

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)

Дослідження методів компенсації спотворень в звукових трактах.

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІм-21-1
Тарусін В.Ю.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олейніков В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Тарусіну Владиславу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів компенсації спотворень в звукових трактах.

затверджена наказом по університету від " 24 " 10 2022 р. № 1384 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Діапазон частот 20 Гц...20 кГц. Максимальна похибка вимірювання абсолютних параметрів $\pm 10\%$. Максимальна похибка вимірювання відносних параметрів $\pm 5\%$. Призначення - для умов науково-навчальної лабораторії. Типи випробувальних сигналів: білий або окрашений шум. Розробити методику генерації випробувальних сигналів і вимірювання АЧХ аудіоапаратури. Розробити програмне забезпечення в середовищі MATLAB для дослідження. Експериментально дослідити можливості та обмеження системи корекції спотворень.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Аналітичний огляд літератури за тематикою роботи.

2. Розробка та обґрунтування методу компенсації спотворень в звукових трактах.

3. Розробка алгоритмів і програмного забезпечення для досліджень.

4. Експериментальне дослідження компенсації спотворень в звукових трактах.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Постановка задачі (1 аркуш А4).

2. Структурна схема компенсатора (1 аркуш А4).

3. Алгоритм генерації тестових сигналів (1 аркуш А4).

4. Результати генерації тестових сигналів (2 аркуші А4).

5. Синтез багатосмугового еквалайзера (1 аркуш А4).

6. Вимірювання відгуку системи (2 аркуші А4).

7. Вимірювання спектру впливу і відгуку (1 аркуш А4).

8. АЧХ системи і її компенсація (1 аркуш А4).

9. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Розробка методики досліджень	14.09.22–27.09.22	
3	Розробка алгоритму і тексту програм	28.09.22–11.10.22	
4	Вимірювання відгуків системи	12.10.22–25.10.22	
5	Вимірювання і корекція АЧХ	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання _____ 01.09.2022 р. _____

Студент _____ Владислав ТАРУСІН _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ОЛЕЙНІКОВ _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 78 сторінок, 44 рисунки, 4 таблиці, 31 джерело.

АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ГРУПОВИЙ ЧАС ЗАТРИМКИ, ЗВУКОВИЙ ТРАКТ, ФАЗО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ЕКВАЛІЗАЦІЯ

Об'єкт дослідження – компенсація спотворень АЧХ системи озвучення.

Мета дослідження – експериментально визначити вимоги до параметрів, можливостей і обмежень систем компенсації спотворень, характеристик тестових сигналів, до роздільної здатності компенсаційних фільтрів.

В роботі вирішуються такі задачі: розроблюється методика вимірювання АЧХ досліджуваної системи озвучування; розроблюється програмне забезпечення для дослідження в середовищі MATLAB; визначається найкращий тип випробувальних сигналів для налаштування системи наскрізної еквалізації і необхідне частотне розрізнення фільтра компенсації; експериментально досліджуються можливості системи компенсаційної еквалізації, визначаються обмеження при їх застосуванні.

ABSTRACT

Explanatory note to the performance appraisal: 78 pages, 44 drawings, 4 tables, 31 sources.

ACOUSTICAL CHARACTERISTICS, AMPLITUDEN-FREQUENCY CHARACTERISTICS, GROUP DELAY TIME, SOUND TRACT, PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS, EQUALIZATION

The object of study – compensation for distortion of the frequency response of the sound system.

The purpose of the study is to experimentally determine the requirements for the parameters, capabilities and limitations of the distortion compensation systems, the characteristics of the test signals, and the resolution of the compensation filters.

The following tasks are solved in the work: the method of measuring the frequency response of the studied sound system is being developed; software for research in MATLAB environment is being developed; determines the best type of test signals to set up the end-to-end equalization system and the required frequency difference between the compensation filter; the possibilities of the compensation equalization system are experimentally investigated, the restrictions on their application are determined.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ І ЇХ ВПЛИВУ НА СЛУХОВЕ СПРИЙНЯТТЯ ЗВУКУ.....	11
1.1 Принципи роботи слуху людини.....	11
1.2 Гучність і сприйняття звукового тиску.....	15
1.3 Суб'єктивне оцінювання акустичних характеристик приміщень.....	19
1.4 Характеристики і параметри звукових трактів.....	21
1.5 Вимірювання АЧХ і ФЧХ.....	25
1.6 Висновки по розділу 1.....	27
2 РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСТОТНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ.....	29
2.1 Постановка задачі дослідження.....	29
2.2 Загальні принципи побудови систем корекції частотних спотворень аудіосигналів.....	30
2.3 Метод автоматичного коригування АЧХ звукового тракту.....	33
2.4 Висновки по розділу 2.....	37
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
3.1 Алгоритм генерації випробувальних сигналів.....	38
3.2 Програми для формування випробувальних сигналів.....	43
3.3 Результати формування випробувальних сигналів.....	44
3.4 Алгоритм корекції частотної характеристики сигналів.....	46
3.5 Програма для корекції частотної характеристики сигналів.....	51
3.6 Висновки до розділу 3.....	54
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСТОТНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ.....	56

4.1	Описання умов експерименту.....	56
4.2	Дослідження імпульсних відгуків звукового тракту.....	58
4.3	Розрахунок параметрів системи з корекцією.....	64
4.4	Корекція спотворень АЧХ.....	69
4.5	Висновки по розділу 4.....	71
	Висновки.....	72
	Перелік джерел посилань.....	75
	ДОДАТКИ.....	79
	Додаток А. Текст програми в MATLAB.....	80
	Додаток Б. Графічний матеріал.....	84
	Додаток В. Відомість кваліфікаційної роботи.....	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

Атт. – аттенюатор;

АРП – автоматичне регулювання підсилення;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ЧР – час реверберації;

ЗК – звукова карта;

ЗС – звуковий сигнал;

СЗМ- сигнали звукового мовлення

Лк – лівий канал;

МУ – мікрофоний підсилювач;

МЭК – Міжнародна електротехнічна комісія;

Пк – правий канал;

ПК – персональний комп'ютер;

УМ – підсилювач потужності;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

CD – компакт-диск;

Line – лінійний вхід, вихід;

Mic – мікрофоний вхід, вихід;

Spk – гучномовець;

PWL – Power Level – рівень потужності;

RMS – Root Mean Square – середньоквадратичне значення;

SPL – Sound Pressure Level – рівень звукового тиску;

V – вольтметр.

ВСТУП

Корекція звукових сигналів під характеристики приміщення давно використовується для забезпечення налаштування звуку в студіях і концертних залах. Мета цієї корекції – компенсація впливу акустичних характеристики приміщення на звук. Особливо це важливо у студіях звукозапису, які не повинні привносити в записуване звучання нічого додаткового. В студіях у першу чергу використовується акустичне оформлення. У концертних залах для компенсації застосовуються багатосмугові графічні еквайзери або параметричні еквайзери. На слух чи за допомогою вимірювальних мікрофонів виявляються проблеми відтворення звучання в різних частинах приміщення, після цього виконують корекцію за допомогою зазначених еквайзерів.

В ідеалі аналогічну звукову картину можна отримати і в домашніх умовах при прослуховуванні різного роду звукозаписів, це могло би дати звучання, відповідне задумкам звукорежисера. На практиці мало користувачів можуть дозволити собі повне акустичне оформлення кімнат в квартирі або будинку. В результаті хтось запрошує інсталяторів звукового обладнання, а хтось намагається зробити налаштування самостійно.

Корекція акустичних характеристик приміщення вимагає значних теоретичних знань, досвіду, а також відповідної вимірювальної апаратури. Тому для домашніх потреб все частіше стали використовуватися автоматичні системи калібрування звуку, що повторюють дії режисера або інсталятора, але роблять це автоматично, з використанням вимірювального мікрофона.

У більшості робіт, що описують таку апаратуру, особливості роботи і граничні можливості систем калібрування не розглядаються. Питання порівняння різних методів еквалізації, не розглядаються взагалі.

У кваліфікаційній роботі реалізуються і порівнюються поширені системи і методи коригування частотної характеристики. При цьому порівнюються як об'єктивні, так і суб'єктивні параметри систем корекції.

Мета роботи – експериментальне визначення вимог до систем компенсації частотних спотворень в звукових трактах, до характеристик випробувальних сигналів, частотного розрізнення фільтрів, граничних можливостей систем компенсації частотних спотворень.

В роботі вирішуються наступні задачі: розроблена методика вимірювання АЧХ системи озвучення; розроблено програмне забезпечення в середовищі MATLAB для досліджень; визначено найкращий тип тестових сигналів для налаштувань наскрізної еквалізації і необхідна частотна роздільна здатність фільтра компенсації; досліджено експериментально можливості системи наскрізної еквалізації, визначено обмеження при її застосуванні.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ І ЇХ ВПЛИВУ НА СЛУХОВЕ СПРИЙНЯТТЯ ЗВУКУ

1.1 Принципи роботи слуху людини

Звук будь-якої природи може бути представлений певним набором фізичних параметрів: частота, інтенсивність, тривалість, зміна у часі, спектр і т. ін. Їм відповідають певні суб'єктивні відчуття, які виникають при сприйнятті цих звуків слухом людини.

Слухові відчуття зв'язані з фізичними характеристиками не однозначно і не лінійно. Наприклад, гучність звуку залежить від інтенсивності, від частоти, спектра і т. ін. Ще в минулому сторіччі було встановлено закон Вебера-Фехнера, який підтвердив, що такий зв'язок нелінійний: "відчуття є пропорційними відношенню логарифмів стимулів". Наприклад, відчуття зміни гучності звуку пов'язані зі зміною логарифма інтенсивності, висоти звуку – зі зміною логарифма частоти і т.д.

Вся звукова інформація, яку людина отримує з зовнішнього світу становить приблизно 25% від загальної. Людина розпізнає звуки за допомогою слуху людини при роботі вищих відділів мозку, і переводить в простів своїх відчуттів, приймаючи рішення, як слід на неї реагувати.

Перш ніж розглянемо, як слух людини сприймає висоту тону, коротко зупинимося на механізмі роботи слуху людини. У даному напрямку в наш час отримано багато нових і досить цікавих результатів. Слух людини є свого роду приймачем інформації і складається з периферійної частини і вищих відділів слуху. Найбільш вивченими є процеси перетворення звуку в периферійній частині слухового аналізатора.

Периферійна частина (рис.1.1):

- це акустична антена, що приймає, локалізує, фокусує і посилює звуковий сигнал;
- мікрофон;

- частотний аналізатор і аналізатор в часі;
- аналого-цифровий перетворювач, який перетворює аналоговий звуковий сигнал в двійкові електричні розряди – нервові імпульси.

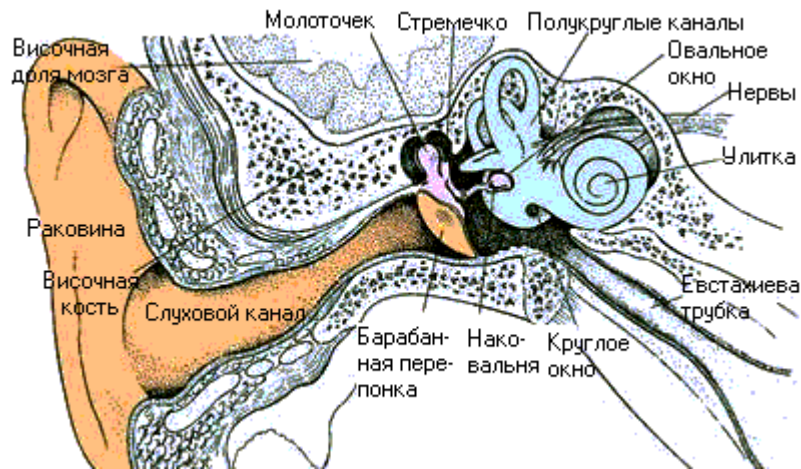


Рисунок 1.1 – Структура периферійної слухової системи

Зазвичай периферійну слухову систему поділяють на 3 частини: зовнішнє, середнє та внутрішнє вухо. Зовнішнє вухо містить вушну раковину і слуховий канал, що закінчується тонкою мембраною – барабанною перетинкою. Зовнішні вуха і голова є компонентами зовнішньої акустичної антени, що узгоджує (з'єднує) барабанну перетинку із зовнішнім полем звуку. Головні функції зовнішніх вух – просторове (бінауральне) сприйняття, локалізація джерела звуку і посилення звукової енергії, головним чином в областях середніх і високих частот.

Слуховий канал являє собою вигнуту циліндричну трубочку 22,5 мм завдовжки, що має перший резонанс на частоті близько 2,6 кГц, тому в даній області частот він сильно підсилює звук, і саме на цій частоті знаходиться область максимальної чутливості слуху.

Барабанна перетинка є тонкою плівкою 74 мкм товщиною, що має вигляд конуса, зверненого вістрям в бік середнього вуха. На низьких частотах перетинка рухається як поршень, на більш високих частотах на ній утворюється досить складна система вузлових ліній, яка також має значення для посилення звуку. Середнє вухо – це заповнена повітрям порожнина, яка

поєднується з носоглоткою Євстахієвою трубою, що потрібно для вирівнювання атмосферного тиску.

У випадку зміни атмосферного тиску повітря має входити або виходити з порожнини середнього вуха, ось чому барабанна перетинка не реагує на повільні зміни атмосферного тиску – спуск, підйом і т.ін.

У середньому вусі розташовані три невеличкі слухові кісточки: молоточок, ковадло і стрем'ячко. Молоточок кріпиться до барабанної перетинки одним кінцем, другим кінцем він стикається з ковадлом, яке за допомогою маленької зв'язки з'єднане зі стрем'ячком. Підстава стрем'ячка пов'язана з овальним вікном у внутрішньому вусі.

Середнє вухо має такі функції: узгодження імпедансу середовища повітря з рідким середовищем равлика внутрішнього вуха; акустичний рефлекс – захист від гучних звуків; посилення за допомогою ричагових механізмів, за рахунок чого звук передається у внутрішнє вухо, підсилюється приблизно на 38 дБ у порівнянні з тим, що надходить на барабанну перетинку. Внутрішнє вухо розташоване в лабіринті каналів в скроневій кістці. Воно включає в себе вестибулярний апарат (орган рівноваги) і равлик.

Равлик відіграє головну роль у слуховому сприйнятті. Він представляє собою трубку змінного перерізу, згорнуту втричі як хвіст гадюки. У розгорнутому стані равлик має довжину 3,5 см. Всередині він має дуже складну структуру. По всій довжині равлик розділений 2-ма мембранами на 3 порожнини: попередні сходи, серединна порожнина, барабанні сходи. Структура равлика показана на рис.1.2.

Зверху серединна порожнина закрита мембраною Рейсснера, знизу – базилярною мембраною. Усі порожнини заповнено рідиною. Верхня і нижня порожнини поєднані через отвір у вершині равлика (гелікотрему). У верхній порожнині розташоване овальне вікно, через яке стрем'ячко передає звук у внутрішнє вухо, у нижній порожнині розташоване кругле вікно, яке виходить назад у середнє вухо.

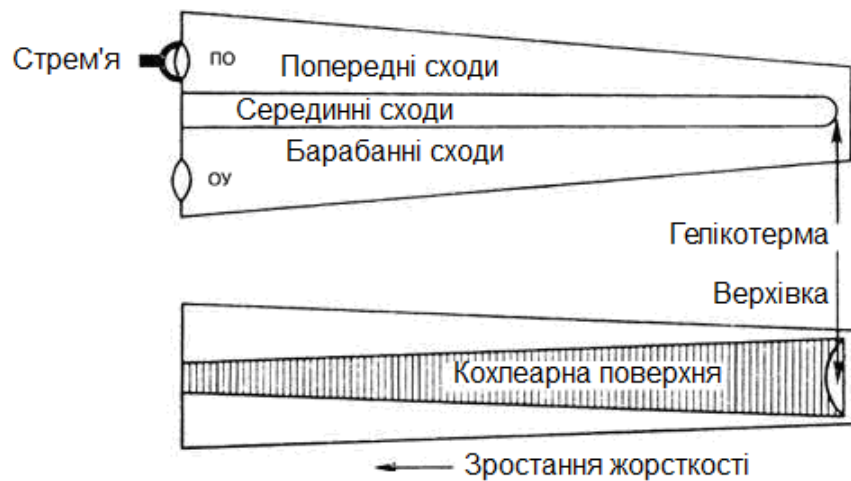


Рисунок 1.2 – Внутрішня структура равлика

Базиллярна мембрана містить з декілька тисяч поперечних волокон довжиною 32 мм, шириною у стремечка – 0,05 мм (вузький, легкий і жорсткий кінець), шириною у гелікотреми – 0,5 мм (кінець товще і м'якше). На внутрішній стороні базиллярної мембрани розташований орган Корті, а в його середині знаходяться спеціальні слухові рецептори – волоскові клітини. В поперечному напрямку орган Корті має один ряд внутрішніх волоскових клітин і три ряди зовнішніх волоскових клітин. Між ними утворено тунель. Волокна слухового нерва перетинають тунель і контактують з волосковими клітинами. Слуховий нерв представляє собою перекручений стовбур, внутрішня серцевина якого складається з волокон, які відходять від верхівки равлика, а зовнішні шари – від нижніх ділянок.

При вході в стовбур мозку, нейрони діють на клітини різних рівнів, піднімаючись до кори мозку і перехреснюючись на своєму шляху так, що слухова інформація від лівого вуха надається у праву півкулю, де відбувається в основному обробка емоцій, а від правого вуха – до лівої півкулі мозку, де головним чином обробляється зміст. У корі мозку головні зони слуху знаходяться в області скронь, між обома півкулями відбувається постійна взаємодія.

Загальний принцип передачі звукової інформації спрощено може бути представлений так: звук проходить звуковий канал і збуджує коливання

барабанної перетинки. Ці коливання крізь систему кісточок середнього вуха надходять до овального вікна, яке штовхає рідину у верхньому відділі равлика (попередні сходи). В равлику виникає імпульс тиску, що змушує рідину переливатися з верхньої в нижню половину через барабанні сходи і гелікотрему і має тиск на перетинку круглого вікна, призводячи у до його зміщення в бік, протилежний руху стрем'ячка.

Рух рідини веде до коливань базилярної мембрани (пряма хвиля, рис.1.3).

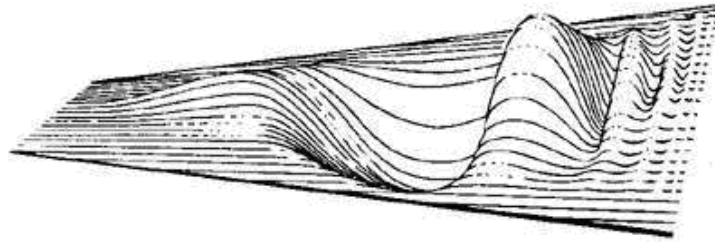


Рисунок 1.3 – Пряма хвиля на базилярній мембрані

Трансформація механічних коливань мембрани на дискретні електричні імпульси нервових волокон здійснюється в органі Корті. При вібрації базилярної мембрани, вії на волоскових клітинах загинаються, що формує електричний потенціал, який викликає потік нервових електричних імпульсів, що передають необхідну інформацію про звуковий сигнал в мозок для подальшої обробки та реакції.

Вищі відділи людського слуху (включно слухові зони кори мозку) можна розглядати як логічний процесор, що декодує (виділяє) корисні звукові сигнали на фоні шуму і перешкод, групує їх за потрібними ознаками, порівнює з наявними образами в пам'яті, визначає їхню інформаційну цінність і формує рішення про відповідні реакції.

1.2 Гучність і сприйняття звукового тиску

Звукові сигнали (мова, музика, шум та ін.), які надходить до входу слухових каналів, викликає у слухачів певні суб'єктивні відчуття, головними з яких є висота звуку, гучність, тембр, просторове відчуття і т. ін. Кожне з

таких відчуттів складним і не однозначним чином пов'язане з об'єктивними параметрами звукових сигналів: рівнем, тривалістю, спектром, локалізацією у просторі та ін. Встановлення даних зв'язків і визначення кількісних співвідношень між ними є однією з головних задач психоакустики.

Людський слух має дивовижну здатність реагувати на звукові сигнали як вкрай малої інтенсивності (звуковий тиск $2 \cdot 10^{-5}$ Па відповідає рівню 0 дБ), так і вкрай великої інтенсивності (звуковий тиск 20 Па відповідає рівню 120 дБ). В результаті це складає динамічний діапазон 120 дБ.

Гучністю звуку називають суб'єктивне відчуття, яке дозволяє слуховій системі подумки розташовувати звук за відповідною шкалою від звуків малої інтенсивності (тихі) до звуків значної інтенсивності ("гучні"). Гучність перш за все пов'язана фізичним параметром звукового сигналу – інтенсивністю (тобто, звуковою енергією).

Інтенсивність I та звуковий тиск p пов'язані простим співвідношенням для пласкої хвилі

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c}, \quad (1.1)$$

де ρ – щільність повітряного середовища,

c – швидкість поширення звуку.

Відомо, що чим більше рівень звукового тиску (в дБ) створює звукова апаратура, тим вона гучніше звучить. На практиці не все так просто – можна створити звуковий сигнал дуже значної інтенсивності, і при цьому не викликати відчуття гучності. Слух людини може бути навіть пошкодженим – наприклад, у випадку, якщо ці сигнали будуть надто короткими (коротше 35 мс) або надто низькочастотними (менше 100 Гц). Це може відбутися тому, що гучність звуку залежить не тільки від його інтенсивності, але і від частоти, спектру, тривалості, просторових характеристик та ін.

Гучність звукового сигналу – це суб'єктивна величина, яка характеризує слухові відчуття людини. Тому вона не може бути виміряна

прямими методами. Можливо, у найближчому майбутньому такі вимірювання можна буде виконати на комп'ютерних моделях людського слуху, які в наш час швидко розвиваються.

В наш час оцінку гучності при зміні різних параметрів звукових сигналів виконують методом суб'єктивної експертизи: шляхом порівняння з еталонними звуками, або шляхом абсолютної оцінки. Це дуже трудомісткі процеси, вони вимагають проведення значної кількості експериментів, накопичення даних і їх статистичної обробки.

Дослідження процесів відчуття гучності довгий час проводяться у провідних як вітчизняних так і зарубіжних наукових інститутах. Постійно з'являються роботи про уточнення вже відомих співвідношень і про нові дані. Найбільше відомі вчені, роботи яких використовуються в даному напрямку – Бекеш, Цвіккер, Стівенс, Мур, Гельфанд. Розуміння механізмів відчуття гучності і його залежності від головних об'єктивних параметрів звукових сигналів має дуже важливе значення у практиці роботи звукорежисерів. Наприклад, якщо запис музичного треку і його прослуховування відбувається при різних рівнях інтенсивності, то відчуття балансу гучності, а значить, і тембру звучання, буде зовсім різним у звукорежисера і у слухача, це слід враховувати при запису і відтворенні звуку.

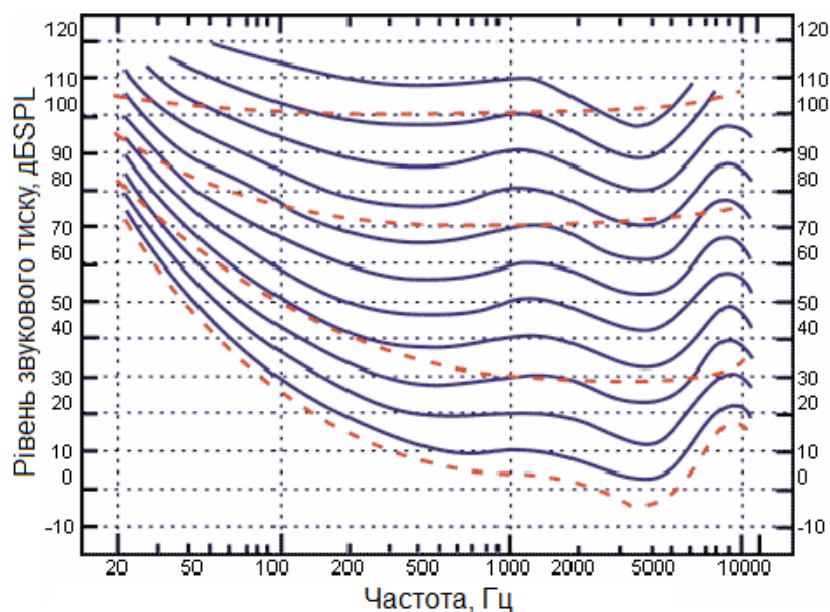


Рисунок 1.3 – Криві рівної гучності

Розподілення звуків по гучності і встановлення впливу на неї основних параметрів звукового сигналу було вперше виконано для гармонійних тональних сигналів різних інтенсивностей, частот і тривалостей, це послужило основою для оцінювання гучності складних мовних, музичних і шумових звуків.

Оскільки технологія оцінки абсолютної гучності і її зв'язку з інтенсивністю, частотою і тривалістю звуків достатньо складна, то широке поширення отримали методи відносного оцінювання рівню гучності. Рівень гучності визначається у ході експериментів.

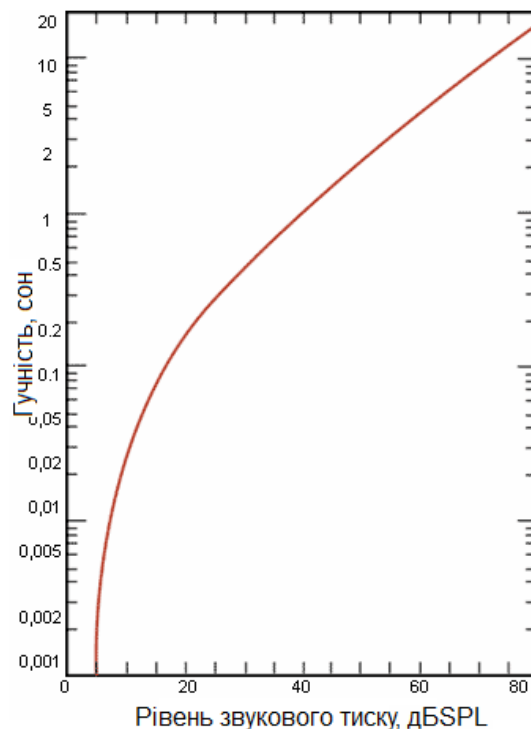


Рисунок 1.4 – Зв'язок між рівнем звукового тиску і гучністю

В експерименті виставляють рівень звукового тиску еталонного звуку з частотою 1 кГц (наприклад, 40 дБ). Потім слухачу пропонується прослухати звук іншої частоти (наприклад, 100 Гц), і налаштувати його рівень таким чином, щоби він здавався рівним з гучністю до еталонного. Сигнали можуть відтворюватися або через навушники, або через гучномовці. Якщо зробити такий експеримент для різних частот, і відмітити отримані значення рівня звукового тиску, що потрібні для сигналів різних частот, щоби вони були рівної гучності з еталонним сигналом, то вийде одна з кривих на рис. 1.3.

Наприклад, щоби звук із частотою 100 Гц здавався таким же гучним, як і звук з частотою 1 кГц рівнем 40 дБ, його рівень повинен бути вищим, і складати біля 50 дБ. Якщо буде відтворено звук із частотою 50 Гц, то щоби зробити його з рівною гучністю з еталонним, потрібно підняти рівень приблизно до 65 дБ і т.д. Якщо на наступному етапі збільшити рівень еталонного звучання до 60 дБ і повторити усі експерименти, то вийде крива рівної гучності, що відповідає рівню 60 дБ.

Сімейство отриманих таким чином кривих для рівнів 0, 10, 20 ... 110дБ показано на рис. 1.3. Такі криві називаються кривими рівної гучності, або ізофонами. Були вперше отримані Флетчером і Менсоном у результаті обробки результатів великої кількості експериментів, проведених з кількома сотнями відвідувачів Всесвітньої виставки 1931 року в м. Нью-Йорк (США).

В наш час в міжнародному стандарті ISO 226 (1987 р.) прийняті уточнені результати вимірювань, отримані у 1956 р. Саме ці дані зі стандарту ISO і надані в кваліфікаційній роботі. Вимірювання виконувалися в умовах вільного поля без відбиттів, тобто в заглушеній камері. Джерело звуку розташовувалося фронтально, звук подавався через гучномовці.

В наш час накопичені нові результати, і прогнозується в найближчому майбутньому уточнення всіх даних. Кожна з показаних на рис.1.3 кривих називається «ізогон» і описує рівень гучності звуку різної частоти. Під рівнем гучності певного звуку розуміється рівень звукового тиску звуку рівної гучності з еталонним на частоті 1000 Гц. Рівень гучності вимірюється в окремих спеціальних одиницях – фонах.

1.3 Суб'єктивне оцінювання акустичних характеристик приміщень

Усі методи, що використовують для суб'єктивного оцінювання акустичних характеристик приміщень, представляють собою спеціальні тести з організацією прослуховування, які проводяться трьома способами:

– слухач виконує оцінку якості звуку, знаходячись в синтезованому звуковому полі, створеному, наприклад, розподіленою системою гучномовців в акустично заглушеній камері (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Акустичне моделювання приміщення в заглушеній камері

Даний спосіб дозволяє гнучко змінювати і точно фіксувати характеристики звукового поля: рівні звуку, час реверберації, час запізнення, напрямок приходу ранніх відбиттів і т.ін. Ці експерименти проводяться у великій кількості, особливо в Японії. Але це трудомісткі експерименти, окрім того, через кінцеву кількість джерел випромінення він створює спрощену звукову картину в приміщенні;

– безпосереднє прослуховування джерел (оркестру або виконавців) у конкретних залах досвідченими експертами з подальшим формуванням статистики їх оцінок (рис. 1.6).

Це метод найбільш точний, однак він вимагає значної кількості експериментів, при яких важко досягти повторюваності результатів, і складно змінювати окремі параметри;

– на основі стереозаписів, виконаних у випробовуваних залах за допомогою моделі – "штучної голови" і при подальшому прослуховуванні записів через навушники або гучномовці.



Рисунок 1.6 – Прослуховування у концертних залах

Даний спосіб дозволяє отримати достатньо точні результати, хоча техніка бінаурального запису як така має свої проблеми і недоліки. Такі експерименти багато раз проводилися (найбільш за все, в Німеччині), в них були отримані дуже цінні результати.

У будь-якому випадку, дані суб'єктивного оцінювання акустики приміщень суттєво залежать від вибору «експертів»: їх досвіду прослуховування, професії, смаків, загальної та музичної культури і т.ін.

1.4 Характеристики і параметри звукових трактів

Звуковий тракт – це будь-яка система, яка здійснює передачу і перетворення звуку. Звуковий тракт характеризують такими параметрами.

Номинальний вхідний і вихідний рівні (Input / Output Level) – рівень сигналу на вході і виході звукового тракту, до якого він зберігає нормовані параметри (коефіцієнт нелінійних спотворень – КНС, амплітудно-частотну характеристику – АЧХ, фазо-частотну характеристику – ФЧХ і т.д.). Вимірюються в вольтах (В) і зазвичай приймається за 0 дБ. Отже, робочі рівні сигналу мають рівень нульовий або менше нуля.

Максимальний вхідний і вихідний рівні – рівень сигналу, до якого тракт зберігає свою працездатність. Рівні сигналу від номінального до максимального завжди мають позитивний рівень.

Коефіцієнт підсилення – це відношення величини вихідного сигналу $U_{вих}$ до величини вхідного $U_{вх}$. Вимірюється в разях, відсотках або децибелах (дБ).

$$K_n = 20 \lg(U_{вих} / U_{вх}). \quad (1.2)$$

Номінальний діапазон частот (частотний відгук – Frequency Response) – інтервал частот, в якому тракт зберігає основні свої параметри:

$$\Delta f_{ном} = f_v - f_n. \quad (1.3)$$

На краях діапазону приймають коефіцієнт передачі на 3 дБ (у $\sqrt{2}$ раз) менше, ніж в середині діапазону. Згідно стандарту «Канали і тракти звукового мовлення. Основні параметри якості. Методи вимірювань» в звуковій апаратурі вищого класу номінальний частотний діапазон має складати 30...15000 Гц.

Форма амплітудно-частотної характеристики – графік залежності амплітуди сигналу на виході пристрою від частоти при постійній амплітуді сигналу на вході. Тракти з незмінною в середині частотного діапазону АЧХ називають частотно-незалежними звуковими трактами.

Нерівномірність АЧХ – відхилення графіка АЧХ від заданої постійної форми. Вимірюється у відсотках або дБ.

Для ланок звукового тракту зазначають нерівномірність частотної характеристики в номінальній смузі частот:

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min},$$

де S_{\max} і S_{\min} – максимальна і мінімальна величина відносного посилення відповідно. Звичайно величину ΔS визначають в дБ, і вона не має виходити за межі зазначених допусків в межах діапазону робочих частот.

Нерівномірність частотної характеристики для звукової апаратури кожного класу якості нормується на краях робочого частотного діапазону в межах $f_H \dots 1,5 \cdot f_H$ і $0,66 \cdot f_B \dots f_B$, а також в середині частині робочого діапазону $1,5 \cdot f_H \dots 0,66 \cdot f_B$ (рис.1.6).

Для апаратури вищого класу якості $\Delta S_1 = -5 \dots +1$ дБ, $\Delta S_2 = \pm 1$ дБ.

Дослідження спотворень АЧХ показують, що експерти високої кваліфікації помічають різницю у звучанні натурального та спотвореного сигналу не більше ніж в 15% випадків, якщо смуга частот змещується до діапазону 30...15 000 Гц.

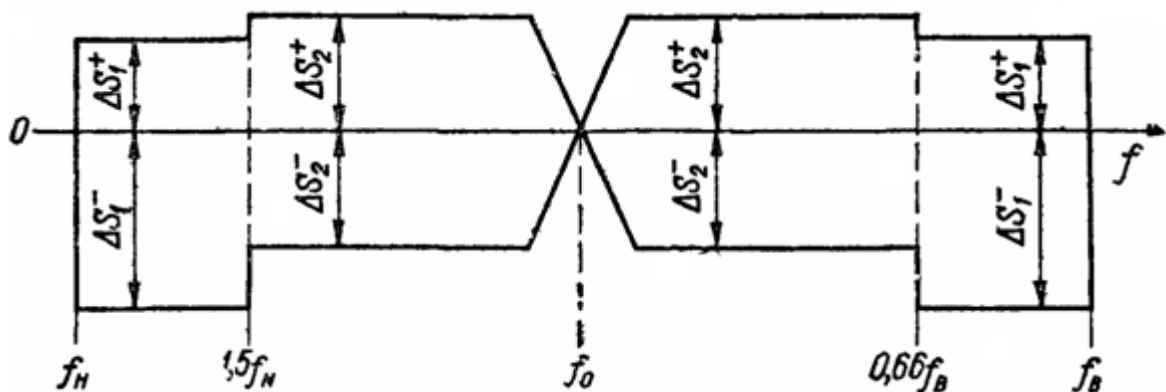


Рисунок 1.6 – Допуски на нерівномірність АЧХ

Двостороннє скорочення в області верхніх (ВЧ) і нижніх (НЧ) частот сприймається на більш сприятливо, ніж одностороннє скорочення в області НЧ або ВЧ. Експерти відмічають окремі піки і провали на частотній характеристиці. Послідовні комбінації піків і провалів на АЧХ менш помітні, ніж одиничні піки і провали.

Фазові спотворення. У ланках, що містять реактивні елементи, час проходження синусоїдальних сигналів залежить від їх частоти. Внаслідок цього окремі гармоніки складного сигналу зміщуються на різні відрізки часу, це призводить до викривлення форми сигналу, тобто до фазових спотворень.

Для умови відсутності фазових спотворень треба, щоб груповий час запізнення t_{gp} у смузі частот був незмінним

$$t_{gp} = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = const . \quad (1.13)$$

Тобто ФЧХ має лінійно залежати від частоти. На межах номінального діапазону частот ця умова не виконується.

Фазові спотворення характеризують різницею у часі поширення по каналу сигналів середньої частоти діапазону і граничних частот [1-3]:

$$\Delta t_H = \left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega_H} - \left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega_{cp}}, \quad \Delta t_B = \left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega_B} - \left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega_{cp}} . \quad (1.14)$$

За рекомендацією МККТТ середня частота обирається рівною 800 Гц. Оскільки людське вухо є частотним аналізатором, то воно мало чутливе до спотворень ФЧХ. Але за великих гучностей звучання фазові спотворення сприймаються як зміни тембру.

Збільшення часу поширення ВЧ складових сприймається як своєрідна зміна звучання, оскільки супутні словам мовлення придихання зміщуються в часі і призводять до «розмитості» звучання. Найбільше знижується якість передачі, коли зміщення у часі наближається до тривалості складу.

Збільшення часу проходження НЧ складових менше помітно на слух.

Є рекомендації по допустимим спотворенням ФЧХ для звукових трактів різних класів якості. Для звукового тракту вищого класу якості величина $\Delta t_B \leq 2$ мс, $\Delta t_H \leq 12$ мс. Для першого класу $\Delta t_B \leq 8$ мс, $\Delta t_H \leq 80$ мс.

З погляду мінімізації фазових спотворень номінальний діапазон робочих частот бажано робити ширше, навіть за межі 20 кГц.

Рівень шуму (Noise Level) – величина шумів відносно номінального рівня сигналу. Вимірюється в дБ і завжди має негативне значення. Інша назва

параметру – відношення сигнал-шум (Signal to Noise Ratio, SNR), воно позитивне значення. Іноді нормують рівень шуму, наведений до вхідного роз'єму, в припущенні, що весь шум потрапляє тільки на вхід, а сам тракт власних шумів не має.

1.5 Вимірювання АЧХ і ФЧХ

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) лінійної ланки є модулем її комплексної АЧХ. Для чотириполюсного звукового пристрою це модуль його коефіцієнта передачі.

З наведеного визначення випливає найбільш очевидний метод вимірювання АЧХ: зняття залежності відношення амплітуди вихідної і вхідної напруги тонального сигналу в окремих точках частоти ("за точками") з подальшою інтерполяцією.

Практично зазвичай вимірюють залежність напруги на виході досліджуваного звукового тракту від частоти за постійної амплітуди напруги тонального сигналу на вході.

Зазначений метод вимірювання АЧХ "за точками" використовує перестроюваний генератор гармонійних коливань і вольтметр. Структурна схема вимірювань АЧХ показана на рис. 1.7, а.

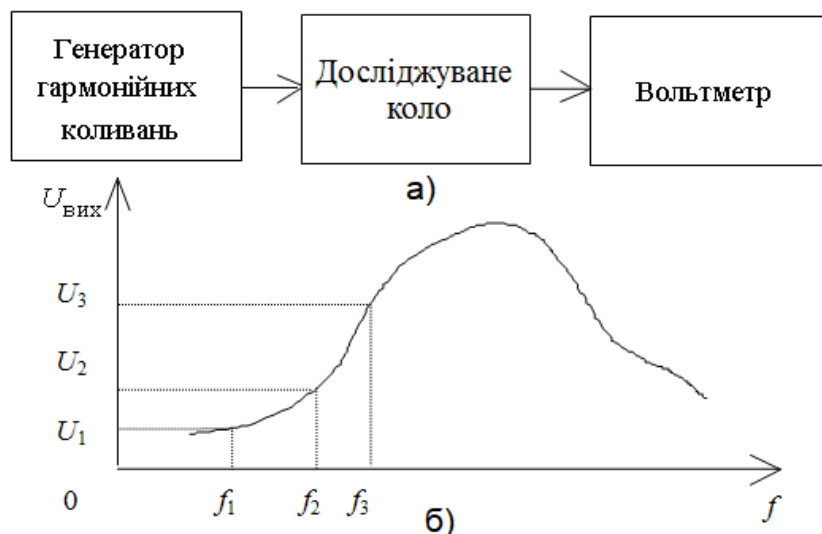


Рисунок 1.7. Вимірювання АЧХ за точками
(а – структурна схема; б – графік АЧХ)

Генератор послідовно перестроюють на ряд заданих частот, а напруга на виході звукового тракту вимірюється вольтметром. При цьому амплітуда напруги генератора підтримується незмінною. Залежність $U_{вих}(f)$, побудована за результатами вимірювання є АЧХ досліджуваного тракту (рис. 1.7, б).

Головним недоліком зазначеного способу вимірювання є його трудомісткість і тривалість. Крім того, за заздалегідь невідомого вигляду АЧХ довільний вибір частотних точок вимірювання може привести до пропуску її характерних особливостей (в смугах різкої зміни графіка АЧХ). При тривалих вимірюваннях на результаті позначаються зміни температури, дрейф напруги живлення і т.д.

Більш вдосконаленим є панорамний метод вимірювання АЧХ. Панорамним його називають по причині використання екранного індикатора, на який виводиться графік АЧХ відразу по усьому досліджуваному частотному діапазону. Суть даного методу – застосування, як джерела вхідного сигналу, генератора, що керується по частоті напругою (рис.1.8).

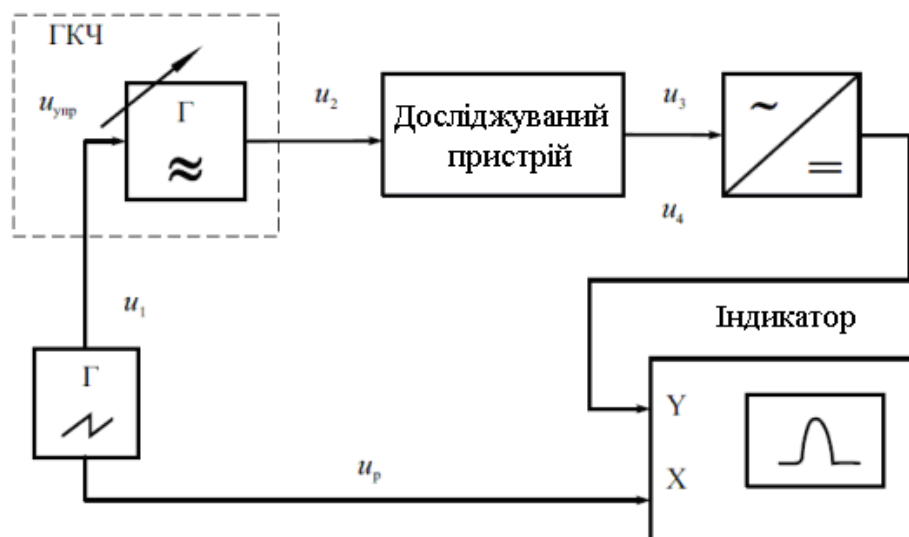


Рисунок 1.8 – Структурна схема панорамного вимірювання АЧХ

Форми сигналів при панорамному вимірюванні АЧХ показані на рис.1.9.

У генераторі качаючоїся частоти (ГКЧ) використовують різні типи автогенераторів (транзисторні, діодні) з коливальними системами, частота яких змінюється електричною напругою. Головна відмінність цифрових пристроїв від аналогових панорамних вимірювачів АЧХ – це використання генератора з цифровим керуванням частотою.

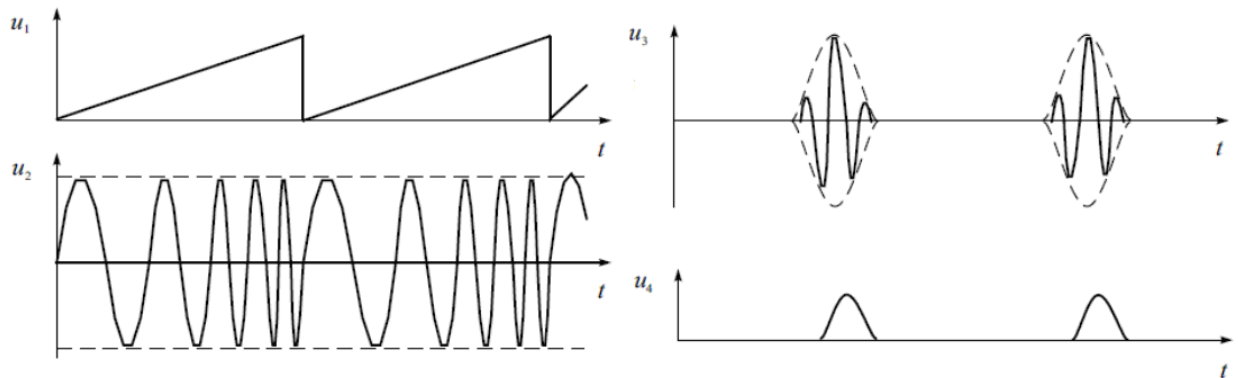


Рисунок 1.9 – Форми сигналів при панорамному вимірюванні АЧХ

Вимірювання ФЧХ складніше, бо потрібно виміряти фазові зсуви між вихідним і вхідним сигналами в широкому частотному діапазоні. Для цього застосовують фазометри, які реалізують, як правило, метод перетворення фазового зміщення у часовий інтервал. Прилади, які вимірюють як АЧХ, так і ФЧХ, називаються векторними аналізаторами (vector analyzer).

1.6 Висновки по розділу 1

Сучасні звукові пристрої проектуються таким чином, щоби майже у всіх умовах експлуатації залишатися на лінійній ділянці амплітудної характеристики. Нелінійні спотворення виникають лише перевантаженні великими рівнями сигналу. В таких умовах на великих гучностях вже сам орган слуху людини вносить нелінійні спотворення і є найслабкішою ланкою відтворення звуку. Отже можна вважати, що сучасні звукові траки є лінійними.

Головними спотвореннями в сучасних звукових трактах є нерівномірності АЧХ і нелінійності ФЧХ. Якість відтворення звуку залежить

від усіх ланок тракту – від студійного мікрофона в студійному приміщенні до гучномовців і приміщення для прослуховування. Тому є актуальною задача створення, удосконалення та застосування методів наскрізної корекції АЧХ і ФЧХ звукових трактів.

У більшості робіт, що описують таку апаратуру, особливості роботи і граничні можливості систем калібрування не розглядаються. Питання порівняння різних методів еквалізації, не розглядаються взагалі.

У кваліфікаційній роботі реалізуються і порівнюються поширені системи і методи коригування частотної характеристики. При цьому порівнюються як об'єктивні, так і суб'єктивні параметри систем корекції.

Об'єкт дослідження – компенсація спотворень частотних характеристик звукових трактів.

Мета дослідження – експериментально визначити вимоги до параметрів, можливостей і обмежень систем компенсації спотворень частотних характеристик, характеристик тестових сигналів, до роздільної здатності компенсаційних фільтрів.

Дана кваліфікаційна робота виконана 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 [26-30] присвячені дослідженню систем озвучення приміщень. Отже, дослідження в даній роботі відповідають традиційному напрямку наукових робіт колективу кафедри МІРЕС.

2 РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСТОТНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ

2.1 Постановка задачі дослідження

Корекція АЧХ звучання під акустичні характеристики приміщення вже давно використовується звукоінженерами для налаштувань звучання в студіях звукозапису і концертних залах [8,9]. Задача такої корекції – зменшення впливу власних акустичних характеристик приміщення на звук. Це є дуже важливим для студій звукозапису, які не мають вносити в записуваний звук ніяких додаткових призвуків. В студіях, у першу чергу застосовується акустична обробка [8,9]. У концертних залах для частотної корекції застосовуються графічні еквалайзери з багатьма смугами, або цифрові параметричні еквалайзери. Проблеми відтворення звуку в різних частинах приміщення виявляються на слух або за допомогою вимірювального мікрофона. Після цього виконують корекцію за допомогою названих вище еквалайзерів [1,2,8,9].

В ідеальному випадку аналогічну звукову обстановку можна було б отримати і в домашніх умовах для прослуховування різного роду звукозаписів. Це могло би забезпечити звучання таким, як його задумував звукорежисер. Практично небагато хто може дозволити собі повне акустичне оброблення кімнат у квартирі або будинку. Вихолом із положення є запрошення інсталяторів звукового обладнання, або намагання налаштувати усе самостійно.

Операція коригування акустичних характеристик приміщення вимагає деякі теоретичних знань, досвіду, а також вимірювальної апаратури. Тому для аматорських потреб усе частіше стали застосовуватися автоматичні системи калібрування частотних характеристик, що повторюють дії звукорежисера чи інсталятора, тільки роблять всі процедури автоматично, з використанням виносного вимірювального мікрофона.

У більшості статей, які описують аналогічну апаратуру, особливості роботи і граничні можливості систем калібрування практично не розглядаються. Питання порівняння різних методів коригування часто не розглядається взагалі.

У даній кваліфікаційній роботі реалізується метод корекції амплітудно-частотної характеристики за допомогою багатосмугового еквайзера, а також досліджуються і порівнюються між собою деякі методи автоматизації процедур коригування.

2.2 Загальні принципи побудови систем корекції частотних спотворень аудіосигналів

З розвитком технологій цифрової обробки, у аудіоапаратурі з'явилася можливість виконувати попередню корекцію відтвореного звуку у заданій точці прослуховування через акустичні системи (АС) із врахуванням характеристик конкретного приміщення:

- геометричних розмірів,
- схеми розташування АС,
- наявності навколишніх предметів (штор, килимів, меблів та ін.).

Задача таких систем, як мінімум, вирівняти амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) в місці прослуховування окремо для кожної АС, а також сумарну АЧХ при одночасній роботі декількох АС в системі домашнього багатоканального кінотеатру.

Крім АЧХ для узгодження синхронної роботи декількох АС потрібно синхронізувати їх фазо-частотні характеристики (ФЧХ), а для покращення сприйняття музики – мінімізувати нерівномірність групового часу затримки (ГВЗ).

Задача корекції ускладнюється, якщо застосовуються АС різних типів, виробників або модельних ліній, самі АС мають власну нерівномірність

АЧХ, а приміщення не має мінімальної акустичної обробки для зменшення впливу акустичних відбиттів.

Додаткові складнощі виникають, якщо АС і точка прослуховування обрані невірно: частина частот підсилюються в точці прослуховування (явище акустичного резонансу), що викликає «бубніння» або неприємне офарбування тембрів, а частина частот взаємно віднімаються і утворюють провал АЧХ, це веде до збіднення музичного тембру і також до додаткового офарбування звучання.

Принципи роботи системи корекції полягають у внесенні у вихідний сигнал таких змін на етапі обробки звуковим цифровим процесором (DSP), щоби в точці прослуховування мати найбільш рівномірну характеристику АЧХ і лінійну характеристику ГВЗ, позбавлені впливу приміщення і особливостей конкретних АС в системі відтворення.

На рис.2.1 показано загальну структурну схему системи корекції частотних спотворень аудіопристроїв.

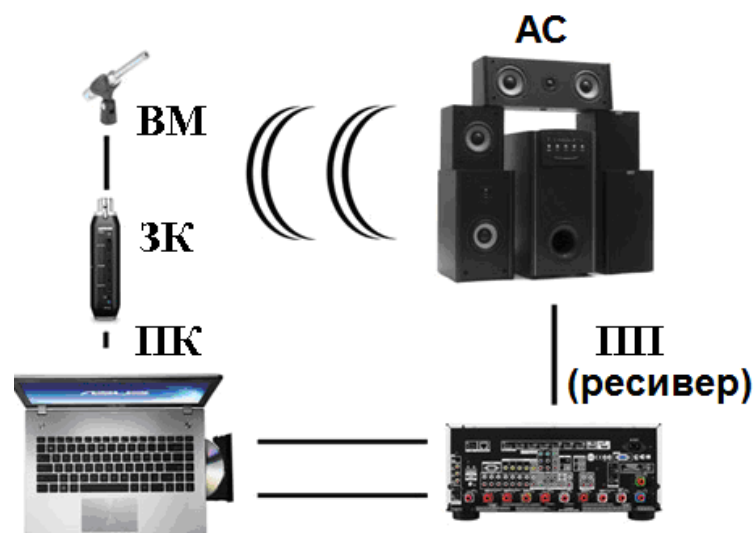


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи корекції частотних спотворень

Для зняття частотних характеристик звучання АС в місці прослуховування застосовується вимірювальний мікрофон ВМ, який підключається до зовнішньої звуковою картою ЗК, яка в свою чергу підключена в USB-порт персонального комп'ютера ПК. На ПК інсталується

спеціальне програмне забезпечення ПЗ для виконання вимірювань. Вихід з інтегрованої звукової карти ПК підключається на один з аналогових входів звукового підсилювача потужності ПП або ресивера.

За допомогою ПЗ генерується тестовий сигнал, який відтворюється обраною АС через ПП. Звукові хвилі надходять на вимірювальний мікрофон ВМ, сигнал з якого оцифровується в ЗК і обробляються в ПЗ. В результаті вимірювань і обчислень формується комплексний коефіцієнт передачі:

$$\dot{K}(\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.1)$$

де $K(\omega)$ – модуль частотної характеристики – АЧХ,

$\varphi(\omega)$ – аргумент частотної характеристики – ФЧХ.

Виміряні і обчислені АЧХ, ФЧХ, ГВЗ застосовуються для налаштування еквалайзера корекції в ПК або у ресивері в ручному або автоматичному режимах. Комплексна частотна характеристика фільтра корекції

$$\dot{K}_{кор}(\omega) = \frac{1}{\dot{K}(\omega)} = \frac{1}{K(\omega)} \cdot e^{-j\varphi(\omega)}. \quad (2.2)$$

У сучасних ресиверах встановлюються досить продуктивні процесори, які за допомогою вимірювання відгуку кожної АС в місці прослуховування можуть в автоматичному режимі налагодити корекцію звуку як за амплітудою, так і за фазою, що має забезпечити мінімальні відхилення на графіку АЧХ і синфазну роботу різних АС.

На практиці виявляється, що різні системи корекції абсолютно по-різному забезпечують оптимізацію звуку, і кінцевий результат достатньо сильно відрізняється при використанні тієї чи іншої системи. Навіть у одного виробника буває у лінійці декілька класів таких систем, які мають різні можливості по частотній корекції звуку.

Крім цього, за допомогою тільки лише попередньої частотної і фазової корекції неможливо вирішити усі проблеми відтворення через АС в житловому приміщенні. При наявності глибоких провалів в наскрізній АЧХ (в деяких випадках, до нуля) неможливо їх компенсувати занадто великим коефіцієнтом підсилення на частоті провалу (див. вираз 2.1).

2.3 Метод автоматичного коригування АЧХ звукового тракту

Суть досліджуваного методу корекції полягає в наступному. Пристрій для автоматичного коригування АЧХ аудіопристроїв (рис.2.2) складається з декількох паралельних каналів з регулюванням підсилення РП і мікрофонного блоку, який містить мікрофон М, мікрофонний підсилювач МП і смуговий фільтр СФ.

Кожен канал підсилення складається зі смугового фільтру СФ, ідентичного відповідному фільтру у мікрофонному блоці, підсилювача з регулюванням коефіцієнта підсилення РП і блоку управління БУ.

Для автоматичного коригування АЧХ звукового тракту використовується випробувальний сигнал із заздалегідь відомим спектром, який програється в паузах між звучанням фонограм. В результаті аналізу реального спектру звучання в місці прослуховування усуваються лінійні частотні спотворення звукового пристрою, обумовлені технологією запису, звуковим трактом і суб'єктивною помилкою користувача, яка виникає внаслідок ручного регулювання тембру. Отже, створюються умови прослуховування, за яких звучання фонограми наблизитиметься до оригінального звучання першоджерела звуку.

Таким чином, метод фактично являє собою багатосмуговий еквайзер, який дозволяє точно вирівняти АЧХ тракту, але з автоматичним настроюванням. Це дозволяє позбутися від суб'єктивної помилки оператора і, крім того, зменшує число органів керування, що можуть створити певні труднощі налаштування АЧХ для непідготованого користувача.

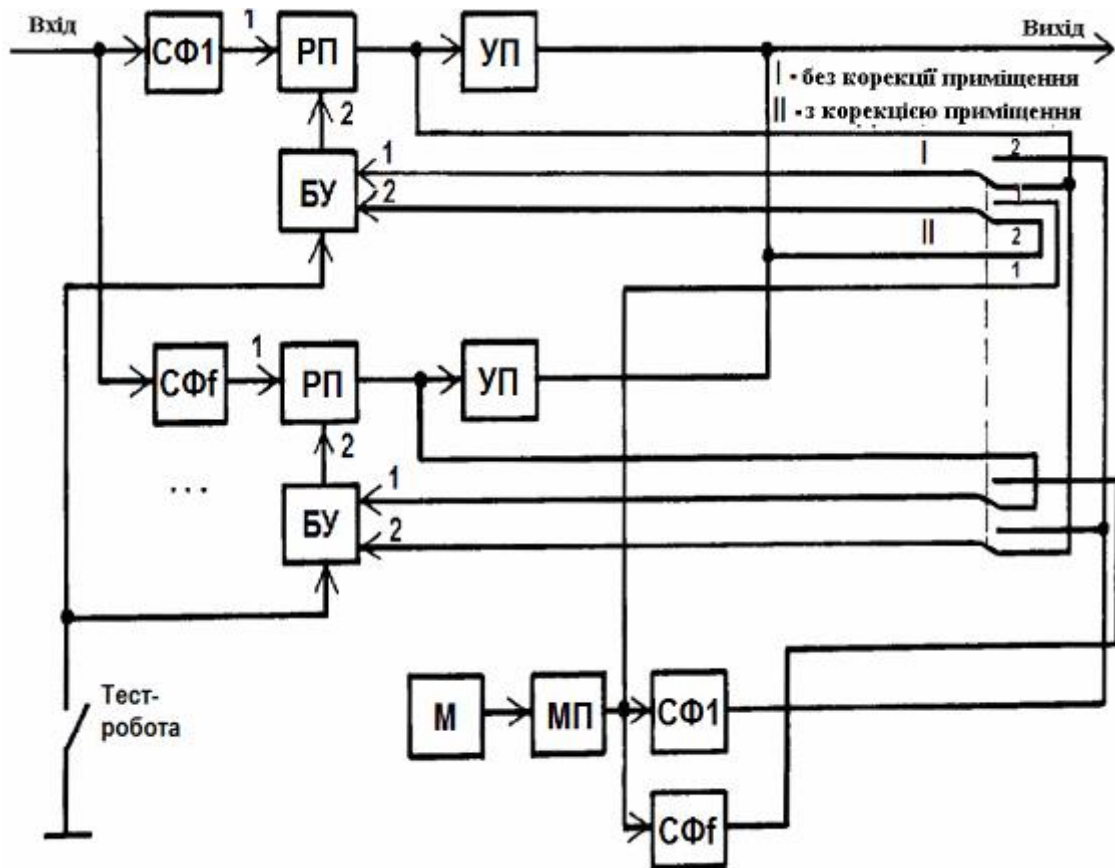


Рисунок 2.2 – Структурна схема методу автоматичного коригування частотної характеристики звукового тракту

Для досягнення задачі корекції пропонується застосовувати принцип аналізу спектру випробувального сигналу для автоматичного коригування АЧХ звукового тракту.

Випробувальний сигнал із заздалегідь відомим спектром, який відповідає неспотвореній формі даного сигналу, відтворюється в паузах між звучанням фонограм. У процесі відтворення у приміщенні в однаковій мірі відбувається часткове спотворення спектру фонограми і спектру випробувального сигналу. Пристрій коригування аналізує дані спотворення і компенсує їх в еквайзері.

Пристрій складається з декількох паралельних каналів підсилення зі змінними коефіцієнтами підсилення. Кожен канал пропускає задану смугу звукових частот. Точка з'єднання входів каналів підсилення є входом пристрою і підключається до виходу джерела фонограми. Точка з'єднання

виходів каналів підсилення є виходом пристрою і підключається до входу звукового підсилювача потужності.

Коефіцієнт підсилення кожного регульованого підсилювача РП може змінюватися в залежності від величини сигналу управління, який формується блоком управління БУ.

Пристрій працює в 2-х режимах. В 1-му режимі не враховується вплив приміщення на частотний спектр звучання, у 2-му режимі вплив приміщення на спектр враховується.

Принцип роботи блоку управління кожного частотного каналу полягає в такому. На блок управління БУ надходять два сигнали. Перший сигнал містить інформацію про загальний рівень складових спектру випробувального сигналу, які проходять через зразковий частотний канал з центральною частотою 1 кГц. Величина сигналу в цьому каналі є опорною.

Блок управління порівнює відношення цих сигналів із їх відношенням у спектрі неспотвореного випробувального сигналу і виробляє сигнал управління, який подається на вхід управління 2 регульованого підсилювача РП каналу відповідної частоти.

Якщо відношення сигналів, які надходять на входи блоку управління БУ, має також еталонне (зразкове) значення, то блок управління фіксує величину напруги управління на заданому рівні, відповідному необхідному коефіцієнту підсилення регульованого підсилювача РП.

Робота каналу підсилення з центральною частотою 1 кГц відрізняється від інших тим, що сигнали для роботи блока управління знімаються так: перший – з загального виходу пристрою, другий – з виходу каналу 1 кГц.

Такий метод дозволяє забезпечити динамічний діапазон регулювання підсилення по кожному частотному каналу більше, ніж динамічний діапазон РП відповідного каналу, зберегти при цьому лінійність режиму роботи підсилювача.

Розглянемо роботу методу на прикладі каналу з середньою частотою 1 кГц. Еталонний сигнал надходить на вхід пристрою, далі він йде на входи

смугових фільтрів СФ 1 і СФ 2. На схемі рис. 2.2 зазначені тільки два частотних канали з середньою частотою 1 кГц і f кГц. Спектральні складові випробувального сигналу, які проходять крізь смуговий фільтр 1 кГц СФ1к, подаються на вхід регульованого підсилювача РП. У регульованому РП змінюється амплітуда даних спектральних складових випробувального сигналу відповідно до значення напруги управління, що формується блоком управління БУ.

З виходу регульованого підсилювача РП сигнали крізь узгоджувальний підсилювач УП надходять на вихід пристрою, а також через тумблер на 1-й вхід блоку управління БУ. На 2-й вхід блоку управління БУ подається сигнал із загального виходу пристрою. Блок управління аналізує відношення сигналів на входах і виробляє сигнал управління, який, керує регульованим підсилювачем РП і змінює його коефіцієнт підсилення, до тих пір, поки відношення сигналів на входах БУ не стане рівним відношенню даних сигналів в спектрі неспотвореного випробувального сигналу, після цього БУ зафіксує напругу управління на незмінному рівні.

Перемикач змінює режим роботи пристрою. На схемі перемикач знаходиться в положенні, коли метод роботи пристрою не враховує вплив спотворень приміщення на тембральне офарбування фонограми.

При зміні положення перемикача пристрій переходить в режим корекції усього тракту (джерело звукового сигналу – приміщення – вухо слухача). У цьому випадку випробувальний сигнал, який пройшов по звуковому тракту і випромінений в приміщення для прослуховування, перетворюється мікрофоном М, вихід якого підключено до мікрофонного підсилювача МП.

Сигнали для блоку управління БУ каналу з частотою 1 кГц надходять з виходів мікрофонного підсилювача МП і смугового фільтра СФ1к, аналогічного смуговому фільтру для 2-го та 1-го входів відповідно.

Робота каналу з середньою частотою f кГц відрізняється від роботи каналу 1 кГц. У режимі роботи, що не враховує впливу спотворень АЧХ

приміщення, сигнал на 1-й вхід БУ надходить через перемикач з виходу РП, а на 2-й вхід – з виходу регульованого підсилювача РП каналу 1 кГц. У режимі роботи пристрою, що враховує спотворюючий вплив приміщення, сигнал на перший вхід блоку управління БУ надходить через перемикач з виходу смугового фільтра СФf, ідентичного до фільтра відповідного каналу, а на 2-й вхід – з виходу смугового фільтра СФ1к, ідентичного до фільтра каналу 1 кГц.

Кнопка служить для переведення пристрою в стан готовності, при якому блок управління БУ кожного частотного каналу більше не фіксуватиме напругу управління і пристрій готовий до прийому випробувального сигналу.

В даному методі пристрій автоматично коригує лінійні спотворення, які вносяться до спектру фонограми звуковим трактом.

Перевага даного метода полягає в тому, що він не призводить до корінної зміни системи запису звуку і звільняє користувача від необхідності ретельного регулювання АЧХ звукового тракту, як це робиться в багатосмугових еквайзерах.

2.4 Висновки по розділу 2

Система компенсації лінійних (амплітудно-частотних і фазо-частотних) спотворень повинна містити наступні вузли:

- еквайзер АЧХ або комплексної частотної характеристики;
- генератор тестового сигналу із заздалегідь відомими характеристиками;
- блок аналізу (порівняння) характеристик тестового (еталонного) та прийнятого (зі спотвореннями АЧХ та ФЧХ) сигналу;
- вимірювальний мікрофон, або мікрофон з відомими характеристиками спрямованості, АЧХ і ФЧХ.

Головна відмінність методів корекції буде у виборі виду тестового сигналу, виборі методу аналізу і порівняння тестового і прийнятого сигналів.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Алгоритм генерації випробувальних сигналів

Розглянемо методику формування послідовності цифрового псевдовипадкового забарвленого шуму зі спектральною щільністю потужності (СЩП) у вигляді:

$$S(f) = k \cdot f^{\alpha}, \quad (3.1)$$

де k – деякий коефіцієнт пропорційності,

f – частота сигналу,

α – показник ступеня в обвідній спектру.

Часто в літературних джерелах поняття «гаусів» і «білий» шум використовуються як рівнозначні. Тим не менш, гаусів шум відноситься до розподілу вірогідності амплітуди в області часу, в той же час термін «білий» відноситься до рівномірності спектральної потужності на всіх частотах, тому одна властивість не має автоматично на увазі іншої.

Граничне значення показника $\alpha = -1$ визначає рожевий шум, а також відмічає границю між передбачуваною та непередбачуваною поведінкою формованого шуму [5]. Для значень $\alpha < -1$ шумові сигнали є нестационарними і тривало корельованими [6].

Відмітимо, що гаусовість і стаціонарність формованих сигналів не є обов'язковими, але вони мають відповідати наступним вимогам [7]:

- 1) бути нестационарними для $\alpha < -1$;
- 2) бути інваріантними до масштабування;
- 3) мати СЩП з заданим нахилом в усьому досліджуваному частотному діапазоні.

У табл.3.1 показані характеристики шуму із різними спектральними забарвленнями.

Таблиця 3.1 – Характеристики шуму із різними спектральними забарвленнями

Тип шуму	α	Обвідна СЦП	Нахил обвідної СЦП	Приклади
Фіолетовий	+2	f^2	+6 дБ/окт. +20 дБ/дек.	Сигнал від акустичного термічного шуму води. Диференціювання білого шуму
Синій	+1	f	+3 дБ/окт. +10 дБ/дек.	Сигнал випромінювання Черенкова. ВЧ фільтрація білого шуму
Білий	0	Рівномірна	0 дБ/окт. 0 дБ/дек.	Сигнал від білого шумового процесу (Наприклад, термального шуму Джонсона-Найквіста)
Рожевий	-1	f^{-1}	-3 дБ/окт. -10 дБ/дек.	Сигнал із статистичного коливання декількох природних процесів. НЧ фільтрація білого шуму
Червоний (коричневий)	-2	f^{-2}	-6 дБ/окт. -20 дБ/дек.	Сигнал від броунівського руху. Інтегрування білого шуму
Чорний	<-2	f^α	<-6 дБ/окт. <-20 дБ/дек.	модель частоти стихійного лиха

Необхідно формувати математично реальний і обмежений у часі дискретний шумоподібний сигнал (послідовність) із нульовим середнім, одиничним стандартним відхиленням і заданим нахилом СЦП f^α чи нахилом спектральної щільності амплітуди (СЩА) $f^{\alpha/2}$:

$$cn(nT_s), \quad (3.2)$$

де $n = 1 \dots N$ – номер вибірки;

N – число вибірок;

T_s – період дискретизації.

Загальна тривалість сформованої послідовності

$$T = N \cdot T_s. \quad (3.3)$$

Формування сигналу здійснюється шляхом обробки адитивного білого гаусового шуму із нульовим середнім значенням. Такий шум може бути сформований одним з відомих методів [13].

Один методом є метод спектральної обробки, що змінює спектр амплітуд часової послідовності білого шуму $wn(nT_s)$, щоби отримати нову забарвлену часову послідовність шуму $cn(nT_s)$ із заданим спектральним нахилом в частотній області. Фазовий спектр при цьому залишиться незмінним, бо немає необхідності у його зміні.

Алгоритм відповідної процедури формування забарвленого шуму наведений на рис.3.1.

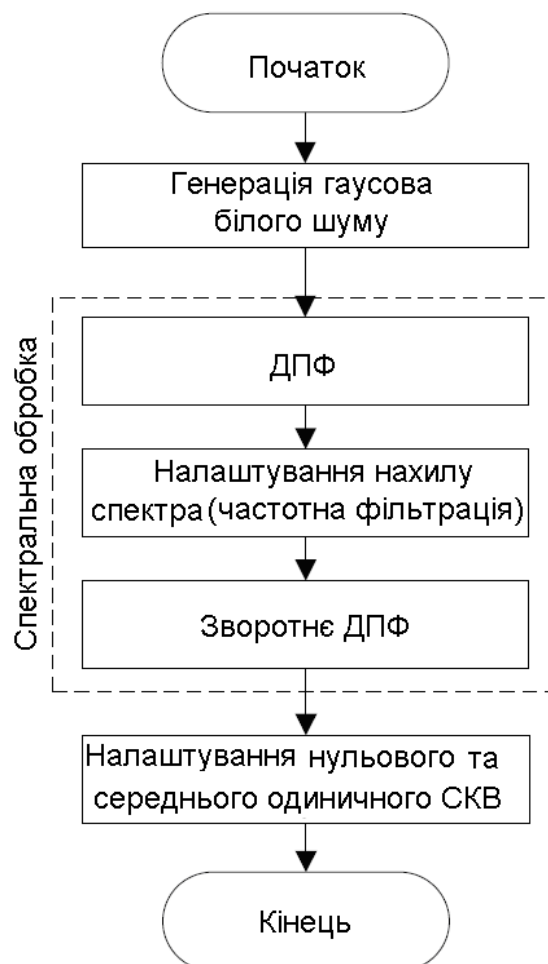


Рисунок 3.1 – Алгоритм формування забарвленого шуму:
забарвлений шумовий сигнал формується шляхом обробки амплітудного спектру білого шуму

Алгоритм формування містить 3 головні етапи (рис.3.1):

- формування сигналу білого шуму $wn(nT_s)$ в області часу;
- дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) шуму $wn(nT_s)$, обробка комплексних коефіцієнтів спектру для отримання нового спектру бажаного колірною шуму і зворотне ДПФ на останньому кроці;
- обробка колірною шумового сигналу $cn(nT_s)$ у області часу для забезпечення нульового середнього і одиничного середньоквадратичного відхилення (СКВ).

Перетворення ДПФ і ЗДПФ виконуються за формулами:

$$\dot{W}N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N wn(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad (3.4)$$

$$cn(n) = \sum_{k=1}^N CN(k) \cdot e^{j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad (3.5)$$

де $k = 1 \dots N$ – індекс спектральних компонентів.

Комплексний спектр, розрахований за виразом (3.4) має структуру, що наведена на рис. 3.2.

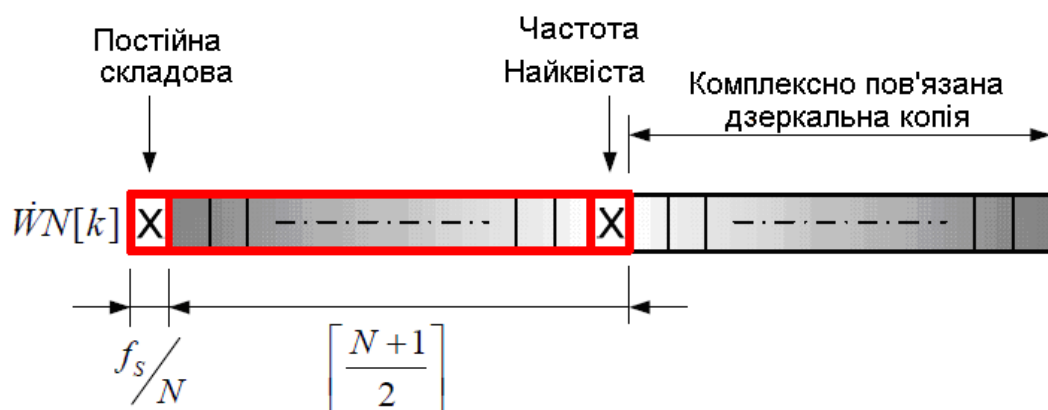


Рисунок 3.2 – Структура спектра ДПФ

Спектр має симетрію, де ліва половина є унікальною, від постійної складової і до половини частоти дискретизації (частоти Найквіста), а права –

є комплексно зв'язаною дзеркальною копією лівої частини. Таким чином, легше буде обробляти лише ліву половину спектра, а потім обчислити праву зв'язану дзеркальну копію.

Власне, процедура встановлення заданого нахилу спектральної обвідної виконується так, як показано на рис. 3.3.

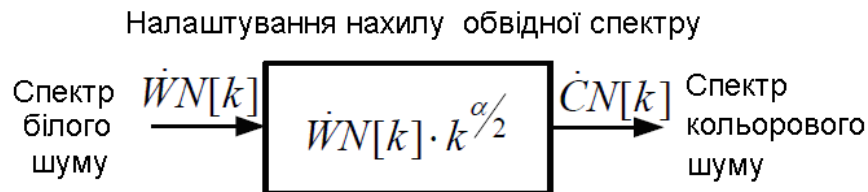


Рисунок 3.3 – Схема процедури встановлення нахилу спектральної обвідної

Застосовується індекс частоти k замість фактичної частоти f :

- $\dot{W}N(k)$ – є комплексним амплітудним спектром, а не СЦП шуму;
- індекс частоти k і лінійна частота f пов'язані виразом:

$$k = f \cdot n / F_s, \quad (3.6)$$

де F_s – частота дискретизації шуму;

– розподіл комплексних коефіцієнтів спектру еквівалентний розподілу амплітудного спектра при збереженні фазового спектра тим же;

– будь-яке ортогональне перетворення (для нас важливе ДПФ) гаусового випадкового процесу теж є новим гаусовим випадковим процесу з тією ж самою дисперсією [13]; це забезпечить незалежний розподіл амплітудного і фазового спектрів формованого колірною шумового сигналу.

Нарешті, середнє значення колірною шумового процесу встановлюється в 0, а середньоквадратичне значення встановлюється в 1:

$$\tilde{c}n(n) = cn(n) - M(cn(n)), \quad (3.7)$$

$$\hat{c}n(n) = \frac{\tilde{c}n(n)}{\sqrt{M(\tilde{c}n^2(n))}}, \quad (3.8)$$

де $M(\cdot)$ – є математичним сподіванням.

Перелічені дії дозволяють користувачу встановити необхідні значення середнього і середньоквадратичного значень довільно, у вигляді:

$$\mu + \sigma \cdot \hat{c}n(n), \quad (3.9)$$

де μ – потрібна постійна складова,

σ – потрібне СКВ шумового сигналу.

3.2 Програми для формування випробувальних сигналів

У середовищі MATLAB розроблено програми формування шумових сигналів із потрібним спектром згідно описаної вище методики.

В результаті було отримано набір з 4-х функцій MATLAB, який забезпечує формування:

1) Рожевого шуму з нахилом спектральної щільності потужності -3 дБ/окт. або -10 дБ/дек.

2) Червоного (або коричневого) шуму з нахилом спектральної щільності потужності -6 дБ/окт. або -20 дБ/дек.

3) Синього шуму з нахилом спектральної щільності потужності +3 дБ/окт. або +10 дБ/дек.

4) Фіолетового шуму з нахилом спектральної щільності потужності +6 дБ/окт., +20 дБ/дек.

Тексти відповідних скриптів функцій наведені нижче.

Для зручності сприйняття вхідні і вихідні аргументи наведені на початку скрипта кожної функції. Сформований шумовий сигнал має 1-не стандартне відхилення і 0-ве середнє значення.

В Додатку А наведено текст скриптів функцій `pinknoise.m`, що формує масив рожевого шуму, `rednoise.m`, що формує масив червоного шуму, `bluenoise.m`, що формує масив синього шуму, `violetnoise.m`, що формує масив фіолетового шуму.

3.3 Результати формування випробувальних сигналів

Комп'ютерне моделювання виконане в середовищі MATLAB для перевірки працездатності алгоритму формування колірною шуму.

Були сформовані послідовності шуму різних типів з тривалістю $T = 300$ с довжиною $N = 213,23 \cdot 10^6$ вибірок з частотою дискретизації $F_s = 44,1$ кГц. СЦП і автокореляційна функція (АКФ) для сформованих шумів показані на рис.3.4 – рис.3.8.

СЦП розраховувалася із застосуванням модифікованої періодограми Уелча [16] з вікном Хемінга довжиною:

$$win = 32132,3 \cdot 10^3, \quad (3.10)$$

та з перекриттям:

$$ovrlp = 0,75win. \quad (3.11)$$

Візуальне спостереження ділянок СЦП підтвердило потрібну швидкість нахилу сформованого сигналу та їхню інваріантність до масштабу.

Тобто, можна стверджувати, що сформовані випадкові процеси будуть сходиться по спектру до заданого вигляду при збільшенні тривалості вибірок. Сходимість (в описаному вище смислі) послідовностей випадкових величин – важливе поняття теорії ймовірностей, що використовується, зокрема, у статистиці та при вивченні випадкових процесів. Цей результат відомий як посилений закон великих чисел.

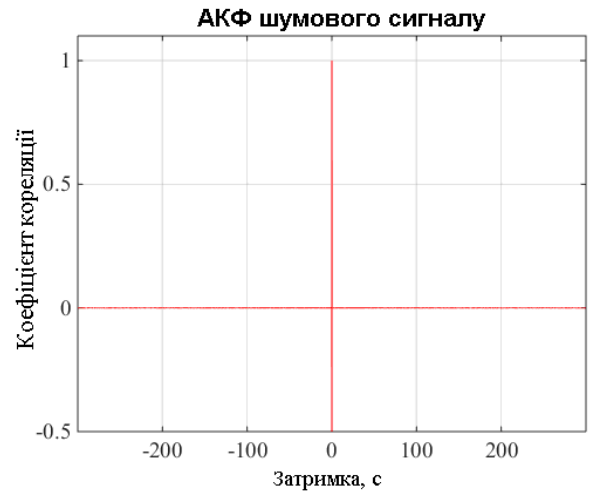
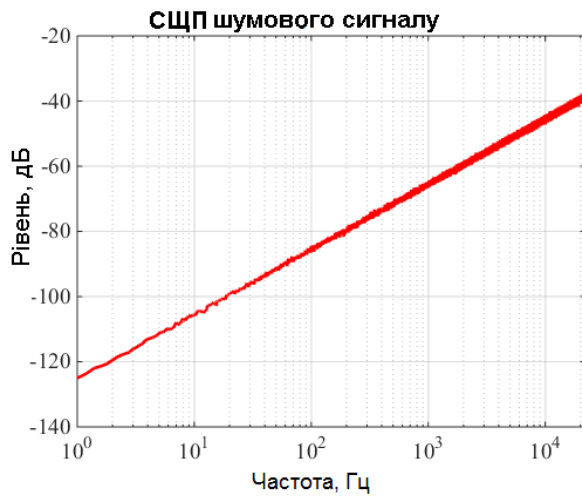


Рисунок 3.4 – СЦП (а) та АКФ (б) сформованого фіолетового шуму

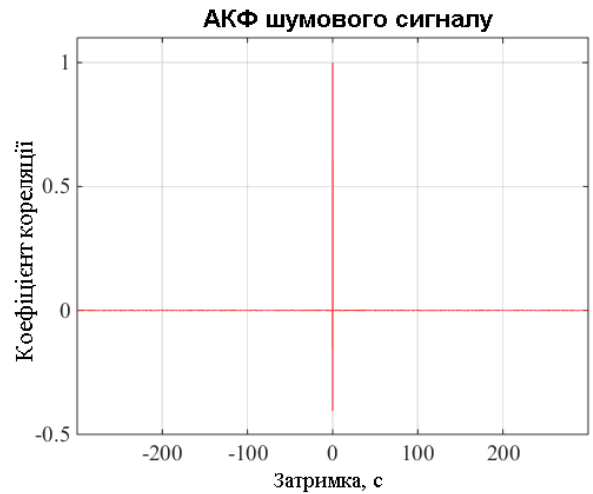


Рисунок 3.5 – СЦП (а) та АКФ (б) сформованого синього шуму

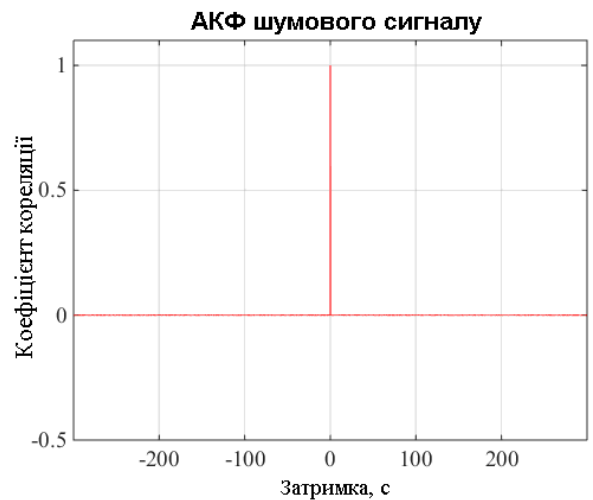
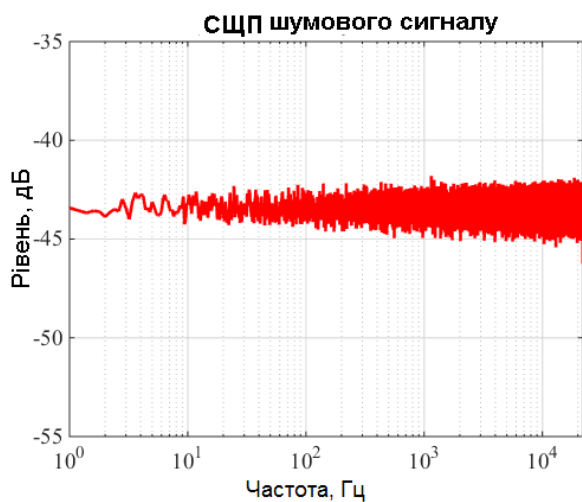


Рисунок 3.6 – СЦП (а) и АКФ (б) сформованого білого шуму

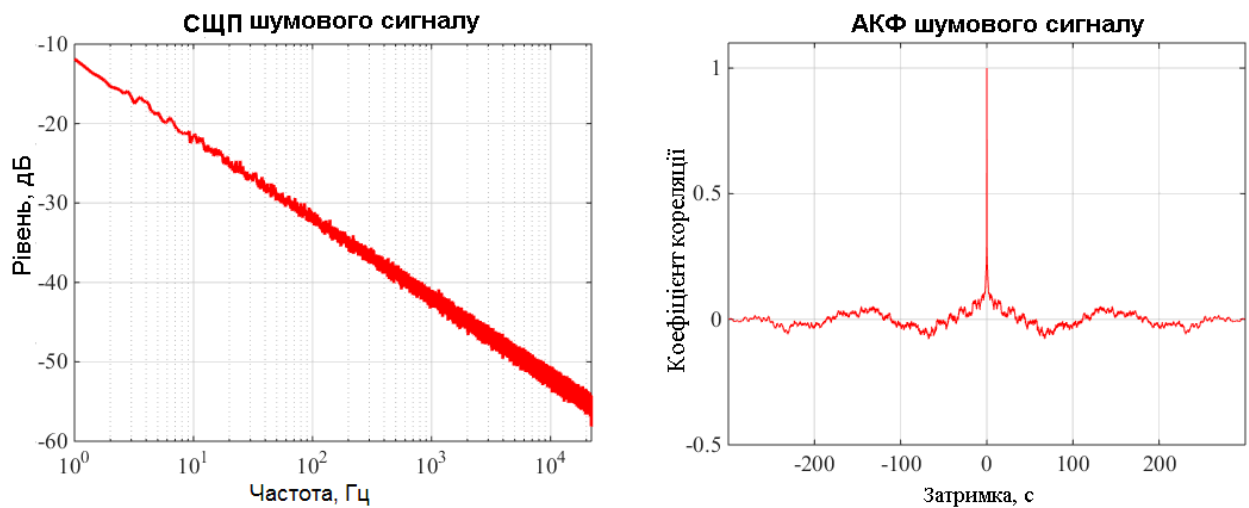


Рисунок 3.7 – СЦП (а) та АКФ (б) сформованого рожевого шуму

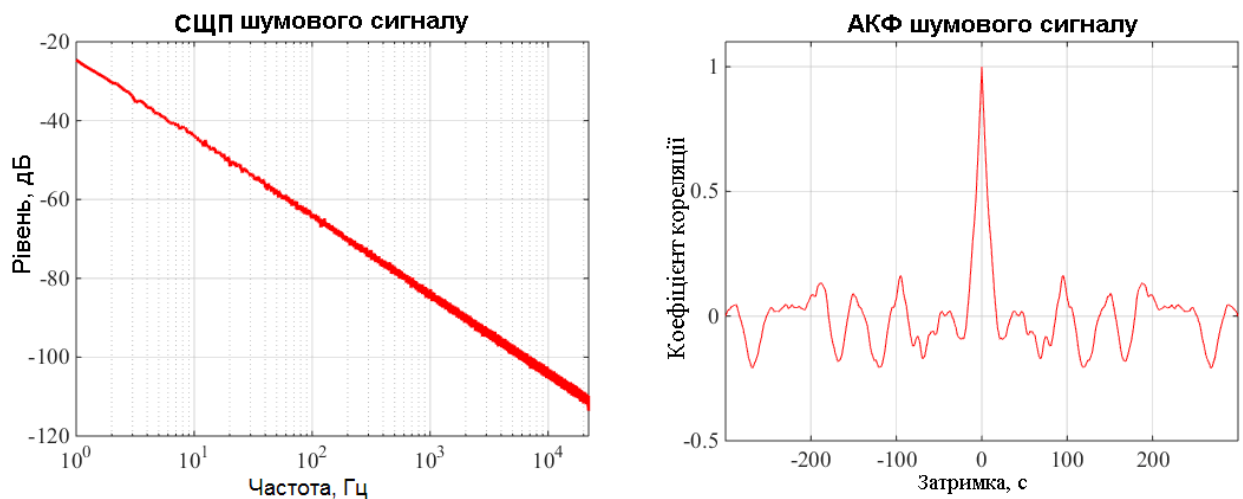


Рисунок 3.8 – СЦП (а) та АКФ (б) сформованого червоного шуму

Отримані АКФ підтверджують гіпотезу про довгострокову кореляцію шумових сигналів при $\alpha < -1$.

3.4 Алгоритм корекції частотної характеристики сигналів

Загальний набір функцій для багатосмугового еквайзера може бути сформований на базі виразів, що використовуються при проектуванні фільтрів нижніх та верхніх частот першого та другого порядків.

В даному розділі розроблено спеціальний набір функцій для реалізації параметричних фільтрів еквайзера. Як і при будь-якій іншій реалізації

фільтра потрібні його характеристики повинні бути доступні для змін. Наведені нижче параметри звичайно визначають усі бажані характеристики фільтра:

– f_c – середня частота для смугового фільтра або частота зрізу для фільтрів НЧ або ВЧ;

– F_s – частота дискретизації сигналу;

– Q – добротність фільтру;

– G – коефіцієнт передачі сигналу на частоті f_c .

Передаточна функція фільтра 1-го порядку в цифровому z -просторі може бути представлена у вигляді

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1}}. \quad (3.12)$$

Та ж саму бікватратичну передаточну функцію визначимо як

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}. \quad (3.13)$$

Формула (3.13) описує основну передаточну функцію. Однак найбільш часто застосовується передаточна функція, що задіяна в реалізації фільтра структури Direct Form I і описується у вигляді:

$$H(z) = \frac{(b_0/a_0) + (b_1/a_0) \cdot z^{-1} + (b_2/a_0) \cdot z^{-2}}{1 + (a_1/a_0) \cdot z^{-1} + (a_2/a_0) \cdot z^{-2}}. \quad (3.14)$$

З цієї передаточної функції отримаємо основне рівняння для розрахунку відліків вихідного сигналу на підставі відліків вхідного сигналу:

$$y[n] = \{(b_0/a_0) \cdot x[n]\} + \{(b_1/a_0) \cdot x[n-1]\} + \{(b_2/a_0) \cdot x[n-2]\} - \{(a_1/a_0) \cdot y[n-1]\} - \{(a_2/a_0) \cdot y[n-1]\} \quad (3.15)$$

БІХ фільтр I-го порядку.

Спочатку треба обчислити кілька проміжних змінних для використання у програмі:

- $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c / f_s$
- $K = \tan(\omega_c / 2)$
- $\alpha = 1 + K = 1 + \tan(\omega_c / 2)$

Коефіцієнти знаменника однакові як для фільтрів НЧ, так і для фільтрів ВЧ, розрахованих на однакове обмеження смуги частот, і розраховуються наступним чином:

- $a_0 = 1$
- $a_1 = -[(1 - K) / \alpha]$

Коефіцієнти чисельника для фільтра НЧ можуть бути розраховані наступним чином:

- $b_0 = b_1 = K / \alpha$

Коефіцієнти чисельника для фільтра ВЧ можуть бути розраховані наступним чином:

- $b_0 = 1 / \alpha$
- $b_1 = -1 / \alpha$

БІХ фільтр II-го порядку.

Спочатку треба обчислити кілька проміжних змінних для використання у програмі:

- $A = \sqrt{10^{(G/20)}}$
- $\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c / f_s$
- $\omega S = \sin(\omega_c)$
- $\omega C = \cos(\omega_c)$
- $\alpha = \omega S / (2 \cdot Q)$
- $\beta = \sqrt{A} / Q$

Нижче наведено набір функцій, які потрібно використовувати, щоб розрахувати коефіцієнти для фільтра необхідного типу.

Фільтр НЧ:

- $b_0 = (1 - \omega C)/2$
- $b_1 = 1 - \omega C$
- $b_2 = (1 - \omega C)/2$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

Фільтр ВЧ:

- $b_0 = (1 + \omega C)/2$
- $b_1 = -(1 + \omega C)$
- $b_2 = (1 + \omega C)/2$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

Смуговий фільтр:

- $b_0 = \omega S/2 = Q \cdot \alpha$
- $b_1 = 0$
- $b_2 = -\omega S/2 = -Q \cdot \alpha$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

Режекторний фільтр:

- $b_0 = 1$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

Всепопукний фільтр:

- $b_0 = 1 - \alpha$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1 + \alpha$
- $a_0 = 1 + \alpha$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - \alpha$

Піковий фільтр еквалайзеру:

- $b_0 = 1 + (\alpha \cdot A)$
- $b_1 = -2 \cdot \omega C$
- $b_2 = 1 - (\alpha \cdot A)$
- $a_0 = 1 + (\alpha / A)$
- $a_1 = -2 \cdot \omega C$
- $a_2 = 1 - (\alpha / A)$

Шельфовий фільтр НЧ:

- $b_0 = A \cdot \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$
- $b_1 = 2 \cdot A \cdot \{(A-1) - [(A+1) \cdot \omega C]\}$
- $b_2 = A \cdot \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$
- $a_0 = \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$
- $a_1 = -2 \cdot \{(A-1) + [(A+1) \cdot \omega C]\}$
- $a_2 = \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

Шельфовий фільтр ВЧ:

- $b_0 = A \cdot \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$
- $b_1 = -2 \cdot A \cdot \{(A-1) + [(A+1) \cdot \omega C]\}$
- $b_2 = A \cdot \{(A+1) + [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$
- $a_0 = \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] + (\beta \cdot \omega S)\}$
- $a_1 = 2 \cdot \{(A-1) - [(A+1) \cdot \omega C]\}$
- $a_2 = \{(A+1) - [(A-1) \cdot \omega C] - (\beta \cdot \omega S)\}$

Для фільтру II-го порядку мають бути виконані 2 умови для забезпечення стабільності фільтру. Вважають, що фільтр є стабільним в z-

області, якщо коріння/полюси фільтра знаходяться всередині одиничного кола. Дане визначення стабільності може бути трансформовано в умови для коефіцієнтів фільтра:

- $|a_2| < 1$
- $|a_1| < 1 + a_2$.

Для фільтра I-го порядку умова стійкості, що має бути виконана, полягає в тому, що полюс фільтра розташовується всередині одиничного кола. Знову, записуючи в термінах зазначених коефіцієнтів, дана умова може бути задана у вигляді:

- $|a_1| < 1$.

Фільтри I-го і II-го порядку є стійкими тоді і тільки тоді, коли виконуються вказані умови.

3.5 Програма для корекції частотної характеристики сигналів

Цифровий еквайзер реалізовано в системі MATLAB. Кожна оброблювана смуга частот є лінійним фільтром II-го порядку, фільтром з безкінечною імпульсною характеристикою (БІХ). Для поєднання сигналів усіх смуг фільтра використана паралельна обробка. Використано вбудовані інструменти MATLAB з обробки сигналів.

Нижче наведено скрипт функції `get_high_shelving_filter.m`, що формує коефіцієнти шельфового фільтра ВЧ.

```
function [b a]=get_high_shelving_filter(g,Q,f,Fs)
A=10^(g/40);
w=2*pi*f/Fs;
sn=sin(w);
cs=cos(w);
al=sn/(2*Q);
bt=sqrt(A)/Q;
b=A*[(A+1)+(A-1)*cs+bt*sn,...
      -2*((A-1)+(A+1)*cs),...
      (A+1)+(A-1)*cs-bt*sn];
a=[(A+1)-(A-1)*cs+bt*sn,...
    2*((A-1)-(A+1)*cs),...
    (A+1)-(A-1)*cs-bt*sn];
b=b/a(1);
a=a/a(1);
```

Нижче наведено скрипт функції `get_low_shelving_filter.m`, що формує коефіцієнти шельфового фільтра НЧ.

```
function [b a]=get_low_shelving_filter(g,Q,f,Fs)
A=10^(g/40);
w=2*pi*f/Fs;
sn=sin(w);
cs=cos(w);
al=sn/(2*Q);
bt=sqrt(A)/Q;
b=A*[(A+1)-(A-1)*cs+bt*sn,...
      2*((A-1)-(A+1)*cs),...
      (A+1)-(A-1)*cs-bt*sn];
a=[(A+1)+(A-1)*cs+bt*sn,...
   -2*((A-1)+(A+1)*cs),...
   (A+1)+(A-1)*cs-bt*sn];
b=b/a(1);
a=a/a(1);
```

Нижче наведено скрипт функції `get_peak_filter.m`, що формує коефіцієнти пікового фільтра.

```
function [b a]=get_peak_filter(g,Q,f,Fs)
A=10^(g/40);
w=2*pi*f/Fs;
sn=sin(w);
cs=cos(w);
al=sn/(2*Q);
b=[1+al*A   -2*cs   1-al*A];
a=[1+al/A   -2*cs   1-al/A];
b=b/a(1);
a=a/a(1);
```

Нижче наведено скрипт функції `recalculate_filter.m`, що пристосовує фільтр під потрібну АЧХ.

```
function recalculate_filter
% Перерахувати об'єкт фільтра (після зміни АЧХ)
global hdl
global g1 g2 n hs
global Q f filts_type
global hp hpp
global Fs
global hd1 hd2
gg=[];
ssa=[];
ssb=[];
for nc=1:n
    g=get(hs(nc),'value');
    gg=[gg g];
    switch filts_type(nc)
```

```

function recalculate_filter
% Перерахувати об'єкт фільтра (після зміни АЧХ)
global hdl1
global g1 g2 n hs
global Q f filts_type
global hp hpp
global Fs
global hd1 hd2
gg=[];
ssa=[];
ssb=[];
for nc=1:n
    g=get(hs(nc),'value');
    gg=[gg g];
    switch filts_type(nc)
        case 1
            [b a]=get_low_shelving_filter(g,Q(nc),f(nc),Fs);
        case 2
            [b a]=get_peak_filter(g,Q(nc),f(nc),Fs);
        case 3
            [b a]=get_high_shelving_filter(g,Q(nc),f(nc),Fs);
    end

    ssa=[ssa; a];
    ssb=[ssb; b];
end
ss=[ssb ssa];
% Відтворити фільтр і скопіювати стан зі старого фільтра в новий, якщо це можливо:
ex=exist('hd1.States','var');
if ex
    os=hd1.States; % old states
end
hd1=dfilt.df1sos(ss);
if ex
    hd1.States=os;
end
hd1.PersistentMemory=true;
ex=exist('hd2.States','var');
if ex
    os=hd2.States; % old states
end
hd2=dfilt.df1sos(ss);
if ex
    hd2.States=os;
end
hd2.PersistentMemory=true;
[h,w] = freqz(hd1);
fq=(w/pi)*Fs/2;
%set(hp,'XData',fq,'YData',abs(h));
set(hp,'XData',fq,'YData',20*log10(abs(h)));
set(hpp,'XData',f,'YData',gg);
xlim(hdl1.axes1,[fq(1) fq(end)]);
ylim(hdl1.axes1,[g1 g2]);
if isstable(hd1)
    set(hdl1.ftx,'string','filter: stable');
else
    set(hdl1.ftx,'string','filter: unstable');
end
drawnow;

```

Нижче наведена програма тестування шельфового фільтра ВЧ.

```
g=-50;
Q=1;
f=10e3;
[x, Fs] = wavread('tea_16bit_48kHz_short.wav');
[b a]=get_high_shelving_filter(g,Q,f,Fs);
y=filter(b,a,x);
sound(y,Fs);
```

На рис.3.9 показаний приклад АЧХ реалізованого десятизмугового еквалайзера.

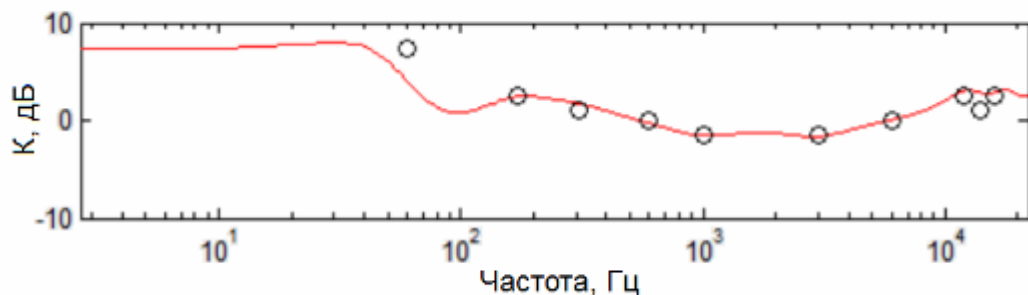


Рисунок 3.9 – АЧХ реалізованого десятизмугового еквалайзера

На цьому розробку програмного забезпечення можна вважати закінченою. Приступаємо до експериментальних досліджень.

3.6 Висновки до розділу 3

Розроблено методику і програми для формування випробувальних сигналів у вигляді білого шуму і колірною шуму із забарвленим спектром. Методика генерації має три основних етапи: формування білого шуму, обробка комплексних коефіцієнтів спектру у частотній області, обробка колірною шуму для забезпечення 0-го середнього і 1-го СКВ.

В результаті отримано набір з чотирьох скриптів MATLAB, який забезпечує формування рожевого, червоного, синього і фіолетового шуму. Шуми відрізняються різним нахилом обвідної спектральної щільності потужності СЩП.

Отримано СЦП і АКФ для сформованих сигналів. Візуальне спостереження ділянок СЦП підтвердило потрібну швидкість нахилу сформованого сигналу та їхню інваріантність до масштабу. Отримані АКФ підтверджують гіпотезу про довгострокову кореляцію шуму при $\alpha < -1$.

Отримано загальний набір функцій для багатосмугового еквайзера. Характеристики фільтрів визначають центральну частоту, частоту дискретизації; добротність і коефіцієнт передачі сигналу на середній частоті.

Отримано формули для коефіцієнтів лінійного БХ-фільтра II-го порядку. В системі MATLAB реалізовано цифровий еквайзер з відповідними характеристиками. Побудовано АЧХ реалізованого в MATLAB десятисмугового еквайзера.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСТОТНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ

4.1 Описання умов експерименту

У дослідженні за допомогою розробленого в MATLAB програмного забезпечення формувався випробувальний сигнал у вигляді білого або забарвленого шуму, який відтворювався активною акустичною системою АС, під'єднаною до звукової карти ПК. Звукові сигнали приймалися мікрофоном, який не є вимірювальним. Сигнал мікрофона оброблявся в ПК програмою MATLAB, в результаті чого отримані графіки реалізацій сигналу, відгуку системи, АЧХ сигналу і спектр відгуку, а також спотворення АЧХ системи озвучення.

Для вимірювання характеристик АС і мікрофона, які брали участь в дослідженнях, отримані наскрізні АЧХ, виміряні в ближньому полі, тобто коли мікрофон розташований на відстані приблизно 10 см від центру ВЧ-головки. Очевидно, що навіть при таких вимірюваннях не вдається нейтралізувати вплив відбитих хвиль, але будемо вважати, що він мінімальний і ним можна знехтувати. Із стереопари замірялася лише одна АС.

Зовнішній вигляд вимірюваних акустичних систем та їх параметри наведені на рис.4.1 та в табл. 4.1 відповідно.

Таблиця 4.1 – Загальні параметри АС Edifier R1280DB

Вид	Акустична система, 2.0, активна, фронтальна, полочна, з фазоінвертором, монополярна
Склад комплекта акустики	пара колонок
Потужність колонок	номінальна 42 Вт;
Характеристики підсилювача	сигнал/шум 85 dB;
Відтворена частота	55-20000 Гц
Тип випромінювачів	купольний ВЧ
Матеріал випромінювачів	ВЧ шовк
Розміри випромінювачів	НЧ 116 мм; ВЧ 13 мм
Розмір колонки (ШхВхГ)	146x234x196 мм
Фронтальні колонки	2-смугові



Рисунок 4.1 – Акустична система Edifier R1280DB

Зовнішній вигляд використаного мікрофону і його параметри наведені на рис.4.2 та в табл. 4.2 відповідно.

Таблиця 4.2 – Загальні параметри мікрофона SVEN МК-200

Вид	Для ПК/ноутбука
Звукозапис	50-16000 Гц
Чуттєвість	60 дБ, 1 мВ/Па
Підключення	провідний, mini jack 3.5 mm



Рисунок 4.2 – Мікрофон SVEN МК-200

Виробники не наводять АЧХ і ФЧХ даної акустичної системи і мікрофона, тому маємо очікувати велику нерівномірність цих характеристик.

4.2 Дослідження імпульсних відгуків звукового тракту

Програма для генерації випробувального сигналу білого або колірного шуму, а також для запису відгуку звукового тракту в MATLAB наведена нижче.

```
clear all; close all

Fs = 48000; % Частота дискретизації, Гц
T = 5; % Тривалість, с
N = T * Fs; % Число вибірок
A = 0.5; % амплітуда
F0 = 20; % Початкова частота
F1 = 20000; % Кінцева частота
n = 1: N; % Номера відліків
t = n * T / N; %поточний час
f = n * Fs / N;

s = pinknoise (N, 1);
% S = randn (N, 1);
% S = rednoise (N, 1);
% S = bluenoise (N, 1);
% S = violetnoise (N, 1);

m = 1: N / 2-0.1 * N;
hh = figure
plot (t (m), s (m))
xlabel ( 'Час, с', 'FontSize', 14); ylabel ( 'Амплітуда', 'FontSize', 14);
title ([ 'Сигнал']);

sound (s, Fs)
recorder = audiorecorder (Fs, 16,1);
recordblocking (recorder, T);
s1 = getaudiodata (recorder);
figure
plot (t (m), s1 (m))
xlabel ( 'Час, с', 'FontSize', 14); ylabel ( 'Амплітуда', 'FontSize', 14);
title ([ 'Відгук']);

S = abs (fft (s));
S1 = abs (fft (s1));
len_s = length (S) / 2 + 1;

K = flipud (filter (1 / Fs, [1 -1], flipud (S))); % інтегрування
K = 20 * log10 (K / max (K));
K1 = flipud (filter (1 / Fs, [1 -1], flipud (S1))); % інтегрування
K1 = 20 * log10 (K1 / max (K1))

for i = 1: len_s
    K (i) = K (i);
    K1 (i) = K1 (i);
end

figure
plot (f (m), K (m))
```

```
xlabel ( 'Частота, Гц', 'FontSize', 14); ylabel ( 'Амплітуда, дБ',
'FontSize', 14);
title ([ 'Обвідна спектра дії']);
```

```
figure
plot (f (m), K1 (m))
xlabel ( 'Частота, Гц', 'FontSize', 14); ylabel ( 'Амплітуда, дБ',
'FontSize', 14);
title ([ 'Обвідна спектра відгуку']);
```

```
figure
plot (f (m), K1 (m) -K (m))
xlabel ( 'Частота, Гц', 'FontSize', 14); ylabel ( 'Амплітуда, дБ',
'FontSize', 14);
title ([ 'Спотворення АЧХ']);
```

На рис.4.3 показано графік перших 2 с тестового рожевого шуму, а на рис.4.4 – графік відгуку звукового тракту на рожевий шум.

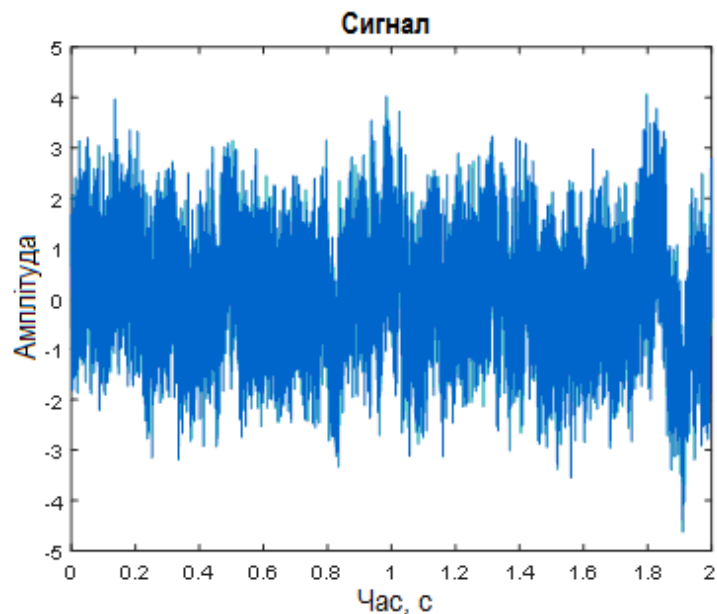


Рисунок 4.3 – Графік перших 2 с тестового рожевого шуму

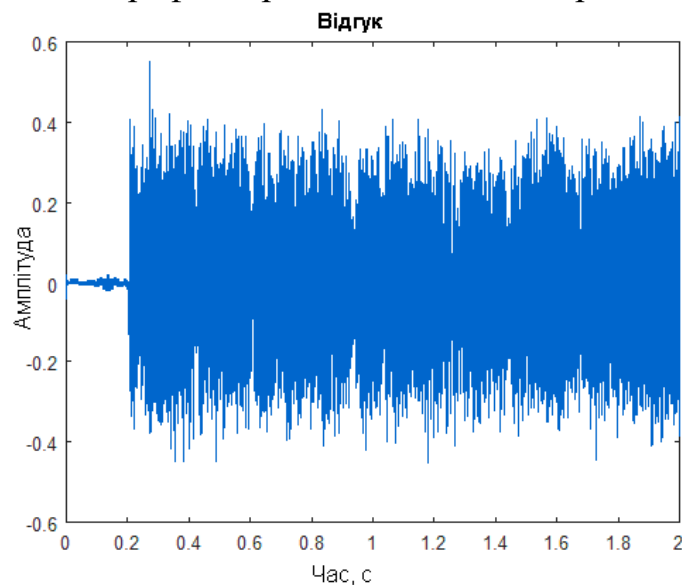


Рисунок 4.4 – Графік відгуку звукового тракту на рожевий шум

Порівнюючи графіки сигналу на рис.4.3 і відгуку на рис.4.4, можна відмітити, що за зовнішнім виглядом системного відгуку на рожевий шум уже можна зробити висновок про нерівномірність АЧХ. Зокрема, сильно помітно зменшення амплітуд коливань НЧ з великим періодом.

На рис.4.5 показано графік перших 2 з тестового білого шуму, а на рис.4.6 – відгук звукового тракту на білий шум.

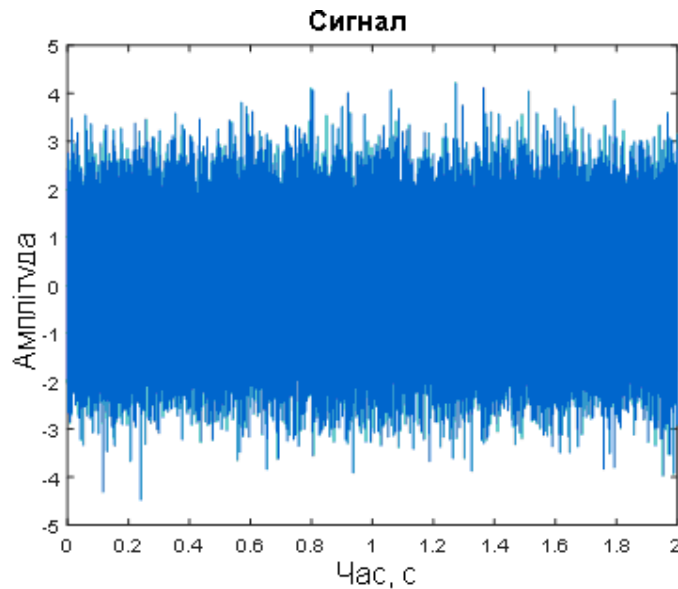


Рисунок 4.5 – Графік перших 2 с тестового білого шуму

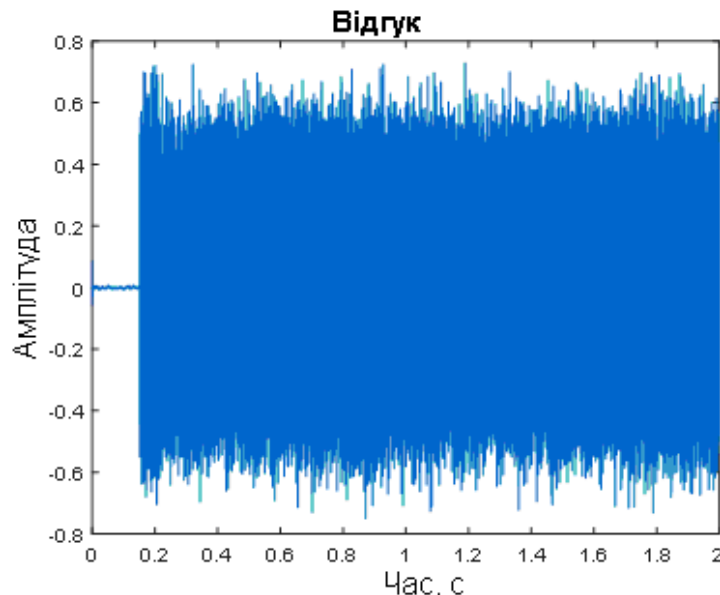


Рисунок 4.6 – Графік відгуку системи на білий шум

На рис.4.7 показано графік перших 2 с тестового червоного шуму, а на рис.4.8 – запис відгуку звукового тракту на червоний шум.

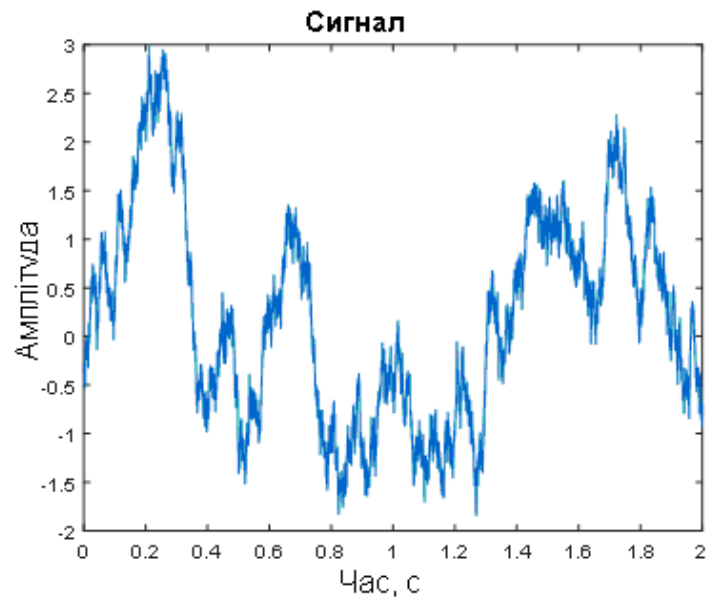


Рисунок 4.7 – Графік перших 2 с тестового червоного шуму

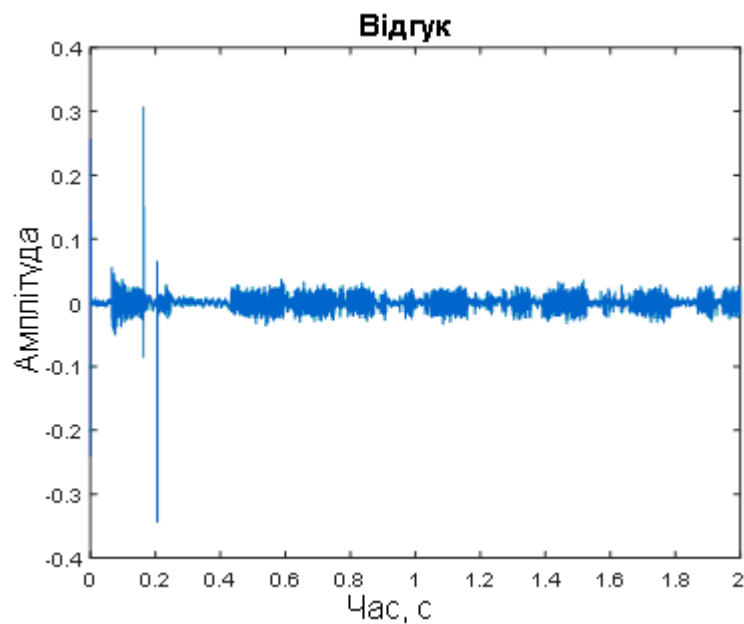


Рисунок 4.8 – Графік відгуку системи на червоний шум

Так як у червоного шуму головна енергія зосереджена на НЧ, а вимірювана система, вочевидь, має завал на НЧ, на запису відгуку наочно помітно зменшення амплітуди відгуку.

На рис.4.9 наведено графік перших 2 з тестового синього шуму, а на рис.4.10 – графік відгуку звукового тракту на синій шум.

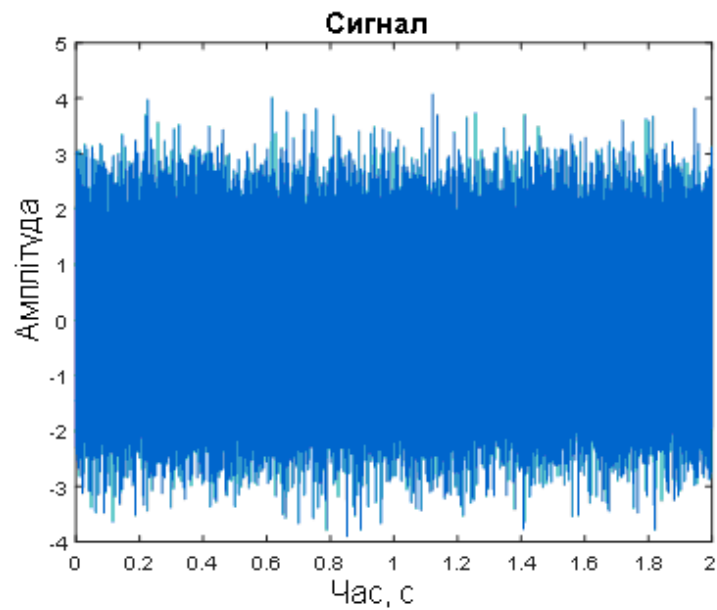


Рисунок 4.9 – Графік перших 2 с тестового синього шуму

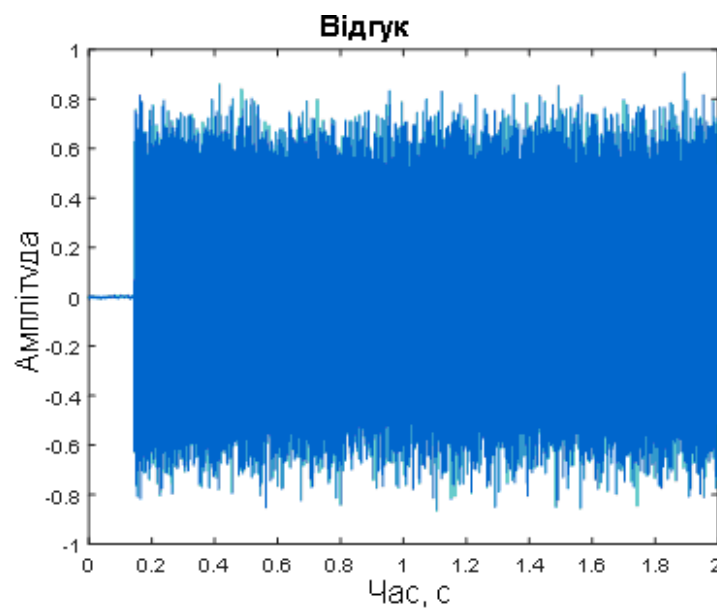


Рисунок 4.10 – Графік відгуку системи на синій шум

Так як вимірювана система, очевидно, не має суттєвого завалу в області ВЧ, то відгук має досить велику амплітуду.

На рис. 4.11 показано графік перших 2 с тестового фіолетового шуму, а на рис.4.12 – графік відгуку звукового тракту на фіолетовий шум.

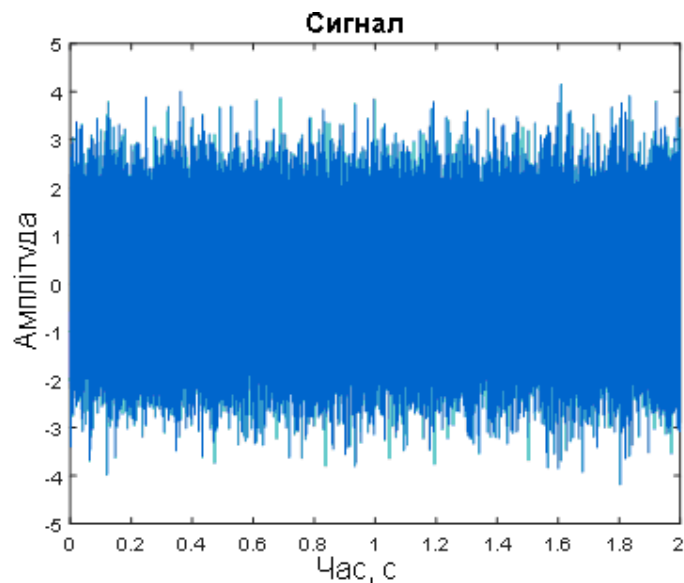


Рисунок 4.11 – Графік перших 2 с тестового фіолетового шуму

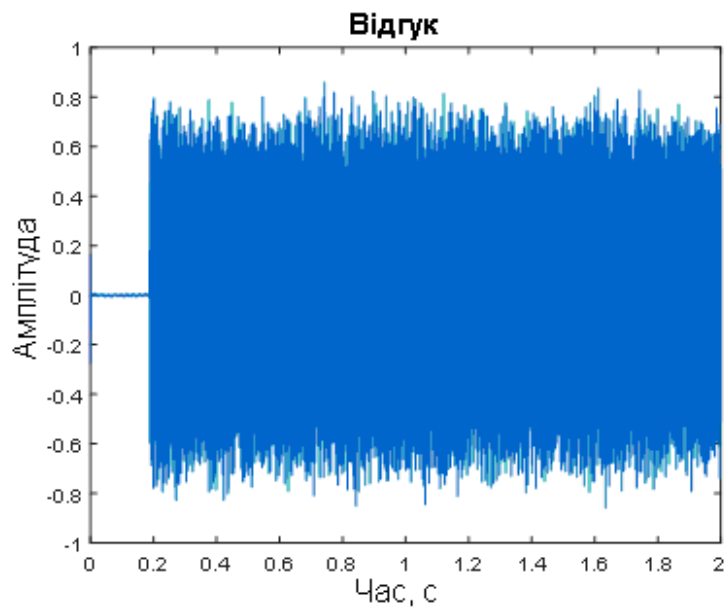


Рисунок 4.12 – Графік відгуку системи на фіолетовий шум

По аналогії з синім шумом, так як вимірювана система, вочевидь, не має помітного завалу в області ВЧ, то відгук має також досить велику амплітуду.

Отже, на етапі дослідження відгуків звукового тракту зрозуміло, що найбільш доцільним є застосування випробувальних сигналів з невеликою нерівномірністю обвідної спектра: білий шум або рожевий шум.

4.3 Розрахунок параметрів системи з корекцією

Розрахунок АЧХ тестового сигналу і відгуку, а також спотворень і АЧХ звукового тракту проведений шляхом порівняння спектра відгуку звукового тракту зі спектром опорного сигналу.

Позначимо вплив як $s(t)$, а відгук системи – як $s_1(t)$. Спочатку знайдемо їх комплексні спектри:

$$\dot{S}(f) \overset{FFT}{\leftrightarrow} s(t); \quad \dot{S}_1(f) \overset{FFT}{\leftrightarrow} s_1(t), \quad (4.1)$$

де FFT – позначка операції швидкого перетворення Фур'є.

Після цього знайдемо модуль комплексної частотної характеристики, тобто АЧХ:

$$S(f) = |\dot{S}(f)|, \quad S_1(f) = |\dot{S}_1(f)|. \quad (4.2)$$

АЧХ тестового сигналу и і відгуку тракту переводились у дБ:

$$S(f) = 20 \lg(S(f)), \quad S_1(f) = 20 \lg(S_1(f)). \quad (4.3)$$

АЧХ тракту розрахуємо як різницю між АЧХ відгуку і тестового сигналу:

$$K(f) = S_1(f) - S(f), \quad (4.4)$$

а АЧХ компенсаційного еквалайзера – як зворотну величину:

$$K(f) = -K(f) = S(f) - S_1(f). \quad (4.5)$$

Важливою проблемою при вимірюванні АЧХ звукової системи є випадковий характер відгуку звукового тракту за рахунок випадкового

характеру вимірювального сигналу. Приклад амплітудних спектрів тестового сигналу і відгуку для білого шуму з тривалістю його реалізації 5 с показано на рис.4.13 і рис.4.14.

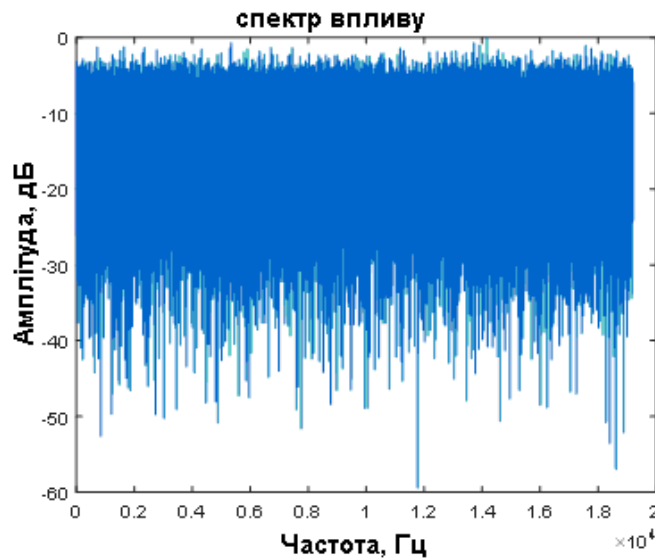


Рисунок 4.13 – Спектр тестового сигналу "білий шум" з реалізацією тривалістю 5 с

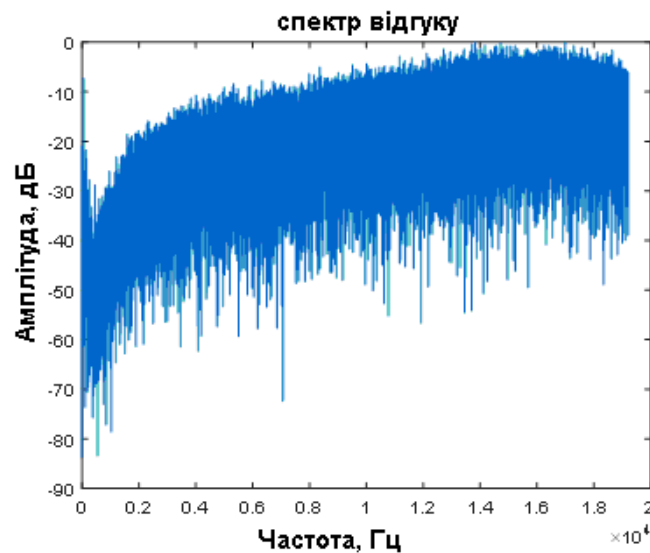


Рисунок 4.14 – Спектр відгуку звукового тракту на білий шум з реалізацією тривалістю 5 с

Виходом із даної ситуації є розрахунок обвідної спектра шляхом інтегрування по частоті:

$$S_a(f) = N \int_{-\infty}^0 S^2(f - F) dF = N \int_f^{\infty} S^2(x) dx. \quad (4.6)$$

На рис. 4.15 і рис. 4.16 показані графіки обвідної спектру тестового сигналу і відгуку звукового тракту на сигнал у вигляді білого шуму.

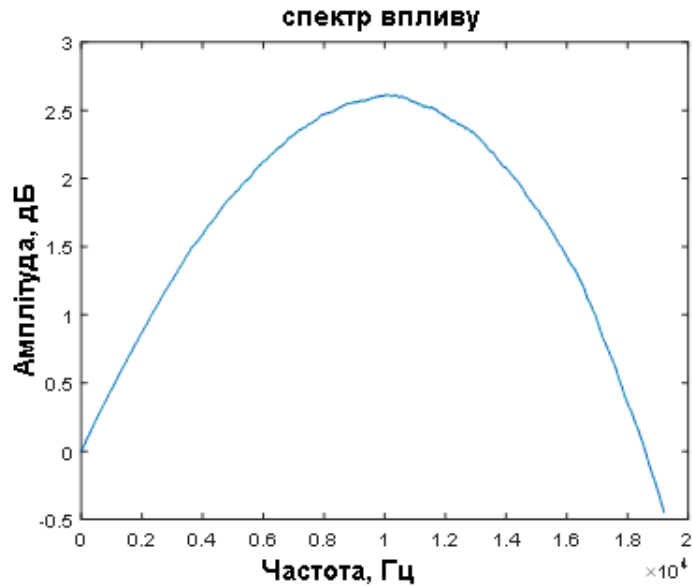


Рисунок 4.15 – Графік обвідної спектру тестового сигналу у вигляді білого шуму

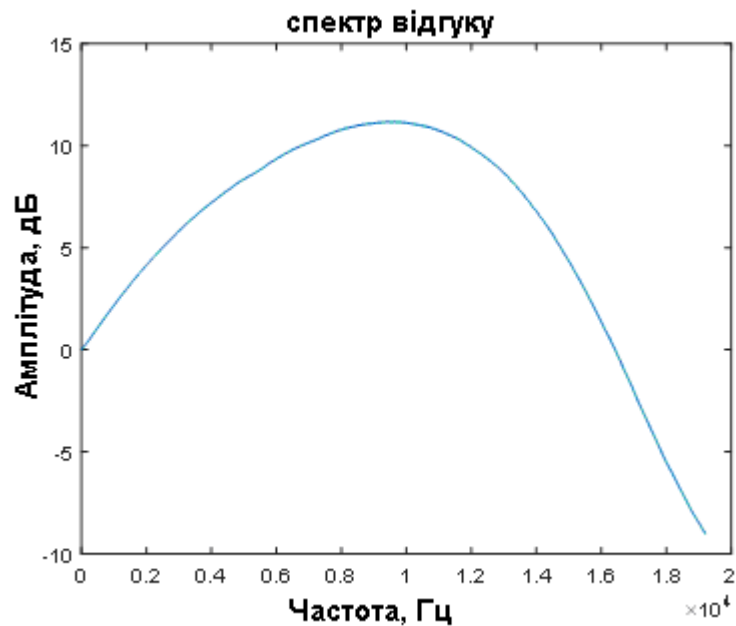


Рисунок 4.16 – Графік обвідної спектра відгуку звукового тракту на опорний сигнал у вигляді білого шуму

Як слідує з рис. 4.15, нерівномірність обвідної спектру тестового білого шуму тривалістю 5 с не більше 3 дБ.

На рис.4.17 наведено графік спотворень АЧХ звукового тракту, розрахованих за виразом (4.4).

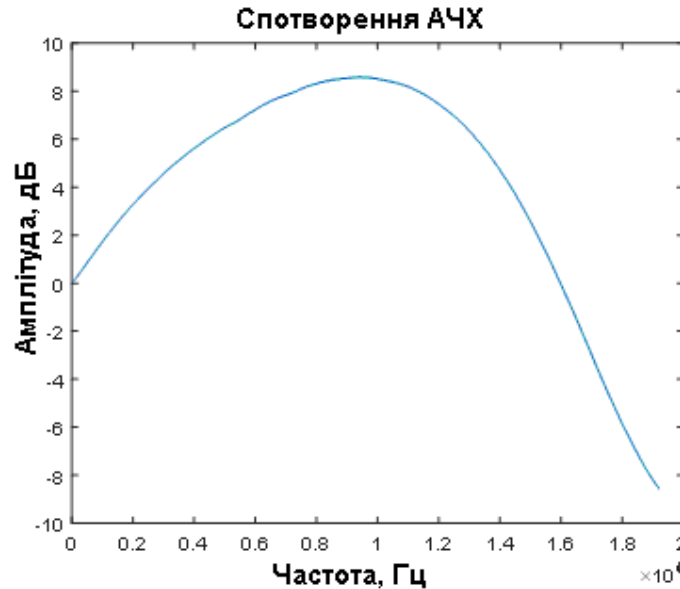


Рисунок 4.17 – Графік спотворень АЧХ звукового тракту, вимірний по тестовому сигналу у вигляді білого шуму

На рис.4.18 і рис.4.19 показані графіки обвідної спектру тестового сигналу і відгуку звукового тракту на опорний сигнал у вигляді рожевого шуму.

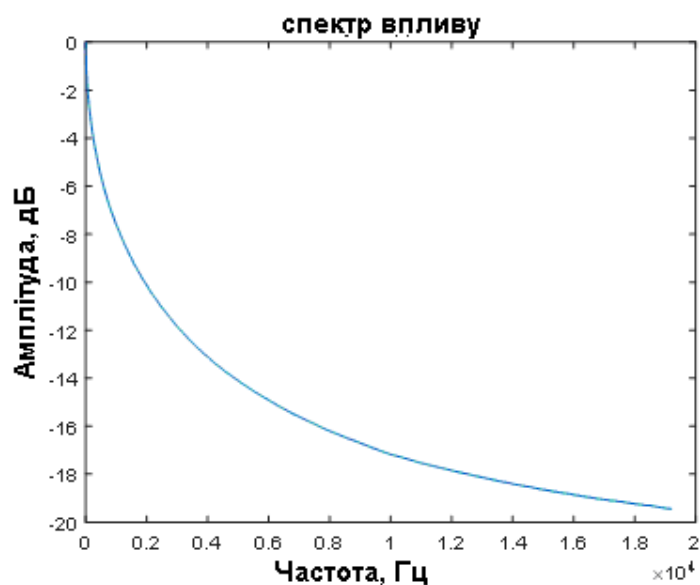


Рисунок 4.18 – Графік обвідної спектру тестового сигналу у вигляді рожевого шуму

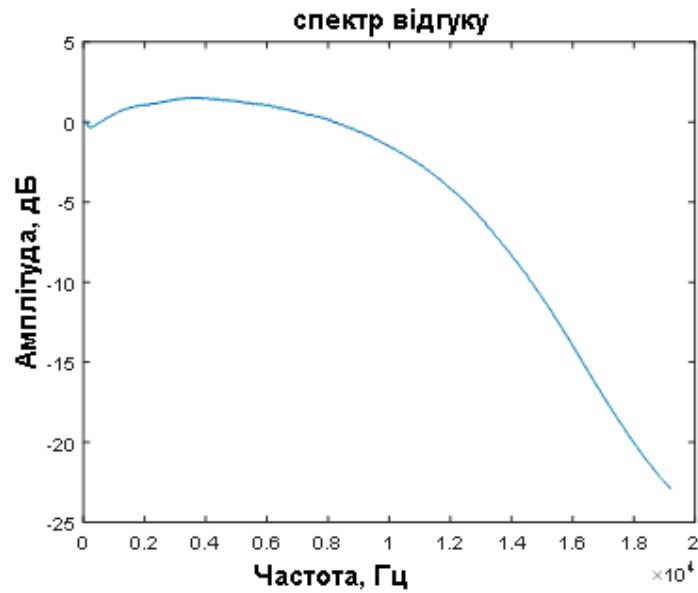


Рисунок 4.19 – Графік обвідної спектра відгуку звукового тракту на тестовий сигнал у вигляді рожевого шуму

На рис.4.20 показано графік спотворень АЧХ звукового тракту, розрахованих за виразом (4.4).

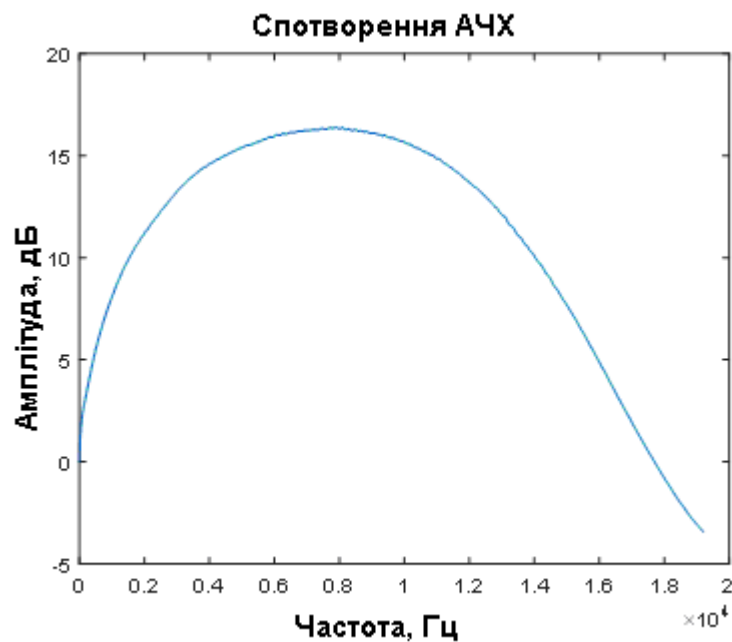


Рисунок 4.20 – Графік спотворень АЧХ звукового тракту за тестовим сигналом у вигляді рожевого шуму

Аналізуючи характеристики на рис. 4.17 та рис.4.20, можна відзначити більшу нерівномірність АЧХ звукового тракту, що складає ± 8 дБ в досліджуваній смузі звукового сигналу.

4.4 Корекція спотворень АЧХ

Корекція спотворень АЧХ звукового тракту здійснювалася шляхом застосування 10-смугового еквайзера, реалізованого в системі MATLAB. Середні частоти налаштування фільтрів розподілялися рівномірно у досліджуваній смузі. Коефіцієнт передачі фільтрів визначався у відповідності з формулою (4.5).

На рис.4.21 наведена АЧХ фільтра корекції для випадку тестового сигналу типу "рожевий шум".

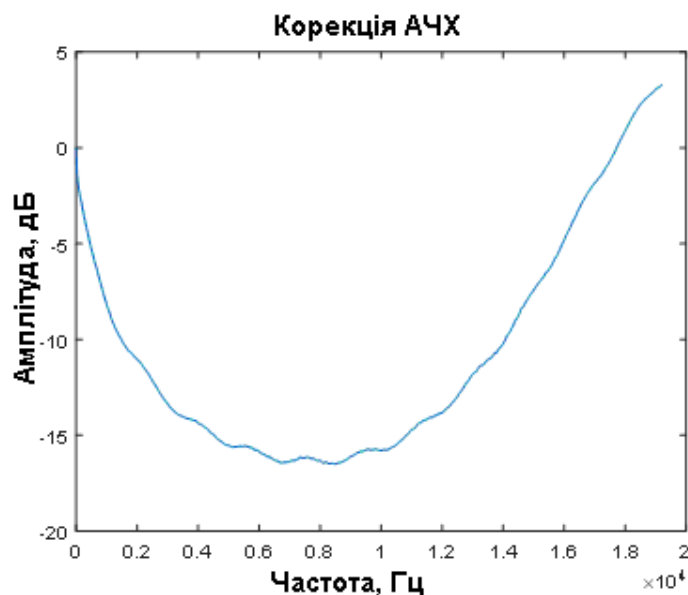


Рисунок 4.21 – АЧХ фільтра корекції для тестового сигналу типу "рожевий шум"

На рис.4.22 наведено АЧХ фільтра корекції для випадку тестового сигналу типу "білий шум".

Аналізуючи характеристики на рис.4.21 і рис.4.22 можна відзначити характерну особливість, що пов'язана з нерівномірністю АЧХ фільтра

корекції. Дана нерівномірність пояснюється частковим перекриттям смуг еквайзера корекції.

На рис.4.23 і рис. 4.24 наведені скориговані АЧХ звукового тракту.

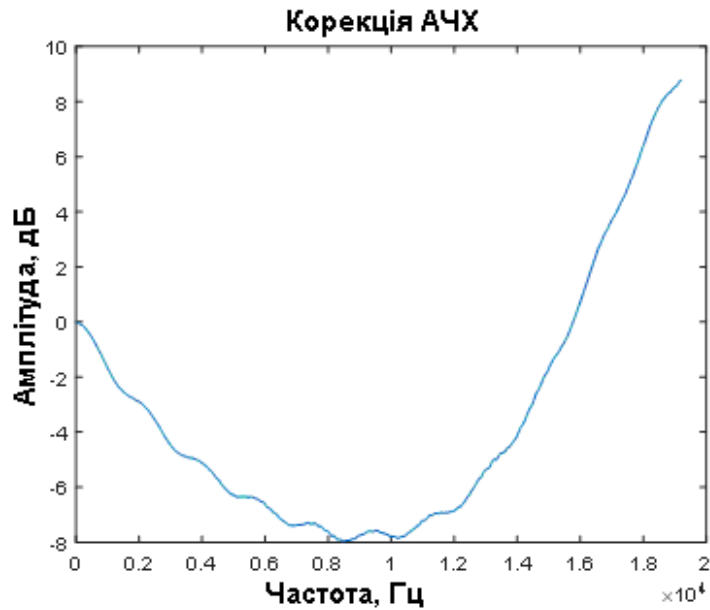


Рисунок 4.22 – АЧХ фільтра корекції для тестового сигналу типу "білий шум"

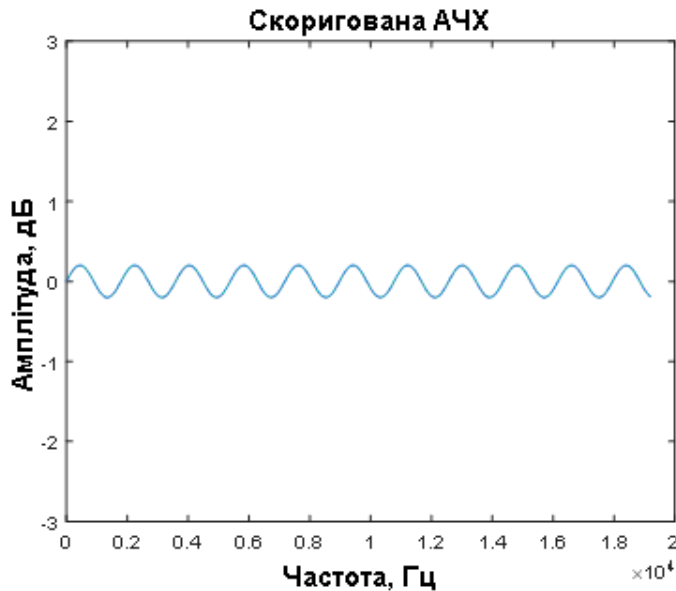


Рисунок 4.23 – Скоригована АЧХ звукового тракту по рожевому шуму

Спостерігаючи графіки на рис.4.23 і рис.4.24 можна відмітити що нерівномірність коригованої АЧХ не більше 0,2 дБ.

Для більш точної корекції необхідно збільшити число смуг еквалайзера, тобто роздільну здатність системи по частоті.

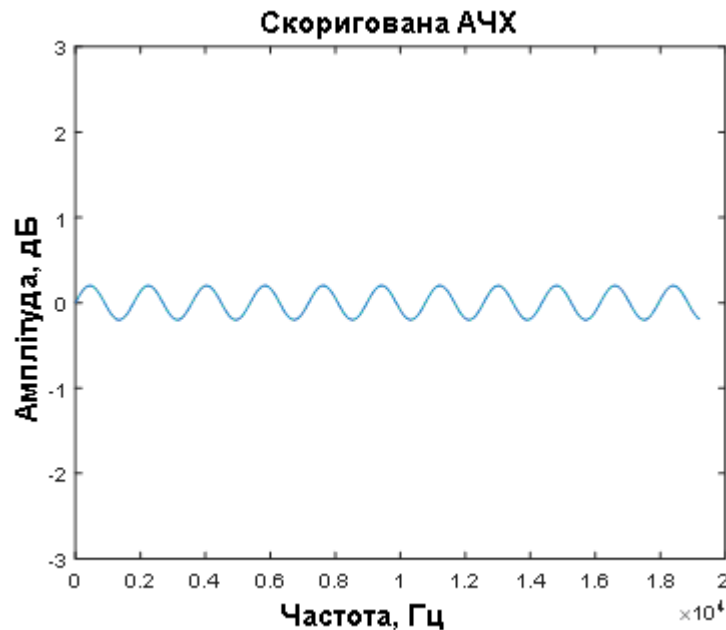


Рисунок 4.24 – Скоригована АЧХ звукового тракту по білому шуму

Отже, завдання на кваліфікаційну роботу виконано.

4.5 Висновки по розділу 4

На етапі дослідження відгуків звукового тракту зрозуміло, що найбільш доцільним є застосування випробувальних сигналів з невеликою нерівномірністю обвідної спектра: білий шум або рожевий шум.

Аналізуючи отримані характеристики можна відзначити характерну особливість, що пов'язана з нерівномірністю АЧХ фільтра корекції. Дана нерівномірність пояснюється частковим перекриттям смуг еквалайзера корекції.

Для більш точної корекції необхідно збільшити число смуг еквалайзера, тобто роздільну здатність системи по частоті.

ВИСНОВКИ

Сучасні звукові пристрої проектуються таким чином, щоби майже у всіх умовах експлуатації залишатися на лінійній ділянці амплітудної характеристики. Нелінійні спотворення виникають лише перевантаженні великими рівнями сигналу. В таких умовах на великих гучностях вже сам орган слуху людини вносить нелінійні спотворення і є найслабкішою ланкою відтворення звуку. Отже можна вважати, що сучасні звукові траки є лінійними.

Головними спотвореннями в сучасних звукових трактах є нерівномірності АЧХ і нелінійності ФЧХ. Якість відтворення звуку залежить від усіх ланок тракту – від студійного мікрофона в студійному приміщенні до гучномовців і приміщення для прослуховування. Тому є актуальною задача створення, удосконалення та застосування методів наскрізної корекції АЧХ і ФЧХ звукових трактів.

У більшості робіт, що описують таку апаратуру, особливості роботи і граничні можливості систем калібрування не розглядаються. Питання порівняння різних методів еквалізації, не розглядаються взагалі.

У кваліфікаційній роботі реалізовано і порівняно поширені системи і методи коригування частотної характеристики. При цьому порівнюються як об'єктивні, так і суб'єктивні параметри систем корекції.

Експериментально визначені вимоги до параметрів, можливостей і обмежень систем компенсації спотворень частотних характеристик, характеристик тестових сигналів, до роздільної здатності компенсаційних фільтрів.

В результаті розробки і обґрунтування методу компенсації частотних спотворень в звукових трактах виявлено таке. Система компенсації лінійних (амплітудно-частотних і фазо-частотних) спотворень повинна містити наступні вузли: еквалайзер АЧХ або комплексної частотної характеристики; генератор тестового сигналу із заздалегідь відомими характеристиками; блок

аналізу (порівняння) характеристик тестового (еталонного) та прийнятого (зі спотвореннями АЧХ та ФЧХ) сигналу; вимірювальний мікрофон, або мікрофон з відомими характеристиками спрямованості, АЧХ і ФЧХ.

Головна відмінність методів корекції буде у виборі виду тестового сигналу, виборі методу аналізу і порівняння тестового і прийнятого сигналів.

Розроблено методику і програми для формування випробувальних сигналів у вигляді білого шуму і колірною шуму із забарвленим спектром. Методика генерації має три основних етапи: формування білого шуму, обробка комплексних коефіцієнтів спектру у частотній області, обробка колірною шуму для забезпечення 0-го середнього і 1-го СКВ.

В результаті отримано набір з чотирьох скриптів MATLAB, який забезпечує формування рожевого, червоного, синього і фіолетового шуму. Шуми відрізняються різним нахилом обвідної спектральної щільності потужності СЩП.

Отримано СЩП і АКФ для сформованих сигналів. Візуальне спостереження ділянок СЩП підтвердило потрібну швидкість нахилу сформованого сигналу та їхню інваріантність до масштабу. Отримані АКФ підтверджують гіпотезу про довгострокову кореляцію шуму при $\alpha < -1$.

Отримано загальний набір функцій для багатосмугового еквалайзера. Характеристики фільтрів визначають центральну частоту, частоту дискретизації; добротність і коефіцієнт передачі сигналу на середній частоті.

Отримано формули для коефіцієнтів лінійного БІХ-фільтра II-го порядку. В системі MATLAB реалізовано цифровий еквалайзер з відповідними характеристиками. Побудовано АЧХ реалізованого в MATLAB десятисмугового еквалайзера.

У дослідженні за допомогою розробленого в MATLAB програмного забезпечення формувався випробувальний сигнал у вигляді білого або забарвленого шуму, який відтворювався активною акустичною системою АС, під'єднаною до звукової карти ПК. Звукові сигнали приймалися мікрофоном, який не є вимірювальним. Сигнал мікрофона оброблявся в ПК програмою

MATLAB, в результаті чого отримані графіки реалізацій сигналу, відгуку системи, АЧХ сигналу і спектр відгуку, а також спотворення АЧХ системи озвучення.

Розрахунок АЧХ тестового сигналу і відгуку, а також спотворень і АЧХ звукового тракту проведений шляхом порівняння спектра відгуку звукового тракту зі спектром опорного сигналу.

На етапі дослідження відгуків звукового тракту зрозуміло, що найбільш доцільним є застосування випробувальних сигналів з невеликою нерівномірністю обвідної спектра: білий шум або рожевий шум.

Аналізуючи отримані характеристики можна відзначити характерну особливість, що пов'язана з нерівномірністю АЧХ фільтра корекції. Дана нерівномірність пояснюється частковим перекриттям смуг еквалайзера корекції.

Для більш точної корекції необхідно збільшити число смуг еквалайзера, тобто роздільну здатність системи по частоті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. С.И. Алябьев, А.В. Выходец, Р. Гермер и др. Радиовещание и электроакустика / под ред. Ю.А. Ковалгина. – Москва: Радио и связь, 2000. – 792 с.
2. Алдошина И.А. Электроакустика и звуковое вещание / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов. – Москва: Радио и связь, 2007. – 872 с.
3. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – Москва: Связь, 1978. – 272 с.: ил.
4. Дуглас Сельф. Проектирование усилителей мощности звуковой частоты. – ДМК Пресс, 2009. – 286 с.
5. Никамин В.А. Цифровая звукозапись. Технология и стандарты..- СПб: Наука и техника, 2002. –256 с.
6. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. СПб.: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2003. – 224 с.
7. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. Цифровое кодирование звуковых сигналов. – СПб,: Корона Принт., 2004. – 240 с.
8. Акустика студий звукового и телевизионного вещания. Системы озвучивания: учебно-методическое пособие/сост. Л.Г. Стаценко, Ю.В. Паскаль. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006 – 96 с.
9. Давыдов В.В. Акустика помещений / В.В. Давыдов. – Санкт – Петербург: Санкт–Петербургский институт кино и телевидения, 1995. – 95 с.
10. Ленк Дж. Справочник по проектированию электронных схем. – К.: Техника, 1979. – 208 с.
11. Дьяконов, В. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. Самое подробное описание последних версий MATLAB, новые возможности Simulink / В. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 799 с.

12. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
13. Снеддон, И. Преобразование Фурье / И. Снеддон. – М.: Издательство иностранной литературы, 1955. – 668 с.
14. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.
15. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.
16. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. – New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.
17. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.
18. V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu. Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.

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

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

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

22. Буйницький Д.В. Аппаратно-программный комплекс для исследования акустических устройств // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 92-93.

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

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

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

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

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

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

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

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

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