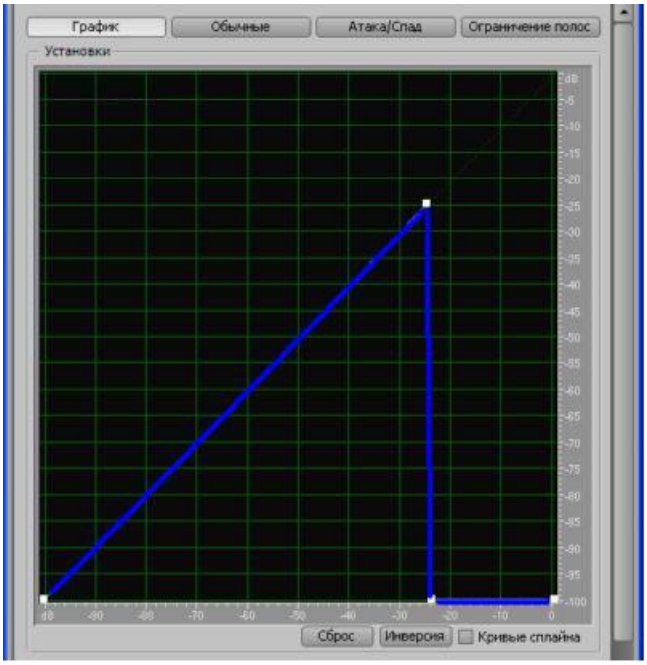


Рисунок 3.17 – Придушення ділянки від -25 до 0 дБ

Всі параметри Gain (підсилення) встановлюємо на 0. Далі доведеться на слух підібрати форму нижнього графіка у вікні Noise Reduction. Він може виглядати приблизно так, рис. 3.18, з переважанням придушення у високочастотному спектрі, інакше «металеве» звучання неминуче.

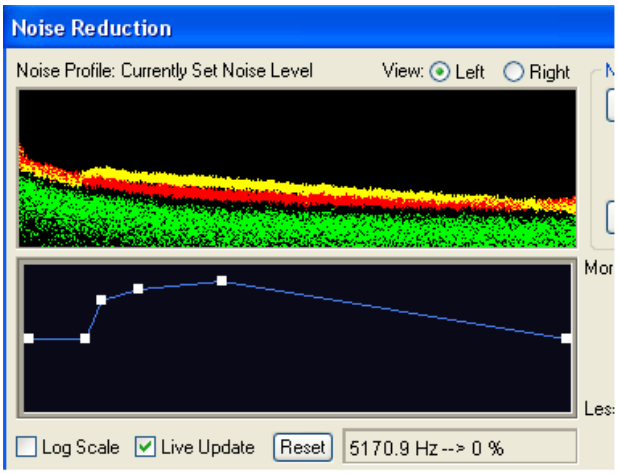


Рисунок 3.18 – Фрагмент графіків вікна Noise Reduction

Підрізання меж частотного діапазону. Реальні межі частотного діапазону, що записується та відтворюється з компакт-касети дорівнює

10…20 Гц –12,5…14 кГц. Вище та нижче частоти теж записуються, але вони вже тонуть у шумах і виділити з них якийсь музичний матеріал досить складно. Щоб взагалі позбутися їх, рекомендується підрізати як низ, і верх, скажімо: до 40Гц і від 14 кГц. Зробити це можна, наприклад, за допомогою функції FFT Filter.

Верхня межа частотного діапазону для стрічки простягається: при швидкості 4,76 см/с – до 13 кГц, при швидкості 9,53 см/с – до 25 кГц, при швидкості 19.05 см/с – до 50 кГц [3].

Динамічна обробка. Зазвичай після видалення всіх шумів проводиться динамічна обробка. Як ми вже говорили вище, динамічний діапазон нашого матеріалу є досить вузьким, що пов'язано з передачею вихідного сигналу по ТВ. Побачимо, що можна зробити. Викликаємо функцію Amplitude Statistics та знову аналізуємо, рис.3.19.

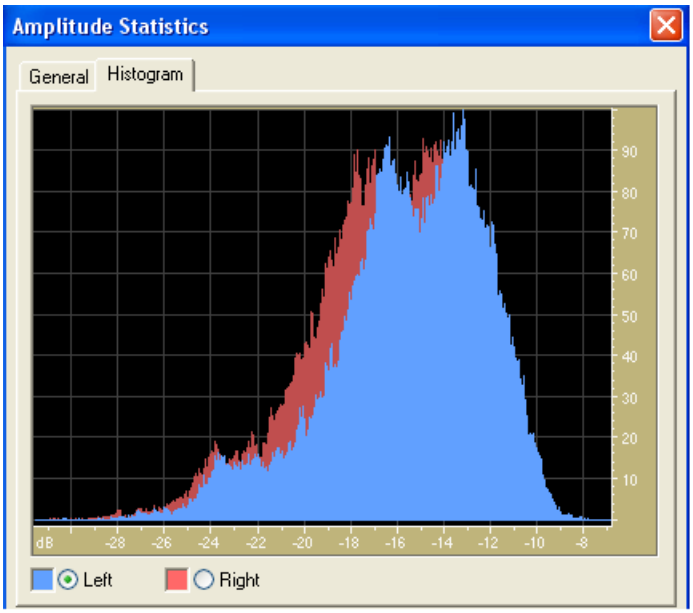


Рисунок 3.19 – Гістограма запису після видалення шумів.

Гістограма розташувалася у проміжку приблизно від 31 до 8 дБ. Середня гучність становить 14,65 та 15,77 дБ у лівому та правому каналах відповідно. На основі цих даних робимо наступне: лімітуємо сигнал на рівні 8 дБ, а точніше – "підглянемо" параметр Maximum RMS Power на попередній

вкладці – 7,97 дБ за рівнем найгучнішого каналу. Одночасно розширимо сигнал від 30 дБ на 7 дБ із запасом для кліпування при подальших операціях.

Для обмеження запису викликаємо вікно Hard Limiter, рис 3.20.

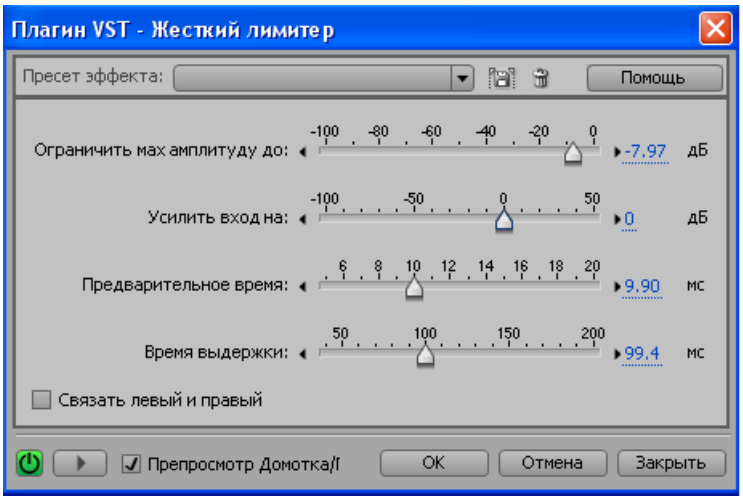


Рисунок 3.20 – Вікно Hard Limiter

Для динамічної обробки викликаємо вікно Dynamics Processing, рис.3.21.

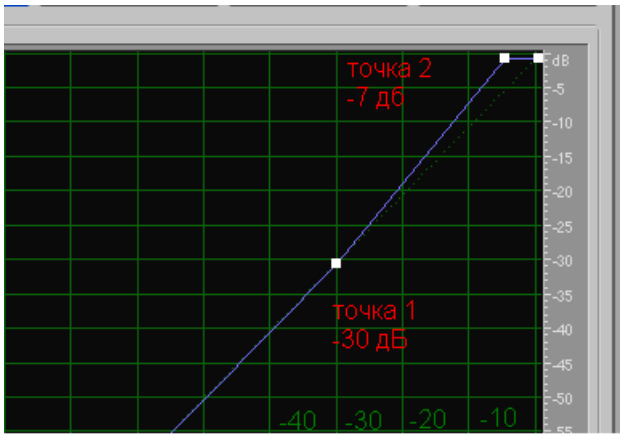
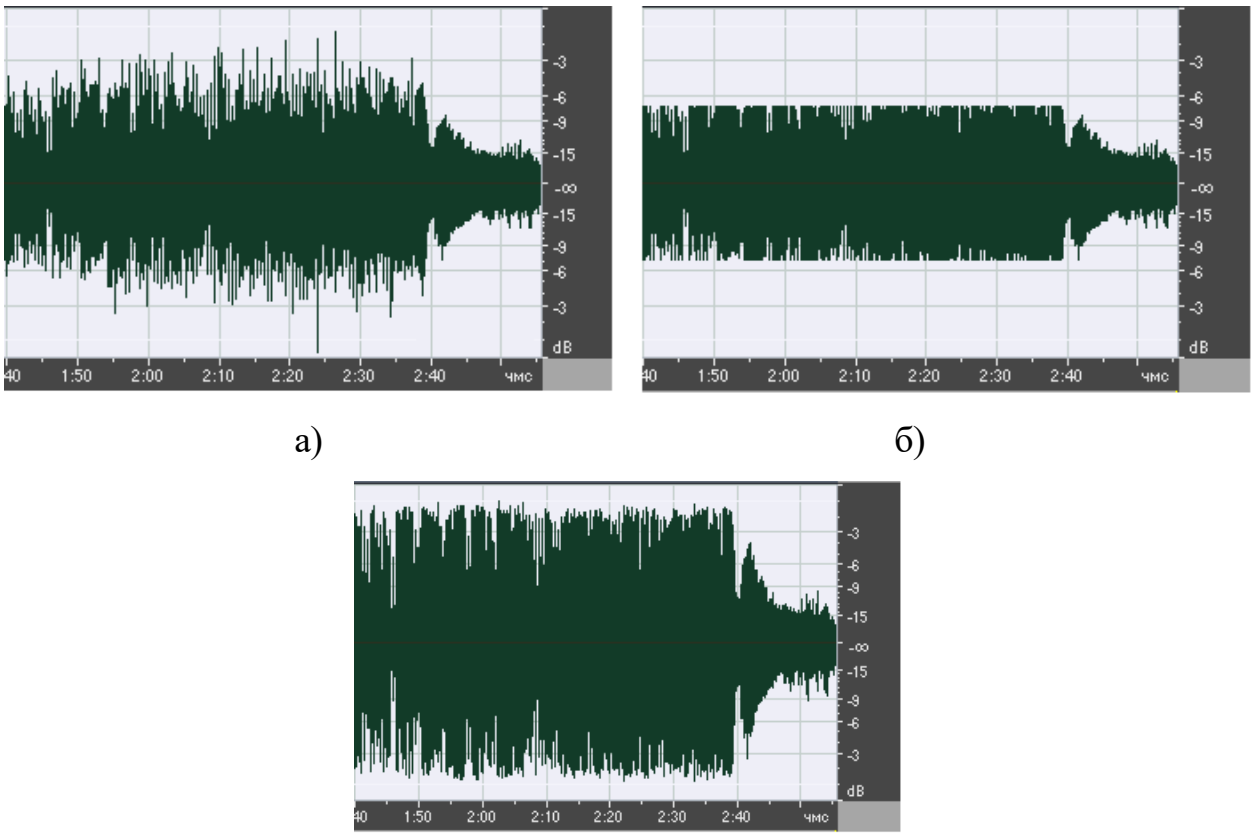


Рисунок 3.21 – Вікно Dynamics Processing

Отже, для обраних нами дій на графіку створюємо дві додаткові точки: точка 1 з координатами -30; -30 – початок експандування на околиці значення Minimum RMS Power; точка 2 з координатами -7; 0 – кінець діапазону експандування та посилення на 7 дБ.

Нижче наведено малюнки з послідовною зміною хвильової форми нашого запису в результаті всіх перерахованих вище дій, рис. 3.21, а, б, в.



а) б)

в)

Рисунок 3.22 – Зміна хвильової форми при динамічній обробці (а – перед динамічною обробкою, б – після обробки лімітером, в – після експандування)

Тепер параметр Total RMS Power становить 10,03 дБ 11,23 дБ для лівого та правого каналів, що дуже непогано. Динамічний діапазон – близько 24 дБ. Обов'язково перевірте, чи не з'явилося кліпування.

Частотна обробка. Частотна обробка, як і динамічна, не є обов'язковою. За відсутності передумов вона не проводиться. У нашому випадку при слуховому контролі з'ясувалося:

– під час концерту регулярно «фонять» мікрофони, що проявляється неприємним та гучним свистом поблизу частоти 5 кГц;

– відзначається нестача низьких частот;

– Відзначається нестача високих частот, починаючи з 2,5 кГц.

У випадку звучання можна охарактеризувати так: голос виконавця – цілком природний, натуральний, чіткий; мелодія – тьмяна, глуха, розпливчаста.

Для зменшення призвука від мікрофонів, що фонять, знаходимо на хвильовій формі потрібну ділянку, виділяємо її, помічаємо на аналізаторі спектру «вистрілювальні» частоти і за допомогою графічного еквалайзера пригнічуємо їх до прийнятної амплітуди. Виконуємо це з усіма фрагментами.

Для підвищення низьких і високих частот за допомогою того ж еквалайзера піднімаємо відповідні повзунки. Підвищуємо їх не більше ніж на 6 дБ, інакше зростуть нечувані раніше рівні перешкод. Також не слід підсилювати частоти, яких на спектроаналізаторі взагалі немає з тієї ж причини.

3.3.3 Третій етап відновлення

Для перетворення моно на стерео існують десятки інструментів, причому як у самих звукових редакторах, так і у вигляді різноманітних плагінів.

Поліпшити звучання фонограм також покликане багато функцій та плагінів. Їх застосування дуже спірне, тому вони й отримали влучну, саркастичну назву «улучшайзеры», Жодних об'єктивних показників їхньої роботи немає, контроль результату проводитися на слух.

Тут, на мій погляд, всі дії краще виконувати у програмі WaveLab, тому що вона має панель Master Section, що робить обробку в режимі реального часу з функціями Mute (приглушення вибраного ефекту) і Solo (пріоритету вибраного ефекту) , тому що при застосуванні відразу кількох ефектів деякі з них можуть виявитися зайвими, частково дублювати один одного, або погіршувати загальне звучання. Можна рекомендувати звернути увагу на такі інструменти:

– Auto Panner – створює ефект руху джерела звуку між каналами. За високої частоти переміщення створюється ефект «стерео»;

– Stereoecho – стереоехо;

– StereoExpander – розширення стереопанорами;

– Externalizer – по дії схожий на попередній і на всі "розширювачі" стерео, ефект нагадує зміну відстані між колонками;

– Multiband Compressor - одночасно виробляє динамічну обробку в декількох частотних діапазонах, на практиці використовується зазвичай для додавання низьких і високих частот;

– Natural Verb – імітує акустичні властивості приміщень від звичайної кімнати до концертних залів;

– Spectralizer – додає високі частоти,

Тут важливо не перестаратися, намагаючись використати все одразу, Тому завантажуємо ці ефекти в комірки і кнопками Mute і Solo прослуховуємо їх разом і окремо і в різній комбінації до отримання бажаного ефекту без спотворень. До речі, спотворення можуть виникнути при застосуванні будь-якого з них.

В нашому випадку зробили наступне. Для початку за допомогою Multiband Compressor були додані низькі та високі частоти. Потім проведено розділення моно на стерео інструментом StereoExpander. Саме така послідовність обрана тому, що у композиції практично відсутні музичні складові вище 2,5 кГц, а тому що стереоефект чітко локалізується лише на середніх і високих частотах, щоб точніше відстежити результат роботи StereoExpander, спочатку і були додані високі частоти .

Далі було додано ефект звучання «в концертному залі» за допомогою Natural Verb.

Останній етап – нормалізація. Виводимо та зберігаємо наш файл.

3.4 Висновки по розділу 3

Для практичної реставрації та ремастерингу був обраний магнітофонний запис живого концерту Віктора Цоя. Концерт проходив у закритому приміщенні, співали та грали наживо. Для відновлення фонограми застосована програма Adobe Audition.

При оцифровці обрані найвища для звукової карти частота дискретизації 192 кГц та бітова роздільна здатність 24 біт/семпл. Ці надмірні значення потрібні для більшої точності процедур відновлення.

Налаштування рівня обиралось так, щоби гарантовано уникнути кліпінгу (-6…-10 дБ на піках сигналу). Запис з магнітної стрічки проводився підряд – зі всіма шумами та паузами. Це потрібно, щоби мати можливість виділити відрізки виключно з шумами носія. Крім того, відсутність частих старт-стопів дозволяє не застосовувати процедуру зміщення постійної складової, яка не завжди працює коректно.

Обробка мала три етапи: очищення запису від клацань (так званий, деклікер); очищення від шумів, корекція частотного та динамічного діапазону покращення звучання: розширення стереобази, додавання високих частот, додавання прозорості, насиченості.

Пошук кліків проведено автоматично. Програма знайшла 38 кліків. При цьому 70% знайдених кліків не виділяються на слух. Це пояснюється тим, що вони знаходяться на рівному місці хвильоформи.

Кліки вирізано вручну. Відповідно до психоакустики, людське вухо не виявляє спотворення звуку тривалістю до 5 мс. Якщо клік набагато довше, то імпульс нормалізуємо. Рівень нормалізації виставляємо у децибелах за сусідніми відліками.

Проведений сумісний аналіз гістограми рівнів і хвильоформ. Основний розподіл відліків знаходиться в інтервалі від -8 дБ до -25 дБ. У районі -8 дБ та правіше зосереджені піки хвильової форми. Від -25 дБ і ліворуч – зазвичай шуми, які на хвильовій формі представлені на початку файлу.

Для збільшення середнього рівня гучності застосуємо м’яке лімітування на рівні -8 дБ з подальшим підсиленням сигналу на 8 дБ. Для збільшення динамічного діапазону застосуємо експандер в 1,5 – 2 рази зі збереженням середньої гучності.

Сумістимо гістограму та аналізатор спектру і проаналізуємо їх разом. Починаючи з 3,3 кГц графік має плавний спад. Нижче лінії -25 дБ є тільки

високі частоти, що підтверджує, що це складові шуму. Захоплюємо шум і подавлюємо методом спектрального віднімання.

Динамічна обробка після шумоподавлення полягала в застосуванні експандера. Після обробки динамічний діапазон збільшився з 17 до 24 дБ.

Частотна обробка. У нашому випадку при слуховому контролі з'ясувалося: під час концерту регулярно «фонять» мікрофони поблизу частоти 5 кГц; є нестача низьких частот; є нестача високих частот, починаючи з 2,5 кГц. За допомогою еквалайзера виправили ці недоліки, при цьому не підсилювали частоти, яких на спектроаналізаторі взагалі немає

На третьому етапі за допомогою Multiband Compressor були додані низькі та високі частоти. Потім проведено розділення моно на стерео інструментом StereoExpander. К композиції практично відсутні музичні складові вище 2,5 кГц, а тому що стереоефект чітко локалізується лише на середніх і високих частотах, щоб точніше відстежити результат роботи StereoExpander, спочатку і були додані високі частоти. Далі було додано ефект звучання «в концертному залі» за допомогою Natural Verb. Останній етап – нормалізація.

ВИСНОВКИ

За більше ніж 140 років існування звукозапису людство накопичило дуже велику кількість аудіоінформації. На носіях фонограм за всі ці роки накопичились великі обсяги архівних записів, що становлять велику цінність як з історичної точки зору, так і з технологічної та технічної сторін.

Якісні показники звукозапису за різними технологіями суттєво відрізняються. Більш того, суттєво можуть відрізнятися і якісні показники звуковідтворення фонограм після тривалого зберігання. Існує необхідність переведення їх у сучасний вид, а саме на цифровий носій. Тому для формування сучасного звукового контенту необхідна реставрація і відновлення аналогових фонограм.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні методів та засобів проведення реставраційних і відновлювальних робіт з аналоговими фонограмами, визначенні їх ефективності для подальшого застосування в різних сферах.

У першому розділі з’ясовано, що аналогові фонограми, які мають підлягати реставрації та відновленню, залежно від носія запису поділяються на фотографічні фонограми (на кіноплівках), магнітні фонограми (на магнітних стрічках), механічні (на грамплатівках).

Розглянуті фізичні принципи запису та відтворення звукових сигналів на вказані типи носіїв, виявлені характерні спотворення, що виникають під час цих процесів і методи боротьби з ними. В разі тривалого зберігання дані спотворення можуть посилюватися, а також можуть з’являтися нові типи спотворень, що потребує додаткових обробок при відновленні.

В другому розділі розглянуто шуми та перешкоди, що виникають при відтворенні аналогових звукозаписів. В усіх аналогових методах – магнітному, механічному, фотографічному – всі шумі і перешкоди можна поділити на 2 типи: адитивні та мультиплікативні. Перші додаються до корисного сигналу, другі – модулюють його. Враховуючи ще амплітудні,

частотні і фазові спотворення в процесі запису-відтворення, отримано загальний вираз для процедур корекції звукозапису. З отриманого виразу слідує, що задачу реставрації можна поділити на 4 основні складові: компенсація спотворень АЧХ; компенсація амплітудних спотворень (декомпресія); подавлення мультиплікативного шуму; подавлення адитивного шуму.

Складено загальний алгоритм дій при відновленні і реставрації. Він включає придушення клацань. Для цього використовується деклікер, рекомендується зробити пару проходів Другий етап – налаштування стерео балансу. Причому сучасні інструменти враховують не тільки різність амплітуд, але й різність запізнень каналів, так званий азимут-коректор.

Третій етап – Мід-Сайд кодування. Якщо запис моно, можна Side-канал відкинути, в ньому тільки шуми та тріск, а Mid-канал, тобто напівсума лівого та правого каналів, містить корисний сигнал. Якщо запис стерео, то в М-каналі ті шуми та клацання, які були в S-каналі, зменшуються на 3-6 дБ, а за допомогою вилучення центрального каналу рівень шуму можна зменшити приблизно на 20 дБ.

Для шумоподавлення існує денойзер на методі спектрального віднімання. Він добре працює в тих випадках, коли шум є стаціонарним. Денойзер "навчається" по фрагменту шуму з фонограми і застосовується до всього запису.

Якщо на носії є фрагменти, пошкоджені сильніше за інших, є інструмент Spectral Repair (спектральне відновлення). Він дозволяє ресинтезувати виділений фрагмент на підставі навколишнього матеріалу, замінивши його на синтетичну латку, яка в багатьох випадках звучить цілком реалістично.

Боротьба з нелінійними спотвореннями зводиться до використання декліпера, тобто відновлювача перевантажень. Корекція спектру і динамічного діапазону виконується еквалайзером і експандером відповідно.

В третьому розділі для практичної реставрації та ремастерингу був обраний магнітофонний запис живого концерту Віктора Цоя. Концерт проходив у закритому приміщенні, співали та грали наживо. Для відновлення фонограми застосована програма Adobe Audition.

При оцифровці обрані найвища для звукової карти частота дискретизації 192 кГц та бітова роздільна здатність 24 біт/семпл. Ці надмірні значення потрібні для більшої точності процедур відновлення.

Налаштування рівня обиралось так, щоби гарантовано уникнути кліпінгу (-6…-10 дБ на піках сигналу). Запис з магнітної стрічки проводився підряд – зі всіма шумами та паузами. Це потрібно, щоби мати можливість виділити відрізки виключно з шумами носія. Крім того, відсутність частих старт-стопів дозволяє не застосовувати процедуру зміщення постійної складової, яка не завжди працює коректно.

Обробка мала три етапи: очищення запису від клацань (так званий, деклікер); очищення від шумів, корекція частотного та динамічного діапазону покращення звучання: розширення стереобази, додавання високих частот, додавання прозорості, насиченості.

Пошук кліків проведено автоматично. Програма знайшла 38 кліків. При цьому 70% знайдених кліків не виділяються на слух. Це пояснюється тим, що вони знаходяться на рівному місці хвильоформи.

Кліки вирізано вручну. Відповідно до психоакустики, людське вухо не виявляє спотворення звуку тривалістю до 5 мс. Якщо клік набагато довше, то імпульс нормалізуємо. Рівень нормалізації виставляємо у децибелах за сусідніми відліками.

Проведений сумісний аналіз гістограми рівнів і хвильоформ. Основний розподіл відліків знаходиться в інтервалі від -8 дБ до -25 дБ. У районі -8 дБ та правіше зосереджені піки хвильової форми. Від -25 дБ і ліворуч – зазвичай шуми, які на хвильовій формі представлені на початку файлу.

Для збільшення середнього рівня гучності застосуємо м’яке лімітування на рівні -8 дБ з подальшим підсиленням сигналу на 8 дБ. Для

збільшення динамічного діапазону застосуємо експандер в 1,5 – 2 рази зі збереженням середньої гучності.

Сумістимо гістограму та аналізатор спектру і проаналізуємо їх разом. Починаючи з 3,3 кГц графік має плавний спад. Нижче лінії -25 дБ є тільки високі частоти, що підтверджує, що це складові шуму. Захоплюємо шум і подавлюємо методом спектрального віднімання.

Динамічна обробка після шумоподавлення полягала в застосуванні експандера. Після обробки динамічний діапазон збільшився з 17 до 24 дБ.

Частотна обробка. У нашому випадку при слуховому контролі з'ясувалося: під час концерту регулярно «фонять» мікрофони поблизу частоти 5 кГц; є нестача низьких частот; є нестача високих частот, починаючи з 2,5 кГц. За допомогою еквалайзера виправили ці недоліки, при цьому не підсилювали частоти, яких на спектроаналізаторі взагалі немає.

На третьому етапі за допомогою Multiband Compressor були додані низькі та високі частоти. Потім проведено розділення моно на стерео інструментом StereoExpander. К композиції практично відсутні музичні складові вище 2,5 кГц, а тому що стереоефект чітко локалізується лише на середніх і високих частотах, щоб точніше відстежити результат роботи StereoExpander, спочатку і були додані високі частоти. Далі було додано ефект звучання «в концертному залі» за допомогою Natural Verb. Останній етап – нормалізація.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гребінь О. П., Прядко О. М. Еволюція технологій створення фонограм в кінематографі: від Т. А. Едісона до О. Ф. Шоріна. Аудіовізуальне мистецтво і виробництво: досвід, проблеми та перспективи: Колективна монографія. Київ : Видав. центр КНУКіМ, 2021. – 328 с.

2. Digital Audio Restoration Simon Godsill and Peter Rayner Dept. of Engineering University of Cambridge, Cambridge, U.K. sjg,p jwr@eng.cam.ac.uk Olivier Cappe ENST Paris, France cappe@sig.enst.fr June 2, 1997. [Електронний ресурс]. URL: http://dsp-book.narod.ru/chapt.pdf (дата звернення – 08.11.2023).

3. Системи та пристрої реєстрації інформації/ Є. М. Травніков, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський та інш. За загальн. ред. В. Б. Швайченко. – К.: Кафедра, 2013. – 216 с.

4. А. П. Гребинь, Н. Ф. Левенец, В. Б. Швайченко, О. Шарадга Особенности восстановления аудиофрагментов носителей механической записи // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №4(32). – С. 62-67.

5. Eric D. Daniel, C. Denis Mee, Mark H. Clark. Magnetic Recording: The First 100 Years. – IEEE Magnetics Society, John Wiley & Sons, 1998. – 370 p.

6. Особенности реставрации и восстановления аудиосигналов, обусловленные спецификой носителя магнитной записи / А. П. Гребинь, Н. Ф. Левенец, В. Б. Швайченко, Д. М. Пробитый // Наукові записки УНДІЗ. – 2015 – №2(36). – С. 38-43.

7. T. Schirmer, A. Hein Digitalisierung und Restaurierung von Schallplatten, Tonbändern und Audiokassetten. – Deutsch, Taschenbuch. – 2008. – 128 S.

8. Grebin, A., Levenets, N., Shvaichenko, V. Methods of quality control of phonograms during restoration and recovery. Journal “ScienceRise”, Tallin, Estonia, №1, 2021. – P. 22-32.

9. Мультимедійні технології та програмні засоби для реставрації та відновлення звукових фонограм. Гребінь О.П., Левенець Н.Ф. Науково-практична конференція «Мультимедійні технології в освіті та інших сферах

діяльності» : Тези доповідей. – К. : НАУ, 2015.

10. Francis Rumsey, Tim McCormick. Sound and Recording: An Introduction. – Focal Press is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2006. – 595 p.

11. Woram J. Sound Recording Handbook. – Howard W. Sams and Co. 1989. – 338 p.

12. Eargle J. Handbook of Recording Engineering, 4th edition. Kluwer Academic Publishers, 2002. – 256 p.

13. Talbot-Smith M. Audio Engineer’s Reference Book, 2nd edition. – Focal Press, 1999. – 412 p.

14. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

15. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Confer-ence on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

16. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. – New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

17. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

18. V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu.

Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.

19. S. Sheiko. Study of the method for assessing atmospheric turbulence by the envelope of sodar signals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/5 (92). – April, 2018. – p. 33–40.

20. Сідоров Г.І., Шейко С.О., Шаповалов С.В., Полонська А.С., Дмитренко А.І. Акустичний метод вимірювання турбулентного стану атмосферного прикордонного шару // Радиотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. – Вип. 192. – С. 46–50.

21. Valerii V. Semenets, V. M. Kartashov, V. I. Leonidov. Registration of refraction phenomenon in the problem of acoustic sounding of atmosphere in airports zone. Telecommunications and Radio Engineering. Volume 77, Issue 5, 2018. – P. 461-468.

22. Бабак К.В. Технічні аспекти створення електронної музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 57-58.

23. Свірідок М.С. Технічні аспекти створення музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 104-105.

24. Курдиш В.В. Алгоритм синхронізації звуку і відео в інтерв'ю // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 129-130.

25. Древальський Р.В. Дослідження методу корекції звука для компенсації впливу приміщення /25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 119-120.

26. Удовік Д.В. Дослідження методів зменшення еквівалентної реверберації в звукозаписі: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 65 с.

27. Тарусін В.Ю. Дослідження методів компенсації спотворень в звукових трактах: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 78 с.

28. Мезенцев І.О. Дослідження алгоритмів автоматизованої еквалізації звукозапису голосу: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 69 с.

29. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв’язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.