

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)

Система компенсації ехо-сигналів при звукозаписі
у великих приміщеннях.
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи СТМм-22-2
Донченко Д.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системи, технології і
комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва освітньої програми)

Керівник ас. Желанов О.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 171 Електроніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системи, технології і комп'ютерні засоби мультимедіа
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Донченку Денису Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система компенсації ехо-сигналів при звукозаписі
у великих приміщеннях.

затверджена наказом по університету від " 20 " 11 _____ 2023 р. № 1371 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – стійкість систем озвучування і звукозапису до ехо-завад і зворотного акустичного зв'язку. Предмет дослідження – ефективність придушення ехо-завад в звукових трактах з мінімальними спотвореннями сигналу. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз, вибір і дослідження методу подавлення ехо-сигналів в системі звукозапису, що дозволив би суттєво знизити або повністю виключити ехо-заваду з мінімальними спотвореннями обробленого сигналу.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1 Аналіз методів і засобів подавлення ехо-сигналів в системах озвучування і звукозапису.

2 Адаптивний метод придушення акустичних ехо-сигналів.

3 Дослідження моделі фільтру ЗАЗ.

4 Дослідження алгоритму адаптивного подавлення ехо-сигналів.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Проблемна ситуація (1 слайд).
2. Мета роботи (1 слайд).
3. Методи подавлення ехо-сигналів (1 слайд).
4. Класичний адаптивний подавлювач ехо (1 слайд).
5. Схема компенсації ехо-перешкод (1 слайд).
6. Реалізація адаптивного методу (1 слайд).
7. Модель компенсатора ехо-сигналу (1 слайд).
8. Підготовка вхідних даних (1 слайд).
9. Імпульсна характеристика приміщення (1 слайд).
10. Результати обробки (1 слайд).
11. Висновки (1 слайд).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	25.09.23–01.10.23	
2	Розробка моделі приміщення	02.10.23–11.10.23	
3	Розробка моделі придушувача	12.10.23–10.11.23	
4	Експериментальне дослідження алгоритмів	11.11.23–03.12.23	
5	Обробка результатів досліджень	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 25.09.2023 р.

Студент Денис ДОНЧЕНКО

Керівник роботи Олексій ЖЕЛАНОВ

(підпис)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 73 сторінки, 26 рисунків, 3 таблиці, 32 джерела.

АДАПТИВНИЙ ФІЛЬТР, АКУСТИКА, ЗВОРОТНИЙ АКУСТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ЗГОРТКА, ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА, КОЕФІЦІЄНТИ ФІЛЬТРУ, ЛІНІЯ ЗАТРИМКИ, ОЗВУЧЕННЯ ПІДСИЛЕННЯ, ЦИФРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ

Об'єкт дослідження – стійкість систем озвучування і звукозапису до ехо-завад і зворотного акустичного зв'язку.

Предмет дослідження – ефективність придушення ехо-завад в звукових трактах з мінімальними спотвореннями сигналу.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз, вибір і дослідження методу подавлення ехо-сигналів в системі звукозапису, що дозволив би суттєво знизити або повністю виключити ехо-заваду з мінімальними спотвореннями обробленого сигналу.

В роботі виконано аналіз сучасних методів і засобів подавлення ехо-сигналів, технічні особливості апаратури систем озвучення і наукових напрямів в теорії і практиці завадозахищеності звукових систем. Виділено перелік причин виникнення ехо-сигналів і зворотного зв'язку і класифіковано методи їх подавлення.

Досліджено алгоритм, який дозволяє в режимі реального часу підняти рівень звукового тиску до 8 дБ в замкнутому озвучуваному просторі без виникнення автоколивань і без спотворення сигналів внаслідок ехо.

Розроблено модель системи озвучування, алгоритм адаптивної ехо-фільтрації корисного сигналу і фільтра для обчислення сигналу корекції, проведено дослідження та аналіз отриманих результатів моделювання.

ABSTRACT

Explanatory note to the certification work: 73 pages, 26 figures, 3 tables, 32 sources.

ADAPTIVE FILTER, ACOUSTICS, ACOUSTIC FEEDBACK, CONVOLUS, IMPULSE CHARACTERISTICS, FILTER COEFFICIENTS, DELAY LINE, ANNOUNCEMENT, DIGITAL FILTERING

The object of the study is the stability of sound and sound recording systems to echo interference and acoustic feedback.

The subject of the study is the effectiveness of echo interference suppression in sound channels with minimal signal distortion.

The purpose of the master's thesis is to analyze, select and research the method of echo suppression in the sound recording system, which would allow to significantly reduce or completely eliminate echo interference with minimal distortion of the processed signal.

The paper analyzes modern methods and means of suppressing echo signals, technical features of sound system equipment, and scientific trends in the theory and practice of noise immunity of sound systems. The list of causes of echo signals and feedback is highlighted and the methods of their suppression are classified.

An algorithm has been studied that allows you to raise the sound pressure level up to 8 dB in real time in a closed sounding space without the occurrence of self-oscillations and without distortion of signals due to echoes.

A model of the sound system, an algorithm for adaptive echo filtering of the useful signal and a filter for calculating the correction signal were developed, research and analysis of the obtained modeling results were carried out.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПОДАВЛЕННЯ ЕХО-СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ ОЗВУЧУВАННЯ І ЗВУКОЗАПИСУ.....	11
1.1. Завдання передачі звукової інформації.....	11
1.2 Основні характеристики акустичних сигналів.....	12
1.3 Методи обробки акустичних сигналів.....	13
1.4 Шуми, перешкоди і спотворення в звукових системах.....	16
1.5 Зворотний акустичний зв'язок.....	18
1.6 Методи подавлення ЗАЗ.....	20
1.7 Висновки по розділу 1.....	21
2 АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПРИДУШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ЕХО-СИГНАЛІВ.....	27
2.1 Компенсація ехо-перешкод.....	27
2.2 Алгоритм компенсації ЗАЗ в замкненому приміщенні.....	35
2.3 Структурна схема адаптивного алгоритму.....	39
2.4 Адаптація фільтру до імпульсної характеристики ЗАЗ.....	41
2.5 Висновки по розділу 2.....	43
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ФІЛЬТРУ ЗАЗ.....	44
3.1 Вибір середовища для побудови моделі фільтру.....	44
3.2 Виявлення імпульсного відгуку системи озвучування.....	45
3.3 Моделювання придушення ЗАЗ.....	47
3.4 Методика адаптивної компенсації ЗАЗ.....	51
3.5 Висновки по розділу 3.....	57
4 ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ АДАПТИВНОГО ПОДАВЛЕННЯ ЕХО-СИГНАЛІВ.....	58
4.1 Підготовлення експериментальних даних.....	58

4.2 Формування імпульсної характеристики озвучуваного приміщення.....	59
4.3 Результати придушення ехо-сигналів адаптивним фільтром.....	62
4.4 Висновки по розділу 4.....	64
Висновки.....	65
Перелік посилань.....	70
ДОДАТКИ.....	74
Додаток А. Графічний матеріал.....	75
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АКФ – автокореляційна функція;
АЗЗ – акустичний зворотний зв'язок;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ВКФ – взаємно-кореляційна функція;
ГЕС – генератора еталонного сигналу;
ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;
Інв. – інвертор,
К – корелятор;
К-ФНЧ – керуючий фільтр нижніх частот,
ЛЗ – лінія затримки,
МП – модуль пам'яті;
ОСК – обчислювач сигналу корекції;
П – підсилювач,
ПП – підсилювач потужності;
ФНЧ – фільтр нижніх частот
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЦФ – цифровий фільтр;
ЧК – частотний коректор (ЧК),
dB SPL – Sound Pressure Level - рівень звукового тиску;
DSP – Digital Signal Processing – цифрова обробка сигналу;
MATLAB – Matrix Laboratory – математичний програмний пакет;
 Σ – суматор.

ВСТУП

На сучасному етапі розробки алгоритмів обробки звукових сигналів, дуже актуальними є завдання збереження цілісності передаваної інформації. Це, по-перше, обумовлено широким спектром задач, виконуваних акустичними системами, до яких можна віднести системи професійного та побутового підсилення і відтворення звуку, системи гучномовного зв'язку, військові інтегровані системи (льотні або тактичні шоломи чи гарнітури приймально-передавальної радіоелектронної апаратури), модулі фільтрації звуку для медичного, науково-дослідного або промислового обладнання. Отже, завдання подавлення перешкод, що виникають при передачі та обробці звукових сигналів є актуальною на даному етапі розвитку акустичної техніки.

Найбільш негативний ефект в звукозаписі мають ехо-сигнали, які виникають в результаті багатократного відбиття звукових хвиль від зовнішніх перешкод.

В наш час є ряд підходів до вирішення даної проблеми. Відомі методи, що засновані на інверсії фази і зсуві сигналу по фазі. Вони використовуються для запобігання явища резонансу.

Також є системи, що дозволяють в автоматичному режимі відслідкувати та утримати петлевий коефіцієнт посилення менше 1. Найбільш поширеними є системи, розроблені на основі принципу режекції частот, які сприяють виникненню збудження в системі звукозапису, що в кінцевому результаті негативно позначається на якості записаного звуку.

Вирішенню задачі придушення відбитих ехо-сигналів з великою затримкою присвячені роботи дослідних відділів провідних світових компаній. Тим не менш, багато відомих результатів, отриманих в даному напрямку, базуються на застосуванні фундаментальних методів подавлення шуму, що вносять помітні спотворення в вихідний сигнал. Отже, більшість методів подавлення ехо-сигналів вирішують проблему лише частково і, згідно доступним джерелам інформації, на сьогодні день не існує систем, що

дозволили би повністю придушити заваду без зниження якості обробленого сигналу. Актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи обумовлена малою поширеністю алгоритмів і засобів повного придушення ехо-завад, а також потребою вдосконалення методів обробки цифрових звукових сигналів в режимі реального часу.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз, вибір і дослідження методу подавлення ехо-сигналів в системі звукозапису, що дозволив би суттєво знизити або повністю виключити ехо-заваду з мінімальними спотвореннями обробленого сигналу.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПОДАВЛЕННЯ ЕХО-СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ ОЗВУЧУВАННЯ І ЗВУКОЗАПИСУ

1.1. Завдання передачі звукової інформації

Основною особливістю при передачі звукових сигналів через повітря, є необхідність збереження незмінності інформаційної складової звуку [1]. Наприклад, при передачі мовлення враховують відносне або відсоткове число вірно прийнятих елементів (слова, фрази, команди, звуки, склади, цифри) із загальної кількості переданих по тракту [2]. В даному випадку, не менш суттєвими параметрами звукового сигналу є тембр, інтонація, емоційне забарвлення, які забезпечують повний обсяг інформації, яка передається до слухача, оскільки звукове мовлення є специфічною єдністю змістової і чуттєвої складових [3]. Поняття «зрозумілість мови» є головною характеристикою, що визначає придатність звукового тракту для передачі мовлення. Оптимальними умовами для повноти передачі інформації за допомогою мовлення є безпосередня близькість слухача до джерела. Тоді, за відсутності інших факторів, що негативно впливають на процес передавання звукової інформації (наприклад, шуми), можна впевнено стверджувати, що звуковий сигнал дійшов до слухача без спотворень.

В деяких випадках є потреба донести звукову інформацію одночасно до декількох слухачів, тоді гучності природного людського мовлення стає недостатньо. В таких випадках є необхідність посилити гучність (потужність) звукового сигналу. Прикладом цих ситуацій є застосування систем озвучування концертних, конференц-залів при "живих" виступах, застосування систем звукового супроводу для телеконференцій і т.д.

Отже, забезпечення якісного звукозапису і відтворення звуку, організація передавання сигналів без спотворень при експлуатації різного роду акустичної апаратури є важливим науковим і технічним завданням.

1.2 Основні характеристики акустичних сигналів

Частотний діапазон є важливим параметром, що визначає якість звучання звукової техніки та відповідає розподілу рівню спектральної щільності сигналів [1-3].

Процес поширення акустичної хвилі в різних середовищах виглядає по-різному, але не залежно від середовища, загальною рисою є неминуче зменшення амплітуди звукового сигналу [1, 2]. Причиною даного ефекту може бути розходження хвилі, розсіювання звуку на перешкодах або поглинання [3]. Довжина хвилі λ відповідає відстані, що звукова хвиля проходить за один період коливання, і розраховується як відношення швидкості звуку c в даному середовищі до частоти звуку f

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

Рівень потужності акустичного сигналу вимірюють в дБ і визначають як логарифм від відношення потужностей P і P_0 звукового сигналу, причому величина P_0 відповідає порогу чутності [3]:

$$N_P = 10 \log(P / P_0) . \quad (1.2)$$

Рівень звуку $N_P = 0$ дБ відповідає 20 мкПа на частоті 1 кГц. Зарубіжні виробники зазначають рівень потужності в dBSPL (SPL – Sound Pressure Level – рівень звукового тиску).

Акустичні хвилі, зустрічаючи на шляху поширення перешкоди, змінюють напрям свого поширення, тобто здатні огинати перешкоди. Дана властивість – дифракція – має найбільший прояв на нижніх частотах, бо вони мають велику довжину хвилі [1-3]. Ще однією властивістю акустичної хвилі є інтерференція – це здатність хвиль однієї частоти складатися в просторі,

при тому в залежності від відношення амплітуд і фаз хвиль змінюється гучність звучання [4].

1.3 Методи обробки акустичних сигналів

Судячи по динаміці зміни рівня звукового тиску як функції часу, будемо відносити звуковий сигнал до однієї з груп, відповідно до поширеної класифікації звукових сигналів:

– періодичні (детерміновані) звукові сигнали; характеризуються можливістю розрахунку майбутніх величин по поточним і попереднім величинам сигналу; сигнал періодичний, якщо виконується умова [5]:

$$s(t) = s(t + kT), \quad (1.3)$$

де T – період сигналу, $k \in Z$.

– випадкові акустичні сигнали; їхньою характерною рисою є неможливість точно передбачити величини в наступні моменти часу, виходячи з відомих величин в поточний і попередні моменти часу, так як вони змінюються випадково [6];

– квазивипадкові звукові сигнали; до таких відносять сигнали, величини яких передбачувані на кінцевих інтервалах часу, але взагалі зміни сигналу передбачити не можливо; такими прикладами є музика і мовлення [6].

«Білий шум» – це шумовий сигнал, спектральна щільність потужності якого є рівномірно розподіленою по усьому діапазону звукових частот [5].

«Білий шум» застосовується для вимірювання частотних характеристик різного роду лінійних динамічних систем, наприклад, підсилювачів, частотних фільтрів, систем управління тощо. При подачі на вхід даної системи білого шуму, на виході отримаємо сигнал, що є відгуком системи на вхідний вплив.

«Рожевий шум» – це шумовий сигнал, спектральна щільність потужності якого зменшується лінійно з ростом частоти. Наприклад, в повітряному середовищі високочастотні складові звукових хвиль загасають сильніше низькочастотних складових [6].

Для аналізу характеристик звукових сигналів використовують методи спектрального, статистичного та кореляційного аналізу:

- статистичний аналіз звукових сигналів дозволяє отримати оцінку динамічного діапазону і пік-фактору шляхом аналізу розподілу миттєвих величин у часі; пік-фактор вказує, на скільки нижче треба встановити рівень сигналу у звуковому тракті в порівнянні з рівнем обмеження, щоби не виникали перевантаження (кліпування) [7].

- спектральний аналіз (Фур'є-аналіз) – процес розкладення складного періодичного сигналу у вигляді суми простих коливань (синус та косинус), частоти яких є гармоніками основної частоти (основного тону) [5]; зворотне перетворення елементарних гармонійних складових назад у сигнал називається синтезом Фур'є [5].

Залежно від типу звукового сигналу застосовуються різні типи спектрального аналізу:

- ряди Фур'є – для періодичних звукових сигналів;
- інтеграли Фур'є – для неперіодичних звукових сигналів;
- дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) – метод розрахунку гармонійних складових спектру звукового сигналу за дискретними відліками аналогового сигналу [5,7]; при тому частота дискретизації F_{∂} , у відповідності до теореми Котельникова, при якій можливо без втрат перетворити аналоговий звуковий сигнал на цифровий і назад, має бути вдвічі більше верхньої частоти F_{ϵ} сигналу [5,7]:

$$F_{\partial} > 2F_{\epsilon}; \quad (1.4)$$

- швидке Фур'є-перетворення (ШПФ) для цифрового сигналу [5,7].

Структура спектру акустичного сигналу має головне значення для сприйняття його за тембром і загальною інформативною складовою.

Для розроблення методів та алгоритмів цифрової фільтрації застосовують низку фундаментальних операцій з сигналом:

– лінійна згортка; для двох сигналів $h(n)$ і $s_0(k)$, які мають тривалість N і K відповідно, згортка записується як [5,7]:

$$s(k) = \sum_{n=1}^N h(n) \cdot s_0(k-n); \quad (1.5)$$

У цифрових системах обробки звуку, найчастіше, одна із послідовностей $s_0(k)$ це сигнал, поданий на вхід системи, друга $h(n)$ – це перехідна характеристика системи, а $s(k)$ – вихідний сигнал системи.

В результаті операції згортки точно розраховується вихідний сигнал при заданому вхідному сигналі за умови, що перехідні коефіцієнти системи є відомими. Деконволюція – є зворотною задачею, що полягає у визначенні за функціями $s(k)$ і $h(n)$ оригінального сигналу $s_0(k)$. Деконволюція має рішення лише при виконанні певних умов [5]. При обчисленні згортки присутня вірогідність суттєвої зміни спектра сигналу $s(k)$ і відновлення сигналу буде $s_0(k)$ неможливе, бо певні смуги частот спектру сигналу $s(k)$ будуть втрачені.

– кореляційний аналіз – є процесом, в результаті якого обчислюється кореляційна функція, що встановлює певний зв'язок змін значення сигналів з часом [6].

Автокореляційна функція (АКФ) розраховується як скалярний добуток сигналу $s(t)$ зі зсунутою у часі власної копією [6]. АКФ дає можливість оцінити в середньому статистичну залежність відліків звукового сигналу в поточний момент часу від власних подальших та попередніх значень (інтервал кореляції), а також помітити в сигналі наявність повторювань із

певним періодом. АКФ розраховується шляхом інтегрування добутку двох, зсунутих один відносно одного на час τ копій звукового сигналу $s(t)$ [6]:

$$B_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t + \tau) dt . \quad (1.6)$$

Поряд з лінійною згорткою суттєву роль в обробці звукових сигналів має взаємно-кореляційна функція (ВКФ) сигналів, що є згорткою і використовується для визначення подібності двох сигналів. ВКФ двох сигналів вказує на ступінь подібності їхньої форми при взаємному зміщенні сигналів у часі [6]:

$$B_{ss}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt . \quad (1.7)$$

Отже, ВКФ обчислюється як послідовність скалярних добутків в точках порівняння ковзної послідовності $s_2(t)$ за сигналом $s_1(t)$.

1.4 Шуми, перешкоди і спотворення в звукових системах

Типова модель системи озвучування наведена на рис. 1.1 [1-4, 8].

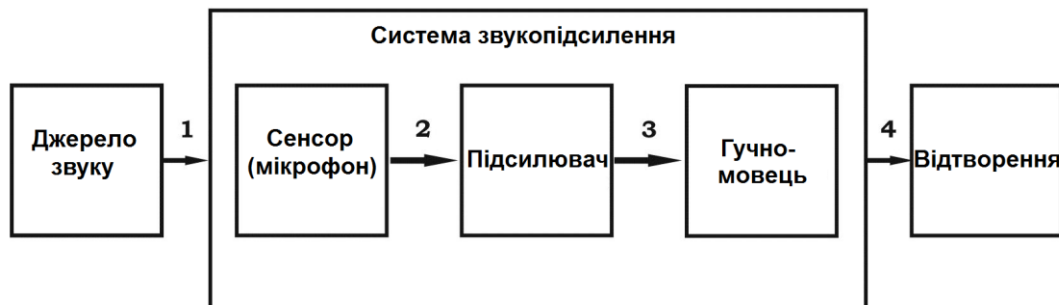


Рисунок 1.1 – Типова модель системи озвучування

Будемо вважати спотвореннями будь-які зміни сигналів, викликані невідповідністю ідеальних і реальних характеристик звукової системи. Всі спотворення в звукових системах поділяють на лінійні і нелінійні.

Нелінійними спотвореннями є ті, при яких в звуковому сигналі з'являються нові складові спектру, які в залежності від величини вхідного сигналу змінюють його часову структуру. Лінійні спотворення проявляють себе в тому випадку, якщо у вихідному сигналі не з'являються нові спектральні компоненти і не залежно від рівня сигналу змінюються фазові і амплітудні співвідношення між окремими складовими звукового сигналу [1-5,8].

Виходячи з відомої класифікації перешкод за походженням, будемо розділяти їх на акустичні та електричні перешкоди [8]. В залежності від того на який параметр сигналу діє завада, виділяють такі перешкоди: по слуховому сприйняттю, по спектру, по тривалості, по діапазону частот. В окрему групу виділяють перехідні перешкоди, що виникають при паразитних електричних та електромагнітних зв'язках між сигнальними колами.

Причинами появи перешкод є:

- недостатня акустична ізоляція приміщення;
- пульсації струму в системах електричного живлення, «наведення» від електромагнітних кіл змінного струму;
- флуктуації електронів або інших носіїв заряду в електронних приладах;
- сторонні електромагнітні поля, створювані електричними двигунами, трансформаторами, колами змінного струму, близько розташованими провідниками у багатожильних кабелях;
- специфічні дефекти носіїв звукових записів;
- сторонні джерела випромінювань в радіодіапазоні (радіостанції, електричні атмосферні розряди, медична, промислова, побутова електрорадіоапаратура).

1.5 Зворотний акустичний зв'язок

Зворотний акустичний зв'язок (ЗАЗ) проявляється як повторне потрапляння генерованої гучномовцем акустичної енергії назад у мікрофон [1,8].

Розрізняють позитивний та негативний ЗАЗ. Для виникнення позитивного ЗАЗ потрібно виконання двох умов: фаза сигналу, що повторно потрапив у мікрофон, має точно збігатися з фазою оригінального корисного сигналу, і загальний коефіцієнт посилення системи має перевищувати одиницю.

При негативному ЗАЗ фаза вихідного і вхідного сигналу є інвертована, (зсув фаз 180°). При тому корисний вихідний сигнал зменшується на рівень сигналу ЗАЗ. Хоча посилення при цьому зменшується, і система передавання звуку стає більш стабільною. Якщо два сигнали мають однаковий рівень, то вихідний сигнал зменшується до нуля.

Виникнення ЗАЗ в системах озвучування впливає негативно на розбірливість звукової інформації. Ця величина описує співвідношення числа елементів мови (слів, фраз, звуків, складів) сприйнятих правильно, до загального числа переданих елементів, і виражається у процентах [9].

На рис. 1.2 показаний приймач звукового сигналу (1), гучномовець (2) та посилювач (3) із змінюваним коефіцієнтом посилення. Перешкоди зворотного акустичного тракту проходять крізь повітряне середовище (пунктирна лінія).

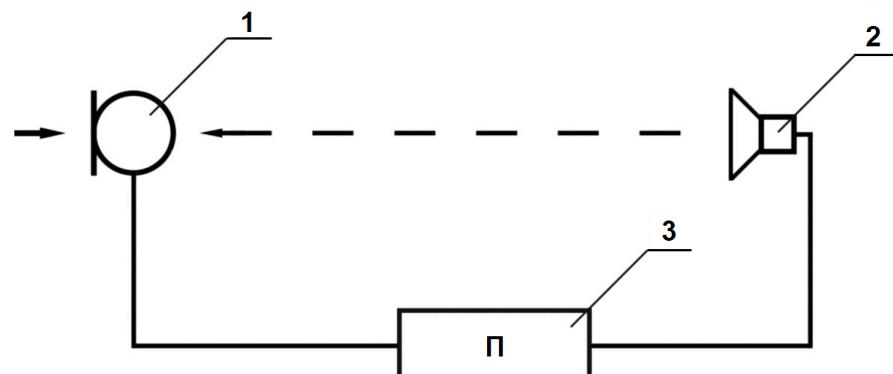


Рисунок 1.2 – ЗАЗ в умовах вільного повітряного простору
(1 – мікрофон, 2 – гучномовець, 3 – посилювач)

Ефективне значення звукового тиску біля мікрофону, створюване первинним звуковим джерелом, позначимо як p_0 , а ефективний тиск біля мікрофону від гучномовця – p ; коефіцієнт зворотного акустичного зв'язку α . Для цієї моделі буде справедливим вираз [8]:

$$p = \alpha(p_0 + p). \quad (1.8)$$

У формулі (1.8) тиск p від гучномовця пропорційний сумарному тиску $p_0 + p$, що впливає на мікрофон.

Коли сигнал в звуковій системі має широкий частотний діапазон, завжди знайдеться ціла низка частот, за яких зворотний зв'язок має позитивний знак. При тому, основний і регенерований сигнали збігаються по фазі, що приводить до наростання амплітуди процесу коливань, тобто до переходу системи у режим генерації автоколивань, коли коефіцієнт зворотного зв'язку $\alpha \geq 1$.

При озвученні замкнутих приміщень, обов'язково присутні ревербераційні перешкоди. До ревербераційних перешкод віднесемо відбиття від обмежуючих поверхонь із різними інтервалами часового запізнення по відношенню до сигналу, який надходить з прямого звукового тракту. При великому часі реверберації збільшується вірогідність виникнення автоколивань в звуковій системі.

При роботі системи посилення звуку в приміщенні треба врахувати, що сигнал впливає на мікрофон не тільки зі сторони гучномовця, але і в результаті відбиттів акустичних хвиль від обмежуючих поверхонь. В даному випадку система озвучування є системою з багаторазовими, поступово запізнюваними зворотними зв'язками (рис. 1.3).

В цілому, результуючий ЗАЗ стає більш глибоким, внаслідок чого зростає небезпека самозбудження звукової системи, а спричинені нею перешкоди стають більш помітні.

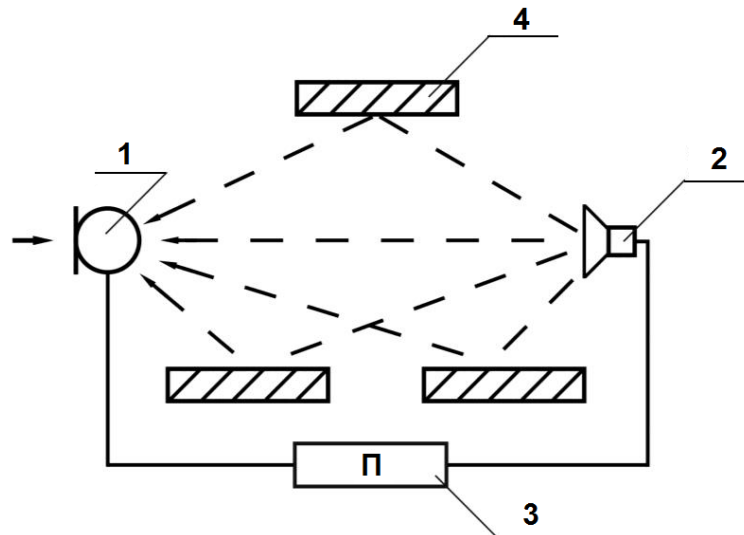


Рисунок 1.3 – ЗАЗ за наявності відбиваючих поверхонь
(1 – мікрофон, 2 – гучномовець, 3 – посилювач 4 – поверхні)

Відбиті хвилі надходять до приймача із різними фазами, причому енергії усіх даних хвиль додаються адитивно. В даному випадку ефективний тиск біля мікрофону описується виразом [8]:

$$p_{ef.} = \sqrt{p_0^2 + p^2}, \quad (1.9)$$

де p_0 – ефективний звуковий тиск, який створюється біля мікрофона первинним звуковим джерелом (прямий звуковий тракт),

p – ефективний звуковий тиск як від прямої хвилі, яка випромінюється гучномовцем, так і від багаторазових відбиттів (зворотний звуковий тракт).

При озвученні замкнених приміщень головна увага приділяється акустичній поглинальній обробці, так як, чим менше потужність відбитих акустичних хвиль, тим менше вірогідність самозбудження системи [1-4,8].

1.6 Методи подавлення ЗАЗ

Із результатів пошуку в мережі Інтернет запатентованих алгоритмів і пристроїв для усунення ЗАЗ, слід виділити декілька фундаментальних

існуючих методів подавлення ЗАЗ і зазничити їх недоліки у вигляді негативного впливу на оброблений сигнал.

Відома система для посилення звуку [10] з функцією подавлення ЗАЗ, структурна схема якого наведена на рис. 1.4.

Система містить мікрофон, попередній посилювач (П), частотний коректор (ЧК), змінну лінію затримки (ЛЗ), посилювач потужності (ПП) та гучномовець.

Недоліками даної системи для посилення звуку є спотворення, які вносяться затримками сигналів, щоби уникнути появи резонансу. Крім цього, схожі пристрої засновані на лінії змінної затримки сигналу від мінімально допустимого значення до повернення до власної фази. Вони спрацьовують тільки на певних частотах.

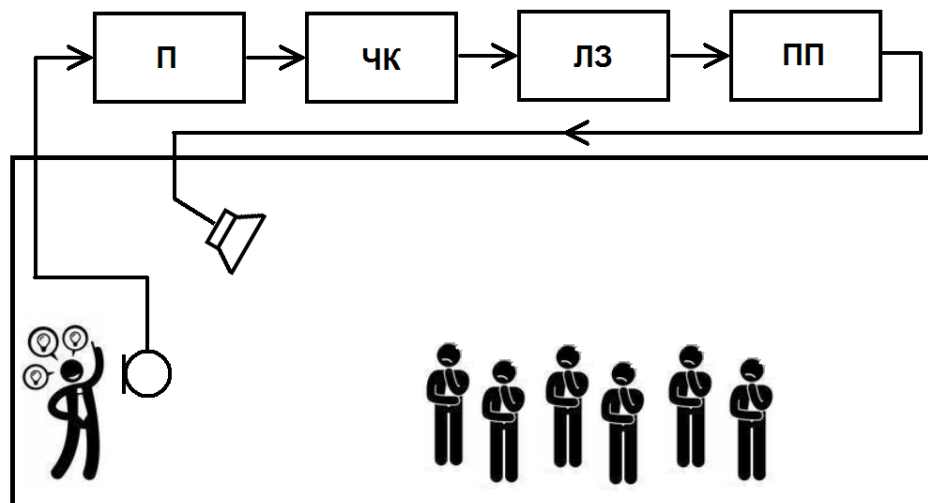


Рисунок 1.4 – Структурна схема подавлення ЗАЗ із звстосуванням лінії затримки (П – попередній посилювач, ЧК – частотний коректор, ЛЗ – лінія затримки, ПП – посилювач потужності)

Серед відомих методів фільтрації є також відомий система для посилення звуку [11] з функцією подавлення ЗАЗ. Система містить мікрофон, фільтр нижніх частот (ФНЧ) із змінною смугою пропускання, посилювач (П), вихід якого підключено до гучномовця, керувальний фільтр нижніх частот (К-ФНЧ), вихід якого підключено до входу випрямляча (В). Структурна схема системи наведена на рис.1.5.

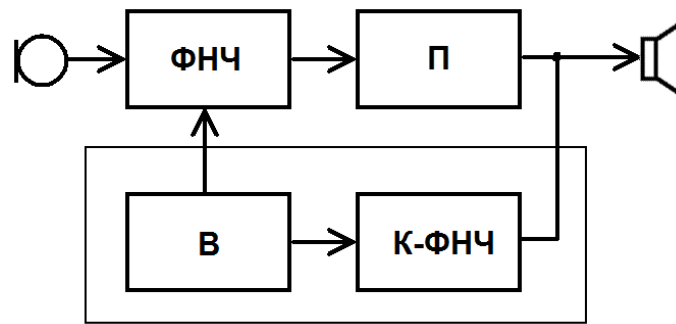


Рисунок 1.5 – Структурна схема подавлення ЗАЗ із частотним фільтром (ФНЧ – фільтр нижніх частот, П – посилювач, К-ФНЧ – керувальний ФНЧ, В – випрямляч)

У даній системі фільтрація сигналів, які сприяють виникненню ЗАЗ відбувається лише в тому випадку, якщо утворюються паузи в мовленні оратора, тоді спрацьовує фільтр і він не пропускає в посилювальний тракт зовсім ніякого сигналу. Під час протяжного, або нерозділеного мовлення з рівнем коефіцієнта посилення більше 1, дана система працює некоректно і є велика вірогідність появи ЗАЗ.

Існує система подавлення зосереджених звукових перешкод [10,11]. У даній системі спектр сигналу обмежується 16-тю смуговими фільтрами від 300 Гц до 3,5 кГц. При впливі на адаптивну систему зосередженої звукової завади, що перевищує рівень порогу, відповідний фільтр відключається. Отже, здійснюється подавлення завади. Однак, при відключенні одного або декількох смугових фільтрів, діапазон частот системи стає неповноцінним, порушується цілісність частот сигналу, зникають ті корисні частоти, смуги яких відключені відповідними фільтрами.

Під час проведеного в роботі пошуку в області існуючих систем і методів усунення ЗАЗ, було з'ясовано, що зменшення негативного впливу ЗАЗ досягається:

- шляхом застосування малопотужних гучномовців, рівномірно розподілених по усьому приміщенню;

- шляхом оснащення системи гостроспрямованими мікрофонами і гучномовцями, а також точного розрахунку і їх взаємного розташування в озвучуваному приміщенні;

- шляхом зниження коефіцієнта посилення для зменшення рівня звукового тиску системи озвучування;

- шляхом оснащення замкнутого озвучуваного приміщення конструкціями, які збільшують фонд поглинання звуку, обробка поверхонь приміщення акустичними поглинальними матеріалами;

- зниження коефіцієнта посилення тих частот, на котрих найбільш вірогідне виникнення самозбудження; у даному випадку в систему посилення звуку додають вузькосмугові режекторні фільтри, які, природно, погіршують якість звуку. Зниження коефіцієнта посилення частоти на котрій відбувається самозбудження може відбуватися автоматично, завдяки спеціальному програмно-апаратному комплексу подавлення ЗАЗ;

- підключення у схему посилювальних пристроїв, що зміщують частотний спектр сигналів на інтервал 4...12 Гц. В результаті мінімуми та максимуми сигналів, що випромінюють звукові джерела, зміщуються відносно мінімумів і максимумів частотної характеристики озвучуваного замкнутого приміщення; для кожного простору експериментальним шляхом підбирається потрібне зміщення частот. У порівнянні із попереднім порогом виникнення збудження це дозволяє збільшити величину потужності системи посилення звуку.

Виходячи з відомих підходів до вирішення задачі запобігання виникнення резонансу в звукопосилювальній апаратурі під час озвучування замкнутого простору, можна зробити класифікацію існуючих алгоритмів, реалізованих апаратними або програмними засобами (рис. 1.6).

Одним із найпоширеніших методів подавлення ЗАЗ є застосування еквалайзера, що полягає у визначенні проблемних частот, де виникає збудження, і видаленні їх із загального спектра звукового сигналу [10-12].

Головним недоліком даного методу є негативні зміни, які вносяться у сигнал, оскільки принцип еквайзера порушує цілісність структури сигналу [10-12].

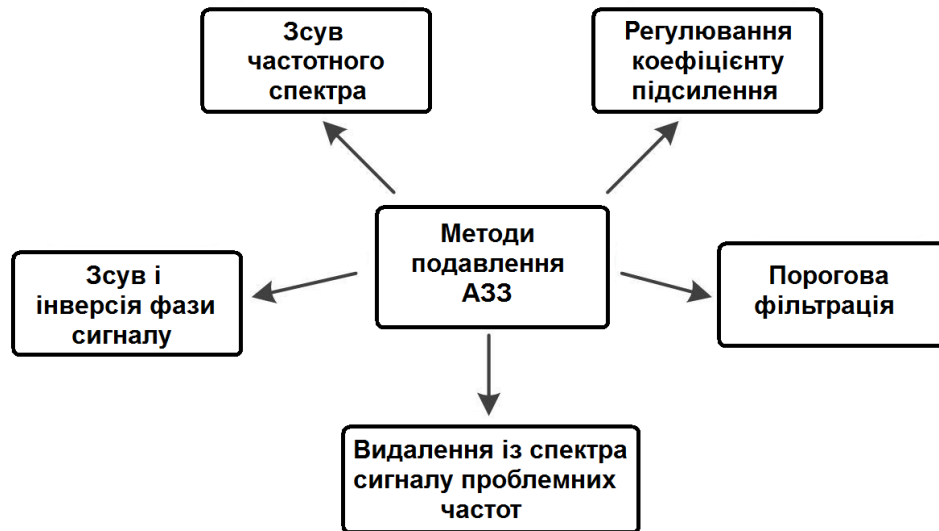


Рисунок 1.6 – Класифікація алгоритмів подавлення ЗАЗ

Також відомі методи, які дозволяють в автоматичному режимі виконувати плавне регулювання коефіцієнта посилення, завдяки чому гучність звучання в процесі функціонування системи змінюється незначно [10,11]. За такого підходу виділяється критерій оцінки сигналу, по якому відстежується момент збудження і, як тільки потужність ехо в сигналі сягає критичного рівня, автоматично знижується коефіцієнт посилення.

Результати аналізу способів подавлення ЗАЗ показані в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики способів подавлення ЗАЗ

№	Спосіб	Вплив на сигнал	Проявлення при сприйнятті на слух
1	Метод видалення проблемних смуг частот	Порушення цілісності спектра сигналу	Сигнал сприймається не чітким
2	Метод зсуву і інверсії фази сигналу	Ослаблення одних частот в порівнянні з іншими	Втрата яскравості звуку
3	Метод зсуву частотного спектра сигналу	Зсув спектру сигналу	Спотворення звуку
4	Метод використання порогових фільтрів	Метод не працює при відсутності пауз в сигналі	Спотворення в момент надходження сигналу
5	Метод регулювання коефіцієнта підсилення	Поява обмеження на збільшення потужності звуку	При появі завад ЗАЗ змінюється рівень звукового тиску

У роботі [10] описані результати дослідження негативного впливу певних систем придушення ЗАЗ на сигнал (табл. 1.2). Дослідження виконувалося на діючих, змонтованих системах гучного зв'язку, системах озвучування замкнених приміщень і відкритих просторів в лабораторних або в промислових умовах.

Оцінка якості звучання здійснювалася за наступною методикою: позмінно змінювалися режими тестування, встановлювалася максимальна гучність звуку, при цьому не доводячи систему до збудження. Рівень звукового тиску реєструвався вимірювальним мікрофоном. Пристрої оцінювалися за такими критеріями:

- критерій 1 – рівень звуку зі включеним апаратним подавлювачем ЗАЗ відносно максимального рівня звуку без подавлювача;
- критерій 2 – природність звуку, відсутність спотворень (суб'єктивне оцінювання за 10-бальною шкалою);
- критерій 3 – число застосованих приладів динамічної обробки (конкретна кількість для кожного із тестованих приладів);
- критерій 4 – час подавлення ЗАЗ приладом.

Таблиця 1.2 – Характеристики приладів подавлення ЗАЗ

№	Метод подавлення ЗАЗ	Пристрій / виробник	Оцінка			
			1	2	3	4
1	Метод видалення проблемних смуг частот	FBQ1000 / Behringer	3,2 дБ	9	5	0,3 с.
2	Метод зсуву і інверсії фази сигналу	LMS-2040 / Eurosound	2,1 дБ	7	5	0,2 с.
3	Метод зсуву частотного спектра сигналу	LBB 1968/00 / Bosch	4,9 дБ	8	5	0,3 с.
4	Метод використання порогових фільтрів	CS-DDU-RF/ SAMY	0 дБ	8	4	<0,1 с.
5	Метод регулювання коефіцієнта підсилення	Vortex EF2280 / Poly-com	до 2 дБ	9	5	<0,1 с.

1.7 Висновки по розділу 1

В розділі 1 представлені результати аналізу і систематизації відомих на даний час теоретичних і практичних досліджень в галузі подавлення ЗАЗ, позначені прояви негативного впливу обробки звукових сигналів.

Проведено аналіз результатів наукових досліджень в області подавлення ЗАЗ, опублікованих у наукових виданнях та Інтернеті, а також аналіз технічних документів до систем та пристроїв посилення звуку і подавлення ЗАЗ.

Виконано класифікацію основних методів зменшення ЗАЗ (рис. 1.6) і визначено негативний вплив на оброблений сигнал (табл. 1.2, табл. 1.3).

Варто зазначити, що у сучасних системах зменшення ЗАЗ найчастіше застосовують еквалайзерні алгоритми подавлення, що вносять помітні негативні зміни в сигнал, при цьому завдання подавлення ЗАЗ вирішується лише частково. При виконанні практичних досліджень повного або значного придушення ЗАЗ без зменшення якості обробленого сигналу досягти не вдається.

Отже, є задача вдосконалення алгоритмів і засобів для придушення ЗАЗ, вдосконалення алгоритмів цифрової обробки звукових сигналів у режимі реального часу.

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 АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПРИДУШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ЕХО-СИГНАЛІВ

Боротьба з ЗАЗ має два головних напрями з видалення ехо з корисних сигналів: загородження ехо і подавлення ехо.

Загородження ехо – це процедура зменшення ефекту відлуння за рахунок штучного ослаблення сигналів в один із напрямів їх передачі [1-4]. Подавлення ехо – є більш складнішою і точнішою процедурою видалення луни з корисного сигналу шляхом віднімання сигналу зворотного звукового тракту із загальних сигналів, які приймаються мікрофоном [1-4].

Компенсація ехо – є процедурою фільтрації небажаних відбитих сигналів, які виникають при перетині діапазонів частот каналів передавання і приймання [13]. Серед виробників апаратно-програмних засобів видалення завад ЗАЗ в системах підсилення звуку є загальна назва «подавлювач зворотного акустичного зв'язку» (Acoustic Feedback Suppressor).

2.1 Компенсація ехо-перешкод

На основі результатів аналітичного огляду джерел було виділено декілька основних методів компенсації ехо-сигналів у звукових системах.

Перший метод полягає в автоматизованому синтезі відгуку ехо, подальшому аналізі часу проходження первинного сигналу та його віднімання від затримки на виході. За рахунок великої швидкодії системи виключається виникнення затримок і переривань сигналів у дуплексному режимі [13].

Другий метод полягає у частотному поділенні усієї смуги каналу на два частотних підканали, сигнал передається по кожному з підканалів в одному напрямку. У даному випадку відсутня можливість займання смуги каналу у повному обсязі. Більш того, з метою запобігання проникнень сторонніх гармонік між підканалами потрібно вводити захисний інтервал частот. В

результаті, підканали займатимуть менше половини усієї смуги частот пропускання каналу [12].

Третій спосіб застосовує автоматично настроювані диференціальні системи, але їх використання економічно не вигідно через підвищену складність їхньої практичної реалізації.

Четвертий спосіб застосовує усунення невідповідності комплексного опору між приймальною і передавальною апаратурою, а також інтерфейсом каналу передачі. Слід відзначити, що природа появи ехо-сигналів полягає в накладанні один на одного вхідного і вихідного сигналів на електричному рівні.

Найбільш перспективними можемо вважати компенсаційні методи боротьби з електричними ехо-сигналами [13]. Розглянемо структурну схему ехо-компенсації електричних сигналів на прикладі телефонної лінії. В основу досліджуваного методу ехо-компенсації покладемо припущення про те, що система може застосовувати для фільтрації сигналу $s_{in}(t)$ від ехо-перешкоди $e(t)$, на основі інформації про власний випромінений сигнал $s_{out}(t)$. Внаслідок амплітудних і фазових змін, відбитий ехо-сигнал $e(t)$ отримує суттєві зміни [12]. Отже, можна відправити в тракт певний випробувальний сигнал і потім виміряти параметри ехо-відбиття, а саме – потужність відбитого сигналу, спотворення амплітуд і фаз, часу запізнення. В процесі передавання інформації з прийнятого вхідного сигналу ехо-компенсатор системи віднімає скоригований відповідно до прийнятих параметрів ехо-відбиття свій власний ехо-сигнал $\hat{e}(t)$.

На рис. 2.1. показано схему на якій зображено лінію затримки з відводами, що виконує задачу створення копії ехо-сигналу. Застосування технології компенсації ехо дає можливість відвести всю ширину смуги частот пропускання звукового каналу, однак вимагає суттєвої обчислювальної складності для обробки сигналів [12].

Не дивлячись на причину виникнення ехо-сигналів, кінцевий слух чує свій голос із затримкою.

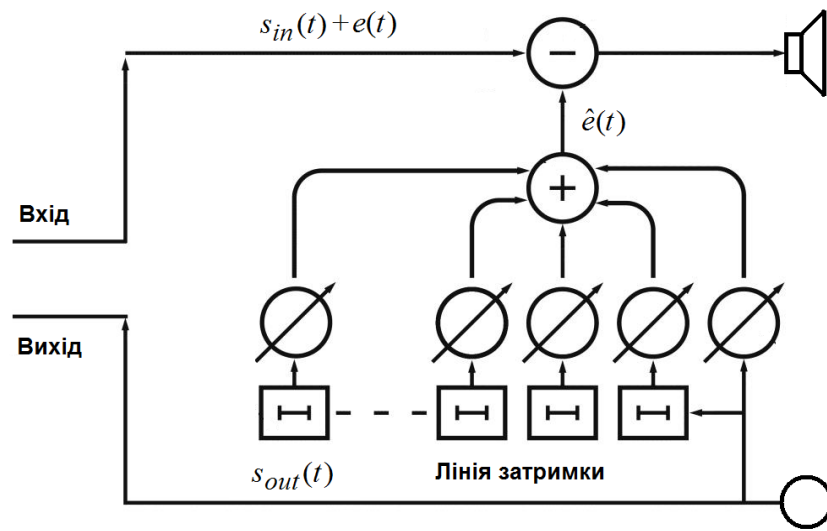


Рисунок 2.1 – Структурна схема компенсатора ехо

Також треба враховувати, що на відміну від електричного сигналу звукове ехо і його перешкоди мають набагато складнішу структуру. Це обумовлено середовищем поширення сигналів, приміщення, навколишнього простору. Структурна схема системи для адаптивного подавлення завад наведена на рис. 2.2.

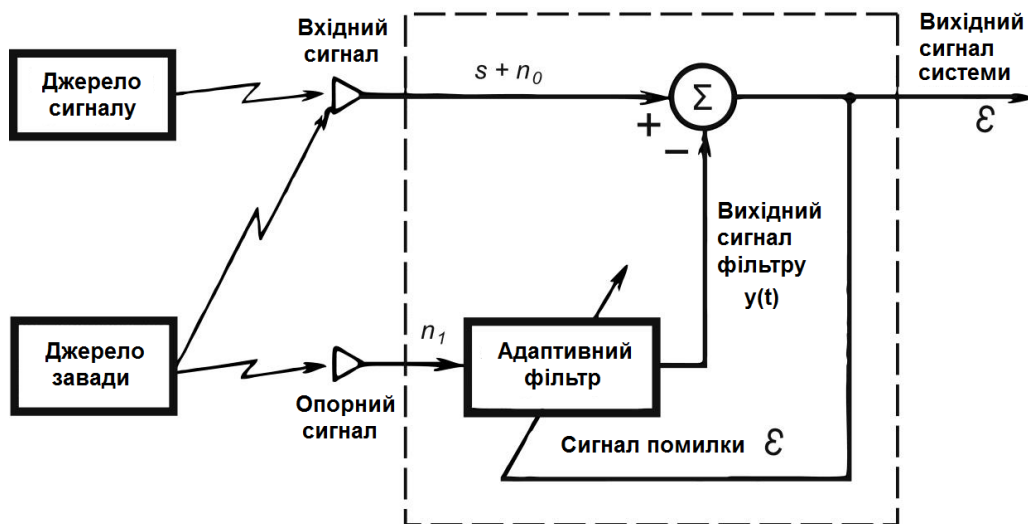


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи для адаптивного подавлення перешкод

Корисні звукові сигнали подаються на мікрофон, що приймає суму сигналу $s(t)$ і деякої перешкоди $n_0(t)$, яка не є корельованою з корисними сигналами. Другий мікрофон приймає перешкоду $n_1(t)$, що не є корельованою

із корисним сигналом, але корельована із перешкодою є корельовано певним невідомим чином. У даному каналі реєструється «опорний сигнал» для пристрою подавлення перешкоди.

В процесі усунення перешкоди $n_1(t)$ утворюється сигнал $y(t)$, що фактично є копією перешкоди $n_0(t)$. Сигнал $y(t)$ віднімається із загального обробленого сигналу $s(t) + n_0(t)$ для формування вихідного сигналу системи обробки $s(t) + n_0(t) - y(t)$. В цілому, при відомих характеристиках каналів, через які перешкода приходить на два мікрофони, можна створити фільтр, що перетворює $n_1(t)$ в $y(t) = n_0(t)$, з постійними параметрами. Тоді сигнал на вході фільтру можна відняти із вихідного сигналу, а на вихід системи надіслати лише один корисний сигнал.

Так як характеристики трактів передавання сигналів відомі тільки приблизно, чи зовсім невідомі, то використання фільтру з постійною конфігурацією не задовольняє умові гнучкості. Навіть коли фільтр з незмінними параметрами забезпечить гнучкість, то його треба налаштовувати з точністю, якої важко досягнути, і найменша помилка приведе до збільшення потужності перешкоди на виході системи.

У показаній на рис. 2.2 системі еталонний сигнал оброблюється адаптивним фільтром, що автоматично перебудовує власну імпульсну характеристику по одному із середньоквадратичних методів (наприклад, по алгоритму найменших квадратів) [12]. Фільтр перелаштовується по сигналу помилки, що залежить від вихідного сигналу фільтру. Отже, за коректного алгоритму фільтр може працювати в динамічно змінюваних умовах і підстроюватися під них з метою мінімізації сигналу помилки.

Практичне застосування системи подавлення перешкоди – це формування вихідного системного процесу $s(t) + n_0(t) - y(t)$, що має найліпше в середньоквадратичному сенсі наближення до процесу $s(t)$. Це виходить за рахунок того, що сигнал із виходу системи йде на адаптивний фільтр, що налаштовує власні параметри відповідно до певного адаптивного

алгоритму таким чином, щоби звести до мінімуму потужність загального сигналу на виході системи.

В конкретному випадку, в системі з адаптивним подавленням перешкод сигналом помилки адаптації є сигнал із виходу системи. Для налаштування фільтру або для його адаптації для створення сигналу $y(t)$, що компенсує перешкоди, потрібні деякі точні відомості про перешкоди $n_0(t)$ і $n_1(t)$ чи про сигнал $s(t)$. Однак, для того майже не треба взагалі апріорних даних про ці сигнали або про їх детерміновані або статистичні взаємозв'язки.

Нехай s, n_0, n_1 і y є стаціонарними випадковими процесами з нульовими середніми, причому s є некорельованим з n_0 і n_1 , а n_0 і n_1 є корельованими між собою. Тоді вихідний сигнал

$$\varepsilon = s + n_0 - y. \quad (2.1)$$

Зведемо дві частини рівності у квадрат:

$$\varepsilon^2 = s^2 + (n_0 - y)^2 + 2s(n_0 - y). \quad (2.2)$$

Виведемо математичне сподівання двох частин виразу (2.2) і, оскільки n_0 і y не є корельованими з s , то запишемо

$$\begin{aligned} E[\varepsilon^2] &= E[s^2] + E[(n_0 - y)^2] + 2E[s(n_0 - y)] = \\ &= E[s^2] + E[(n_0 - y)^2]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Потужність сигналу $E[s^2]$ залишиться незмінною при налаштуванні фільтру в процесі мінімізації $E[\varepsilon^2]$. В такому разі мінімальна потужність сигналу на виході, у відповідності з цим, буде записана як:

$$E_{\min} [\varepsilon^2] = E[s^2] + E_{\min} [(n_0 - y)^2]. \quad (2.4)$$

Якщо фільтр синтезовано так, що значення $E[\varepsilon^2]$ є мінімальним, то мінімальну величину матиме також і $E[(n_0 - y)^2]$. У даному випадку вихідний сигнал y є найкращою середньоквадратичною оцінкою перешкоди n_0 . Крім цього, при мінімізації $E[(n_0 - y)^2]$ мінімальну величину матиме також і $E[(\varepsilon - y)^2]$, так як із формули (2.1)

$$\varepsilon - s = n_0 - y. \quad (2.5)$$

Отже, адаптація фільтра або налаштування для мінімізації потужності загального сигналу на виході рівнозначна тому, що при обраних структурі адаптивного фільтру і еталонному вихідному сигналі, сигнал ε на виході змінюється таким чином, що він є найкращим наближенням сигналу s в середньоквадратичному сенсі.

У загальному випадку результуючий сигнал ε дорівнює сумі сигналу s і певної перешкоди. Відповідно виразу (2.1) перешкода на виході дорівнює $n_0 - y$. Так як при мінімізації $E[\varepsilon^2]$ відбувається мінімізація $E[(n_0 - y)^2]$, то мінімізація потужності загального вихідного сигналу веде до мінімізації потужності перешкоди на виході і, оскільки сигнал на виході лишається незмінним, до максимізації вихідного відношення сигнал-перешкода.

Із формул (2.3) і (2.4) слідує, що мінімальна можлива потужність сигналів на виході $E_{\min} [\varepsilon^2] = E[s^2]$. Якщо то досягається, то $E[(n_0 - y)^2] = 0$. Таким чином, $n_0 = y$ і $\varepsilon = s$, і зведення до мінімуму вихідної потужності сигналу призведе до того, що сигнал буде взагалі не спотворений перешкодою.

Крім того, коли вхідний сигнал є зовсім не корельованим із опорним сигналом, то фільтр відключиться і не збільшить перешкоду на виході. У даному випадку вихідний сигнал фільтру y некорельований із вихідним сигналом, і вихідна потужність сигналу

$$\begin{aligned} E[\varepsilon^2] &= E[(s + n_0)^2] + 2E[-y(s + n_0)] + E[y^2] = \\ &= E[(s + n_0)^2] + E[y^2]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Для мінімізації вихідної потужності сигналу потрібно, щоби було мінімальним $E[y^2]$. Це досягається за рівності усіх вагових коефіцієнтів нулю, що приведе до $E[y^2] = 0$.

Ці міркування можна поширити і на той випадок, коли вхідний і еталонний сигнали містять, крім n_0 і n_1 , частки адитивного випадкового шуму, що некорельовані між собою і з s , n_0 і n_1 . Крім цього, дані міркування є справедливими, коли n_0 і n_1 є детермінованими, а не випадковими сигналами.

На рис. 2.3 наведено випадок, коли оратор застосовує мікрофон М1 в приміщенні, де є сильна акустична перешкода. Збоку від оратора поміщується другий мікрофон (М2) в тому ж приміщенні. На виходах мікрофонів М1 і М2 отримуються вхідний і опорний сигнали для адаптивної системи подавлення перешкод, далі вихідний сигнал йде у віддалене від цього приміщення місце, де його слухає адресат.

Пристрій для придушення завад у [12] мав адаптивну фільтрацію із 16-ю ваговими коефіцієнтами. На рис. 2.4. показано характерний графік кривої навчання, що показує залежність вихідної потужності від кількості циклів адаптації. Повна адаптація здійснюється приблизно через 5 тис. ітерацій (циклів), що в реальному часі становить приблизно 1 с [12].

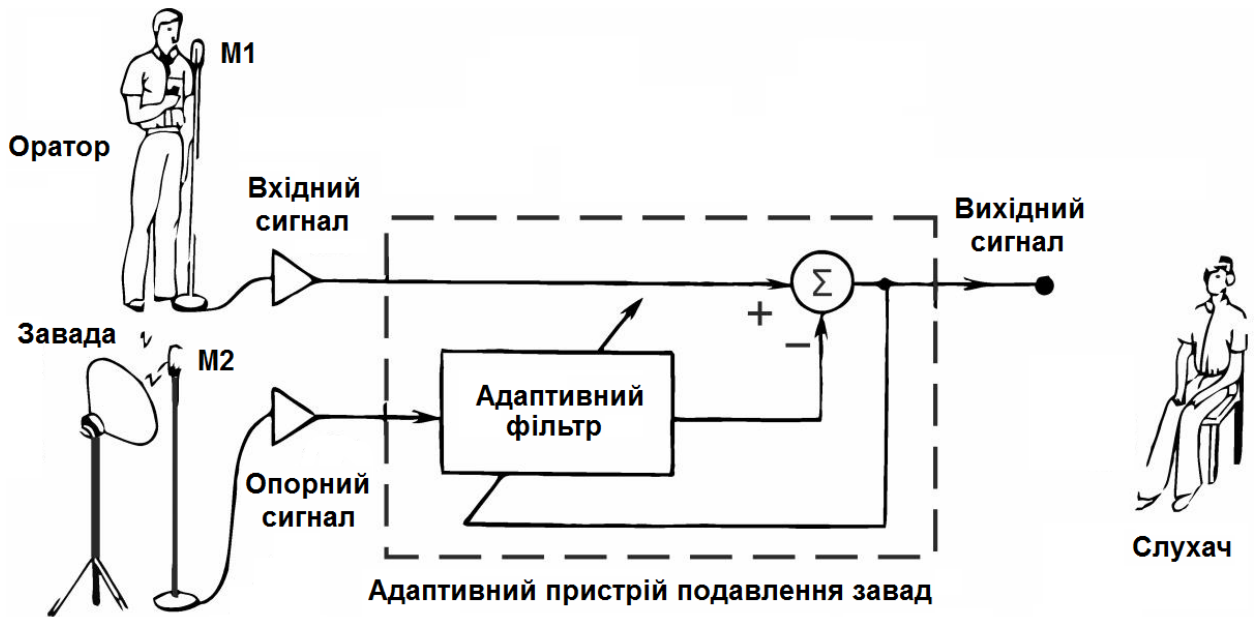


Рисунок 2.3 – Придушення акустичної перешкоди, некорельованої із корисним сигналом

Пристрій придушення ехо-перешкод зменшує потужність перешкоди на виході на 20...25 дБ, тим самим роблячи її майже не відчутною для віддалених слухачів.

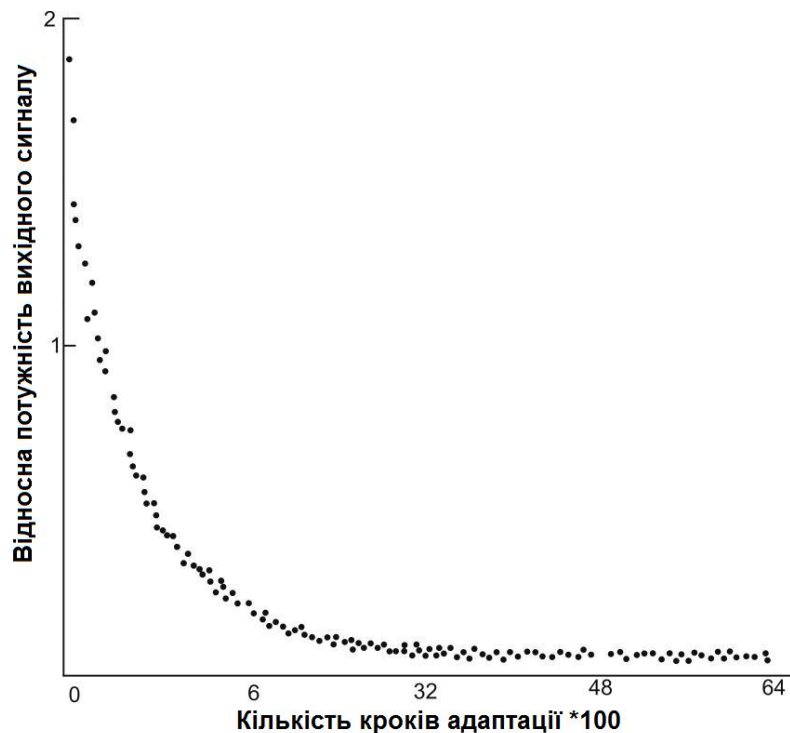


Рисунок 2.4 – Придушення шуму у мовному сигналі (крива навчання)

При цьому в мовний сигнал не вносяться помітні спотворення. Час сходження становить декілька секунд, а система адаптивної обробки легко перелаштовується при зміні положення мікрофонів і частот перешкоди у діапазоні від 100 Гц до 2 кГц.

2.2 Алгоритм компенсації ЗАЗ в замкненому приміщенні

Побудова математичної моделі алгоритму, описаного в [13], основана на лінеаризації якісних і кількісних характеристик нелінійної системи, яка схильна до виникнення збудження внаслідок ЗАЗ. За лінійного підходу до вирішення даної задачі для звукових хвиль перешкода носитиме мультиплікативний характер, а також буде вірним принцип суперпозиції. У створеній моделі системи підсилення звуку в замкненому просторі озвучення, починаючи з певного моменту часу t , в мікрофоні системи додаються два сигнали (рис. 2.5): корисний сигнал і сигнал ЗАЗ, викликаний джерелами звуку.

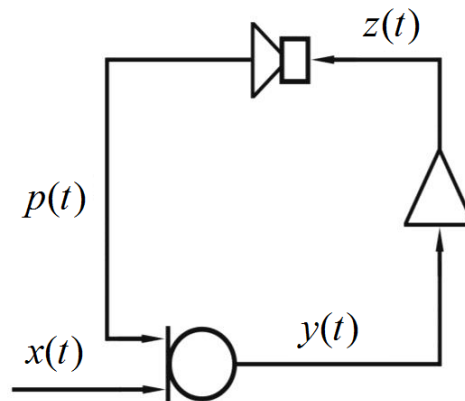


Рисунок 2.5 – Схема виникнення ЗАЗ

У схемі на рис. 2.5 зазначені: $y(t)$ – загальний сигнал, який приймається мікрофоном і надається в тракт, $x(t)$ – корисний сигнал спікера, $p(t)$ – сигнал зворотного акустичного зв'язку, який надходить зі звукової системи у вигляді багаторазово відбитих звукових хвиль [8]:

$$y(t) = x(t) + p(t). \quad (2.7)$$

З формули (2.7) корисний сигнал можна виразити як

$$x(t) = y(t) - p(t) \quad (2.8)$$

і далі в систему звукопідсилювання подати лише його. Тим самим можна сильно ослабити чи зовсім розімкнути петлю ЗАЗ.

Сигнал $z(t)$, який надходить на звукові джерела, вважаємо відомим і вважатимемо, що тільки він пройшовши далі через джерела звуку, акустичний тракт озвучуваного приміщення і досягнувши мікрофону, породжує паразитний сигнал $p(t)$, який характеризує мультиплікативний характер перешкоди:

$$z(t) = k \cdot y(t), \quad (2.9)$$

де k – коефіцієнт посилення.

Сигнал перешкоди записується як

$$p(t) = L\{z(t)\}, \quad (2.10)$$

де $L\{ \}$ – оператор, що визначає математичну модель озвучуваного приміщення, він перетворює $z(t)$ в $p(t)$.

Виходячи з того, що звукові системи є квазілінійними, вважатимемо, що оператор $L\{ \}$ теж є лінійним. Перешкода $p(t)$ може бути записана як згортка сигналу $z(t)$ із імпульсною характеристикою $h(\tau)$ звукового тракту, що складається із гучномовця і простору, через який проходить сигнал:

Символ $*$ означає на схемі згортку згідно формули (2.11). Показаний на схемі сигнал $s(t)$ має в собі всі сторонні сигнали в акустичному тракті (перешкоди, сигнали від сторонніх випромінювачів і т.д.). Ця схема в області часу описується такими рівняннями:

$$y(t) = x(t) + h(t) * z(t), \quad (2.14)$$

$$u(t) = y(t) + g(t) * z(t). \quad (2.15)$$

Підставляючи формулу (2.14) у (2.15), запишемо

$$u(t) = x(t) + \{h(t) - g(t)\} * z(t).$$

При $h(t) = g(t)$ ЗАЗ буде повністю компенсований, оскільки $u(t) = x(t)$, і внаслідок цього паразитний сигнал буде відсутній. В даному випадку будуть подавлені не тільки ехо-сигнали від вхідного сигналу, а й зворотні акустичні зв'язки, що породжено ехо-сигналом $s(t)$.

Для тій моделі, коли звукове джерело і мікрофон є точками, що знаходяться одна від іншої на відстані l у вільному просторі, то перехідну характеристику можна визначити по формулі:

$$h(\tau) = \alpha \cdot \delta\left(\tau - \frac{l}{c}\right), \quad (2.16)$$

де α – постійний коефіцієнт, який залежить від ефективності випромінювачів і дистанції l ,

δ – дельта-функція,

c – швидкість звуку у повітрі.

У даному випадку, з врахуванням (2.5), сигнал ЗАЗ $p(t)$ відповідає сигналу $z(t)$, затриманому на час його розповсюдження в повітрі від джерела звуку до мікрофону.

Як видно із (2.16), $h(\tau)$ є відгуком системи на дельта-функцію у вигляді короткого імпульсу. Тобто, якщо сформувати сигнал $z(t)$ у вигляді короткого імпульсу за відсутності корисного сигналу в посилювальній системі, то на виході мікрофону будемо мати сигнал $y(t)$, що відповідає імпульсній характеристиці $h(\tau)$.

Можна застосувати і більш досконалий метод визначення $h(\tau)$. Наприклад, якщо впливати на систему серією коротких імпульсів, розділених часовими інтервалами такої величини, щоби їхні відгуки не перетиналися з відгуками від попередніх імпульсів, після чого узагальнити отримані результати в частотній або часовій області.

Ще один з можливих способів – це формування сигналу $z(t)$ у вигляді «білого шуму». В такому випадку імпульсна характеристика $h(\tau)$ дорівнюватиме відношенню спектру $y(t)$, до взаємного спектру сигналів $y(t)$ і $z(t)$. Потім потрібно буде обчислити зворотне Фур'є-перетворення.

Також можна вирішити завдання обчислення $h(\tau)$ по будь-якому сигналу $s(t)$, поданому в систему, що надходить у мікрофон від звукових джерел, пройшовши зворотний звуковий тракт, якщо при цьому приймається сам сигнал $z(t)$. Слід відмітити, що при такому підході всі звукові властивості озвучуваного приміщення, а також тонкощі розповсюдження сигналу в звуковому тракті (враховуючи нерівномірність АЧХ звукових джерел) міститимуться саме в $h(\tau)$.

2.3 Структурна схема адаптивного алгоритму

Досліджуваний алгоритм подавлення ЗАЗ ґрунтується на застосуванні фільтру попереднього розрахунку сигналу корекції [12]. При цьому технічний результат буде полягати в підвищенні рівня звукового тиску без виникнення автоколивань і спотворення сигналів внаслідок ЗАЗ.

Система компенсації (рис. 2.7) містить в тракту передавання мікрофон, підсилювач потужності (ПП), гучномовець і коло управління трактом. Між виходом мікрофону і входом ПП, включено суматор інвертованих (Інв.) сигналів корекції. Обчислювач сигналів корекції (ОСК) розраховує згортку сигналу, який прийшов з ПП з імпульсною характеристикою озвучуваного приміщення. Сигнали корекції є моделлю сигналів, які надходять на мікрофон зі звукової системи у вигляді прямих та відбитих звукових хвиль з гучномовця, із деякими затримками і рівнем посилення або ослаблення.

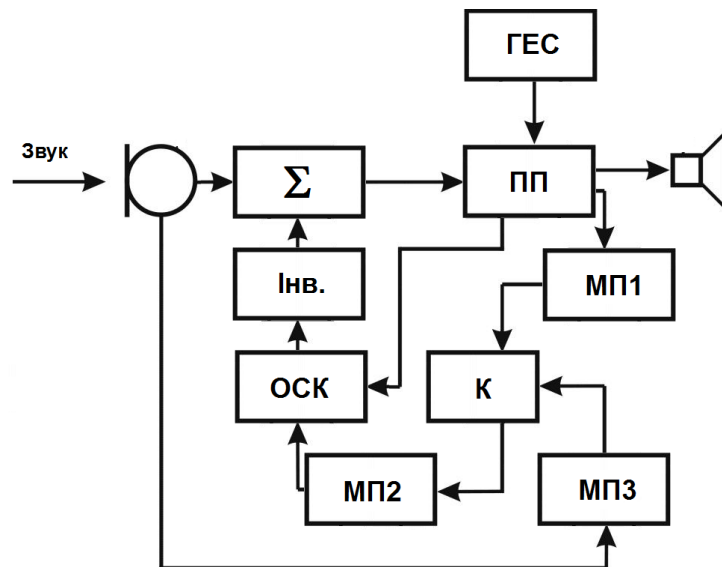


Рисунок 2.7 – Структурна схема адаптивного алгоритму подавлення ЗАЗ

В суматорі (Σ) інвертованого сигналу корекції отримана оцінка віднімається із загальних сигналів, що надходять до мікрофону, залишаючи в тракту тільки корисний сигнал (наприклад, мова спікера). В результаті той сигнал, що вже пройшов через звукову систему і повітряне середовище, йде на посилювач повторно і ще раз не посилюється, що дозволяє збільшити рівень звукового тиску без порушення структури корисного сигналу і без виникнення петлі ЗАЗ.

Також описаний метод передбачає наявність генератора еталонного сигналу (ГЕС), модуля пам'яті (МП2) перехідної характеристики озвучуваного приміщення, корелятору (К), модуля пам'яті (МП3) сигналу з мікрофону, модуля пам'яті (МП1) еталонного сигналу з посилювача потужності.

За відсутності корисного сигналу на вході мікрофону, треба виконати калібрування системи компенсації, подавши на посилювач ПП сигнал з генератору еталонного сигналу ГЕС, що транслюється гучномовцем. При умові повної тиші в озвучуваному приміщенні, на мікрофон йде сигнал, що пройшов крізь все озвучуване приміщення. Цей сигнал зберігається у модулі пам'яті МПЗ. Число збережених відліків сигналів дорівнює часу реверберації помноженому на частоту дискретизації.

Вибірка того ж розміру зберігається у модулі пам'яті МП1 еталонного сигналу із посилювача ПП. Корелятор К розраховує ВКФ обох збережених вибірок. Функція ВКФ містить у собі інформацію про то, як звук проходить озвучуваний простір, і дає можливість оцінити перехідну характеристику. Перехідна характеристика зворотного звукового тракту зберігається у модулі пам'яті МП2 імпульсної характеристики озвучуваного приміщення.

При надходженні звуку мови до мікрофону, на вхід підсилювача ПП і далі на гучномовець надається сигнал спікера. Той же сигнал йде на обчислювач сигналу коригування ОСК. В ОСК розраховується згортка сигналу від підсилювача ПП із перехідною характеристикою, збереженою в модулі пам'яті МП2. Отриманий як результат згортки сигнал коригування йде на інвертор Інв., і потім на суматор Σ .

Оскільки перехідна характеристика зворотного звукового тракту не є постійною (по причині переміщення об'єктів в озвучуваному приміщенні), потрібно періодично здійснювати налаштування фільтра, формуючи сигнал із системи відтворення звуку, щоби в обчислювачі імпульсної характеристики зберігалися актуальні дані про те, як звук долає озвучуваний простір.

2.4 Адаптація фільтра до імпульсної характеристики ЗАЗ

При побудові моделі фільтра треба врахувати, що перехідна характеристика ЗАЗ та його складова, за якою сигнал повторно надходить від гучномовця в мікрофон, є функціями часу.

Тобто, при моделюванні завади за вхідним сигналом потрібно мати найбільш повну інформацію про зворотний акустичний тракт. Отже, чим точніше буде інформація про перехідну характеристику тракту, тим точніше буде згенерована копія перешкоди, а в процесі її компенсації негативний вплив на корисний сигнал буде мінімальним. При тому фільтр компенсації ЗАЗ має працювати в режимі реального часу і виконувати автоматичне налаштування до зміни звукових властивостей навколишнього середовища. Швидкість адаптації фільтру має бути достатньою для забезпечення сигналу високої якості. Такого роду адаптивний фільтр (АФ) має пропускати без спотворень корисну складову сигналів і ослабити, або зовсім придушити перешкоди.

В цифровій обробці сигналів виділяють рекурсивні та нерекурсивні фільтри. Виходячи з потрібного методу подавлення ЗАЗ, при якому обчислення вихідних значень відліків фільтру відбувається шляхом віднімання із поточного вхідного сигналу відліків модельованої перешкоди за попередніми вихідними значеннями фільтру. Розглянемо процес адаптації фільтру під динамічно змінювану у часі імпульсну характеристику замкненого озвучуваного приміщення $h(\tau)$.

Припустимо, що маємо зашумлений акустичний сигнал, представлений у цифровому вигляді. Для віднімання із загального сигналу перешкод, які виникають в результаті мультиплікативного ефекту реверберації, використаємо цифровий рекурсивний фільтр (ЦРФ). Вихідне значення окремого відліку рекурсивного фільтру обумовлено не тільки в результаті обробки поточних значень, що надійшли на вхід фільтру, але і з попередніми значеннями відліків фільтру, отриманих раніше [12].

Вхідний сигнал запишемо у вигляді виразу

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(t-n), \quad (2.17)$$

де $s(t)$ – вхідний акустичний сигнал,

b_n – вагові коефіцієнти акустичного тракту людина – середовище – мікрофон,

N – число вагових коефіцієнтів прямого звукового каналу.

2.5 Висновки по розділу 2

Головною функцією системи озвучування є посилення звукового сигналу, прийнятого від спікера, і відтворення посиленого сигналу гучномовцями. Число гучномовців змінюється в залежності від об'єму озвучуваного приміщення. В певний момент часу у мікрофон починає доходити сигнал від найближчого гучномовця, а потім надходять сигнали з гучномовців, розташованих на більшій відстані і сигнали з гучномовців, відбиті від різного роду поверхонь. Отже, до сигналу, перетвореного мікрофоном, додається сигнал зворотного зв'язку:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(t-n) + \sum_{m=0}^{M-1} a_m y(t-m), \quad (2.18)$$

де $y(t)$ – сигнал із гучномовців,

a_m – вагові коефіцієнти звукового тракту гучномовці – приміщення – мікрофон,

M – число вагових коефіцієнтів зворотного звукового каналу.

Головними завданнями обчислювача адаптивного фільтру є:

– автоматичне визначення динамічної імпульсної характеристики озвучуваного приміщення;

– формування поточного масиву перехідних коефіцієнтів звукового зворотного тракту a_m [12].

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ФІЛЬТРУ ЗАЗ

В даному розділі кваліфікаційної роботи під синтезом моделі фільтра ЗАЗ розуміємо розробку лінійної математичної моделі озвучуваного приміщення. Завдання полягає в імітації тракту ЗАЗ, оскільки в основі принципу придушення ЗАЗ лежить адаптивний синтез відгуку завади з подальшим вилученням її із загального сигналу.

Висока складність моделі простору обумовлює дослідження лінійної моделі озвучування замкнутих просторів у лабораторних умовах. Саме такий підхід дозволить виконати необхідну кількість дослідницьких ітерацій на відміну від природного аналізу процесу.

Отже, побудована модель системи озвучування в даному випадку є математичним описом, імітацією функціонування системи озвучування і підсистеми придушення ЗАЗ при потрібному рівні відповідності натурних випробувань. Критерієм адекватності моделі вважаємо досить малу середньоквадратичну похибку результатів моделювання.

3.1 Вибір середовища для побудови моделі фільтру

На підставі аналітичного пошуку в предметній області [29-31], в якості середовища для створення моделі замкнутого озвучуваного приміщення зі акустичним зворотним зв'язком було обрано пакет MATLAB. Система для математичних та інженерних розробок MATLAB (скорочення від англ. «Matrix Laboratory») є прикладним пакетом програм для розв'язання задач з технічних розрахунків [30]. Мова програмування «М», що використовується в даному пакеті, є засобом для реалізації подібного моделювання [31].

Для створення моделі використано імітаційне і ситуаційне моделювання, заміщення функціонування модельованих систем і процесів [29-31]. Для цього використано пакет моделювання динамічних систем Simulink, що входить до складу MATLAB. Simulink – є інтерактивним

програмним комплексом, призначеним для об'єктного моделювання і математичних обчислень лінійних і нелінійних динамічних пристроїв і систем, згідно з розробленою структурною схемою роботи моделі.

В дослідженнях застосовувалися різні способи моделювання: в часовій області, в частотній області, з використанням методу Монте-Карло (реакція системи на впливи випадкового характеру).

3.2 Виявлення імпульсного відгуку системи озвучування

При використанні адаптивних фільтрів вирішується задача ідентифікації певної системи, тобто визначення її параметрів. При цьому є два варіанти ідентифікації – прямий і зворотний. На рис. 3.1 наведені схеми реалізації прямої і зворотної ідентифікації системи.

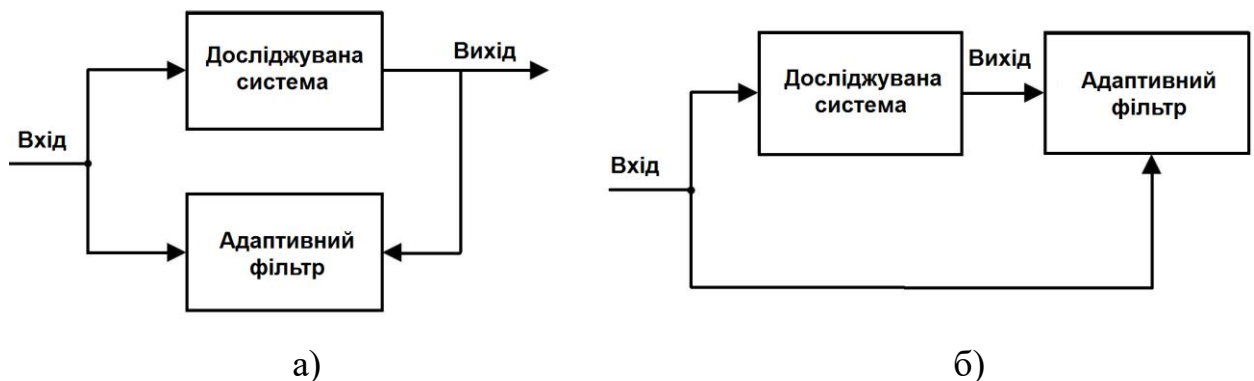


Рисунок 3.1 – Ідентифікація характеристик системи

(а – прямий варіант ідентифікації, б – зворотний варіант ідентифікації)

В системі MATLAB прямий варіант ідентифікації системи виконується за допомогою адаптивного фільтра у пакеті Filter Design, демонстраційній програмі adapt kalman demo, а також при можливості блоків DSP Blockset із середовища імітаційного моделювання Simulink, зокрема у моделі kalmnsce.

Задача адаптивної функції системи фільтрації – налаштувати коефіцієнти фільтру під динамічно змінну перехідну характеристику тракту перешкод, щоби на момент компенсації перешкоди мати її максимально точну оцінку.

Вхідний сигнал є спільним для адаптивного фільтра і досліджуваної системи в разі прямої ідентифікації, а зразковим сигналом для адаптивного фільтра служить вихідний сигнал системи. В процесі адаптації фільтру до часових і частотних характеристик системи озвучення і звукозапису будуть наближатися і відповідні параметри фільтрації.

В режимі зворотної ідентифікації адаптивний фільтр послідовно поєднаний з досліджуваною системою. Вхідний сигнал системи є зразком для адаптивного фільтра, а вихідний сигнал – подається на вхід адаптивного фільтру. Отже, фільтр прагне відновити сигнал на виході, усунувши вплив системи озвучення і компенсувати спотворення системи [12].

Подібні способи ідентифікації широко використовуються у сучасних модемах для ліній телефонного зв'язку, що працюють в дуплексному режимі. Для правильного функціонування системи ехо-придушення потрібно, щоби переданий і прийнятий сигнали були некорельовані між собою.

У разі застосування електроакустичних систем озвучування в замкнених приміщеннях, на відміну від систем дуплексного зв'язку, завдання визначення характеристик тракту ехо-сигналу є набагато складнішою через їх складну структуру і кореляційні зв'язки викликаних ними завад із корисним сигналом [12].

На рис. 3.2 показано принцип ідентифікації для деякої невідомої складної моделі поширення акустичної хвилі в замкненому приміщенні. В цьому випадку маємо систему озвучування з мікрофонами і багатьма гучномовцями, що зумовлює наявність акустичного зворотного тракту з позитивним зворотним зв'язком.

В реальних умовах експлуатації систем озвучування навколишнє приміщення може мати складну структуру і протяжні траси проходження акустичних сигналів. Тому розрахунок тривалості інтервалів – пауз оснований на швидкості поширення звукової хвилі в повітряному середовищі і частоті дискретизації.

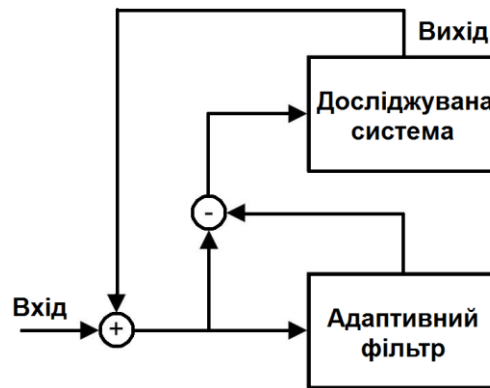


Рисунок 3.2 – Визначення характеристик системи озвучення із позитивним зворотним зв'язком

Таким чином, розраховуються часові інтервали оригінального сигналу в акустичному тракті, тобто сигналу без накладання зворотного акустичного зв'язку. На даному інтервалі для адаптивного фільтра оригінальний сигнал є еталонним, а сигнали, які надходять у мікрофон поза розрахунковим інтервалом, визначаються як зміщені сигнали і є накладанням (сумою) сигналів прямого і зворотного звукових трактів.

3.3 Моделювання придушення ЗАЗ

В кваліфікаційній роботі розроблено модель системи озвучування замкнутого приміщення з динамічною перехідною характеристикою для реалізації адаптивної компенсації перешкод внаслідок ЗАЗ.

До складу моделі (рис. 3.3) включено тракт прийому – посилення – передавання сигналу, зворотний звуковий тракт і лінія компенсації ЗАЗ. Моделлю проходження звукового сигналу крізь повітряне середовище замкнутого приміщення, є блок «Згортка 1», який імітує посилення вхідного сигналу і накладання вектору коефіцієнтів перехідної характеристики. При моделюванні сигнал формується «Генератором випадкових чисел» (ГВЧ) і зберігається у модулі «Пам'ять 4». Сигнал, одержаний в результаті згортки, проходить затримку, імітуючи відстань мікрофону від гучномовців.

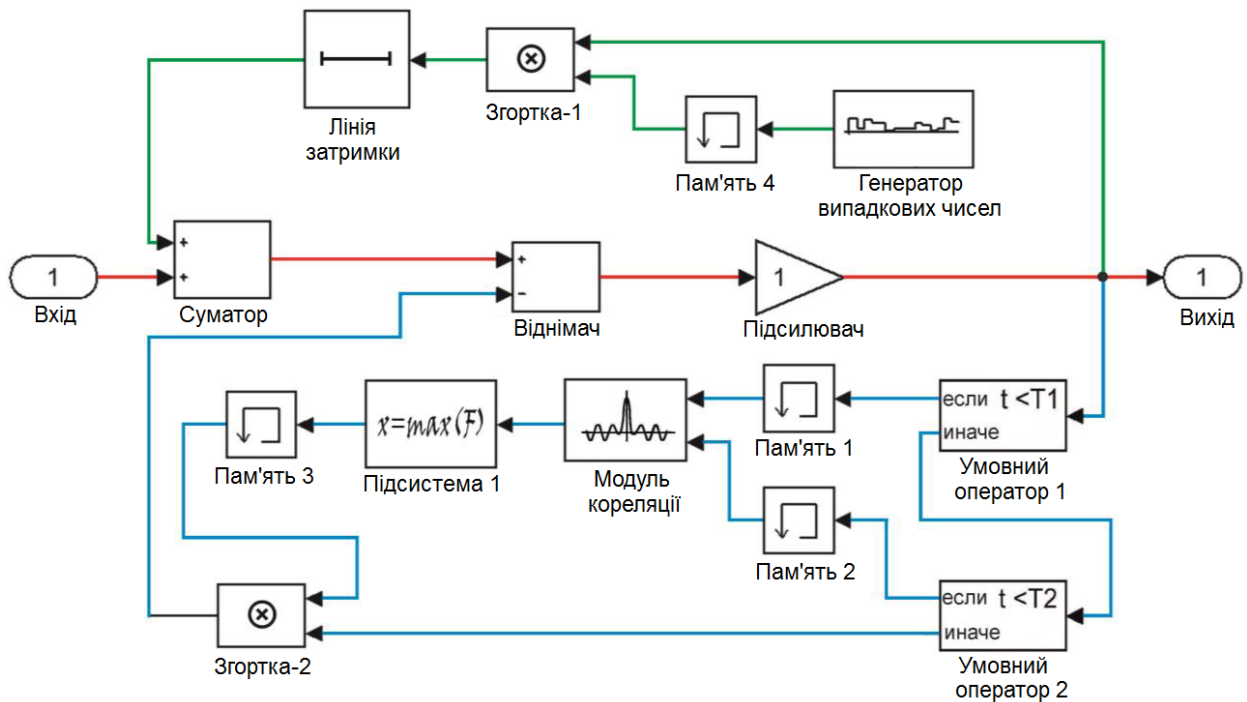


Рисунок 3.3 – Модель системи озвучування замкнутого простору зі зворотним акустичним трактом і системою придушення ЗАЗ

На рис. 3.3 елементи, які моделюють перехідний тракт, розташовані над лінією посилення і представляють послідовне поєднання генератора, модуля пам'яті, модуля розрахунку згортки і лінії затримки.

Нижче лінії тракту посилення розміщені елементи модуля адаптивної фільтрації сигналів. Після посилення сигнал надходить не тільки у вихідний тракт (озвучування імітованого простору), а і на два умовні оператори, що в залежності від потрібного числа відліків (розрахункового інтервалу часу) передають сигнал у блоки пам'яті для подальшого оброблення або на блок розрахунку сигналу корекції.

Модель працює у двох режимах. Перший – режим адаптації (налаштування) на поточний стан озвучуваного приміщення. У цьому режимі формується перехідна характеристика, відповідна стану навколишнього простору. Другий режим – фільтрація. У цьому режимі здійснюється компенсація ЗАЗ.

У імітованому озвучуваному приміщенні мікрофон віддалений від джерел сигналу на дистанцію, що визначається лінією затримки. Таким

чином, в даний проміжок часу в посилювальний тракт надходить тільки корисний сигнал. Час, за який сигнал по найкоротшій дистанції повторно надходить у мікрофон, вважається відомим і вказується оператором. Виходячи із реальних параметрів озвучуваних приміщень, наприклад, конференц-залів, інтервал може складати $T_1 \approx 0,02$ с, що за частоти дискретизації $F_\partial = 48$ кГц, дає значення

$$T_1 \cdot F_\partial = 0,02 \cdot 48000 = 960 \text{ відліків} \quad (3.1)$$

«чистого» сигналу в лінії посилення.

«Чистий» сигнал, сприймається як еталонний і зберігається в Пам'яті 1. На наступному відрізку сигнал зберігається в Пам'яті 2, величина інтервалу дорівнює добутку часу реверберації T_2 озвучуваного приміщення на частоту дискретизації F_∂ . Для реальних приміщень T_2 не є більшим за 2 с.

У розглянутій моделі час реверберації T_2 є сумою часу поширення одиничного імпульсу, яким імітується озвучуваний простір, і величини затримки згенерованих копій ідеального сигналу. Сигнал на відрізку (T_1, T_2) записується в Пам'ять 2, і є серією прийнятих вхідним мікрофоном відліків з додатком на модулі «Суматор» значень прийнятих повторно копій еталонного сигналу.

У модулі «Кореляція» розраховується ВКФ еталонного сигналу з сигналом, що містить інформацію про то, як еталонний сигнал пройшов крізь імітоване приміщення (T_1, T_2) . У модулі «Підсистема 1» обчислюється вектор вагових коефіцієнтів для розрахунку сигналу корекції. У блоці «Пам'ять 3» зберігається вектор коефіцієнтів, які імітують характеристики зворотного акустичного тракту. Задача фільтра в режимі адаптації – розрахувати і зберегти ключові вагові коефіцієнти, а по максимуму – усі коефіцієнти на відрізку, порівнянному із значенням часу реверберації і перехідної характеристики.

У режимі фільтрації сигнал після посилення надходить як на імітоване озвучуване приміщення, так і на модуль «Згортка 2», де формується повна або часткова модель перешкоди в залежності від порядку фільтру. У блоці «Віднімання» відбувається компенсація ЗАЗ.

Оцінка часу адаптації фільтра під актуальну імпульсну характеристику зворотного акустичного тракту буде містити два часових показника:

$$T_a = T_1 + T_2. \quad (3.2)$$

Перша складова тривалістю T_1 – це запис еталонного і зашумленого сигналів:

$$T_1 = \frac{l_1}{c} \cdot F_\partial + \frac{l_2 - l_1}{c} \cdot F_\partial + \frac{l_1}{c} \cdot F_\partial, \quad (3.3)$$

де l_1 – дистанція від найближчого джерела до приймача,

l_2 – дистанція від найдалшого джерела до приймача,

$F_\partial = 48$ кГц – частота дискретизації,

$c = 330$ м/с – швидкість поширення звуку;

$\frac{l_1}{c} \cdot F_\partial$ – час, коли в тракту є лише корисний сигнал (запис еталонного сигналу).

$\frac{l_2 - l_1}{c} \cdot F_\partial + \frac{l_1}{c} \cdot F_\partial$ – час запису сигналу з перешкодами.

Другий етап T_2 – це розрахунок згортки 2-х векторів: еталонного і зашумленого сигналів. Час на додавання двох вибірок з накопиченням запишемо у вигляді:

$$T_2 = \left(\frac{l_1}{c} \cdot F_\partial \right) \cdot \left(\frac{l_2 - l_1}{c} \cdot F_\partial + \frac{l_1}{c} \cdot F_\partial \right). \quad (3.3)$$

Для середніх приміщень відстань l_1 є в межах 6 м, а відстань l_2 знаходиться в межах 12 м. Виходячи з того маємо:

$$T_1 = 2618 \text{ відліків сигналу із АЦП (0,05 с).}$$

$$T_2 = 873 \cdot 1745 = 1523781 \text{ відліків сигналу (0,01 с).}$$

Попередні оцінки показали, що представлена модель дозволяє повністю обчислити сигнали корекції і компенсувати перешкоди без негативного впливу на оброблений сигнал спікера. При динамічно змінній у часі перехідній характеристиці озвучуваного приміщення достатньо мати паузи тривалістю 0,06 с для підлаштування фільтру в момент приймання сигналу від спікера, наприклад, на початку промиви чи при наявності паузи між словами потрібної довжини.

3.4 Методика адаптивної компенсації ЗАЗ

Для адаптивного придушення ЗАЗ застосовувалося повне різницеве рівняння рекурсивного цифрового фільтру [12, 31]. Вихідне значення y_k кожного відліку рекурсивного фільтру розраховується не тільки за рахунок обробки поточних значень s_k , які надійшли на вхід фільтру, але й за попередніми значеннями відліків фільтру, обчислених раніше y_{k-m} .

Принцип функціонування рекурсивного фільтру описується повним різницеvim рівнянням (3.1) і відповідає рішенням завдання компенсації ЗАЗ в замкнутому озвучуваному приміщенні:

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(k - \tau_n) - \sum_{m=0}^{M-1} a_m y(k - \tau_m), \quad (3.4)$$

– де перша згортка ц правій частині виразу є моделлю звукового тракту корисного сигналу від спікера;

– друга згортка є моделлю завади перешкоди звукового тракту;

- величину затримки перешкод визначають затримки τ_n і τ_m ;
- коефіцієнти b_n і a_m відображають потужність звукових сигналів прямого і зворотного трактив;
- N і M визначають число відліків сигналів.

На підставі даних про максимальну дистанцію джерела від мікрофону, а також даних про частоту дискретизації, розраховано часові інтервали і число відліків для прийому «чистого» сигналу. Отримані результати дозволили реалізувати алгоритм розрахунку вектора перехідних коефіцієнтів фільтру зворотного акустичного зв'язку в замкненому озвучуваному приміщенні.

Розглянемо головні етапи алгоритму:

Етап 1. розраховується розмір інтервалу T_1 еталонного сигналу :

$$T_1 = \frac{l_1}{c} \cdot F_\partial, \quad (3.5)$$

де l_1 – ДИСТАНЦІЯ від найближчого гучномовця до мікрофону, м,

c – швидкість звуку в повітрі, м/с,

F_∂ – частота дискретизації.

Етап 2. Початок вимірювань. На інтервалі $0 \dots T_1$ здійснюється запис у пам'ять корисних сигналів, які надходять на вхід мікрофону від спікера.

Етап 3. Відбувається запис сигналів на подальшому інтервалі $T_1 \dots T_2$. Розмір інтервалу у відліках відповідає подвійному розміру вектору еталонного сигналу на тривалості $0 \dots T_1$. Даний сигнал є сумою сигналу від спікера і накладеного на нього сигналу акустичного зворотного тракту у вигляді перешкоди:

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(k - \tau_n), \quad (3.6)$$

$$u(k) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(k - \tau_n) - \sum_{m=0}^{M-1} a_m y(k - \tau_m). \quad (3.7)$$

Етап 4. Розраховується ВКФ від двох прийнятих сигналів:

$$Corr(t) = \int_0^{(T_2-T_1)F_\delta} s(t)u(t + \tau)dt, \quad (3.8)$$

де $s(t)$ – прийнятий мікрофоном сигнал на ділянці $0...T_1$,

$u(t)$ – той же сигнал на ділянці $T_1...T_2$.

Оскільки ВКФ визначає на скільки схожі порівнювані сигнали, то у сигналі $u(t)$, окрім корисного сигналу від спікера, міститься інформація про те, як сигнал $s(t)$ пройшов через зворотний звуковий тракт. При тому, в пам'яті фіксуються максимальні значення імпульсної характеристики звукового тракту.

На рис. 3.5 на графіку ВКФ піками зазначені максимальні значення. Графік ВКФ на рис. 3.5 показує процес проходження ехо-сигналів.

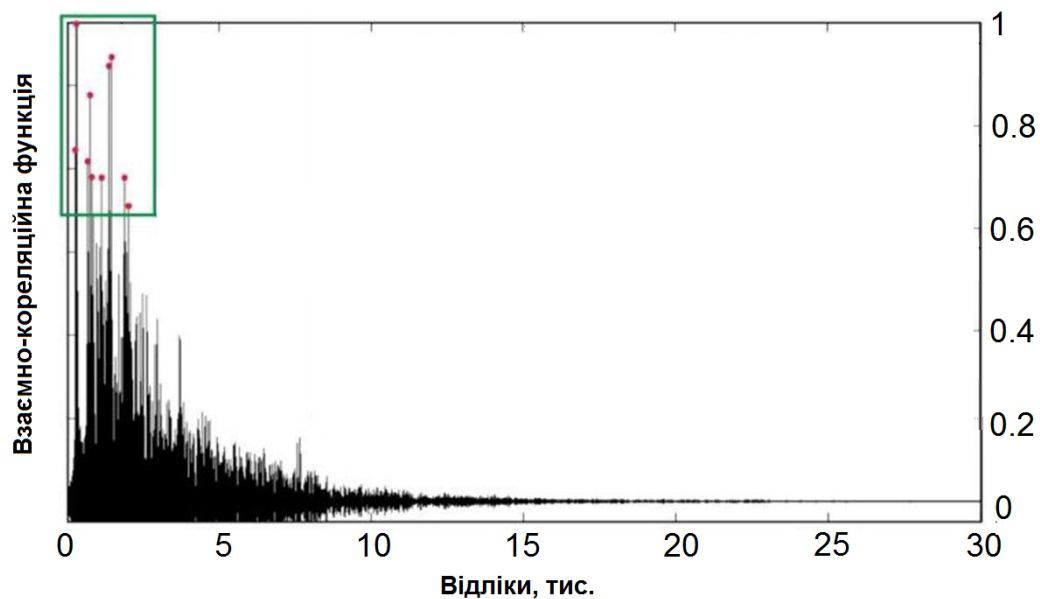


Рисунок 3.5 – Приклад імпульсної характеристики зворотного звукового тракту

Продемонстровані затримки τ_x і їх потужність P_x . Протяжність ВКФ двох послідовностей визначається подвійною протяжністю більшої з двох послідовностей. Для подальших роз обчислень використовується позитивна частина ВКФ. На осі абсцис розташовано масив даних, відповідний часовому зсуву сигналу $s(t)$ відносно зашумленого процесу $u(t)$.

Етап 5. Виконується обчислення M максимумів ВКФ. Розраховані результати несуть дані про відносну потужність ехо-сигналів акустичного зворотного тракту.

На рис. 3.5 значення $\tau_1 \dots \tau_{10}$ рахуємо за кількість тактів, через яку до мікрофону приходить черговий ехо-сигнал з акустичного зворотного тракту. Оцінені інтервали відповідають затримкам ехо-сигналів

$$a = \{a_{\tau_1}, 0, 0, \dots, a_{\tau_2}, 0, 0, \dots, a_{\tau_3}, 0, 0, \dots, a_{\tau_M}\}. \quad (3.9)$$

Для того, щоби при черговому обчисленні функції \max коефіцієнти повторно не потрапляли до вектору перехідних коефіцієнтів акустичного зворотного тракту, треба виключити знайдений пік ВКФ із оброблюваної функції (рис. 3.6).

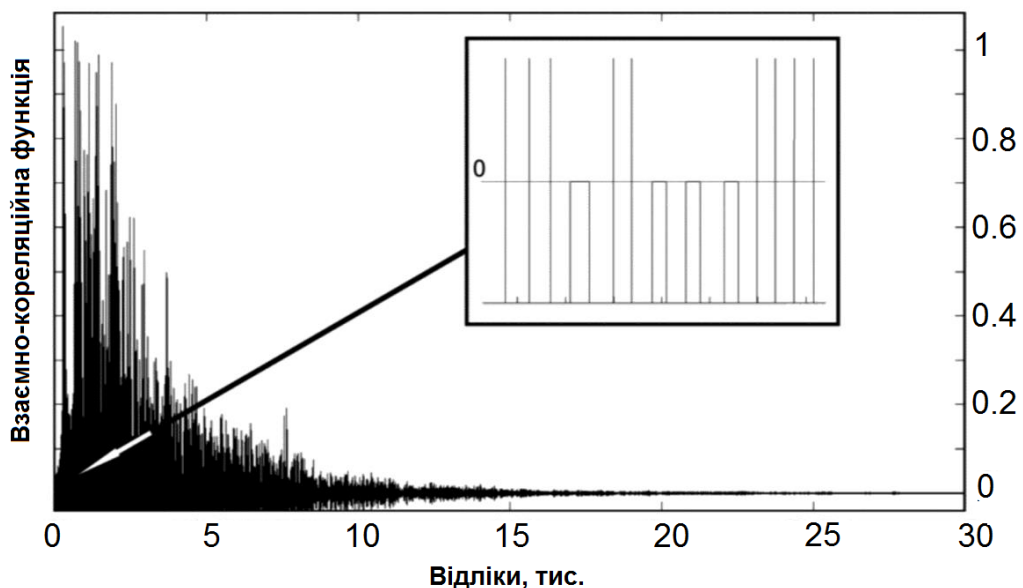


Рисунок 3.6 – Виключення максимумів ВКФ

$$\begin{aligned}
[a_m, \tau_m] &= \max(\text{Corr}), \\
\text{Corr}(x) &= 0, \quad x \in [\text{Corr}(x_1) = 0, a_m), \\
\text{Corr}(x) &= 0, \quad x \in (a_m, \text{Corr}(x_2) = 0].
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Етап 6. Здійснюється процедура нормалізації одержаного масиву a_m до інтервалу від 1 до 0. При тому максимальний коефіцієнт дорівнює 1, а усі інші пропорційно розподіляємо на потрібному інтервалі:

$$a = \{1, 0, 0, \dots, \frac{a_{\tau 2}}{a_{\tau 1}}, 0, 0, \dots, \frac{a_{\tau 3}}{a_{\tau 1}}, 0, 0, \dots, \frac{a_{\tau M}}{a_{\tau 1}}\}.
\tag{3.11}$$

Етап 7. Здійснюється побудова моделі звукового сигналу зворотного каналу із врахуванням a_m і τ_m :

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n y(k - \tau_n).
\tag{3.12}$$

Етап 8. Здійснюється віднімання звукового сигналу зворотного каналу із загального сигналу, що надходить до мікрофону. Віднімання виконується на проміжку часу від T_2 :

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n s(k - \tau_n) + \sum_{m=0}^{M-1} a_m y(k - \tau_m) - \sum_{m=0}^{M-1} a_{m1} y(k - \tau_{m1}).
\tag{3.13}$$

Отже, перехідна характеристика акустичного зворотного тракту, а разом із тим і коефіцієнти для моделювання перешкоди по вхідному сигналу, обчислюються на початку кожного надходження корисного сигналу від спікера на мікрофон (початок спічу, паузи між словами, або складами). На рис. 3.7 показана схема алгоритму придушення ЗАЗ.

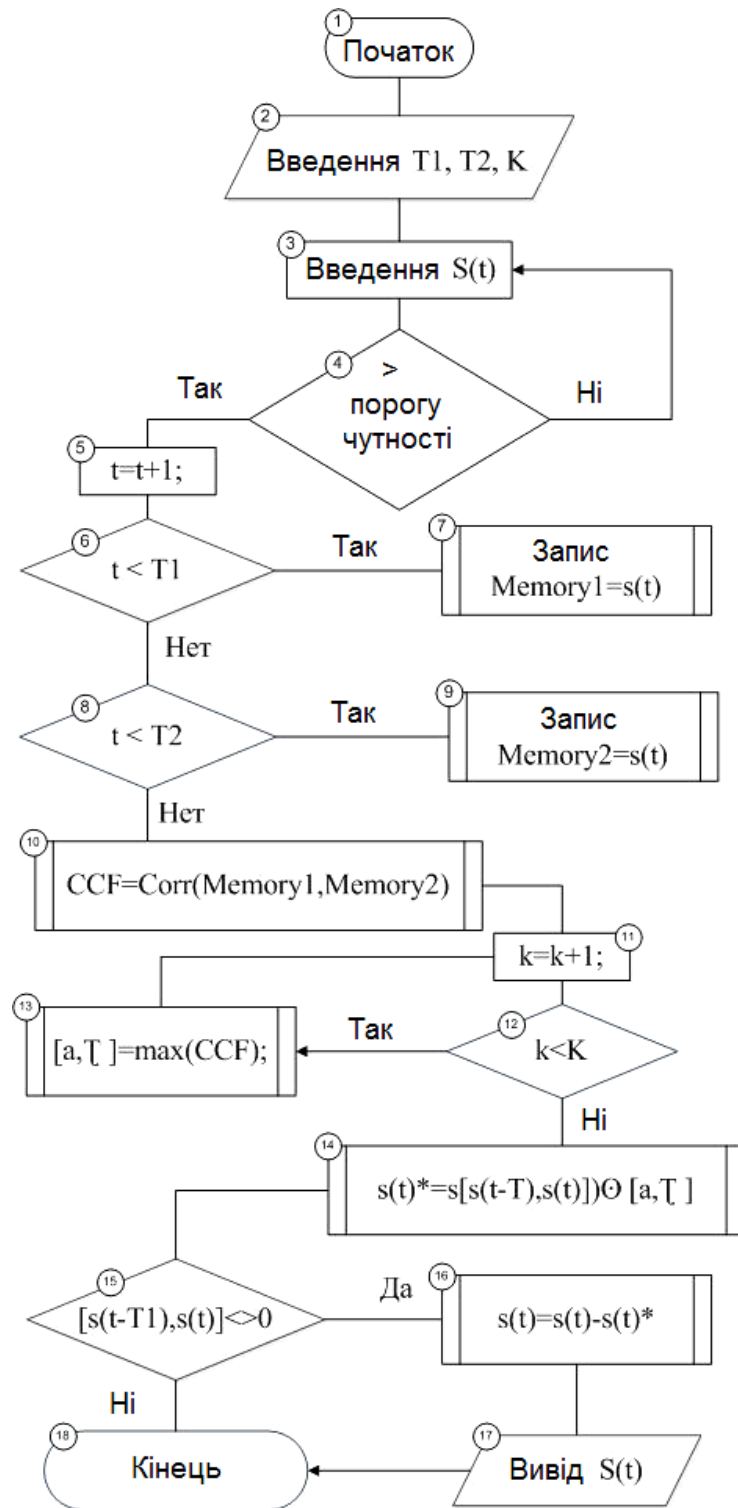


Рисунок 3.7 – Структурна схема алгоритму придушення ЗАЗ

За наявності збереженого в пам'яті «чистого» сигналу на заданому інтервалі часу, а також фрагменту реалізації, в якій до вхідного сигналу додалася перешкода, розрахунковим шляхом обчислюється масив лінійних

затримок копій сигналу, який утворив перешкоду, шляхом обчислення взаємно-кореляційної функції двох збережених проміжків.

Перешкода, породжена корисним сигналом, накладається на подальші інтервали запису сигналу, імітуючи продовження надходження сигналу до мікрофону. При додаванні копій сигналу в якості перешкоди потужність сигналу була меншою, ніж потужність вхідного сигналу. Отже, чим пізніше копія сигналу надходила повторно до мікрофону, тим більше її потужності розсіялося при проходженні озвучуваного приміщення.

Аналізуючи накладені сигнал і його відбиті копії, слід визначити властивості самоподібності коливань, що фіксуються мікрофоном звукових системи. Отже, якщо виконати нормування значень піків по першому піку, то можна визначити коефіцієнти потужності перешкоди. Якщо при тому враховувати час появи піків перешкоди, то отримаємо коефіцієнти для цифрового фільтру придушення ЗАЗ.

3.5 Висновки по розділу 3

Перевагою даного методу є то, що коефіцієнти a_m цифрового рекурсивного фільтру розраховуються в перші моменти часу подачі акустичного сигналу мови спікера, що дозволяє обчислити коефіцієнти акустичного зворотного тракту на початку мовної сесії та застосовувати їх в подальшому для подавлення ЗАЗ.

Цей факт дає змогу створювати системи, які експлуатуються в умовах постійно змінюючихся характеристик навколишнього простору і озвучуваного приміщення.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ АДАПТИВНОГО ПОДАВЛЕННЯ ЕХО-СИГНАЛІВ

4.1 Підготовлення експериментальних даних

Оригінальним сигналом в проведеному експерименті була промова диктора, записана в студії. Даний запис було оброблено ревербератором із додаванням рожевого шуму у звуковій програмі Studio. Отже було імітовано випадок, коли сигнал, пройшовши акустичний зворотний тракт (систему посилення, джерела звуку і повітря озвучуваного приміщення), був зареєстрований мікрофоном системи звукозапису в конференц-залі (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Моделювання простору озвучування у програмі Studio

Нижче описані головні параметри змодельованого простору:

- площа: 200 м²;
- об'єм: 1190 м³;

Внутрішні матеріали [32]:

- підлога: ламінат;
- стіни: пофарбований гіпсокартон;

- стеля: пофарбований «ламаний» гіпсокартон;
- вікна: металопластикові $3 \times 2,4$ м – 12 шт.
- двері: дерев'яні $2,1 \times 1,5$ м – 2шт.

Результати оцінок часу реверберації змодельованого простору, згенеровані програмою Studio у вигляді таблиці, побудовані у програмі Excel та у вигляді графіків показані на рис. 4.2.

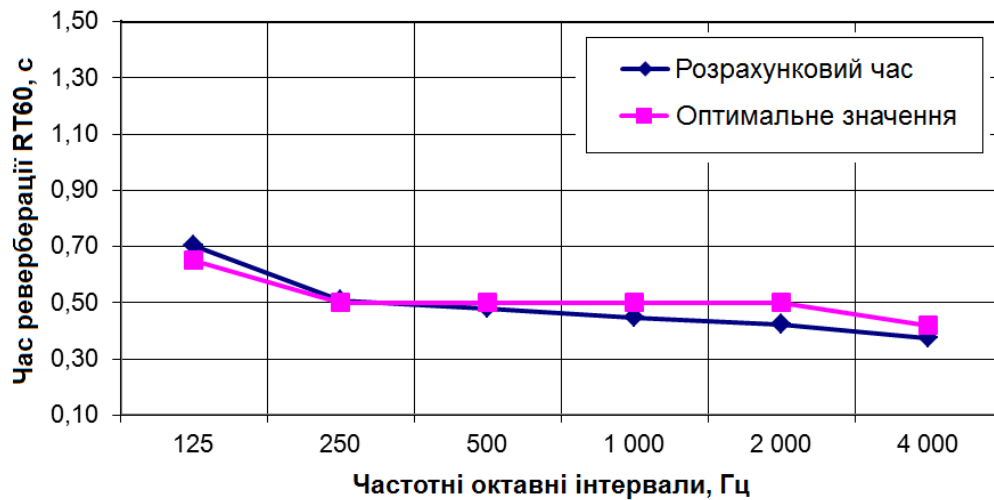


Рисунок 4.2 – Частотна характеристика змодельованого простору

Далі шляхом порівняльного аналізу із чистим сигналом, було отримано перехідну характеристику озвучуваного приміщення.

4.2 Формування імпульсної характеристики озвучуваного приміщення

При формуванні моделі імпульсної характеристики озвучуваного приміщення, а також для аналізу отриманих результатів і реалізації методу обробки застосовано пакет MATLAB – Simulink. Для обчислення результатів поширення акустичних хвиль від джерел до мікрофонів з урахуванням геометричних особливостей змодельованого приміщення, було знайдено ВКФ сигналів: чистого і обробленого програмним ревербератором і потім зашумленого.

У програмі MATLAB для обчислення взаємно-кореляційної функції застосовано команду *xcorr* :

$$CCF = xcorr(x_1, x_2), \quad (4.1)$$

де CCF – cross-correlation function – взаємно-кореляційна функція;

x_1, x_2 – вибірки двох сигналів, що шляхом множення із накопиченням послідовно порівнюються один з одним з кроком переміщення один відлік.

Розміри масиву ВКФ вдвічі перевищують число відліків у більшій вибірці. В цьому випадку нам цікава позитивна область тої частини ВКФ, де оброблений сигнал зсувається відносно сигналу, записаного мікрофоном. Дана частина ВКФ наведена на рис. 4.3.

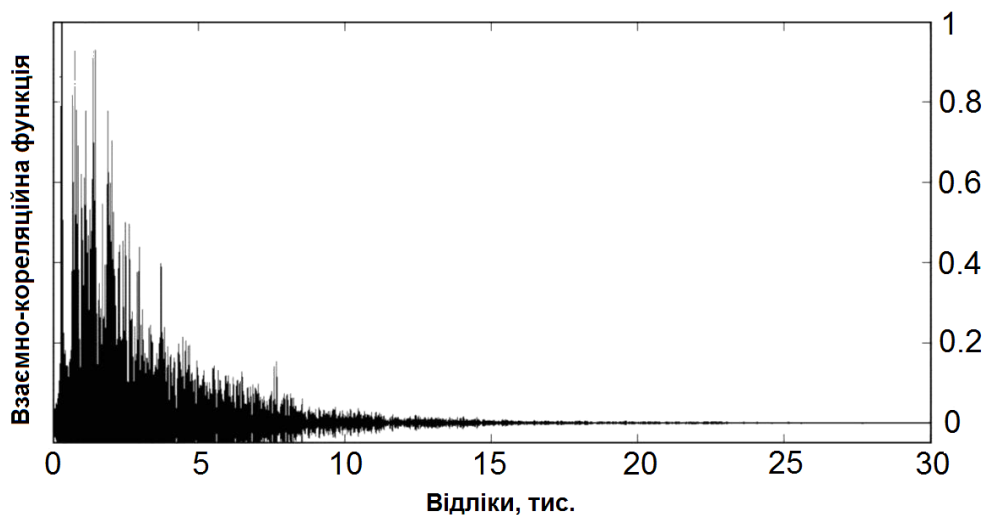


Рисунок 4.3 – ВКФ чистого і "записаного" сигналів

В цьому прикладі вибірки двох сигналів мали однакові розміри – 100 тис. вибірок. Припустимо, що максимальний час реверберації звуку в замкненому приміщенні не перебільшить 2 с, для сигналу із частотою дискретизації 48 кГц отримаємо 48 тис. відліків.

З функції ВКФ помітно, що час реверберації в змодельованому приміщенні не перевищує 20 тис. відліків, що для цифрового сигналу з частотою дискретизації 48 кГц складає менше 0,5 с. На даній ділянці графіка ВКФ пікові значення є коефіцієнтами для фільтру подавлення ехо-сигналу. Однак, дані коефіцієнти потребують нормалізації. Точка максимуму вказує,

що в даному місці сигнали є максимально схожими, а значення по осі абсцис вказує на затримку поширення сигналів.

Чистий і "записаний" сигнали наведені відповідно на рис. 4.4 і 4.5.

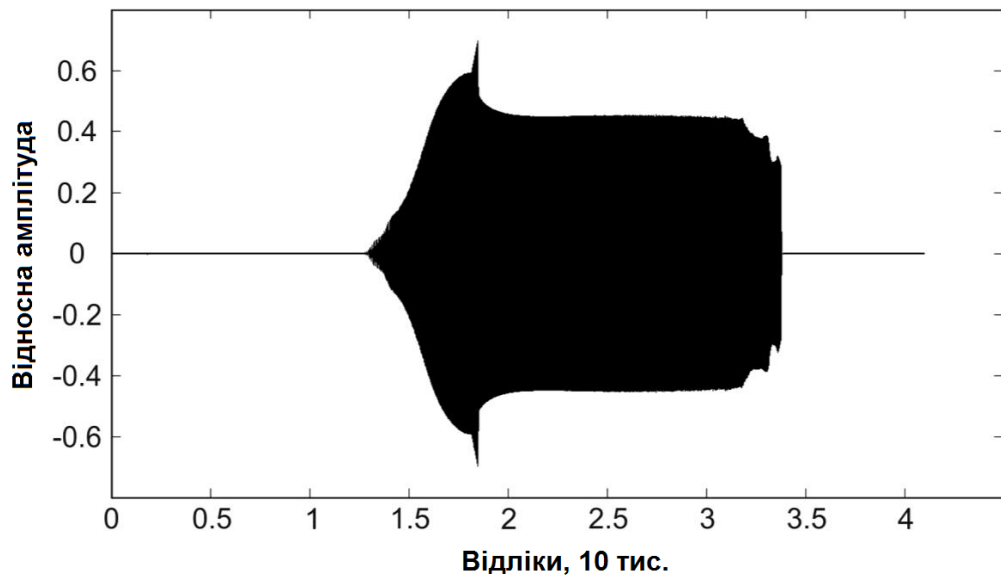


Рисунок 4.4 – Чистий сигнал в системі озвучування

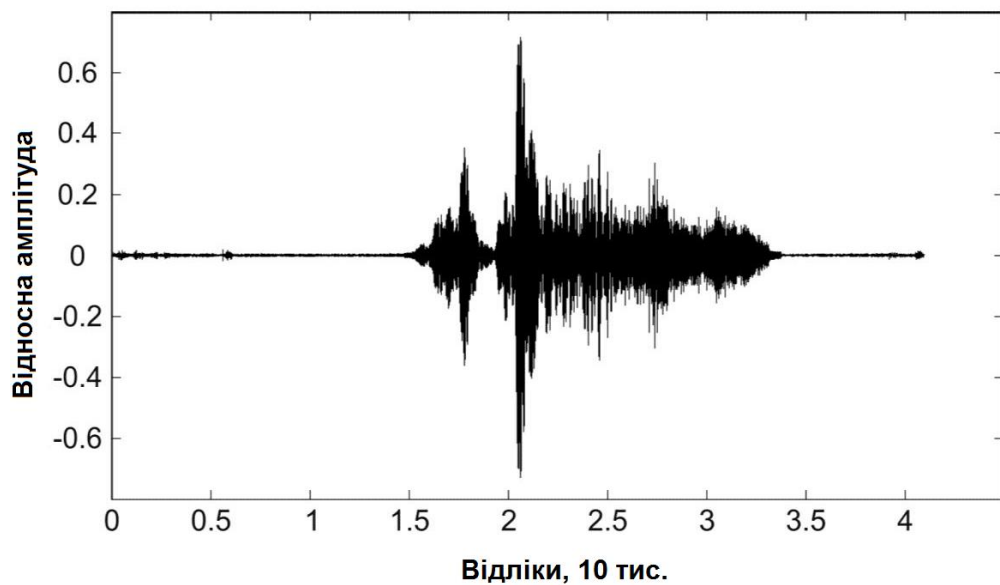


Рисунок 4.5 – "Записаний" мікрофоном сигнал

На наступному етапі проведено вибір порядку фільтра та відповідного числа коефіцієнтів, отримано масив коефіцієнтів затримки фільтра. Потім віднімали чистий сигнал із "записаного" мікрофоном сигналу з урахуванням визначених затримок.

4.3 Результати придушення ехо-сигналів адаптивним фільтром

В результаті проведення експерименту досліджено залежність коефіцієнту придушення від потужності сигналу на конкретній реалізації. Для визначення потужності придушення на окремо взятій ділянці сигналу тривалістю I відліків оцінювалася потужність сигналу:

$$P = \frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_I^2}{I}, \quad (4.2)$$

або у середовищі MATLAB

$$Power = \frac{sum(X.*conj(X))}{length(X)}, \quad (4.3)$$

де $Power$ – потужність реалізації,

X – частина загального сигналу,

$length(X)$ – розмір реалізації.

Відсоток придушення розраховувався згідно формули:

$$Ph = \left(1 - \frac{Power(u(t))}{Power(u^*(t))} \right) \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

$Power(u(t))$ – потужність «записаного» мікрофоном сигналу,

$Power(u^*(t))$ – потужність цього ж сигналу після обробки.

У табл. 4.1 показані результати обробки на 7-ит послідовних інтервалах, і залежність зниження потужності ехо-перешкоди від порядку

фільтру. З таблиці слідує, що чітко простежується залежність коефіцієнту k від обчисленої середньоквадратичної потужності обробленого сигналу (коефіцієнт кореляції складає 0,9834). Це в свою чергу дозволяє обробці адаптуватися під зміни рівня посилення сигналів під час затяжної мови без пауз. Графік залежності середньоквадратичної величини (RMS) ехо-перешкоди від порядку фільтра (N) після обробки показано на рис.4.6.

Таблиця 4.1 – Залежність ступеня зниження ехо-перешкоди від порядку фільтру

№ інтер-валу	Потужність сигналу на інтервалі	k	Зниження потужності завади (порядок фільтру)		
			10 порядок	20 порядок	30 порядок
1	0,0732	0,05	66,76%	82,85%	85,72%
2	0,2937	0,20	57,87%	79,81%	92,79%
3	0,1629	0,14	75,64%	79,97%	85,89%
4	0,0941	0,06	39,75%	57,59%	72,58%
5	0,0864	0,05	42,68%	57,87%	68,83%
6	0,1083	0,09	46,88%	63,25%	70,65%
7	0,0635	0,05	34,88%	47,27%	59,84%

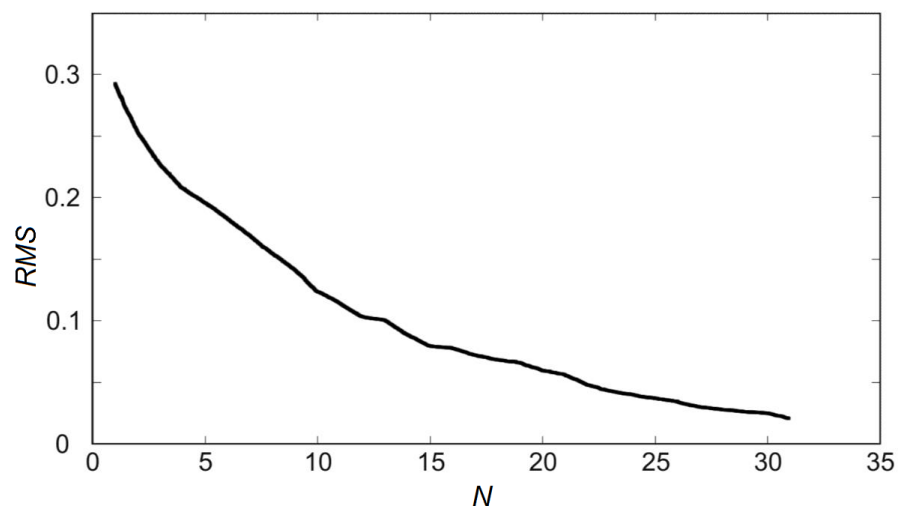


Рисунок 4.6 – Залежність середньоквадратичної величини (RMS) ехо-перешкоди від порядку фільтра (N) після обробки

4.4 Висновки по розділу 4

На основі аналізу отриманих результатів дослідження можна зробити наступні висновки.

1. Досліджений алгоритм адаптивного придушення ехо-сигналів дозволяє підняти рівень звуку в замкненому озвучуваному приміщенні відносно рівня, при якому виникають первинні ознаки наявності ехо-сигналів до 8 дБ. При тому частотний спектр звукового сигналу не спотворюється.

2. Є можливість отримати задовільну оцінку імпульсної характеристики акустичного зворотного тракту в замкненому приміщенні шляхом розрахунку ВКФ звукових сигналів, що надходять у мікрофон на сусідніх часових ділянках.

3. На виникнення петлі акустичного зворотного зв'язку впливають звукові сигнали, що мають найбільшу потужність, до яких, у першу чергу, можна віднести прямі звукові сигнали, а також ті, що відбиті від найближчих поверхонь. На даній підставі можна отримати висновок, що при використанні дослідженого алгоритму немає потреби моделювати ревербераційні завади на протязі часу реверберації, це дозволяє суттєво понизити вимоги до обчислювальних можливостей процесора обробки.

ВИСНОВКИ

Для озвучування великих приміщень застосовують електронні системи, в яких одночасно функціонують мікрофони і гучномовці. Робота таких систем, а також звукозапис в подібних умовах, ускладнюється наявністю ехо-сигналів, а також є загроза появи зворотного акустичного зв'язку. Ехо-сигнали виникають внаслідок явища реверберації, а зворотний зв'язок – коли частина сигналу гучномовців потрапляє назад в мікрофон і при тому має фазу і амплітуду, достатні для утворення петлі зворотного зв'язку. Ефекти ехо-сигналів і зворотного зв'язку тісно пов'язані один з одним, тому що приміщення є частиною загальної системи озвучування. Отже, ехо-сигнал і зворотний акустичний зв'язок – це шкідливі ефекти, що можуть дуже заважати звукозапису а також проведенню різного роду громадських заходів – конференцій, зборів, концертів і т.д.

Метою кваліфікаційної роботи є визначення і дослідження алгоритму подавлення ехо-сигналів в системі озвучування великого приміщення, який дозволив би суттєво знизити або повністю придушити ревербераційну ехо-заваду і заваду від акустичного зворотного тракту із мінімальними спотвореннями обробленого сигналу.

В наш час відомі декілька підходів до вирішення зазначеної задачі. Відомі алгоритми, що засновані на інверсії фази або фазовому зсуві сигналу для запобігання виникнення резонансу. При даному підході розривається петля зворотного зв'язку шляхом інверсії на 180° власної фази вузької смуги частот, які підкреслює приміщення і де виникає збудження системи. Також відомі системи, що дозволяють в автоматизованому режимі відслідкувати та тримати петлевий коефіцієнт посилення на рівні менше одиниці. Найбільш поширені системи, побудовані на основі принципу режекції сигналів з частотами, що сприяють виникненню самозбудження системи, що в результаті негативно позначається на якості звучання.

Аналіз літератури показав, що зменшення негативного впливу ехо-сигналів і зворотного частіше за все досягається:

- використанням малопотужних гучномовців, рівномірно розподілених по всьому озвучуваному приміщенню;
- застосуванням в системі гостроспрямованих мікрофонів і гучномовців, та і їхнім правильним взаємним розташуванням в озвучуваному приміщенні;
- шляхом зниження коефіцієнта посилення для зниження рівня звукового тиску в системі озвучування;
- збільшення коефіцієнта поглинання звуку озвучуваного приміщення;
- зменшення коефіцієнта посилення на тих частотах, на яких найбільш вірогідне виникнення самозбудження, але вузькосмугові режекторні фільтри, помітно погіршують якість звуку;
- включення в схему пристроїв, що зміщують спектр сигналів на 4...12 Гц, що також спотворює звук.

Найчастіше в системах подавлення ехо-сигналів і зворотного зв'язку використовують адаптивні еквайзери, що вносять помітні негативні зміни в сигнал, при цьому завдання придушення зворотного зв'язку вирішується лише частково. Найбільш перспективними є адаптивні алгоритми компенсації ехо-сигналів. Їхні особливості і були досліджені в даній роботі.

Розглянута схема класичного адаптивного подавлювача ехо-перешкод. В ній мікрофон уловлює суму корисного сигналу і ехо-перешкоди. Другий мікрофон приймає перешкоду. В процесі обробки утворюється сигнал, що по суті є копією перешкоди і віднімається із загального сигналу. Можна автоматично налаштувати фільтр таким чином, щоби середньоквадратична величина помилки на виході була мінімальною. Отже, при коректних налаштуванні фільтр може працювати в динамічно змінюваних умовах і підлаштовуватися під них для мінімуму сигналу помилки. В системі адаптивного подавлення ехо-перешкод потрібні точні відомості про перешкоди або про сигнал, щоб отримати характеристики приміщення.

Поширюючи компенсаційний алгоритм подавлення ехо-перешкод на випадок зворотного акустичного зв'язку, можемо сформулювати схему компенсації. Всі звукові властивості озвучуваного приміщення, а також особливості поширення сигналу в звуковому тракті (включаючи нерівномірність АЧХ джерел звуку) містяться в імпульсній характеристиці системи.

Імпульсну характеристику можна визначити різними методами: за окремим імпульсом в тракті передачі, або серією імпульсів, при подачі в систему білого шуму або будь-якого точно відомого сигналу.

Досліджуваний метод подавлення ехо-сигналів ґрунтується розрахунку сигналу корекції безпосередньо по сигналам, які надходять у мікрофон з системи озвучування у вигляді прямих і відбитих звукових хвиль. Мова спікера складається зі слів та пауз між ними, фразами або складами. Початковий етап між паузою та початком слова (тобто, коли в системі відсутній сигнал, а потім він з'являється) можна використати для оцінки імпульсної характеристики системи озвучення та адаптації фільтру.

В умовах попередньої паузи, до мікрофону надходить сигнал, що пройшов через все озвучуване приміщення. Даний сигнал знаходиться в модулі пам'яті 3. Число збережених відліків сигналу відповідає часу реверберації. Реалізація того ж розміру зберігається в модулі пам'яті 1 еталонного сигналу з підсилювача потужності. Корелятор розраховує ВКФ двох збережених реалізацій. ВКФ містить інформацію про те, як звук проходить озвучуваний простір, і дає можливість оцінити імпульсну характеристику. Вона зберігається в модулі пам'яті 2. Блок обчислення сигналу корекції розраховує згортку сигналу підсилювача з імпульсною характеристикою простору озвучення. Отримана модель ехо-перешкоди віднімається із загального сигналу, що йде у мікрофон. За відсутності робочого сигналу на вході мікрофону калібрація здійснюється по сигналу еталонного генератора.

В системі MATLAB-Simulink розроблено модель системи озвучування замкненого приміщення з мінливою імпульсною характеристикою і адаптивною компенсацією ехо-сигналів і зворотного зв'язку.

Елементи, які моделюють тракт системи озвучування, розміщені над лінією посилення. Нижче лінії посилення розташовані елементи модуля адаптивної фільтрації сигналів. Алгоритм має два етапи роботи. Перший етап – адаптація – це налаштування на поточний стан озвучуваного приміщення, у даній фазі формується імпульсна характеристика. Другий етап – фільтрація, на ньому виконується компенсація ехо-сигналів і зворотного зв'язку.

Основні етапи обробки: розрахунок величини інтервалу T_1 еталонного сигналу з врахуванням дистанції до найближчого гучномовця; запис чистих сигналів мікрофону від спікера; запис сигналу на наступному інтервалі, що є сумою чистого і накладеного ехо-сигналу і сигналу зворотного акустичного зв'язку; розрахунок ВКФ для двох отриманих сигналів; визначення M перших максимумів ВКФ і їхніх затримок, що несуть інформацію про найсильніші ехо-перешкоди; розрахунок моделі зворотного каналу для M найсильніших відбиттів, віднімання звукового сигналу зворотного каналу із загального сигналу, що надходить до мікрофону.

Чистим сигналом в проведеному експерименті була промова диктора, записана в студії. Даний запис був оброблений ревербератором із додаванням рожевого шуму у програмі Studio. Таким чином було імітовано сигнал, що пройшов зворотний акустичний тракт і був знову прийнятий мікрофоном у залі. Результати розрахунку часу реверберації модельованого простору, дані програмою Studio у вигляді таблиць і побудовані потім в Excel.

Для обчислення результатів поширення звуку від джерел до мікрофонів з врахуванням геометричних особливостей змодельованого приміщення, була розрахована ВКФ сигналів: чистого і програмно обробленого ревербератором і зашумленого. З графіка ВКФ помітно, що час реверберації в змодельованому приміщенні не перевищує 20 тис. відліків, що при частоті з

частотою дискретизації 48 кГц складає менше 0,5 с. Також було отримано чистий і "записаний" сигнали.

Для компенсації зворотного зв'язку використано не всю ВКФ, а лише відносні амплітуди і затримки її M піків. Це дозволило врахувати лише найсильніші ехо-сигнали, що ефективно подавляє їх, а також зворотний зв'язок без суттєвих обчислювальних затрат і спотворень звуку.

Отримано результати обробки на 7-ми послідовних інтервалах, і залежність зниження потужності ехо-перешкоди від порядку фільтру. Отримано графік залежності середньоквадратичної величини ехо-перешкоди від порядку фільтру.

На основі аналізу отриманих результатів дослідження можна зробити наступні висновки.

1. Досліджений алгоритм адаптивного придушення ехо-сигналів дозволяє підняти рівень звуку в замкненому озвучуваному приміщенні відносно рівня, при якому виникають первинні ознаки наявності ехо-сигналів до 8 дБ. При тому частотний спектр звукового сигналу не спотворюється.

2. Є можливість отримати задовільну оцінку імпульсної характеристики акустичного зворотного тракту в замкненому приміщенні шляхом розрахунку ВКФ звукових сигналів, що надходять у мікрофон на сусідніх часових ділянках.

3. На виникнення петлі акустичного зворотного зв'язку впливають звукові сигнали, що мають найбільшу потужність, до яких, у першу чергу, можна віднести прямі звукові сигнали, а також ті, що відбиті від найближчих поверхонь. На даній підставі можна отримати висновок, що при використанні дослідженого алгоритму немає потреби моделювати ревербераційні завади на протязі часу реверберації, це дозволяє суттєво понизити вимоги до обчислювальних можливостей процесора обробки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. F. Alton Everest, Ken Pohlmann. Master Handbook of Acoustics, Seventh Edition. McGraw Hill TAB, 2021. – 636 p.
2. Steven L. Garrett. Understanding Acoustics: An Experimentalist's View of Sound and Vibration (Graduate Texts in Physics) 2nd ed., 2020. – 462 p.
3. Electroacoustics. Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/electroacoustics> (дата звернення 11.12.2024).
4. Daniel M. Thompson. Understanding Audio. Berklee Press. 2018. – 484 p.
5. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. Том 1. – Х.: Компанія СМІТ, 2003. – 580 с.
6. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. Том 2. – Х.: Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.
7. Lawrence R. Rabiner and Ronald W. Schafer. Introduction to Digital Speech Processing. – Publishers Inc., 2007. – 213 p.
8. Marshall Long. Architectural Acoustics. Academic Press, 2014. – 950 p.
9. Sadaoki Furui. Digital Speech Processing, Synthesis, and Recognition: Second Edition, Revised and Expanded. – CRC Press, 2000. – 480 p.
10. Atul Puri, Tsuhan Chen. Multimedia Systems, Standards, and Networks (Signal Processing and Communications, Band 2). – Marcel Dekker Inc., 2000. – 636 p.
11. Digital Signal Processing for Multimedia Systems / Edited By Keshab K. Parhi, Takao Nishitani. – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 880 p.
12. Adaptive filters / edited by C.F.N. Cowan and P.M. Grant. – Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1985. – 308 p.
13. Line Echo Cancellation with DUSLIC-XT. [Електронний ресурс]. URL: <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/distributors/Datasheets-14/DSA-261154.pdf> (дата звернення 11.12.2023).

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., Koryttsev 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 звуку 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. Rabiner L., Gould B. *Theory and application digital signal processing*. М.: World, 1978. – 848 p.

30. *MATLAB for Artificial Intelligence. Design AI models and AI-driven systems*. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата

звернення 11.12.2023).

31. Overview of Adaptive Filters and Applications. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/overview-of-adaptive-filters-and-applications.html> (дата звернення 11.12.2023).

32. Tyler Adams. Sound Materials: A Compendium of Sound Absorbing Materials for Architecture and Design. Frame Publishers, 2016. – 288 p.