

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 обробки звуку з використанням динамічної компресії
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІМ-20-1
Козлов А.І.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Шейко С.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Карташов В.М.
(прізвище, ініціали)

2021 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

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Козлову Андрію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи обробки звуку з використанням динамічної компресії.

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1676 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз принципів динамічної обробки звукових сигналів. Виконати теоретичне обґрунтування та дослідження алгоритмів динамічної компресії. Розробити алгоритм та математичний опис роботи динамічного процесора. Розробити методіку дослідження динамічних процесорів. Розробити програму динамічної обробки звукових фрагментів в MATLAB. Провести дослідження нелінійних спотворень сигналів в компресорах.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Аналіз принципів дії та сфер застосування динамічної обробки звукових сигналів.

2. Теоретичне обґрунтування та дослідження алгоритмів динамічної компресії.

3. Експериментальне дослідження впливу параметрів компресора на об'єктивні характеристики оброблених сигналів.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Проблемна ситуація . _____

2. Постановка задачі. _____

3. Дослідження компресорів в аудіоредакторах. _____

4. Структура оброблених сигналів. _____

5. Структура динамічного процесора. _____

6. Математичне описання компресора. _____

7. Алгоритми детекторів обвідної. _____

8. Реалізація компресора в MATLAB. _____

9. Дослідження нелінійних спотворень. _____

10. Оцінка нелінійних спотворень. _____

11. Висновки. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	02.11.21–10.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	11.11.21–17.11.21	
3	Дослідження впливу параметрів	18.11.21–24.11.21	
4	Розробка структурної схеми	25.11.21–1.12.21	
5	Дослідження нелінійних спотворень	02.12.21–5.12.21	
6	Обробка результатів досліджень	25.11.21–5.12.21	
7	Графічна частина роботи	25.11.21–5.12.21	
8	Перевірка керівником	5.12.21–6.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	7.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	7.12.21–8.12.21	

Дата видачі завдання _____ 08.11.2021 р. _____

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____

(підпис)

проф. Шейко С.О. _____

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 61 сторінка, 28 рисунків, 1 таблиця, 31 джерело.

АТАКА, ВІДНОВЛЕННЯ, ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, ГЕЙТ, КОМПРЕСОР, ЕКСПАНДЕР, ЛІМІТЕР, НЕЛІНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ, ПК-ФАКТОР

Об'єкт дослідження – нелінійні спотворення звукових сигналів при обробці динамічними процесорами.

Мета роботи – об'єктивна та суб'єктивна оцінка впливу параметрів динамічних процесорів на характеристики оброблених сигналів .

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних.

В роботі проведено аналіз принципів дії та сфер застосування динамічної обробки звукових сигналів. Виконано теоретичне обґрунтування та дослідження алгоритмів динамічної компресії. Розроблено алгоритм та зроблено математичний опис роботи динамічного процесора. Розроблена методика дослідження динамічних процесорів. Розроблена програма динамічної обробки звукових фрагментів в MATLAB. Проведено дослідження нелінійних спотворень сигналів в компресорах.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к квалификационной работе: 61 страница, 28 рисунков, 1 таблица, 31 источник.

АТАКА, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН, ГЕЙТ, КОМПРЕССОР, ЭКСПАНДЕР, ЛИМИТЕР, НЕЛИНИЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, ПИК-ФАКТОР

Объект исследования нелинейные искажения звуковых сигналов при обработке динамическими процессорами.

Цель работы – объективная и субъективная оценка влияния параметров динамических процессоров на характеристики обработанных сигналов.

Способы исследования – модельный эксперимент, натурный эксперимент, статистическая обработка экспериментальных данных.

В работе проведен анализ принципов действия и сферы применения динамической обработки звуковых сигналов. Выполнено теоретическое обоснование и исследование алгоритмов динамической компрессии. Разработан алгоритм и выполнено математическое описание работы динамического процессора. Разработана методика исследования динамических процессоров. Разработана программа динамической обработки звуковых фрагментов в MATLAB. Проведены исследования нелинейных искажений сигналов в компрессорах.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 61 pages, 28 figures, 1 table, 31 sources.

ATTACK, RECOVERY, DYNAMIC RANGE, GATE, COMPRESSOR, EXPANDER, LIMITER, NONLINEAR DISTORTION, PEAK FACTOR

The object of study is nonlinear distortion of sound signals when processed by dynamic processors.

The purpose of the work is an objective and subjective assessment of the influence of the parameters of dynamic processors on the characteristics of the processed signals.

Research methods – model experiment, field experiment, statistical processing of experimental data.

The analysis of the principles of action and areas of application of dynamic processing of sound signals is carried out in the work. Theoretical substantiation and research of dynamic compression algorithms are performed. An algorithm has been developed and a mathematical description of the dynamic processor operation has been made. The technique of research of dynamic processors is developed. The program of dynamic processing of sound fragments in MATLAB is developed. The study of nonlinear distortions of signals in compressors is carried out.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ДІЇ ТА СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ.....	12
1.1 Призначення динамічної обробки звукових сигналів.....	12
1.2. Динамічний діапазон звукових сигналів.....	13
1.3 Динамічний діапазон звукових трактів.....	16
1.4 Гучність звуку та динамічний діапазон.....	21
1.5 Принцип динамічної обробки.....	25
1.6 Нормалізація гучності в медіа.....	29
1.7 Висновки по розділу 1.....	31
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ДИНАМІЧНОЇ КОМПРЕСІЇ.....	31
2.1 Алгоритм роботи динамічного процесора.....	31
2.2 Алгоритм роботи детекторів обвідної.....	37
2.3 Розробка методики дослідження динамічних процесорів.....	41
2.4 Висновки по розділу 2.....	45
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КОМПРЕСОРА НА ОБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРОБЛЕНИХ СИГНАЛІВ.....	46
3.1 Розробка програми обробки звукових фрагментів.....	46
3.2 Дослідження нелінійних спотворень сигналів в компресорах.....	49
3.3 Висновки по розділу 3.....	53
Висновки.....	54

Перелік посилань.....	58
Додаток А. Графічний матеріал.....	62
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АІМ – амплітудно-імпульсна модуляція;
 АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
 дБА – децибели акустичні;
 ДП – динамічний процесор;
 ІКМ – імпульсно-кодова модуляція;
 фон – одиниця вимірювання гучності;
 EBU – European Broadcasting Union – Європейський мовний союз;
 FS – Full Scale – повна шкала АЦП або ЦАП;
 IMD – Inter Modulation Distortion – інтермодуляційні спотворення;
 PML – Permitted Maximum Level – максимальний рівень сигналу;
 THD – Total Harmonic Distortion – коефіцієнт нелінійних спотворень;
 TPDF – трикутний розподіл амплітуд;
 SPL – Sound Pressure Level – рівень звукового тиску;
 f_s – частота дискретизації;
 F_{\max} – максимальна частота звукового діапазону.
 L – рівень сигналу;
 L_l, L_c, L_e, L_n – пороги роботи лімітера, компресора, експандера та гейта;
 S_l, S_c, S_e, S_n – крутизна передавальної характеристики лімітера, компресора, експандера та гейта;
 k – пік фактор сигналу;
 SNR – відношення сигнал-шум;
 t – поточний час,
 τ – постійна часу.

ВСТУП

В даний час найсучасніша аудіотехніка не в змозі передати повну динаміки, яку сприймає людське вухо. Тому для практичних цілей при записі завжди доводиться здійснювати скорочення динамічного діапазону з використанням динамічної обробки. При виконанні цієї операції вирішуються як технічні, так і художні завдання. Насамперед, необхідно повністю використовувати динамічний діапазон носія. Також важливо максимально використати динамічний діапазон відтворюючого пристрою, щоб запис не тонував шумах.

Отже, уявлення про можливість природного сприйняття всього динамічного діапазону музики є абсолютно ілюзорним. Динамічна обробка звукових сигналів у електричних трактах позбавляє наші вуха від непотрібної роботи. Важливо лише щоб обробка здійснювалася це так само, як це робить людський слуховий апарат.

Як при аналоговому, так і цифровому звукозапису збільшення гучності звучання фонограми шляхом збільшення рівня запису значною мірою обмежується пік-фактором звукового сигналу. В першому разі важливо, щоб піки не наводили до сильного насичення магнітного носія, а в другому – піки можуть викликати кліпування сигналу.

При зведенні на цифровий носій фонограма без динамічної обробки має пік-фактор у районі 20 дБ. Це означає, що вона звучатиме на 6 дБ (тобто вдвічі) тихіше, ніж та ж фонограма, зведена на аналогову магнітну стрічку. Тому цифровий звукозапис може звучати менш привабливо, ніж її оригінал на студійній магнітній стрічці. Для компенсації дворазової втрати гучності доводиться використовувати досить жорстку динамічну обробку звукових сигналів.

Третім, найбільш складним завданням є підвищення гучності звучання за рахунок скорочення динамічного діапазону без помітного погіршення якості звуку. Це досягається тим, що при меншому пік-факторі звукового

сигналу вища гучність звучання фонограми досягається шляхом збільшення рівня запису.

Сучасні динамічні процесори працюють за різними алгоритмами роботи та мають багато налаштувань. Кожен динамічний процесор є принципово нелінійним пристроєм, який вносить спотворення в оброблений сигнал. В кваліфікаційній роботі проводиться об'єктивна та суб'єктивна оцінка впливу параметрів динамічних процесорів на характеристики оброблених сигналів.

Об'єкт дослідження – нелінійні спотворення звукових сигналів при обробці динамічними процесорами.

Мета роботи – об'єктивна та суб'єктивна оцінка впливу параметрів динамічних процесорів на характеристики оброблених сигналів .

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ДІЇ ТА СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

1.1 Призначення динамічної обробки звукових сигналів

Динамічна обробка призначена для скорочення динамічного діапазону звукових сигналів. Звукові сигнали в радіомовленні, телебаченні та звукозаписі завжди піддаються такій обробці, незалежно аналогові вони чи цифрові. Це пов'язано з тим, що часто динамічний діапазон природних звуків, звуків музики та мови значно ширше динамічного діапазону електроакустичних трактів сучасної апаратури. Якщо не використовувати динамічну обробку та передавати повністю натуральний динамічний діапазон оркестру (70...80 дБ), щоб не заважали шуми приміщення, рівень сигналу піаніссимо має бути не нижче 40 дБ SPL. Фортіссимо при цьому досягатиметься при рівні звукового тиску 120 дБ SPL, що близько до больового порога [1-5,11].

Динамічна обробка звукових сигналів дозволяє слухати радіо та телевізійні передачі зі звуковим тиском не вище 100 дБ SPL у звичайних житлових приміщеннях, в яких зазвичай рівень шуму не менше 40...50 SPL і навіть у автомобілях, де рівень шуму значно більший. Без такої обробки при піковому звуковому тиску не вище 80 дБ SPL (як у театрі) звукозапису можна було б слухати тільки в повній тиші, зачинивши вікна та двері, інакше будь-який сторонній шум заглушить тихі місця фонограми [1-5,11].

Динамічна обробка звукових сигналів проводиться за допомогою:

- лімітерів,
- максимайзерів,
- компресорів,
- експандерів
- гейтів.

Це все порогові пристрої, яких при досягненні сигналу встановленого рівня їх коефіцієнт передачі змінюється стрибком.

У такий спосіб можна як стиснути, так і розширити динамічний діапазон сигналу. У системах передачі звукових сигналів лініями зв'язку скорочення та зворотне розширення динамічного діапазону проводиться за допомогою компандерної системи компресування. На вході лінії встановлюється компресор, а на виході – експандер, тому в такій системі сигнал компресований лише у лінії зв'язку. Назви приладів такі ж, як і при динамічній обробці, але їх принцип роботи зовсім інший, це потрібно мати на увазі.

1.2. Динамічний діапазон звукових сигналів

Людина чує звук у надзвичайно широкому діапазоні звукових тисків. Цей діапазон простягається від абсолютного порога чутності до больового порога 140 дБ SPL відносно нульового рівня, за який прийнято тиск $2 \cdot 10^{-5}$ Па (рис.1.1).

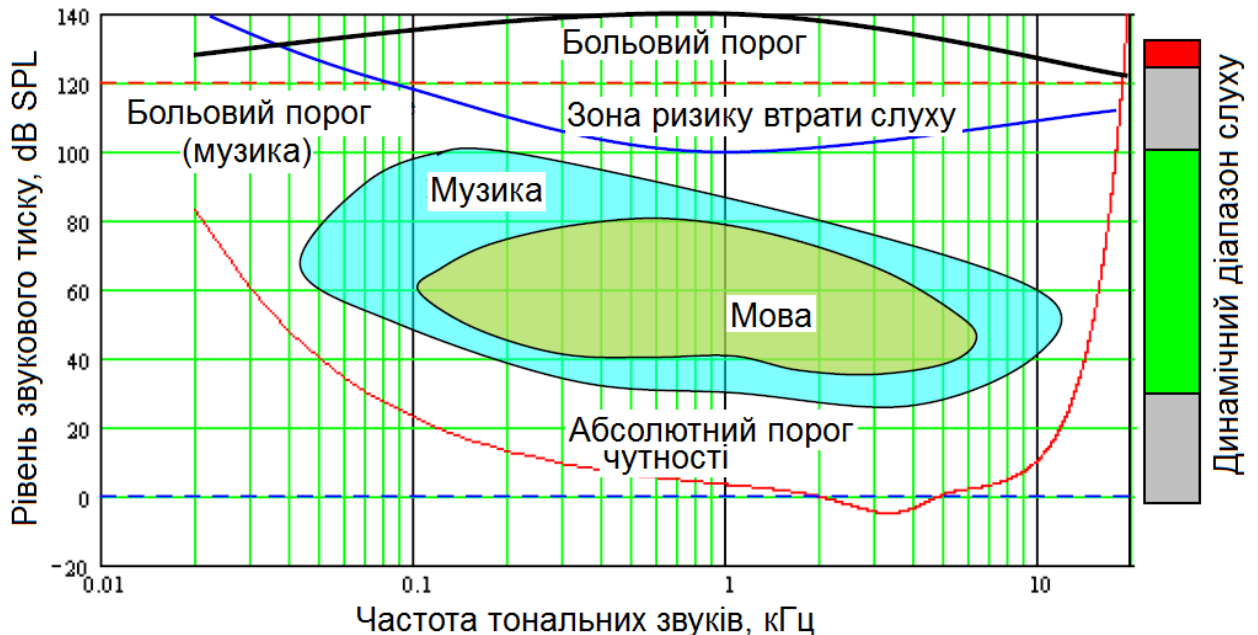


Рисунок 1.1 – Области чутності слуху

Зона ризику на цьому рисунку позначає область звукових тисків, які при тривалій вплив може призвести до повної втрати слуху. Больовий поріг

для тональних звуків залежить від частоти, для звуків з довільним спектром за больовий поріг прийнято рівень тиску 120 дБ SPL.

У тиші чутливість слуху людини підвищується, а в атмосфері гучних звуків – знижується, слух адаптується до навколишнього звукового середовища, тому *динамічний діапазон слуху* не такий великий – близько 70...80 дБ. Зверху він обмежений тиском 100 дБ SPL, а знизу шумом із рівнем -30...35 дБ SPL. Цей динамічний діапазон може зрушуватися вгору та вниз до 20 дБ. Для комфортного сприйняття музики рекомендується, щоб звуковий тиск не перевищував 104 дБ SPL у домашніх умовах та 112 дБ SPL, у спеціально обладнаних приміщеннях [5,6].

Динамічний діапазон музики визначається відношенням у децибелах самого гучного звуку (фортісімо) і самого тихого звуку (піаніссімо). *Динамічний діапазон симфонічної музики* становить 65...75 дБ, але в концертах рок-музики він зростає до 105 дБ, при цьому піки звукових тисків можуть досягати 122...130 дБ SPL. Динамічний діапазон вокальних виконавців – не перевищує 35...45 дБ (рис.1.1).

Шум приміщення маскує звук і цим зменшує динамічний діапазон.

Впливом шуму можна повністю знехтувати, якщо його рівень на 10...20 дБ SPL нижче мінімального рівня музичних звуків. У студіях звукозапису рівень шуму не перевищує 20...30 дБ SPL, вночі в квартирах «тихих» будинків цей рівень дорівнює 40 дБ SPL, будь-яка розмова збільшує рівень шуму до 60дБ SPL. Саме тому тиха музика часто тоне в шумах приміщення прослуховування і мимоволі виникає бажання збільшити гучність.

Музичний і мовний сигнали являють собою послідовність швидко наростаючих і повільніше загасаючих звукових імпульсів (рис.1.2). Такий сигнал характеризується *середньоквадратичним* $N_{сер}$ та *піковим* $N_{п}$ значеннями рівнів, різниця цих рівнів називається *пік фактором* k (1.1). Прямокутна хвиля (меандр) має одиничний пік-фактор 0 дБ, пік-фактор синусоїди дорівнює 3 дБ [1-5,11].

$$k = N_{\Pi} - N_{сер} \cdot \quad (1.1)$$

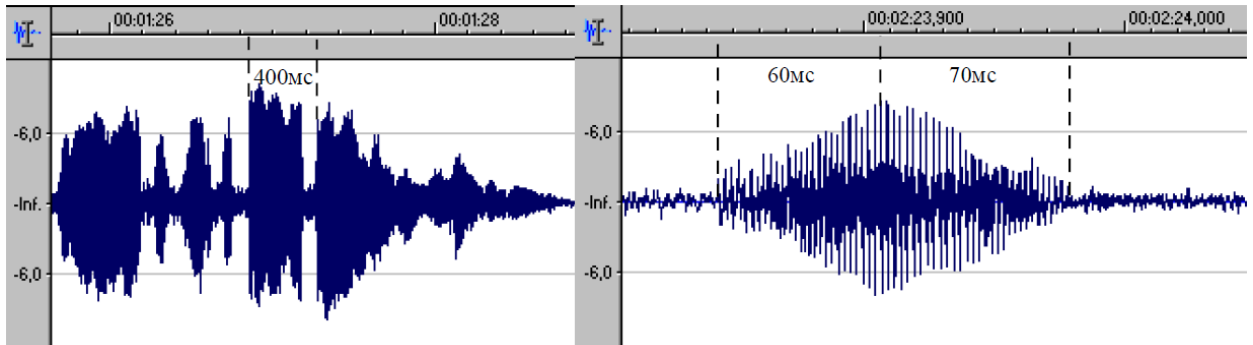


Рисунок 1.2 – Фрагменти фонограм музичних уривків різної тривалості

Фонограми музичних та мовних сигналів мають пік-фактор до 20 дБ та більше. Час визначення пік-фактора пов'язаний з часом інтегрування при обчисленні середньоквадратичного значення сигналу, як правило, воно дорівнює 50 мс.

Емоційну музику з широким динамічним діапазоном та великим пік-фактором можна слухати тільки на високоякісній дорогій апаратурі з гарними акустичними колонками. На дешевих плеєрах з навушниками та в автомобілях через шуми динамічний діапазон скорочується і вона звучить неякісно. Тому широким попитом такі записи не користуються і, неминуче, з кожним роком динамічний діапазон та пік-фактор фонограм навмисно аудіовиробниками зменшується (рис.1.3) [12].

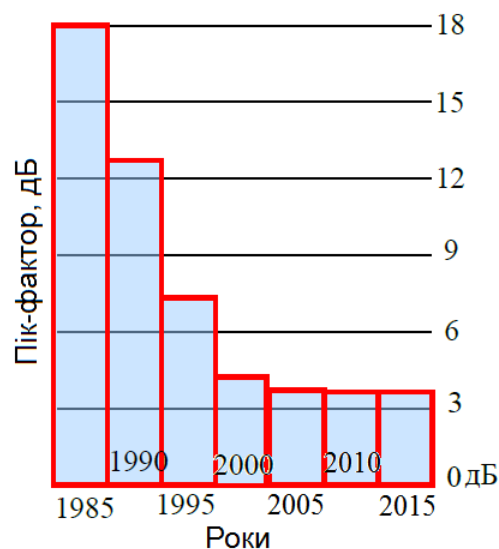


Рисунок 1.3 – Пік-фактор звукозаписів

На рис.1.4. наведено зображення фонограми сучасної поп-пісні.

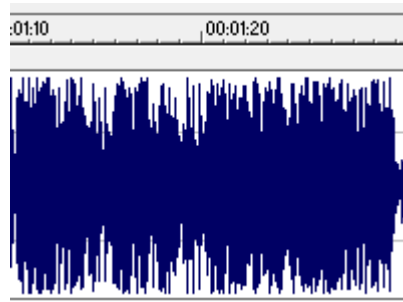


Рисунок 1.4 – Фрагмент фонограми сучасної поп-пісні

У сучасних звукозаписах в більшості випадків динамічний діапазон не перевищує 20 дБ, а пік-фактор-трохи більше 3 дБ, що цілком достатньо для танцювальної музики.

1.3 Динамічний діапазон звукових трактів

Динамічний діапазон мікрофонів визначається так само, як це зазвичай робиться в електричних трактах. Верхня межа обмежується допустимою величиною нелінійних спотворень, а нижня – рівнем власних шумів.

Сучасні студійні мікрофони допускають максимальний звуковий тиск 125...145 дБ SPL, при цьому нелінійні спотворення не перевищують 0,5%...3%. Рівень власних шумів мікрофонів становить 15...20 дБА, динамічний діапазон - від 90 до 112 дБА, а відношення сигнал/шум-від 70 до 80 дБА. Ці мікрофони із запасом перекривають весь діапазон слуху людини від 120 дБ SPL до рівня шуму студії 20 дБ SPL.

В сучасних студіях запис проводиться з використанням 32 або 24 розрядних АЦП, іноді використовується квантування з плаваючою комою, тому проблем із динамічним діапазоном немає. Коштує така апаратура досить дорого.

Динамічний діапазон D будь-якого АЦП визначається як різниця у децибелах максимального N_{\max} та мінімального N_{\min} значень рівнів електричних сигналів [9]

$$D = N_{\max} - N_{\min}, \quad (1.2)$$

які можна оцифрувати в принципі (передати сигнал із входу на вихід), без жодних умов щодо можливих спотворень.

В аналого-цифровому перетворювачі лінійного ІКМ тракту максимальна амплітуда синусоїдального сигналу однозначно визначається кроком квантування Q та числом розрядів квантувача q

$$A_{\max} = Q \cdot 2^{q-1}. \quad (1.3)$$

У такому АЦП поки що амплітуда вхідного сигналу не перевищить половини кроку квантування – на виході сигналу немає, тому можна вважати, що мінімальне значення вхідного сигналу дорівнює половині кроку квантування і тоді динамічний діапазон АЦП визначається формулою

$$D = 6,02 \cdot q. \quad (1.4)$$

Значення відношення сигнал-шум SNR в ІКМ тракті розраховується через відношення середньоквадратичних значень синусоїдального коливання максимально можливої амплітуди та спотворень квантування. Його обчислення проводяться за формулою [9]

$$SNR = 6,02q + 1,78 + 10 \lg \left(\frac{f_s}{2F_{\max}} \right), \quad (1.5)$$

де f_s – частота дискретизації;

F_{\max} – максимальна частота звукового діапазону.

При $f_s = 44,1$ кГц та $F_{\max} = 20$ кГц динамічний діапазон $D = 96$ дБ, а відношення сигнал-шум $SNR = 98,5$. Як видно, відношення сигнал/шум лише

на 2 децибела більше динамічного діапазону, треба звернути увагу на те, що величина SNR залежить ще від частот f_s і F_{\max} , тоді як D від цих параметрів не залежить.

Тим не менш, у більшості технічних публікацій динамічний діапазон ототожнюється з відношенням сигнал/шум. Це підтверджується стандартом EBU 128. У цьому стандарті рекомендується вимірювати SNR та D при подачі на вхід АЦП синусоїдального сигналу з частотою 997 Гц та рівнем мінус 60 дБ FS с обов'язковим використанням TPDF дизера. При цьому розрахункове співвідношення для SNR через внесення додаткового шуму пропонується у вигляді [9]

$$SNR = D = 6,02q - 3,01 + 10 \lg \left(\frac{f_s}{2F_{\max}} \right). \quad (1.6)$$

За колишніх умов $D = SNR = 93,7$ дБ, а не 96 дБ, як це часто зустрічається в технічній літературі. Отже, зменшується і розрахунковий динамічний діапазон.

Замість SNR часто використовується його обернена величина, що визначає інтегральний рівень шуму квантування

$$\bar{L}_n = -SNR. \quad (1.8)$$

Рівень шуму мінус 93,7 дБ – це багато чи мало. Важливо, наскільки цей рівень перевищує поріг чутності. З використанням технології дизеринг шум квантування стає білим шумом, поріг чутності якого дорівнює 4 дБ SPL [2]. Це означає що при максимальному звуковому тиску 120 дБ SPL шум квантування при $q = 16$ біт буде перевищувати поріг чутності на 22,3 дБ. Для того, щоб шум квантування був не чутним в АЦП з ІКМ потрібно використовувати 20-розрядне квантування.

При квантуванні сигналів мінімального рівня виникають значні спотворення, що перевищують 100%, а через дизеринг вносяться шуми, за рівнем вдвічі більше за основний сигнал. На рис.1.5. наведено форму сигналу, який набуває синусоїдальний сигнал із рівнем мінус 93 дБ FS на виході АЦП.

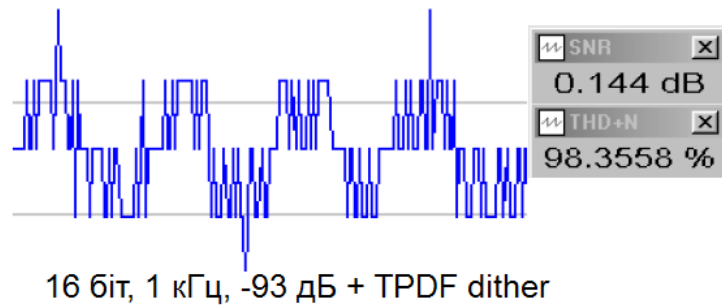


Рисунок 1.5 – Послідовність вибірок синусоїдального сигналу спотвореної форми

У зв'язку з цим на практиці доводиться керуватися реальним динамічним діапазоном АЦП. При визначенні цього діапазону слід враховувати: пік-фактор музичних сигналів, що досягає 12...20 дБ, необхідність піднімати рівень нижньої межі динамічного діапазону над рівнем шуму квантування хоча б на 20 дБ і мати додатковий запас у верхній частині динамічного діапазону близько 10...12 дБ для запобігання випадковому навантаженню.

В результаті реальний динамічний діапазон запису 16-розрядного АЦП ІКМ тракту вбирається у 48...54 дБ. Цього навіть близько не вистачає для гарного студійного звукозапису. При автоматичному регулюванні рівнів, що має місце під час звукозапису, цей діапазон може бути розширений до 74 дБ, тільки з помітним погіршення якості звуку сигналів низького рівня.

Запас динамічного діапазону зверху захищає від можливості перевантаження, коли пікові рівні перевищують очікуване значення. При записі танцювальної музики цілком достатньо запасу 6 дБ. При записі симфонічної музики іноді доводиться мати запас до 20...30 дБ. Запас

динамічного діапазону знизу запобігає можливості тихих пасажів виявитися нижче за рівень шуму і, тим більше, нижче за поріг чутності.

Для розширення динамічного діапазону АЦП без збільшення кількості розрядів та частоти дискретизації розроблено багато спеціальних алгоритмів. Наприклад, запис у студії здійснюється з використанням 20 або 24-розрядів, а потім цифрові дані округляються до 16 розрядів із застосуванням технологій дизеринг та нойз-шейпінг.

При використанні технології дизерингу, усувається поріг квантування, лінеаризується передатна функція при малих рівнях сигналів, похибки квантування перетворюються на білий шум з рівномірною спектральною щільністю.

Завдяки цьому динамічний діапазон розширюється вниз на 25 дБ і досягає 118 дБ. Фізичною основою такого феномену є здатність людини чути тональний звук, що маскується білим шумом, коли рівень інтенсивності тону менше рівня потужності шуму. Це пов'язано з тим, що маскування тону відбувається в критичній смузі слуху, в якій знаходиться тон, що маскується, правда ефект не такий великий, як про нього пишуть.

Рівень потужності білого шуму у критичних смугах визначається формулою [9]

$$L_{mn}(f) = L(f)_{sdn} + 10 \lg(W_{cbw}), \quad (1.10)$$

де W_{cbw} – ширина критичної смуги, що розраховується за емпіричною формулою [9]

$$W_{cbw} = 25 + 75[1 + 1,4(f/1000)^2]^{0,69}, \text{ Гц.} \quad (1.11)$$

Ширина критичної смуги змінюється від 100 Гц на НЧ до 6 кГц – на високих. У стільки ж раз зростає рівень потужності шуму квантування у критичних смугах (рис.1.6).

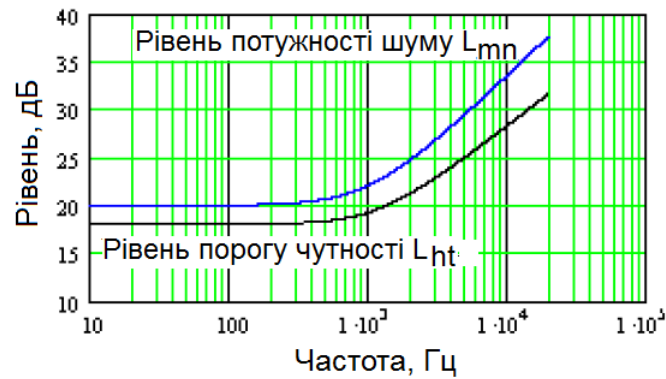


Рисунок 1.6 – Рівень порогової чутності тону, що маскується білим шумом

До частоти 500 Гц ширина критичних смуг однакова і дорівнює 100 Гц, тому в цьому діапазоні рівень потужності шуму в критичних смугах 20 дБ вище за рівень спектральної щільності потужності. Вище 500 Гц рівень потужності шуму піднімається з крутістю близько 10 дБ на декаду. Спектральна щільність потужності шуму квантування $L(f)_{sdn}$ пов'язана з інтегральним рівнем шуму \bar{L}_n формулою [9]

$$L(f)_{sdn} = \bar{L}_n - 10 \lg(f_s / 2). \quad (1.12)$$

Для 16-ти розрядного АЦП з TPDF дизером $\bar{L}_n = -93,7$ дБ, $L(f)_{sdn} = -137,2$ дБ.

1.4 Гучність звуку та динамічний діапазон

З динамічним діапазоном звукового сигналу та його пік-фактором тісно пов'язана така важлива характеристика фонограми як гучність звуку. *Гучність звуку* є суб'єктивною характеристикою. Вона найбільше залежить від двох факторів – звукового тиску та спектрального складу звуку. Як одна з оцінок гучності використовується поняття рівня гучності, що вимірюється у фонах. Відповідно до стандарту ISO на частоті 1 кГц *рівень гучності* у фонах

повністю визначається рівнем звукового тиску в децибелах (наприклад, 40 дБ SPL – 40 фон).

Зв'язок між рівнем гучності та звуковим тиском на інших частотах визначається експериментальними графіками, званими кривими рівної гучності або ізофонами (рис.1.7).

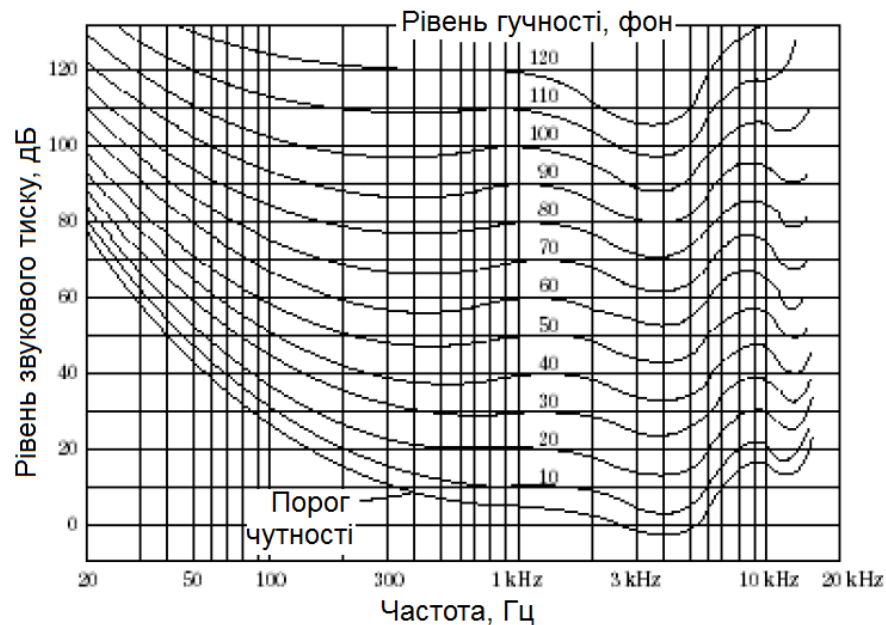


Рисунок 1.7 – Криві рівної гучності

З наведених графіків кривих рівної гучності слідує, що для натурального звучання запис має відтворюватися при тому ж рівні гучності, при якому вона була здійснена. Коли запис, зроблений на високому рівні гучності, відтворюється на нижчих рівнях, низькі та високі частоти як би пропадають, частотний баланс порушується.

Якщо запис зроблено на низькому рівні гучності, а відтворюється на високому – спів і мова здаються бубонящими, тому що слухач сприймає в них низькі частоти значно гучнішими, ніж при прослуховуванні природного джерела більш «тихих» рівнях.

Ізофони в перевернутому вигляді (рис.1.8), які називають ваговими характеристиками, являють собою частотну залежність чутливості слуху людини від рівня гучності звуку. Криві з індексами С, В та А відповідають ізофонам з рівнями гучності 100, 70 та 30 фон.

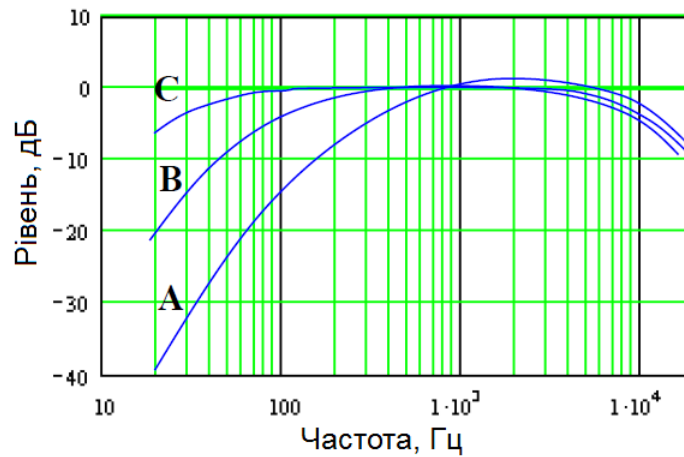


Рисунок 1.8 – Зважувальні криві

З цих графіків випливає, що частотні спотворення слухової системи тим менше, що більший рівень гучності звуку. Саме тому гучна музика найчастіше здається "красивішою", ніж тиха, і більше привертає увагу. На цій підставі більшість продюсерів усіма силами прагнуть підвищити рівень запису фонограми при мастерингу, оскільки від цього залежатиме її комерційний успіх.

При динамічній обробці звукових сигналів слід враховувати ефект адаптації слуху, який виникає при звукових тисках 90 і більше дБ.

Цей ефект полягає в тому, що зміна рівня гучності при підвищенні та зниженні звукового тиску на ту саму величину, припустимо на 6 дБ, сприймається абсолютно по-різному. При різкому підвищенні тиску на 6 дБ рівень гучності стрибком збільшується на 9 фон і потім повільно зменшується за експоненціальним законом (рис. 1.9) до значення +6 фон.

При різкому зменшенні звукового тиску, також на 6 дБ, рівень гучності стрибком зменшується на 19 фон, потім дуже повільно наростає до стаціонарного значення.

Час адаптації слуху до рівня гучності при перепаді звукового тиску на 6 дБ приблизно дорівнює 120...150 мс, максимально воно може досягати 260 мс. При спаді звукового тиску час адаптації суттєво більший, і стрибок рівня гучності становить 19 фон. Все це враховується при виборі часових параметрів процесорів.

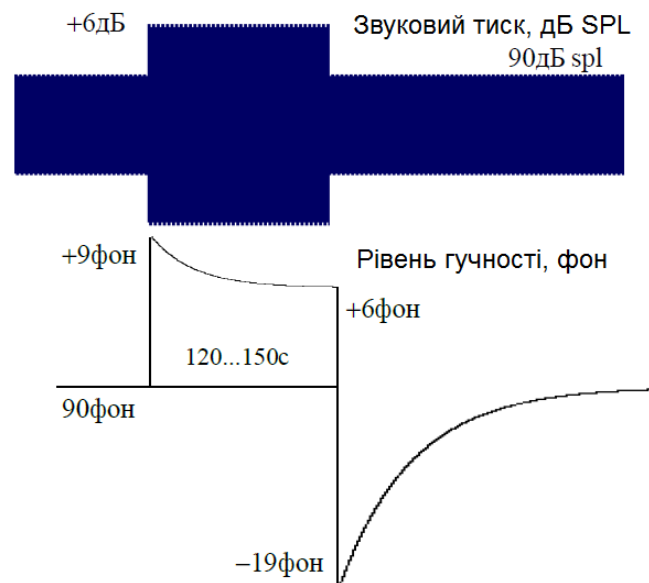


Рисунок 1.9 – Час адаптації сприйняття гучності

Графік обвідної рівня гучності на рис.1.9 свідчить, що при великих рівнях звукового тиску слуховий апарат людини здійснює своєрідну компресію звукових сигналів, подібну до динамічної обробки. Таке відбувається завдяки нелінійності розтягування барабанної перетинки зовнішнього вуха. Цим слуховий апарат самостійно намагається захистити власні вуха.

Таким чином, уявлення про можливість природного сприйняття всього динамічного діапазону музики є абсолютно ілюзорним. Динамічна обробка звукових сигналів у електричних трактах позбавляє наші вуха від непотрібної роботи. Важливо лише щоб здійснювалося це так само, як це робить слуховий апарат.

Як при аналоговому, так і цифровому звукозапису збільшення гучності звучання фонограми шляхом збільшення рівня запису значною мірою обмежується пік-фактором звукового сигналу. В першому разі важливо, щоб піки не наводили до сильного насичення магнітного носія, а в другому – піки можуть викликати кліпування сигналу.

При зведенні на цифровий носій фонограма без динамічної обробки має пік-фактор у районі 20 дБ. Це означає, що вона звучатиме на 6 дБ (тобто вдвічі) тихіше, ніж та ж фонограма, зведена на аналогову магнітну стрічку.

Тому цифровий звукозапис може звучати менш привабливо, ніж її оригінал на студійній магнітній стрічці. Для компенсації дворазової втрати гучності доводиться використовувати досить жорстку динамічну обробку звукових сигналів.

В даний час найсучасніша аудіотехніка не в змозі передати повну динаміку, яку сприймає людське вухо. Тому для практичних цілей при записі завжди доводиться здійснювати скорочення динамічного діапазону з використанням динамічної обробки. При виконанні цієї операції вирішуються як технічні, так і художні завдання. Насамперед, необхідно повністю використовувати динамічний діапазон носія. Також важливо максимально використати динамічний діапазон відтворюючого пристрою, щоб запис не тонував у шумах.

Третім, найбільш складним завданням є підвищення гучності звучання за рахунок скорочення динамічного діапазону без помітного погіршення якості звуку. Це досягається тим, що при меншому пік-факторі звукового сигналу вища гучність звучання фонограми досягається шляхом збільшення рівня запису.

1.5 Принцип динамічної обробки

Динамічна обробка звукових сигналів проводиться для звуження або розширення динамічного діапазону. Прилад або програмний модуль, що виконує цю функцію називається динамічним процесором (ДП).

Динамічна обробка застосовується тільки для нестационарних сигналів з підйомами та провалами обвідної звукового сигналу. Рівень обвідної визначається за допомогою пікового детектора, при цьому одночасно обчислюється середньоквадратичне значення сигналу з часом інтегрування приблизно рівним постійній часу слуху – 50...60 мс.

Принцип цифрової динамічної обробки заснований на майже миттєвому зміні коефіцієнта передачі сигналів, коли рівень звукового

сигналу стає вище (або нижче) встановленого порога. Поріг може задаватися як піковим значенням рівня, так і середньоквадратичним.

Основними параметрами ДП є:

- передавальна характеристика (у вигляді графіка або функції),
- поріг спрацьовування (*Threshold*),
- час установлення (*Attack*) T_y ,
- час відновлення (*Release*) T_B коефіцієнта передачі.

Перелом у передавальній характеристиці називається точкою перегину. Вхідний рівень, що відповідає перегину, називається порогом (*Threshold*), задається він у децибелах. Кут нахилу графіка передавальної характеристики вище (нижче) точки перегину визначає коефіцієнт передачі підйомів (провалів) обвідної звукового сигналу.

Залежно від виду передавальної характеристики ДП він може виконувати функції лімітера, компресора, експандера чи гейта. Всі ці функції можуть бути реалізовані в одному пристрої або за допомогою одного програмного модуля. На рис. 1.10 наведено типові передавальні характеристики цих пристроїв [13].

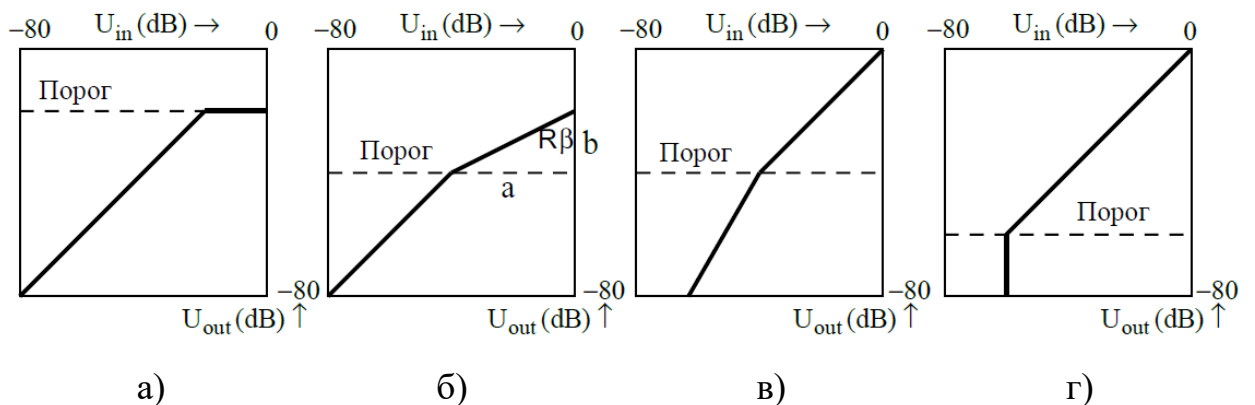


Рисунок 1.10 – Передавальні функції динамічних процесорів

(а – лімітер, б – компресор, в – експандер, г – гейт)

Передавальна характеристика ДП однозначно визначає регульовальну характеристику, відповідно до якої змінюється коефіцієнт передачі регулюючого елемента ДП. Вигини та злами передавальної характеристики

визначають дискретний характер зміни коефіцієнта передачі регулюючого елемента ДП, і вони значною мірою визначають форму амплітудної обвідної динамічно обробленого звукового сигналу.

Лімітер обмежує динамічний діапазон зверху – піки та підйоми обвідної, значення яких перевищують пороговий рівень, він послаблює рівні до рівного встановленому порогу.

Компресор також обмежує динамічний діапазон зверху – підйоми обвідної, величина яких перевищує пороговий рівень, він послаблює відповідно до встановленого коефіцієнта передачі вище точки перегину.

Різниця в роботі лімітера та компресора особливо помітна при малій швидкості наростання та спаду обвідної вхідного звукового сигналу (рис.1.11.).

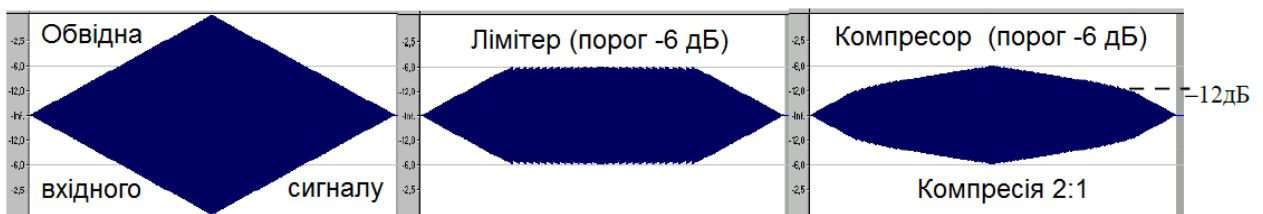


Рисунок 1.11 – Амплітудні обвідні вихідного сигналу ДП при $T_y = T_B = 0$

Усі злами амплітудної обвідної вихідного сигналу повністю відповідають моментам стрибкоподібної зміни коефіцієнта передачі. Як видно, при компресуванні схили амплітудної обвідної більш плавні. Зі збільшенням крутості наростання і спаду обвідної вхідного сигналу злами амплітудної обвідної стають все різкіше, аж до повного розриву, а різниця у роботі лімітера та компресора нівелюється.

Експандер розширює динамічний діапазон знизу – провали обвідної, рівень яких нижче порогового він збільшує шляхом зменшення коефіцієнта передачі нижче від точки перегину.

Гейт обмежує динамічний знизу – всі сигнали у провалах обвідної, рівень яких нижче порогового, не пропускає.

Ступінь стиснення (компресії) визначається ставленням коефіцієнтів передачі нижче та вище точки перегину передавальної функції. Тому вона може задаватися як відношення прирощень вхідного та вихідного сигналів у децибелах, наприклад,

$$Ratio = 18:6.$$

Коефіцієнт передачі визначається також кутом нахилу передавальної функції β , тому ступінь стиснення може задаватися у вигляді відношення сторін прямокутного трикутника a та b (рис. 1.10, б).

Якщо, наприклад, $a:b = 1:1$, кут нахилу дорівнює $\beta = 45^\circ$ – це означає, що стиску немає. Якщо $a:b = 2:1$ – це означає, що при збільшенні вхідного рівня на 2 дБ вище за поріг вихідний рівень зросте лише на 1 дБ і, отже, ступінь стиснення дорівнює 2.

У роботі ДП дуже важливу роль відіграють його часові параметри:

- час встановлення T_y , часто званий часом спрацьовування,
- час відновлення T_B ,

від яких значною мірою визначають тривалість перехідних процесів.

Ці параметри вимірюються в одиницях часу, тоді як швидкість встановлення та відновлення вимірюється у дБ/с. Останнє означає, що час спрацьовування та час відновлення не є постійними величинами, а залежать від рівня звукового сигналу. Ця залежність виявляється в тому, що чим більший рівень сигналу, тим більший час встановлення та менший час відновлення.

Вибір значень цих параметрів залежить від режиму динамічного процесора (компресор, експандер, лімітер чи гейт). Істотне значення має характер музичного матеріалу. Іноді ці параметри вибираються виходячи з необхідності вирішення будь-яких творчих завдань. Сучасні ДП дозволяють плавно змінювати час встановлення від 0 до 500 мс, а час відновлення – від 0 до 5 с.

1.6 Нормалізація гучності в медіа

Принципи динамічної обробки телевізійних і радіопрограм надані в документі EBU R 128. Цей документ детально описує одну з найбільш фундаментальних змін в історії звуку у мовленні: зміна принципу встановлення рівнів з нормалізації піків та нормалізації гучності. Вимірювання гучності та нормалізація гучності життєво необхідні через проблему, що стала головним джерелом роздратування телевізійної та радіо аудиторії у всьому світі – перепаду рівнів звуку у вставках усередині програм, між програмами та між каналами.

Регулювання рівня гучності впливає на всі стадії сигналу аудіомовлення, від виробництва до розподілу та передачі. Таким чином, кінцева мета – гармонізація рівнів гучності звуку задля досягнення однакового універсального рівня гучності на користь слухачам.

Необхідно підкреслити, що це не означає, що рівень гучності повинен бути постійним та однорідним усередині програми, навпаки. Нормалізація гучності повинна гарантувати, що середня гучність усієї програми однакова між програмами; всередині програми рівень гучності, звичайно, може змінюватися у відповідності з художніми та технічними потребами. З новим рівнем (реальних) пікових значень та (у більшості випадків) меншим середнім рівнем гучності потенційні відмінності між гучними та тихими частинами міксу (або «діапазон гучності») можуть бути фактично більшими, ніж при нинішній нормалізації піків у мовленні.

Концепція встановлення рівнів звуку з нормалізацією піків відносно максимально допустимого рівня (PML; наприклад, -9 dBFS) призвела до однорідних пікових рівнів програм, але дуже різних рівней гучності. Фактичне коливання залежить від ступеня динамічної компресії сигналу.

На відміну від цього, нормалізація гучності досягає однакової середньої гучності програм із зміною піків залежно від контенту, а також художніх та технічних вимог (рис. 1.12).

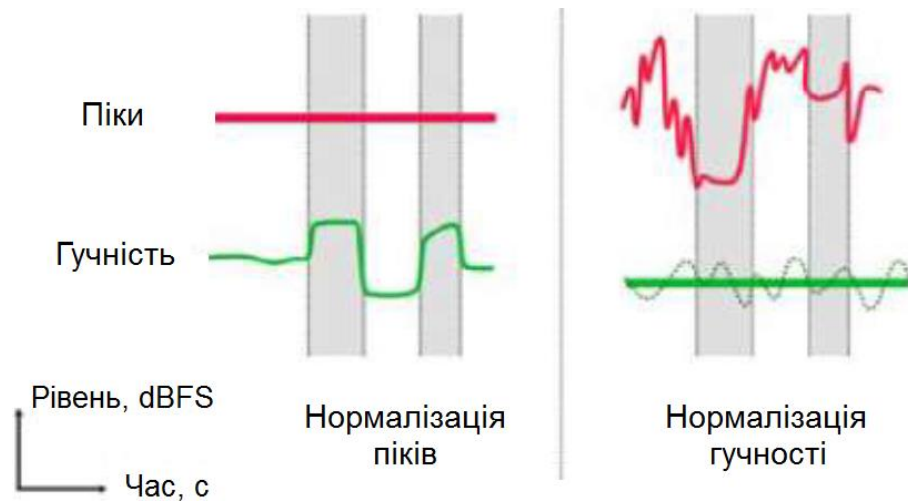


Рисунок 1.12 – Нормалізація пікового рівня проти нормалізації рівня гучності у серії програм

Слухач може насолоджуватися однорідним середнім рівнем гучності всіх програм, не користуючись більше пультом для частого регулювання гучності.

Рис. 1.12 не означає, що всередині програми рівень гучності має бути постійним, навпаки. Це також не означає, що всі окремі компоненти програми (наприклад, премікси або стем-мікси, версія з музикою та ефектами або ізольована мовна доріжка) повинні бути на одному рівні гучності! Варіація гучності – художній інструмент, а концепція нормалізації гучності по рекомендації R 128 насправді стимулює динамічніше зведення. Це середня, інтегрована гучність цілої програми, яка нормалізована.

Через потенційно дуже динамічний контент художні фільми, представляють найбільшу проблему в інтеграції кіно у програми з балансованою гучністю.

У багатьох випадках вихідний мікс для кінотеатру не підходить для типового домашнього середовища прослуховування. Зазвичай різниця між рівнем гучності програми та максимальним миттєвим або короткочасним рівнем гучності занадто велика для такого варіанта відтворення. Крім того, рівень гучності програми часто значно відрізняється від рівня гучності мови.

Така ситуація зустрічається у багатьох фільмах, але її можна зустріти і в телевізійних серіалах. Якщо подібний контент проходить звичайний процес нормалізації гучності програм згідно EBU R 128, це може вести до занадто низького рівня мови та надто гучних звукових ефектів.

Проблема стає ще помітнішою, коли фільм переривається рекламними вставками: різниця рівня мови викликає великі перехідні стрибки (рис. 1.13).

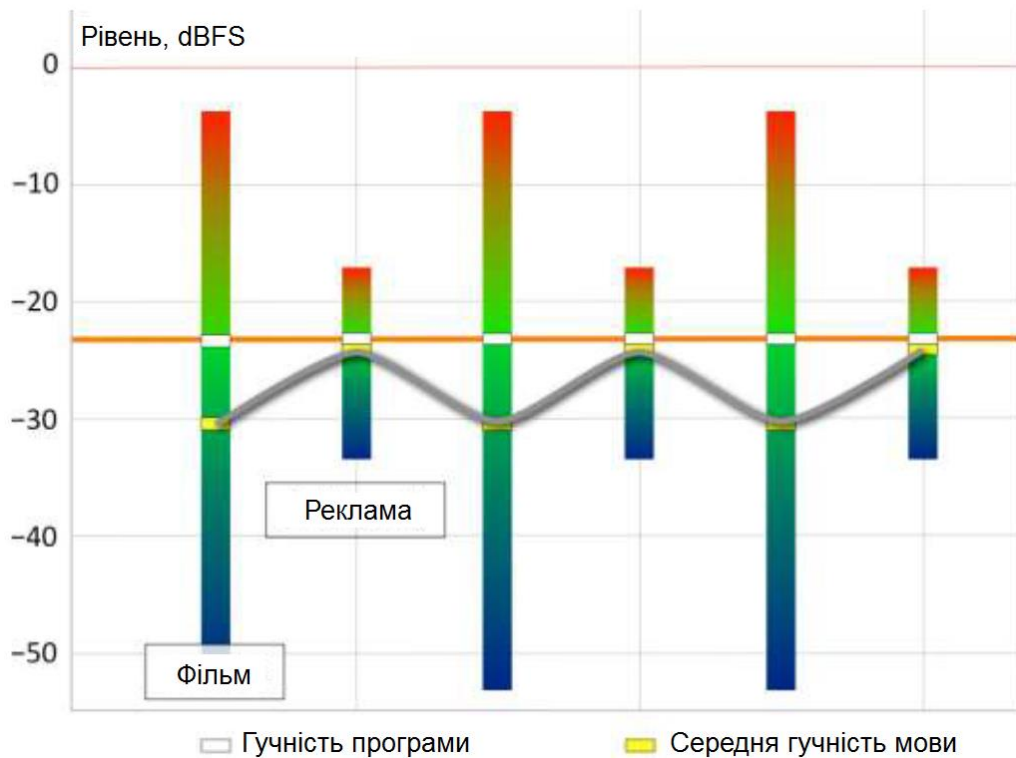


Рисунок 1.13 – Стрибки у середньому рівні мови між фільмом та рекламою

Тому доцільно застосовувати спеціальне динамічне оброблення з урахуванням рівня гучності програми, рівня гучності мови, максимального короткочасного рівня гучності (і/або максимального миттєвого рівня гучності), а також діапазону гучності.

1.7 Висновки по розділу 1

Важливим параметром будь-якого звуку є динамічний діапазон. Емоційну музику або звук кіно з широким динамічним діапазоном можна слухати тільки в тиші на високоякісній дорогій апаратурі. В повсякденних

умовах через шуми динамічний діапазон скорочується і прослуховування стає некомфортним. Тому неминуче, з кожним роком динамічний діапазон фонограм аудіовиробниками навмисно зменшується.

Крім цього, виявлено, що основним джерелом роздратування телевізійної та радіо аудиторії у всьому світі є перепад рівнів звуку у вставках усередині програм, між програмами та між каналами. Ці проблеми вимагають застосування динамічних процесорів, які регулюють динамічний діапазон та нормалізують звучання.

Сучасні динамічні процесори працюють за різними алгоритмами роботи та мають багато налаштувань. Кожен динамічний процесор є принципово нелінійним пристроєм, який вносить спотворення в оброблений сигнал. В кваліфікаційній роботі проводиться об'єктивна та суб'єктивна оцінка параметрів динамічних процесорів на характеристики оброблених сигналів.

Кваліфікаційна робота магістра виконується на кафедрі Медіаінженерії ХНУРЕ. Працівниками кафедри 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 [26-29] присвячені дослідженню систем озвучення приміщень. Отже, дослідження в даній кваліфікаційній роботі магістра відповідають напрямку наукових робіт працівників кафедри МІРЕС та продовжують його.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ДИНАМІЧНОЇ КОМПРЕСІЇ

2.1 Алгоритм роботи динамічного процесора

Динамічний процесор (ДП) відноситься до регулятора прямої дії. Його функціональна схема наведена на рис.2.1. Вона містить два кола – основний канал і коло прямого керування.

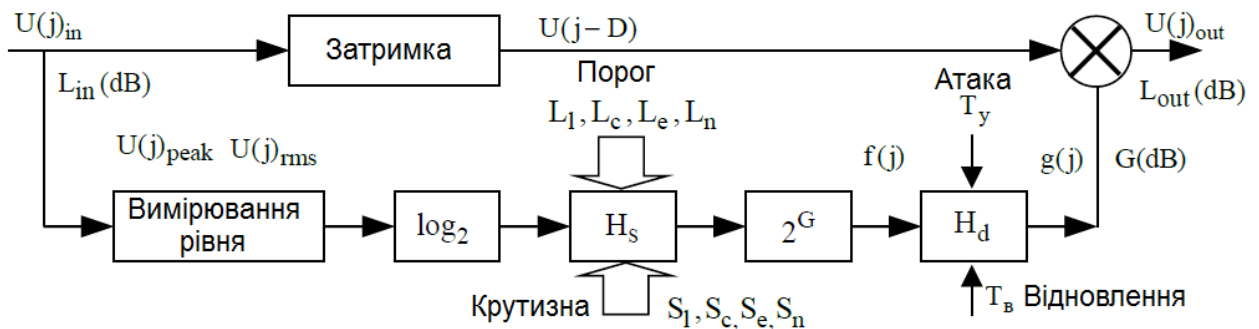


Рисунок 2.1 – Функціональна схема динамічного процесора

В основному каналі вхідний сигнал затримується на час D , який задається числом вибірок. Необхідність запровадження затримки пов'язана з тим, що при динамічній обробці завжди керуючий сигнал запізнюється по відношенню до вхідного. Це насамперед пов'язано з тим, що у колі управління проводиться обчислення середньоквадратичного значення сигналу з часом інтеграції близько 50 ... 60 мс.

Крім того, для підвищення ефективності роботи ДП необхідно, щоб зміна коефіцієнта передачі починалася дещо раніше, ніж підйом (спад) обвідної звукового сигналу зрівняється із встановленим пороговим значенням. Така функція є майже у всіх сучасних ДП під назвою look-ahead. Наведена схема може працювати як лімітер, компресор, експандер або гейт, а за необхідності виконувати всі ці функції одночасно.

Залежно від режиму роботи ДП в колі управління проводиться вимірювання пікового $U(j)_{peak}$ або середньоквадратичних значень $U(j)_{rms}$ вхідної напруги, а потім виконується логарифмування по основі 2.

У блоці H_s формується математична модель статичної передавальної характеристики, що задається параметрами або у графічній формі на дисплеї у логарифмічному масштабі. Коли на дисплеї малюється передатна функція в цей блок автоматично водяться дані про

- пороги роботи лімітера, компресора, експандера та гейта (L_l, L_c, L_e, L_n) ,
- крутизну передавальної характеристики (S_l, S_c, S_e, S_n) вище (або нижче) цих порогів.

Операція антилогарифмування виконується в блоці 2^G . На виході цього блоку формується керуючий сигнал $f(j)$, відповідний статичній передавальній функції.

У блоці H_d за заданими значеннями часу установлення T_y та часу відновлення T_B формується математична модель динамічної передавальної функції, яка визначає форму і тривалість перехідних процесів при зменшенні та збільшенні коефіцієнта передачі.

У помножувачі основного каналу під дією керуючого сигналу $g(j)$ формується динамічно оброблений вихідний сигнал

$$U(j)_{out} = q(j) \cdot U(j - D), \quad (2.1)$$

де j – поточний номер вибірки.

У логарифмічному масштабі операція множення замінюється операцією підсумовування статичного сигналу управління $G(\text{dB})$ із вхідним сигналом $L_{in}(\text{dB})$

$$L_{out}(\text{dB}) = L_{in}(\text{dB}) + G(\text{dB}). \quad (2.2)$$

Статична передавальна характеристика ДП визначає залежність між вхідним та заданим вихідним рівнями. З її допомогою розраховується статична регульовальна характеристика (рис.2.2), яка визначає залежність рівня керуючого сигналу помножувача ДП від рівня вхідного сигналу.

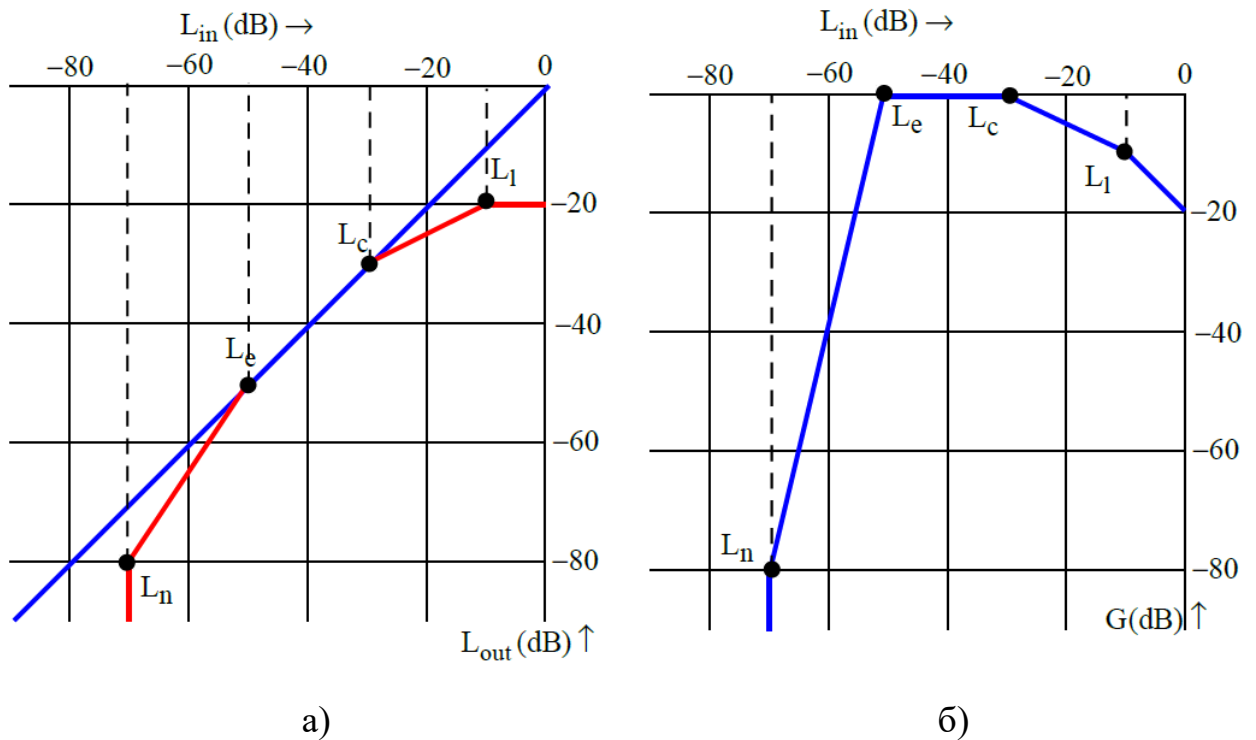


Рисунок 2.2 – Статична передавальна характеристика (а) і статична регулювальна характеристика (б) динамічного процесора

По ній визначається швидкість зміни регулюючого сигналу в залежності від швидкості наростання або спаду обвідної на вході ДП.

На рис.2.2, а і б наведені складні формою статичні характеристики ДП, який виконує усі можливі функції. Якщо поріг не заданий, коефіцієнт передачі у всьому діапазоні вхідного сигналу дорівнює 0 дБ та рівень керуючого сигналу G (dB) також дорівнює 0 дБ.

У режимі компресора для вхідних сигналів з рівнем обвідна вище з порога L_c коефіцієнт передачі стрибком зменшується до значення, що визначається графіком, та далі залишається незмінним до рівня -10 дБ. При цьому рівень керуючого сигналу G (dB) лінійно зменшується з 0 до -10 дБ.

У режимі лімітеру для вхідних сигналів обвідною вище порога L_l коефіцієнт передачі стрибком зменшується до порогового рівня -20 дБ. При цьому рівень керуючого сигналу G (dB) лінійно зменшується з -10 до -20 дБ.

У режимі експанера для вхідних сигналів з рівнем обвідної нижче порога L_e , рівного -50 дБ, коефіцієнт передачі стрибком зменшується до

значення, заданого графіком, і надалі залишається постійним до рівня вхідного сигналу -70 дБ. При цьому рівень сигналу управління $G(\text{dB})$, лінійно зменшується від 0 до -80 дБ.

У режимі гейту для вхідних сигналів з рівнем обвідної нижче порога L_n , рівного -70 дБ коефіцієнт передачі стрибком зменшується до $-\infty$, відбувається відсікання шумів. При цьому рівень керуючого сигналу $G(\text{dB})$ також стрибком зменшується до $-\infty$.

З графіка на рис. 2.2 можна отримати розрахункові формули для крутизни нахилу передавальної функції S у різних режимах роботи ДП (табл.2.1). У програмних продуктах зазвичай задається коефіцієнт компресії R , який пов'язаний з крутизною S та кутом нахилу передавальної функції β формулою

$$R = \frac{1}{1-S} = \tan \beta. \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1 – Крутизна нахилу передавальної функції S і коефіцієнт компресії R у різних режимах роботи ДП

Режими	Крутизна	Коефіцієнт компресії
Лімітер	$S=1$	$R=\infty$
Компресор	$0 < S < 1$	$1 < R < \infty$
Лінійний	0	$R=1$
Експандер	$-\infty < S < 0$	$0 < R < 1$
Гейт	$S=-\infty$	$R=0$

Тангенс кута нахилу може визначатися як відношення катетів прямокутного трикутника, тому він часто задається у вигляді, наприклад: 2:1, 1:1 тощо.

Використовуючи вираз (2.3), нескладно записати аналітичні вирази передавальної функції ДП. Наприклад, для компресора воно матиме вигляд

$$G_c = L_c + \frac{1}{R}(U_{in} - L_c), U_{in} > L_c. \quad (2.4)$$

Саме цією функцією описуватиметься амплітудна обвідна вихідного сигналу ДП.

Реалізація заданих передавальних функцій здійснюється за допомогою керуючого сигналу. Розрахункові формули, якими процесор обчислює функції регулювання $G(\text{dB})$ у логарифмічному масштабі наведено у табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Крутизна нахилу передавальної функції S і коефіцієнт компресії R у різних режимах роботи ДП

Режими	Функції регулювання
Лімітер	$G_l = -S_l(U_{in} - L_l) + S_c(L_c - L_l)$
Компресор	$G_c = -S_c(U_{in} - L_c)$
Лінійний	$G_{lin} = 0$
Експандер	$G_e = -S_e(U_{in} - L_e)$
Гейт	$G_n = -S_n(U_{in} - L_n) + S_e(L_e - L_l)$

Операція антилогарифмування зазвичай проводиться за допомогою таблиць.

2.2 Алгоритм роботи детекторів обвідної

Алгоритм роботи пікового детектора показано на рис.2.3.

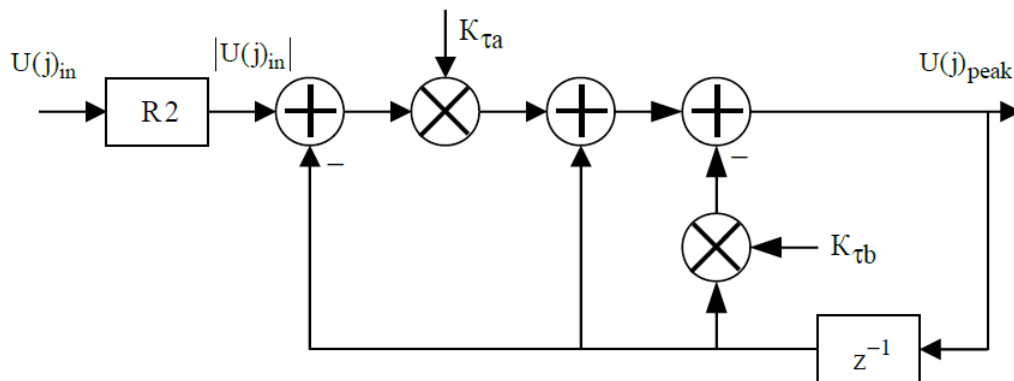


Рисунок 2.3 – Алгоритм роботи пікового детектора

У цій схемі пікове значення визначається за позитивними та негативними значеннями звукового сигналу, тому в блоці $R2$ здійснюється двонапівперідне випрямлення. Далі у суматорі проводиться порівняння вхідного сигналу з вихідним, затриманим на один такт.

Якщо вхідний сигнал більше $U(j)_{peak}$, формується різницевий сигнал, який математично обробляється з використанням коефіцієнтів $K_{\tau a}$ і $K_{\tau b}$ пов'язані з часом встановлення та відновлення.

Алгоритм обчислення пікового значення напруги в дискретно-часовій області визначається виразом

$$U(j)_{peak} = (1 - K_{\tau a} - K_{\tau b}) \cdot U(j-1)_{peak} + K_{\tau a} \cdot |U(j)|. \quad (2.5)$$

Передаточна функція пікового детектора розраховується у формі z перетворення

$$H(z) = \frac{K_{\tau a}}{1 - (1 - K_{\tau a} - K_{\tau b}) \cdot z^{-1}}. \quad (2.6)$$

Алгоритм роботи середньоквадратичного детектора сигналу показано на рис. 2.4.

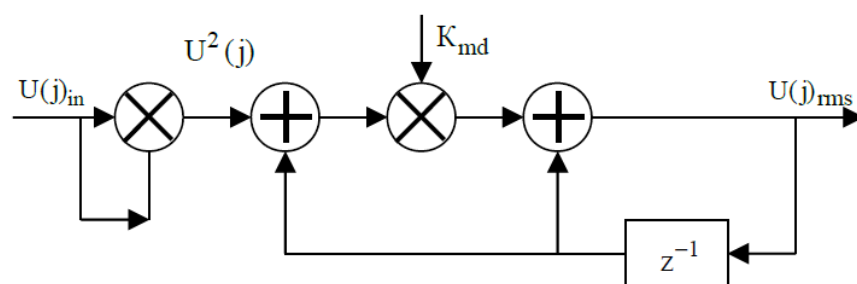


Рисунок 2.4 – Алгоритм роботи середньоквадратичного детектора

У цій схемі коефіцієнт K_{md} визначається прийнятим часом усереднення. Цей час у різних виробників обладнання різний, тому відрізняються і результати вимірювань. Найчастіше воно дорівнює 50 мс.

Алгоритм обчислення середньоквадратичного значення сигналу в дискретно-часовій області визначається формулою

$$U(j)_{rms} = (1 - K_{md}) \cdot U(j-1) + K_{md} \cdot U^2(j)_{rms}. \quad (2.7)$$

Передаточна функція середньоквадратичного детектора розраховується у формі z перетворення

$$H(z) = \frac{K_{md}}{1 - (1 - K_{md}) \cdot z^{-1}}. \quad (2.8)$$

Динамічна передавальна функція визначається перехідними процесами, що виникають при вході та виході з регулювання. Як відомо, процеси встановлення та відновлення в аналоговій системі описуються функціями

$$g(t) = e^{-t/\tau}, \quad (2.9)$$

$$g(t) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad (2.10)$$

де t – поточний час,

τ – постійна часу.

При цьому тривалість встановлення та відновлення визначаються як інтервали часу, за який напруга сигналу змінюється в межах від 0,1 до 0,9 від максимального значення. Відомо, що час перехідного процесу пов'язаний з постійною часу виразом

$$\tau_G = 2,2\tau. \quad (2.11)$$

При цифровій динамічній обробці імпульсний відгук в дискретно-часовій області динамічної передавальної функції може бути представлений як

$$g(j/f_s) = \varepsilon(j/f_s) - e^{-j/f_s \tau} = 1 - z_j^\infty, \quad (2.12)$$

де $z^\infty = e^{-1/f_s \tau}$.

Вираз (2.12) дозволяє отримати розрахункову формулу для передавальної функції блоку H_d у формі z перетворення

$$H(z) = \frac{(1 - z_\infty)z^{-1}}{(1 - z_\infty z^{-1})}. \quad (2.13)$$

Різкі злами передавальної характеристики ДП створюють значні інтермодуляційні спотворення, тому в блоці H_d потрібно здійснювати згладжування керуючої функції $g(j)$. Це здійснюється шляхом усереднення значень коефіцієнтів $g(j)$. Для цього проводиться порівняння попереднього та поточного значень. Математично алгоритм розрахунку передавальної функції $g(j)$ записується у вигляді

$$g(j) = (1 - K) \cdot g(j-1)_{peak} + K \cdot f(j). \quad (2.14)$$

Ця передавальна функція у формі z перетворення

$$H(z) = \frac{K}{1 - (1 - K) \cdot z^{-1}}. \quad (2.15)$$

У формулах (2.14), (2.15) під коефіцієнтом K розуміються коефіцієнти установлення (атаки) $K_{\tau a}$ та відновлення $K_{\tau b}$.

2.3 Розробка методики дослідження динамічних процесорів

Для дослідження та демонстрації роботи різних ДП найбільше підходить синусоїдальний звуковий сигнал з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ), обвідна якого має прямокутну форму (рис.2.5).

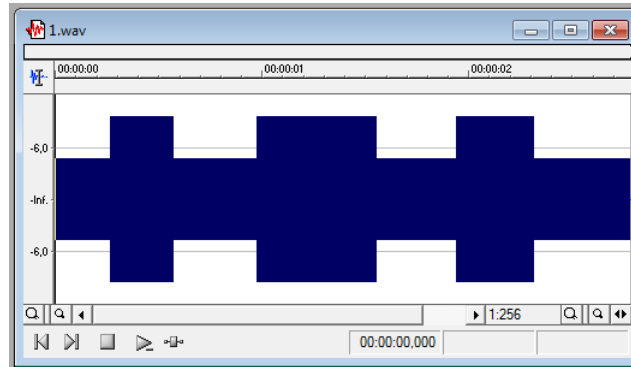


Рисунок 2.5 – Тестовий синусоїдальний звуковий сигнал з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ)

Мінімально можлива крутизна фронтів таких імпульсів (час атаки) визначається частотою звукового сигналу, і тому може набувати значення від

$$\tau_{\min} = \frac{1}{2f_{\max}} = \frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^3} = 25 \text{ мкс}, \quad (2.16)$$

до

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2f_{\min}} = \frac{1}{2 \cdot 20} = 25 \text{ мс}. \quad (2.17)$$

Це слід враховувати під час вибору часу встановлення динамічного процесора.

На рис.2.6 наведено сигналограму з виходу графічного динамічного звукового редактора Sound Forge, що працює в режимі компресора.

Встановлюваний поріг визначає максимальний розмах вихідного сигналу U_{pk} у встановленому режимі, а ступінь компресії визначає зміну коефіцієнта передачі

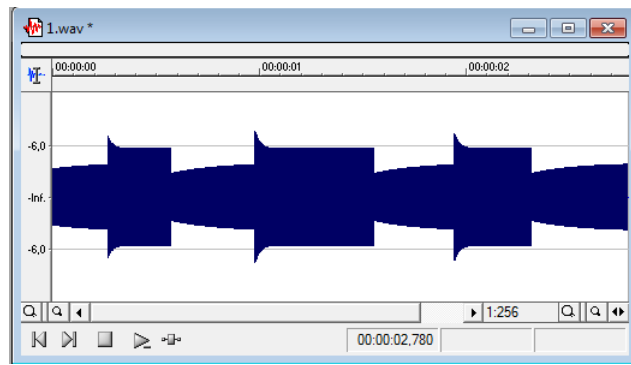


Рисунок 2.6 – Сигналограма на виході динамічного компресора

На рис. 2.7 показано визначення параметрів обробленого компресором сигналу.

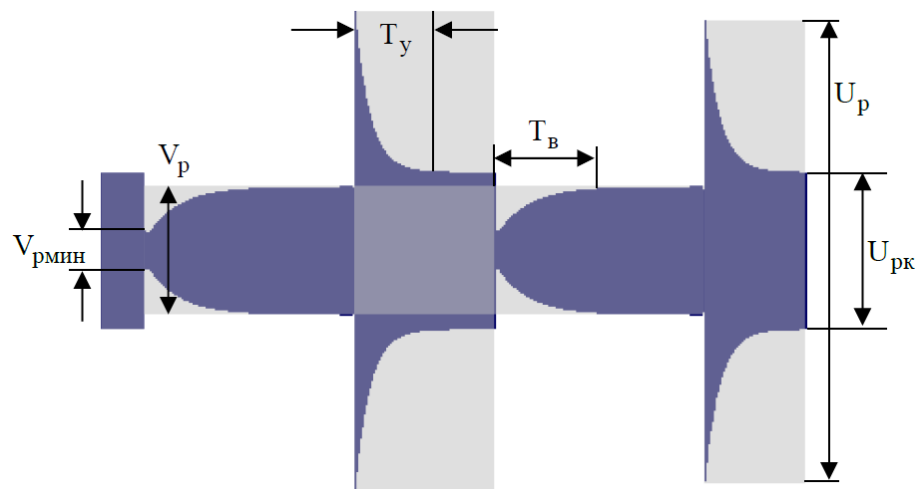


Рисунок 2.7 – Визначення параметрів сигналу, обробленого компресором

У момент наростання вхідного піку обвідної сигналу його розмах U_p на виході компресора майже такий самий, як і на вході. Це обумовлено тим, що в аналізованому прикладі час встановлення значно більше часу фронту імпульсів. Спад обвідної вихідного сигналу компресора відбувається по загасаючій експоненті. Після закінчення перехідного процесу (статика) коефіцієнт посилення компресора зменшується втричі, у стільки ж разів зменшується розмах вихідного сигналу U_{pk} .

У момент спаду піку обвідної коефіцієнт підсилення, що встановився в режимі не може миттєво змінитися, тому відбувається різке зменшення

розмаху вихідного сигналу V_p теж утричі. Далі відбувається поступове відновлення коефіцієнта підсилення до вихідного значення по наростаючій експоненті. Тривалість цього процесу визначається значенням T_B .

Час встановлення T_B визначає час між моментом наростання чи спаду обвідної вхідного сигналу до порогового значення (знизу або зверху) і часом, через який встановлюється заданий рівень вихідного сигналу процесора.

На рис. 2.8 показані сигнали голоса (а,б), гітари (в,г) і кік-барабана (д,е) до (а,в,д) і після (б,г,е) обробки компресором.

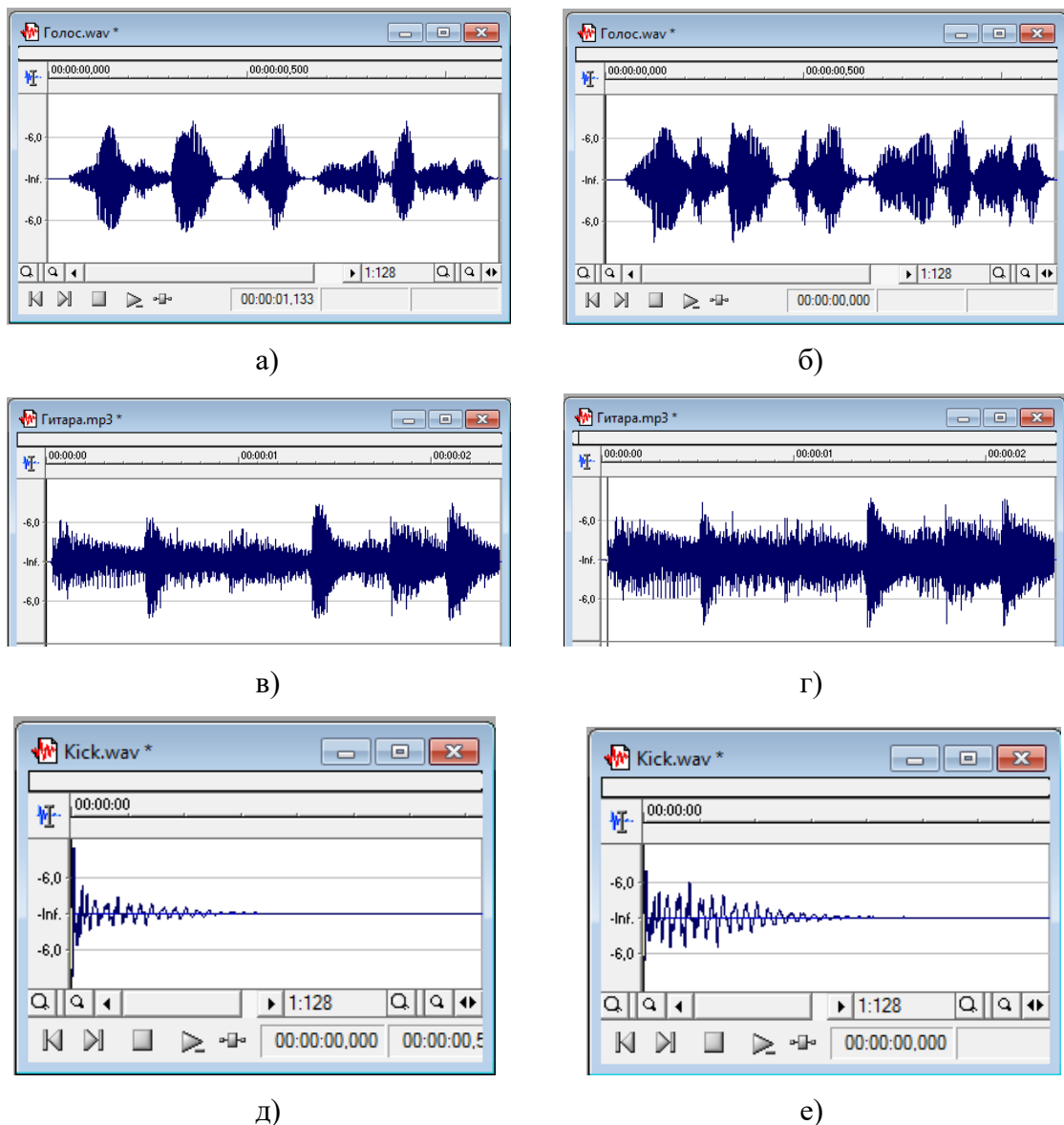


Рисунок 2.8 – Сигнали голоса (а,б), гітари (в,г) і кік-барабана (д,е) до (а,в,д) і після (б,г,е) обробки компресором

В результаті великої кількості експериментів з параметрами компресії до звукових фрагментів різних жанрів вдалося зробити наступні висновки.

Чим менший час встановлення – тим на більш коротких піках рівня спрацьовує ДП. За малого часу встановлення можна практично виключити виникнення піків сигналу при стрибкоподібному збільшенні його рівня. Однак при цьому звучання може стати недостатньо акцентованим. Також слід відмітити, що малий час встановлення може викликати спотворення, особливо на низьких частотах. Низькочастотні сигнали мають великий період, і компресія, що діє серед періоду, звучить дуже неприродно.

При великому часі встановлення компресор пропускатиме короткі атаки звукового сигналу, що перевищують поріг, оскільки не встигатиме на них реагувати. Це може бути небажаним, наприклад, для лімітерів. У сигналі на виході компресора будуть присутні піки.

Дослідження показали, що для лімітерів найкраще обирати час встановлення в межах 0,5...1,0 мс, для компресії мовних сигналів час встановлення має становити 1...2 мс, для компресії музичних сигналів час встановлення – близько 10...100 мс.

Час відновлення T_v визначає час між моментом спаду піку обвідної вхідного сигналу до порогового рівня (згори або знизу) та часом, через який на виході процесора відновиться вихідний рівень звукового сигналу. При малому часі відновлення забезпечується більш істотне згладжування. Якщо час відновлення занадто великий, то компресор довше перебуває в активному стані та впливає на динамічний діапазон навіть тоді, коли це небажано. Це дає помітний на слух ефект пульсації звуку, оскільки компресія не призводить до згладжування сигналу.

Дослідження показали, що для інструментальної музики як грубе наближення для більш тонкого подальшого налаштування слід вибирати час відновлення близько 500 мс. Це відповідає проміжку між двома тактами при темпі 120 чвертей за хвилину. Для компресії мовних сигналів час відновлення – 300 мс, у для музичних сигналів час відновлення – близько 100...1000 мс.

2.4 Висновки по розділу 2

З проведених досліджень слідує, що застосування компресії зовсім не означає автоматичного зменшення динамічного діапазону за піковими значеннями і не виключає можливості кліпування звукового сигналу. Гарна робота компресора дуже залежить від вибору постійних часу процесора.

В деяких випадках можна допустити моментальне спрацювання компресора, але час відновлення не може бути нульовим. Це пов'язано з тим, що будь-якому акустичному згасанні, наприклад, коливання струни або реверберуючий звук, супутні флуктуації, які в компресорі можуть призводити до спонтанної зміни гучності.

Чим менший час встановлення та відновлення, тим гучніше виходить результуючий звук, але тим більше зламанною виходить ампліудна обвідна вихідного сигналу ДП, і більше виникає інтермодуляційних спотворень. Зрозуміло, що чим більший час встановлення та відновлення, тим повільніше змінюватиметься в часі ампліудна обвідна, тим гладкішою вона буде.

Проте, за великого часу встановлення та відновлення починає проявлятися ефект "провалювання гучності" (pumping). Провали гучності виникають навколо короточасних піків у сигналі. Таким чином, вибір часу встановлення/відновлення – це компроміс між інтермодуляційними спотвореннями та ефектом провалювання гучності.

На багатьох моделях компресорів є можливість автоматичного включення режиму встановлення однієї або обох постійних часу. Більше того, існують моделі компресорів, у яких одна з постійних часу взагалі не має ручної установки (встановлюється автоматично), а ще бувають і повністю автоматичні компресори – взагалі без регуляторів часу спрацювання та відновлення.

Як правило, в автоматичному режимі час спрацювання зменшується при збільшенні рівня вхідного сигналу, час відновлення при цьому збільшується. В результаті вдається добитися більшої рівності і м'якості ампліудної обвідної в моменти різкої зміни рівня вхідного сигналу.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КОМПРЕСОРА НА ОБ'ЄКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРОБЛЕНИХ СИГНАЛІВ

3.1 Розробка програми обробки звукових фрагментів

Для дослідження впливу параметрів динамічного компресора на об'єктивні характеристики звукових сигналів потрібно програмно реалізувати компресор, алгоритм роботи якого і задані параметри його роботи будуть точно відомі. Цього, на жаль, не можна сказати про компресори, реалізовані в популярних і широко відомих програмах з обробки звуку: Audacity, Sound Forge, Ableton Live, FL Studio, Adobe Audition та інші.

В кваліфікаційній роботі пропонується реалізувати алгоритм динамічної компресії в програмі математичного моделювання MATLAB. В такому випадку ми зможемо точно задати алгоритм роботи компресора і бути впевненими, що обробка сигналів відбувається з відомими параметрами.

Алгоритм програми компресора показаний на рис.3.1.

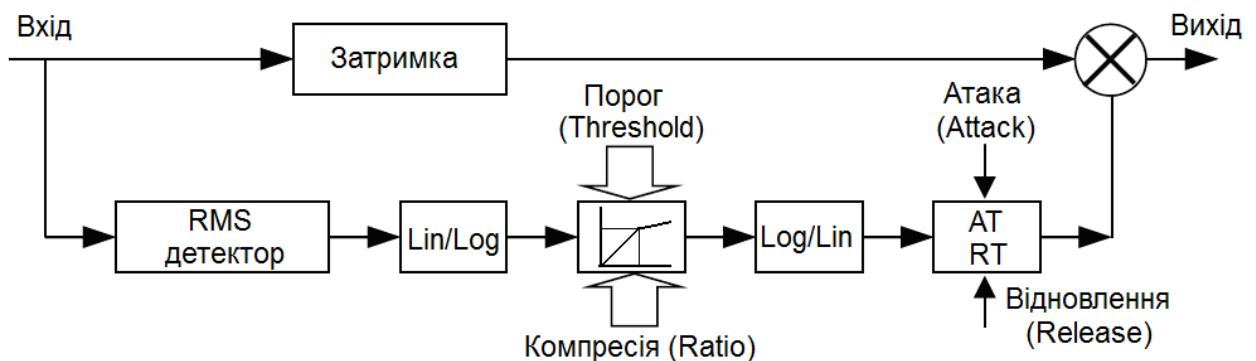


Рисунок 3.1 – Схема алгоритма програми компресора

Він є окремим випадком загальної схеми динамічного процесора, розробленої в розділі 2 (рис.2.1). Він включає в себе два кола: верхнє – обробка сигналу з буферною затримкою, нижнє – формування керуючого сигналу для обробки. Нижній канал управління містить середньоквадратичний (RMS) детектор, обчислювач логарифму для

вимірювання рівня, блок формування передаточної характеристики з заданим порогом (Threshold) і компресією (Ratio), обчислювач антилогарифму для перетворення в лінійні одиниці, інерційне коло для завдання часу атаки (Attack) і відновлення (Release).

Середньоквадратичне значення обвідної розраховується за формулою

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N x^2(i)}, \quad (3.1)$$

де $x(i)$ – відліки вхідного сигналу,

N – кількість відліків сигналу за час інтегрування $\tau = 50$ мс,

$$N = \tau f_s, \quad (3.2)$$

де f_s – частота дискретизації ($f_s = 44100$ Гц).

При $\tau = 50$ мс та $f_s = 44100$ Гц

$$N = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 44100 = 2205.$$

Сигнал управління для кожного відліку з номером i формується згідно виразу

$$g(i) = (h(i))^{Comp}, \quad (3.3)$$

де $h(i)$ – оброблена обвідна сигналу,

$Comp$ – ступінь компресії.

На виході перемножувача формується вихідний сигнал компресора

$$y(i) = g(i) \cdot x(i). \quad (3.4)$$

Нижче наведено текст програми в MATLAB, в якій реалізується алгоритм обробки, наведений на рис. 3.1, що працює у відповідності з виразами (3.1) – (3.4).

Текст основної програми:

```
[input,fs] = audioread('C:\wav\Голос.wav'); %введення wav файлу

%встановити параметри.
% comp - стиснення: 0>comp>-1, розширення: 0<comp<1
% a - параметр фільтра: <1, пов'язаний з часом атаки, як швидко фільтрується
% реагує на зміни введених даних. Менші цифри вказують на швидшу відповідь.

comp = -0.3;
a = 0.6;

output = comprexp(input, comp, a); %виклик підпрограми компресора

sound(input,fs); %програти вхідний та вихідний файли
sound(output,fs);

wavwrite(output, fs, 'CompressedSnare.wav'); %зберегти вихідний wav файл
```

Обробка відбувається в підпрограмі компресора:

```
function y = comprexp(x,CT,CS,AT,RT)

tav = 0.05;% час усереднення
at = AT;
rt = RT;
delay = 150;

xrms = 0;
g = 1;
buffer = zeros(1,delay); % встановити нульову матрицю із затримкою

for n = 1:length(x)
    xrms = (1-tav) * xrms + tav * x(n)^2;%rms детектор
    X = 10*log10(xrms);
    G = min([0, CS*(CT-X)]);
    f = 10^(G/20);
    if f < g
        coeff = at;
    else
        coeff = rt;
    end;
    g = (1-coeff) * g + coeff * f;
    y(n) = g * buffer(end);
    buffer = [x(n) buffer(1:end-1)];
end;
```

Приклад роботи розробленої програми показані на рис.3.2. Компресор був застосований до сигналів, що містять один удар снейр-барабана. Даний експеримент демонструє очікувану функціональність програми. На рис. 3.2, а показаний вхідний сигнал, на рис. 3.2, б – вихідний сигнал для снейр-барабана, на рис. 3.2, в – відповідне зменшення підсилення.

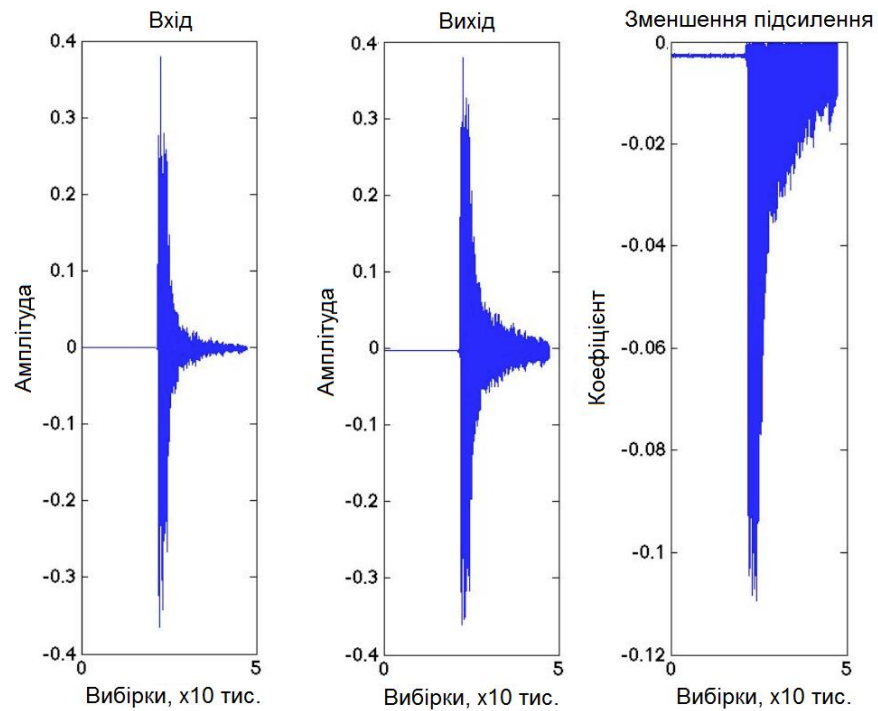


Рисунок 3.3 – Результат роботи програми компресора (а – вхідний сигнал, б – вихідний сигнал, в – зменшення підсилення)

Як і очікувалося, найбільше зменшення підсилення спостерігається там, де амплітуда вхідного сигналу найбільша. Вплив цього факту на результат обробки полягає в тому, що підкреслюються частини звуку з меншими рівнями, що можна чітко почути як більш протяжний «хвіст».

3.2 Дослідження нелінійних спотворень сигналів в компресорах

Для дослідження нелінійних спотворень в компресорі були сформовані тестові синусоїдальні сигнали частотою 1000 Гц з амплітудно-імпульсною модуляцією (AIM). Його обвідна має прямокутну форму, приклад такого сигналу показаний на рис. 3.4, а.

На рис. 3.4, б показана сигналограма на виході компресора, реалізованого в MATLAB, а на рис. 3.5, б – сигналограма на виході експандера, реалізованого в MATLAB.

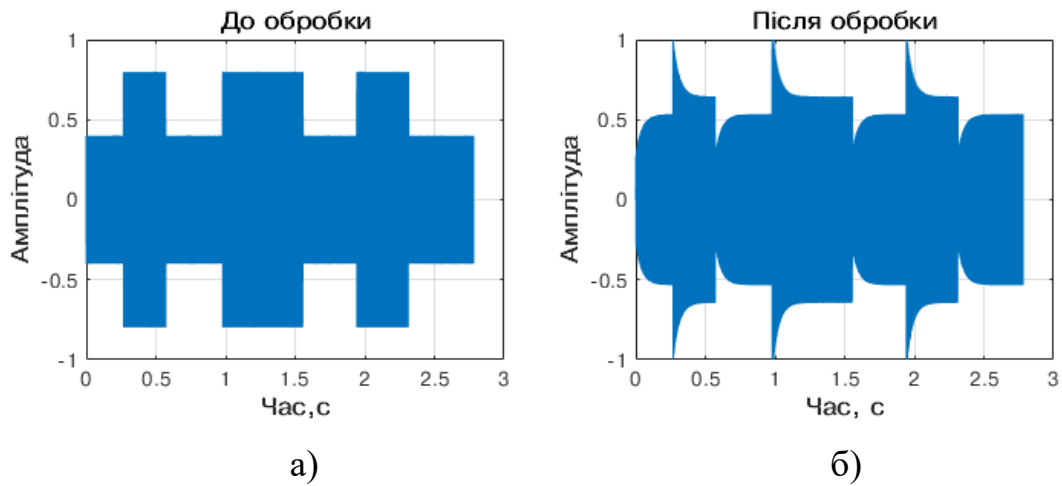


Рисунок 3.4 – Сигнали на вході (а) і на виході (б) компресора, реалізованого в MATLAB

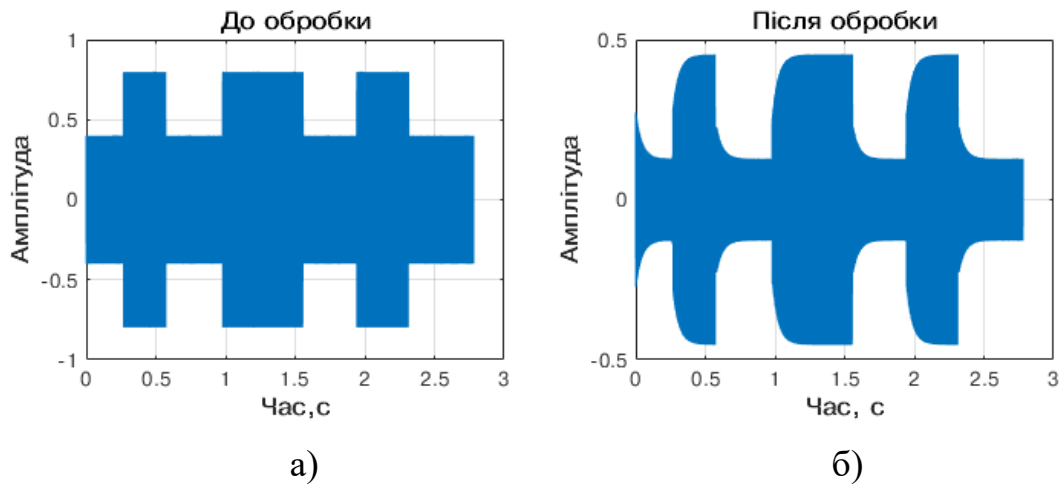


Рисунок 3.5 – Сигнали на вході (а) і на виході (б) експандера, реалізованого в MATLAB

Компресори та експандери в принципі мають нелінійну передатну функцію, тому важливо знати який характер мають нелінійні спотворення, і як вони залежать від пік-фактора сигналу та часових параметрів процесора. Якщо прийняти в якості моделі некомпресованого звукового коливання АІМ сигнал, його спектр має вид бічних смуг при основній частоти звукового сигналу (рис.3.6).

Спектр смуг дискретний та визначається частотою повторення піків звукового сигналу. В нашому випадку ця частота дуже низька, і фактично спектр є суцільним. Говорити у цьому випадку про гармонічні спотворення

або інтермодуляційні спотворення у звичайному розумінні цих термінів не можна, оскільки ці поняття відносяться до стаціонарних періодичних функцій. Це нормальний спектр сигналу АІМ.

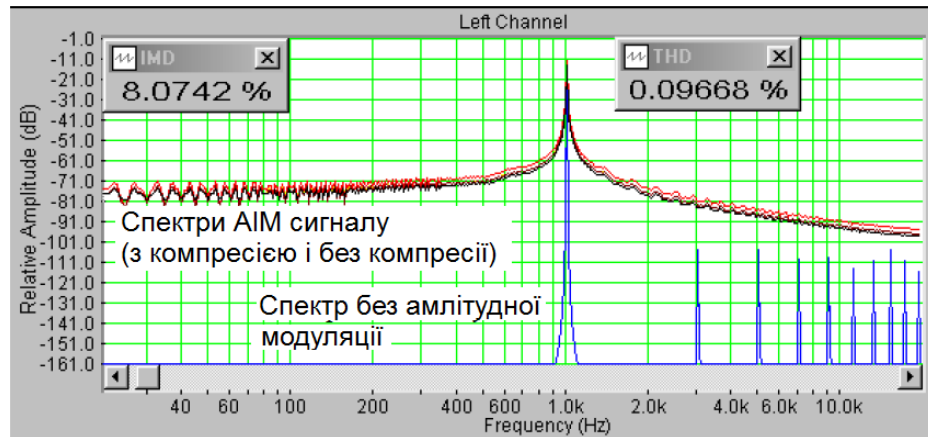


Рисунок 3.6 – Залежність спектрів сигналів від амплітудної модуляції та динамічної обробки (частота сигналу 1 кГц, глибина модуляції +10 дБ)

При роботі динамічного процесора нелінійні спотворення виникають лише під час перехідних процесів, вони носять імпульсний характер і можуть бути чутні.

Під час роботи компресора пік-фактор за рахунок пропуску піків збільшується, глибина амплітудної модуляції зростає, тому «інтермодуляційні» спотворення мають збільшуватися.

При роботі експандера навпаки пік-фактор зменшується, внаслідок чого глибина амплітудної модуляції і рівень бічних смуг теж зменшується, тому «інтермодуляційні» спотворення мають зменшуватися.

У табл. 3.1 наведено результати вимірювань продуктів нелінійних спотворень у редакторі SpectraLab для АІМ сигналу з частотою 1 кГц та глибиною модуляції +15 дБ, у якого тривалість імпульсів дорівнює 200 мс, а період повторення дорівнює 2 Гц.

З таблиці видно, що гармонійних спотворень і в компресорі, і в експандері практично немає, що й слід очікувати.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань продуктів нелінійних спотворень

Режим роботи	Атака, мс	Відновлення, мс	IMD, %	THD, %
Немає модуляції			0,07	0,008
Є модуляція			9,97	0,089
Компресор	100	200	15,6	0,08
	0	200	12,3	0,08
Експандер	100	200	9,97	0,097
	0	200	8,62	0,079

Найбільша величина «інтермодуляційних» спотворень у АІМ сигналу, вона зростає при компресуванні та зменшується при використанні експандера. Зменшення часу встановлення призводить до невеликого збільшення спотворень у експандері та значному їх зростанню в компресорі.

В результаті досліджень отримано графіки залежності величини гармонійних і «інтермодуляційних» спотворень від порогу спрацьовування компресора при двох часах атаки – 10 мс і 100 мс (рис. 3.7).

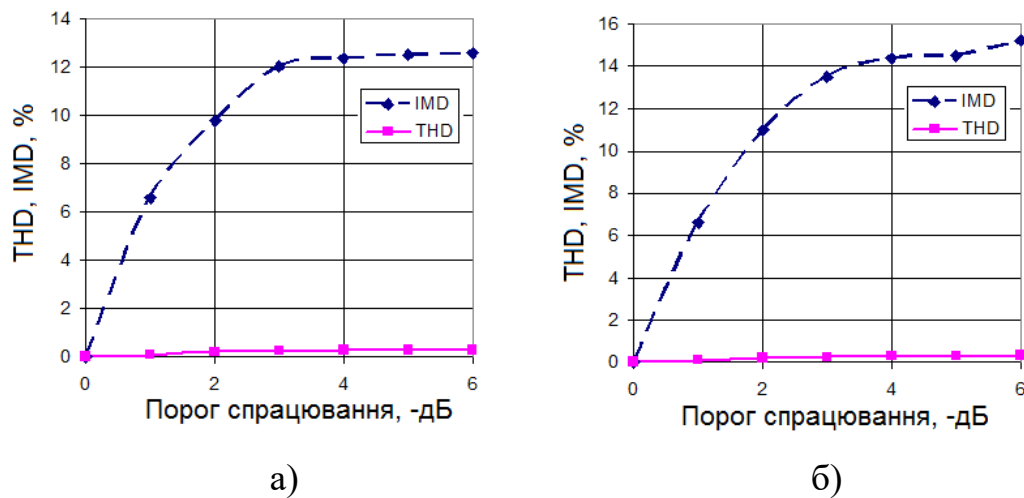


Рисунок 3.7 – Графіки залежності величини гармонійних і «інтермодуляційних» спотворень від порогу спрацьовування компресора (а – час атаки 0 мс, б – час атаки 100 мс)

З аналізу отриманих результатів експерименту графіків можна зробити наступні висновки.

3.3 Висновки по розділу 3

З графіків випливає, що при компресії звукових сигналів зазвичай переважають інтермодуляційні спотворення, їхня величина може досягати 9...12%. Гармонічні нелінійні спотворення значно менше і, зазвичай, їх величина складає 0,1... 2,5%.

Зі зниженням порога обмеження інтермодуляційні нелінійні спотворення ростуть по закону, близькому до зворотної експоненти. При порозі -2 дБ спотворення майже подвоюються, а починаючи з рівня - 4 дБ, майже перестають збільшуватись (рис.3.7).

У досліджених компресорах спотворення стають помітними на слух при порозі обмеження нижче - 3дБ. Потрібний час встановлення та відновлення залежить від характеру музичного матеріалу, тому їх можна і потрібно змінювати.

ВИСНОВКИ

Важливим параметром будь-якого звуку є динамічний діапазон. Емоційну музику або звук кіно з широким динамічним діапазоном можна слухати тільки в тиші на високоякісній дорогій апаратурі. В повсякденних умовах через шуми динамічний діапазон скорочується і прослуховування стає некомфортним. Тому неминуче, з кожним роком динамічний діапазон фонограм аудіовиробниками навмисно зменшується.

Крім цього, виявлено, що основним джерелом роздратування телевізійної та радіо аудиторії у всьому світі є перепад рівнів звуку у вставках усередині програм, між програмами та між каналами. Ці проблеми вимагають застосування динамічних процесорів, які регулюють динамічний діапазон та нормалізують звучання.

Сучасні динамічні процесори працюють за різними алгоритмами роботи та мають багато налаштувань. Кожен динамічний процесор є принципово нелінійним пристроєм, який вносить спотворення в оброблений сигнал. В кваліфікаційній роботі проводиться об'єктивна та суб'єктивна оцінка впливу параметрів динамічних процесорів на характеристики оброблених сигналів.

На першому етапі досліджено роботу компресорів, які входять до складу аудіоредакторів Sound Forge та Audacity. Для дослідження використані тестові сигнали у вигляді синусоїди 1 кГц та амплітудно-імпульсною модуляцією, а також короткі записи голосу диктора, акустичної гітари і кік-барабану. Аналізувалися часова і амплітудна структура сигналів і їх звучання після обробки з різними значеннями порогу, коефіцієнта компресії, часу атаки і затухання. В результаті вдалося зробити наступні висновки.

Чим менший час атаки – тим на більш коротких піках спрацьовує компресор. При малому часі атаки можна практично виключити виникнення піків сигналу при швидкому збільшенні його рівня. Однак при цьому

звучання може стати недостатньо акцентованим. Також малий час атаки може викликати спотворення, особливо на низьких частотах. Вони мають великий період, і компресія посеред періоду звучить дуже неприродно.

При великому часі атаки компресор пропускатиме короткі стрибки сигналу, і у сигналі на виході будуть присутні піки, що може бути небажаним, наприклад, для лімітера.

Дослідження показали, що для лімітерів найкраще обирати час атаки 0,5...1,0 мс, для компресії мовних сигналів атака має бути 1...2 мс, для музичних сигналів атака близько 10...100 мс.

При малому часі відновлення забезпечується більш істотне згладжування. Якщо час відновлення занадто великий, то компресор довше перебуває в активному стані та впливає на динамічний діапазон навіть тоді, коли це небажано. Це дає помітний на слух ефект пульсації звуку, оскільки компресія не призводить до згладжування сигналу.

Дослідження показали, що для інструментальної музики як грубе наближення можна вважати час відновлення близько 500 мс. Це відповідає інтервалу між тактами при темпі 120 чвертей за хвилину. Для компресії мовних сигналів час відновлення – 300 мс, у для музичних сигналів – близько 100...1000 мс.

Для подальших об'єктивних оцінок проведено теоретичне обґрунтування обробки сигналів динамічним процесором. Складена загальна структурна схема процесора. Вона включає в себе два кола: верхнє – обробка сигналу з буферною затримкою, нижнє – формування керуючого сигналу для обробки. Нижній канал управління містить середньоквадратичний (RMS) або піковий детектор, обчислювач логарифму для вимірювання рівня, блок формування передаточної характеристики з заданим порогом (Threshold) і компресією (Ratio), обчислювач антилогарифму для перетворення в лінійні одиниці, інерційне коло для завдання часу атаки (Attack) і відновлення (Release).

Отримані вирази для статичної передавальної і регулювальної характеристик в режимах компресора, експандера, лімітера, гейта, а також зв'язок нахилу передавальної функції з коефіцієнтом компресії. Реалізація заданих передавальних функцій здійснюється за допомогою керуючого сигналу. Отримані розрахункові формули, за якими процесор обчислює функції регулювання.

Складено алгоритми роботи середньоквадратичного та пікового детекторів обвідної. Отримані вирази для їх передавальних функцій. Відповідну програму динамічної обробки реалізовано в MATLAB.

Коректність роботи програми перевірена на тестовому сигналі снейр-барабану. Як і очікувалося, найбільше зменшення підсилення спостерігається там, де амплітуда вхідного сигналу найбільша. Вплив на результат обробки полягає в тому, що підкреслюються частини звуку з меншими рівнями, що можна чітко почути як більш протяжний «хвіст» удару.

Для дослідження нелінійних спотворень в компресорі були сформовано тестовий синусоїдальний сигнал з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) з частотою 1 кГц та глибиною модуляції +15 дБ, у якого тривалість імпульсів дорівнює 200 мс, а період повторення дорівнює 2 Гц. Вимірювання коефіцієнта гармонік і інтермодуляційних спотворень оброблених сигналів здійснювалося в редакторі SpectraLab.

З результатів видно, що гармонійних спотворень і в компресорі, і в експандері практично немає. Тобто, вони не руйнують високочастотне заповнення.

Величина «інтермодуляційних» спотворень АІМ сигналу зростає при компресуванні та зменшується при використанні експандера. Це пояснюється тим, що компресор пропускає піки сигналу, що збільшує його пік-фактор і рівень бічних смуг в спектрі. Зменшення часу встановлення призводить до невеликого збільшення спотворень у експандері та значному їх зростанню в компресорі.

Отримано графіки залежності величини гармонійних і «інтермодуляційних» спотворень від порогу спрацьовування компресора при двох часах атаки – 10 мс і 100 мс. З аналізу отриманих результатів експерименту графіків можна зробити наступні висновки.

При компресії звукових сигналів зазвичай переважають інтермодуляційні спотворення, їхня величина може досягати 9...12%. Гармонічні нелінійні спотворення значно менше і, зазвичай, їх величина складає 0,1... 2,5%.

Зі зниженням порога обмеження інтермодуляційні нелінійні спотворення ростуть по закону, близькому до зворотної експоненти. При порозі -2 дБ спотворення майже подвоюються, а починаючи з рівня – 4 дБ, майже перестають збільшуватись.

У досліджених компресорах спотворення стають помітними на слух при порозі обмеження нижче – 3дБ. Потрібний час встановлення та відновлення залежить від характеру музичного матеріалу, тому їх можна і потрібно змінювати.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Радиовещание и электроакустика / [С.И. Алябьев, А.В. Выходец, Р. Гермер и др.]; под ред. Ю.А. Ковалгина. – Москва: Радио и связь, 2000. – 792 с.: ил.
2. Алдошина И.А. Электроакустика и звуковое вещание / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов. – Москва: Радио и связь, 2007. – 872 с.
3. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – Москва: Связь, 1978. – 272 с.: ил.
4. Акустика: Справочник/ А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров; ред. М.А. Сапожкова. – 2 изд. перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1986. – 336 с.: ил.
5. Кнудсен Верн Оливер. Архитектурная акустика: пер. с англ. под ред. Е.А. Копиловича, Л.Д. Брызжева. – Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 520 с.
6. Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации / ГОСТ 24146-89. Дата введения 1990-01-01.
7. Петелин Р.Ю. Музыкальный компьютер. Секреты мастерства / Р.Ю. Петелин Ю.В. Петелин. – Изд. 2-е. – СПб.: БВХ-Петербург; Арлит, 2004. – 688 с.
8. Цифровая звукозапись. Под редакцией Дж. Мааса и М. Веркамена. Пер. с англ. – М.: Мир, 2004. – 352 с.
9. Радзишевский А. Основы аналогового и цифрового звука. Из-во дом «Вильямс», М, СПб, Киев, 2006, – 281.
10. Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшин, М.Н.Поляк. Цифровая обработка сигналов. Справочник. – М. Радио и связь, 1985. – 322 с.
11. Звуковое вещание. Справочник. Под ред. Ю.А.Ковалгина. М. Радио и связь, 1993. – 463 с.

12. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. Цифровое кодирование звуковых сигналов. – СПб.: КОРОНА –принт, 2004. – 240 с.

13. Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg. Application of Digital Signal Processing to Audio and Acoustic. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, London, Moscow. 2002. – pp. 538.

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 Conference 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. Буйницький Д.В. Апаратно-программний комплекс для дослідження акустических пристроїв // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 92-93.

23. Ашихмин В.О. Исследование системы коррекции звука с учётом характеристик помещения // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 96-97.

24. Тушев В.О. Исследование влияния фазовых искажений аудиоаппаратуры на качество звучания // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 84-85.

25. Чернов К.А. Исследование акустических характеристик студии звукозаписи // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 94-95.

26. Ашихмін В.О. Адаптивні методи подавлення акустичного зворотного зв'язку: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 69 с.

27. Буйницький Д.В. Дослідження методів компенсації ревербераційних завад: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 67 с.

28. Шевченко П.Д. Система вимірювання та аналізу акустичних характеристик приміщень: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 68 с.

29. Лісовий Р.О. Комплексне дослідження акустичних характеристик студійного приміщення: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 81 с.

30. Козлов А.І. Вимірювання акустичних характеристик студії звукозапису /25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 39 – 40.

31. 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.