

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий(магістерський)

Генератор рожевого шуму для тестування звуку

(тема)

Виконав:

студент VI курсу, групи СКСм-22-2
Пупловський Д.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Комп'ютерна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник: Литвинова Є.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри Чумаченко С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий(магістерський)
Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Комп'ютерна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Пупловському Дмитру Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Генератор рожевого шуму для тестування звуку

затверджена наказом по університету від “ 03 ” _____ 11 _____ 2023 р. № 1282Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19.01.2024

3. Вхідні дані до роботи _____

Функція – генерація рожевого шуму для тестування звуку;

Програмний засіб NI Multisim для моделювання радіотехнічних пристроїв;

Транзистор BC548, операційний підсилювач TL072

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Аналіз предметної галузі та постановка задачі дослідження.

Розробка структури цифрового генератора рожевого шуму.

Розробка схеми цифрового генератора рожевого шуму.

Реалізація цифрового генератора за допомогою програмного застосунку.

Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Презентація, 18 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	06.11.2023	
2	Аналіз предметної галузі та постановка задачі проектування	06.11.2023-15.11.2023	
3	Огляд літератури за темою роботи	16.11.2023-30.11.2023	
4	Розробка схеми роботи цифрового генератора рожевого шуму	01.12.2023-15.12.2023	
5	Реалізація схеми цифрового генератора	16.12.2023-31.12.2023	
6	Оформлення пояснювальної записки	02.01.2024 -10.01.2024	
7	Оформлення графічного матеріалу	11.01.2024 -15.01.2024	
8	Представлення кваліфікаційної роботи в ДЕК	19.01.2024	

Дата видачі завдання _____

Студент 
_____ (підпис)

Керівник роботи 
_____ (підпис)

проф. Литвинова Є.І.
_____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 62 сторінки, 41 рисуноків, 1 таблицю, 20 джерел за переліком посилань.

РОЖЕВИЙ ШУМ, ФІЛЬТРАЦІЯ, ЦИФРОВИЙ ГЕНЕРАТОР РОЖЕВОГО ШУМУ

Кваліфікаційна робота спрямована на розробку цифрового генератора рожевого шуму, який дозволяє збільшити швидкодію тестування звуку та зменшити енерговитрати. Вирішено задачі, пов'язані з розробкою структури цифрового генератора рожевого шуму, схеми електричної принципової, здійснено моделювання ЗдБ/октавного фільтру. Схема генератора рожевого шуму на основі TL072, або RC4558 дає можливість отримати лінійну відповідь в межах від 22.7 Гц до 19.6 кГц.

ABSTRACT

The explanatory note contains 62 pages, 41 figures, 1 table, 20 sources according to the list of references.

PINK NOISE, FILTERING, DIGITAL PINK NOISE GENERATOR

The qualification work is aimed at the development of a digital generator of pink noise, which allows increasing the speed of sound testing and reducing energy consumption. The tasks related to the development of the structure of the digital pink noise generator, the electrical principle scheme, and the modeling of the 3dB/octave filter were solved. The circuit of the pink noise generator based on TL072 or RC4558 makes it possible to obtain a linear response in the range from 22.7 Hz to 1

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Визначення флуктуації	9
1.2 Природа шуму	10
1.3 Сигнали	11
1.4 Фільтри	15
1.5 Фільтр низьких частот згладжування	18
1.6 Фільтр Баттерворта	23
1.7 Фільтр Бесселя	24
1.8 Активні фільтри	27
1.9 VCVS фільтр	29
1.10 Фільтр Allpass	30
1.11 Цифрова обробка сигналів	31
2. КОЛИВАННЯ В ШУМІ	32
2.1 Операційні підсилювачі	32
2.2 Ідеальний операційний підсилювач	34
2.3 Спектральні густини шумів	35
2.4 Цифрова генерація сигналів	43
3. ЦИФРОВИЙ ГЕНЕРАТОР РОЖЕВОГО ШУМУ	46
3.1 NI Multisim для моделювання радіотехнічних пристроїв	46
3.2 Генератор рожевого шуму	47
3.3 Альтернативний ЗдБ / октавний фільтр та його дослідження	51
3.4 Фільтри рожевого шуму ІЕС	57
ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62
ДОДАТОК А Графічна частина	63

ВСТУП

Майже в кожній області вимірювання кінцева межа виявлення слабких сигналів задається шумом – небажані сигнали, які затьмарюють бажаний сигнал. Навіть якщо вимірювана величина не є слабкою, наявність шуму погіршує точність вимірювання.

Деякі форми шуму неминучі (наприклад, реальні коливання величини, що вимірюється), і їх можна подолати лише за допомогою методики усереднення сигналу та звуження смуги пропускання. Інші форми шуму (наприклад, радіочастотні перешкоди та «контури заземлення») можна зменшити або усунути за допомогою різноманітні прийоми, включаючи фільтрацію та ретельну увагу до конфігурації проводки та розташування деталей. Нарешті, є шум, що виникає в самому процесі підсилення, і це можна зменшити за допомогою техніки конструкції підсилювача з низьким рівнем шуму. Хоча методи усереднення сигналу часто можуть бути використані для порятунку сигналу, схованого в шумі, тому варто почати з системи, яка вільна від запобігання перешкод і має найменший шум підсилювача.

Кожен шум має власну спектральну густину, яка відображає розподіл енергії шуму по різних частотах та використовується для опису властивостей в сигналах та системах. Спектральний аналізатор розбиває сигнал на його складові частоти та вимірює енергію кожної з них. Аналіз випадкових сигналів знаходить використання в галузі радіотехніки та зв'язку. Існуючі методи оцінювання спектрів дискретизованих сигналів базуються на використанні швидкого перетворення Фур'є, тоді як класичний підхід до цифрового спектрального аналізу сигналів дає можливість отримати достовірні оцінки для класу досліджуваних сигналів, що задовольняють умови стаціонарності, ергодичності та наявності масиву даних великого обсягу [1-3].

Шуми використовуються у різних контекстах та галузях для різних цілей. В статистичних дослідженнях шуми можуть використовуватися для

створення випадкових величин або сценаріїв, які відображають невизначені аспекти досліджень, в експериментальних можуть бути додані до сигналів або даних для вивчення стійкості алгоритмів чи систем до випадкових впливів. Також додавання шумів може допомогти зробити візуальні ефекти більш природними та реалістичними. У передачі даних через канали із завадами, шум використовується для корекції помилок у прийнятому сигналі.

У галузі акустики широкого використання набули для аналізу та моделювання різних акустичних сценаріїв. За допомогою шуму ще виконують забезпечення безпеки інформації та підвищення стійкості шифрів.

Метою роботи є розробка цифрового генератора рожевого шуму, що дозволить збільшити швидкодію тестування звуку та зменшити енерговитрати.

Задачі роботи:

- розробка структури цифрового генератора рожевого шуму;
- розробка схеми електричної принципової цифрового генератора рожевого шуму;
- тестування цифрового генератора рожевого шуму.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Визначення флуктуації

Основними джерелами рожевого шуму в електронних пристроях майже завжди є повільні флуктуації властивостей матеріалів конденсованого стану пристроїв. У багатьох випадках відомі конкретні джерела коливальних процесів. До них відносяться флуктуючі зміни дефектів у металах, флуктуючі заселеності пасток у напівпровідниках і флуктуючі доменні структури в магнітних матеріалах.

Фізичні величини, що характеризують макроскопічне тіло, яке знаходиться у стані рівноваги, практично завжди з великою точністю дорівнюють своїм середнім значенням. Але відхилення від середнього значення все ж таки мають місце, у зв'язку із чим виникає питання про знаходження розподілу ймовірностей цих відхилень [1].

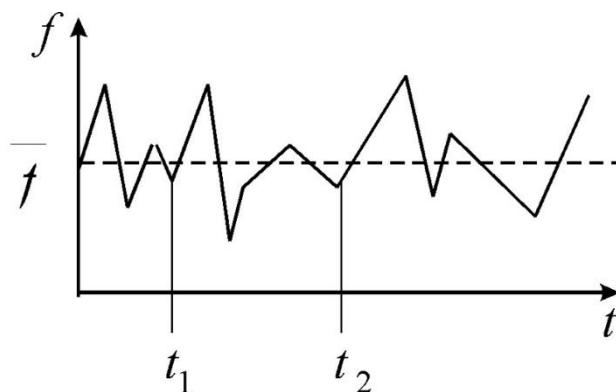


Рисунок 1.1 – Величина флуктуації

Деяка фізична величина випадковим чином змінюється з часом. Доцільно ввести середнє значення як (1.1):

$$\bar{f} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (1.1)$$

Реальне значення величини f практично завжди відрізняється від \bar{f} . Такі випадкові відхилення фізичних величин від їх середніх значень і називаються флуктуаціями.

Прикладів флуктуючих величин можна навести чимало, і не тільки у фізиці. Флуктує зріст людини, тривалість життя, густина населення у певній місцевості. З флуктуаціями пов'язані шумові характеристики приладів та розповсюдження радіохвиль.

1.2 Природа шуму

Струм, що протікає через опір, лампу або транзистор, відчуває невеликі коливання навіть тоді, коли всі джерела ЕРС строго постійні. У деяких випадках це явище викликається зміною провідності між окремими точками опорів, в основному ж воно пов'язане зі статистичними характером руху носіїв струму. Коливання струму створюють на затискачах опорів, електродах ламп і транзисторів флуктуації напруги - шуми. До таких шумів відносяться тепловий, дробовий, генераційно-рекомбінаційний і фліккер- шум[14].

Для будь-якої передачі даних справедливим є твердження, що отриманий сигнал складається з переданого сигналу, модифікованого різними спотвореннями, які вносяться самою системою передачі, а також з додаткових небажаних сигналів, що взаємодіють з вихідної хвилею під час її поширення від точки передачі до точки прийому. Ці небажані сигнали прийнято називати шумом. Шум є основним чинником, що обмежує продуктивність систем зв'язку.

Шуми можна розділити на чотири категорії:

- тепловий шум;
- інтермодуляційні шуми;
- перехресні перешкоди;
- імпульсні перешкоди.

Розглянемо основні види шумів. "Джонсоновской шум". Резистор на платі генерує на своїх виводах деяку напругу шуму, відому як "шум Джонсона" (тепловий шум). У нього горизонтальний частотний спектр, тобто однакова потужність шуму на всіх частотах (до певної межі). Шум з горизонтальним спектром називають "білим шумом"[10].

Таким чином Уш.ефф. це те, що вийде на вході абсолютно безшумного фільтра зі смугою пропускання B , якщо подати на його вхід напругу, породжену резистором при температурі T . При кімнатній температурі 293 К:
 $B / \text{Гц} = 1,27B / \text{Гц}$.

Шум Джонсона встановлює нижню межу напруги шумів будь-якого детектора, джерела сигналу або підсилювача, що має резистивні елементи. Активна складова повного опору джерела породжує шум Джонсона; так само діють резистори ланцюгів зсуву і навантаження підсилювача.

Тепловий шум - рівноважний шум, обумовлений тепловим рухом носіїв заряду в провіднику, в результаті чого на кінцях провідника виникає флюктуюча різниця потенціалів. Спектральна щільність теплового шуму не залежить від частоти, тому його можна розглядати в широкому діапазоні частот як білий шум.

1.3 Сигнали

Синусоїдальні сигнали є найпопулярнішими сигналами; це те, що ми отримуємо від розетки. Якщо хтось каже щось на кшталт «взяти сигнал 10 мкВ на 1 МГц», вони мають на увазі синусоїду. Математично ми маємо напругу, яка описується як:

$$V = A \sin 2 \pi f t , \quad (1.2)$$

де A називається амплітудою, а f - частотою герц (цикли в секунду). Синусоїда виглядає як хвиля (рис. 1.2). Іноді важливо знати значення сигналу в деякій довільний момент часу $t = 0$, в якому ми можемо побачити фазу ϕ у виразі (1.3):

$$V = A \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1.3)$$

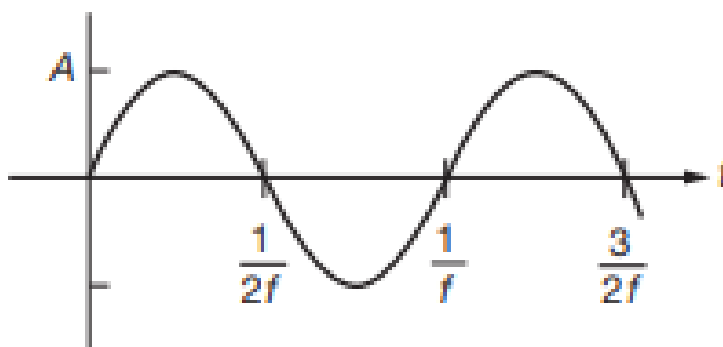


Рисунок 1.2 – Синусоїда амплітуди A і частоти f

Іншим варіантом цієї простої теми є використання кутової частоти, яка виглядає так:

$$V = A \sin \omega t \quad (1.4)$$

Тут ω — кутова частота, виміряна в радіанах. Пам'ятаємо про важливе співвідношення $\omega = 2\pi f$. Велика заслуга синусоїд (і причина їх багаторічної популярності) полягає в тому, що вони є рішеннями до певних лінійних диференціальних рівнянь, які описують багато явищ у природі, а також властивостей лінійних кіл. Лінійна схема має властивість, що її вихід, керований сумою двох вхідних сигналів, дорівнює сумі її окремих вихідних сигналів, коли керується по черзі кожним вхідним сигналом; тобто, якщо $O(A)$ представляє вихід, коли керується сигналом A , то схема є лінійною якщо $O(A + B) = O(A) + O(B)$.

Лінійний контур завжди відповідає синусоїді, хоча загалом фаза й амплітуда змінюються. Жоден інший періодичний сигнал не може зробити це твердження. Насправді стандартною практикою є опис поведінки схеми за допомогою її частотної характеристики, під якою ми маємо на увазі те, як

схема змінює амплітуду застосованої синусоїди як функцію частоти. Стереопідсилювач, наприклад, характеризується «плоскою» частотною характеристикою в діапазоні принаймні від 20 Гц до 20 кГц. Діапазон синусоїдальних частот, з якими ми зазвичай маємо справу від кількох герц до кількох десятків мегагерц. Можна генерувати нижчі частоти до 0,0001 Гц або нижче з ретельно побудованими схемами, якщо це необхідно. Вищі частоти, до 2000 МГц (2 ГГц) і вище, можуть бути створені, але вони вимагають спеціальних ліній передачі. Крім того, ми маємо справу з мікрохвильовими печами, для яких звичайні дротові схеми з елементами зосереджених схем стають непрактичними, а екзотичні хвилеводи або «смугові» використовуються замість них.

Крім амплітуди, існує ще кілька способів, що характеризують величину синусоїди або будь-якого іншого сигналу. Іноді це визначено амплітудою від піку до піку (амплітуда pp), а саме вдвічі більше амплітуди. Інший спосіб - середньоквадратична амплітуда, яка є $V_{rms} = (1/\sqrt{2})A = 0,707A$ (це лише для синусоїд; відношення pp до середньоквадратичного буде іншим для інших форм сигналу). Це звичайний метод, тому що rms напруга – це те, що використовується для обчислення потужності. Номінальна напруга на клемі настінної розетки (у США) становить 120 вольт середньоквадратичного значення, 60 Гц.

Як порівняти відносні амплітуди двох сигналів? Наприклад, що сигнал X такий же великий, як сигнал Y . Це корисно для багатьох цілей. Але оскільки ми часто маємо справу з такими великими співвідношеннями, краще використовувати логарифмічну міру, а для цього використовується децибел. За визначенням, відношення двох сигналів у децибелах (дБ) становить:

$$dB = 10 \log_{10} P_1 / P_2 \quad (1.5)$$

де P_1 і P_2 представляють потужність у двох сигналах. Однак ми часто маємо справу з амплітудами сигналу, у цьому випадку ми можемо виразити відношення двох сигналів, які мають таку саму форму хвилі:

$$dB = 20 \log_{10} A_1 A_2 \quad (1.6)$$

де A_1 і A_2 - дві амплітуди сигналу. Отже, один сигнал удвічі перевищує амплітуду іншого +6 дБ відносно нього, оскільки $\log_{10} 2 = 0,3010$. Сигнал 10 більше +20 дБ; сигнал в одну десяту від величини -20 дБ.

Хоча децибели зазвичай використовуються для визначення співвідношення двох сигналів, іноді вони використовуються як абсолютна міра амплітуди. Приймають певний рівень опорного сигналу та виражають будь-який інший рівень у децибелах відносно нього. Існує кілька стандартних рівнів, що використовуються таким чином; найпоширенішими посиленнями є 0 дБВ (1 В середньоквадратичного значення); 0 дБм (напруга, що відповідає 1 мВт в деякому припущеному опорі навантаження, який для радіочастот зазвичай становить 50 Ω , але для аудіочастот 600 Ом; відповідні амплітуди 0 дБм під час навантаження відповідають цим імпедансам, тоді 0,22 В середньоквадратичного значення та 0,78 В середньоквадратичного значення; і невелика напруга шуму, створювана резистором при кімнатній температурі. Крім них, існують еталонні амплітуди, що використовується для вимірювань в інших галузях техніки та науки. Наприклад, в акустиці 0 дБ SPL (рівень звукового тиску) – це хвиля, середньоквадратичне значення тиску якої становить 20 мкПа (тобто 2×10^{-10} атм); в аудіокомунікації рівні можуть бути вказані в dB_{rnC} (відносний еталонний шум, зважений за частотою за «кривою C»). Визначаючи амплітуди таким чином, найкраще вказати конкретну еталонну амплітуду 0 дБ[18];

1.4 Фільтри

Часто потрібні фільтри з більш плоскими смугами пропускання. Це трапляється щоразу, коли сигнали повинні бути відфільтровані від інших заважаючих сигналів поблизу за частотою. Очевидне наступне питання полягає в тому, чи можемо (скажімо, шляхом каскадування кількох ідентичних фільтрів низьких частот) створити наближення до ідеальної «мурованої» частотної характеристики низьких частот (рис. 1.3).

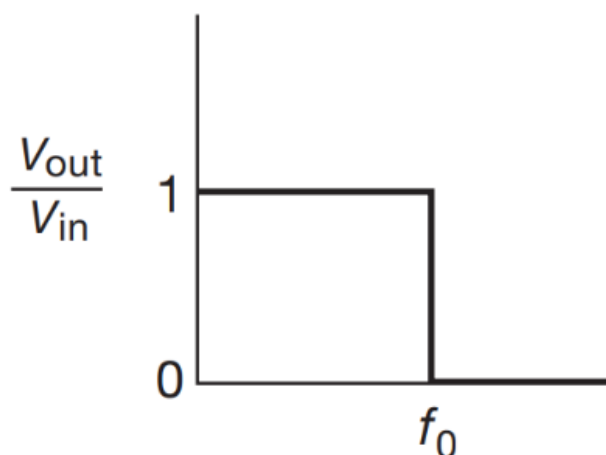


Рисунок 1.3 – Ідеальний фільтр низьких частот

Просте каскадування не спрацює, тому що вхідний опір кожної секції буде серйозно навантажувати попередню секцію, погіршуючи відгук. Але з буферами між кожною секцією (або організацією, щоб кожна секція мала набагато вищий імпеданс, ніж попередня), це здається можливим. Тим не менш, відповідь ні. Каскадні RC-фільтри справді створюють крутий кінцевий спад, але «коліно» кривої реакції від частоти не загострюється.

Щоб пояснити це графічно, показані кілька графіків залежності коефіцієнта підсилення (тобто V_{out}/V_{in}) від частоти для фільтрів низьких частот, побудованих з 1, 2, 4, 8, 16 і 32 ідентичних RC секцій, ідеально буферизованих (рис. 1.4). Перший графік показує ефект каскадування кількох секцій RC, кожна зі своєю точкою 3 дБ на одиничній частоті. Коли додається

більше секцій, загальна точка 3 дБ знижується за частотою. Щоб справедливо порівняти характеристики фільтра, спад частоти окремих секцій слід налаштувати таким чином щоб загальна точка 3 дБ завжди знаходилася на одній частоті. З цієї причини всі інші графіки «нормовані» за частотою, що означає, що точка -3 дБ (або точка розриву) знаходиться на частоті 1 рад/сек (або 1 Гц). Щоб визначити відгук фільтра, точка зриву якого встановлена на іншій частоті, просто помножується значення на осі частот на фактичну частоту зриву f_c . Загалом, будемо триматися з логарифмічним графіком частотної характеристики, коли будемо говорити про фільтри, оскільки він найбільше розповідає про частотну характеристику. Це дає змогу побачити наближення до кінцевого нахилу спаду, а також дозволяє зчитувати точні значення розрідження. У цьому випадку (каскадні RC-секції) нормалізовані графіки (рис 1.4 б), рис. 1.4 в)) демонструють м'яке коліно, характерне для пасивних RC-фільтрів. Цікаво також поглянути на фазовий зсув RC каскаду низьких частот, знову скоригований, щоб поставити загальні 3 дБ на одиничній частоті.

Відстаючий фазовий зсув досягає $90^\circ \times n$ асимптотично для n каскадних секцій, як і можна було очікувати (плавний перехід від 0° до 90° відстаючого фазового зсуву однієї RC-секції). Однак, можливо, фазовий зсув у точці 3 дБ прогресивно зростає з більшими каскадами. Характеристики фазового зсуву є важливими, оскільки вони визначають внутрішньосмугове спотворення сигналу фільтра[18].

Але на відміну від ідеальних конденсаторів, справжні конденсатори мають деякі додаткові властивості «паразитичні» елементи – найбільш ефективна серія опору (ESR) і ефективної послідовної індуктивності (ESL). Тому на дуже високих частотах (де ESR конденсатора стає порівнянним з ємнісним реактивним опором $1/\omega C$), справжній RC-фільтр припиняє скочуватися.

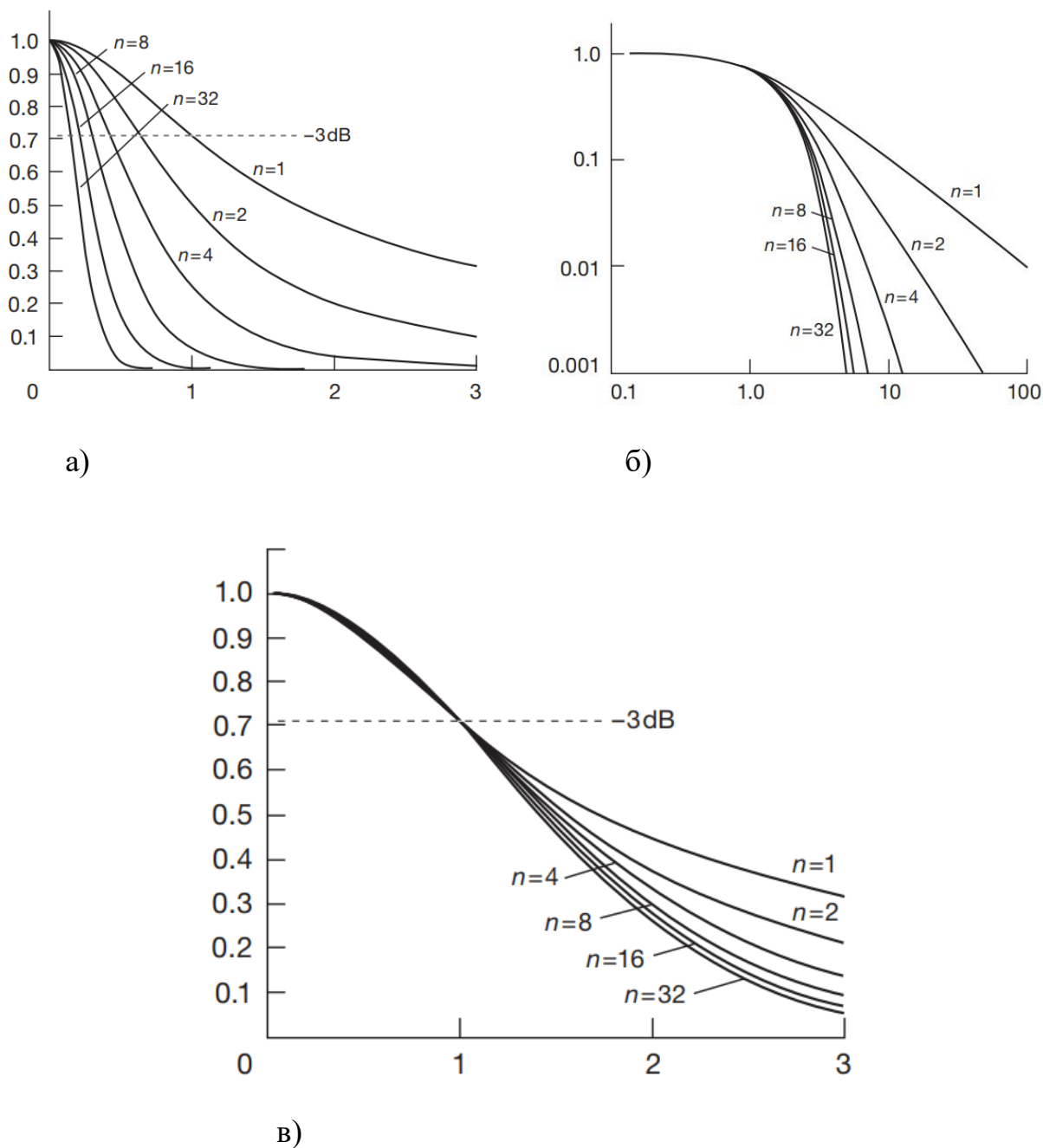


Рисунок 1.4 – Частота відгуків багатосекційних RC фільтрів

Графіки рис. 1.4 а) і б) є лінійними, тоді як в) є логарифмічними. Відповіді фільтра в рис. 1.4 б) і в) були нормалізовані (або масштабовані) для ослаблення 3 дБ на одиничній частоті.

1.5 Фільтр низьких частот згладжування

Аналоговий сигнал можна оцифрувати шляхом періодичної вибірки його амплітуди та перетворення кожного зразка на числову величину. Бачимо, що процес може вводити артефакти як через кінцеву точність, з якою квантуються амплітуди, так і через кінцеву швидкість, з якою беруться ці зразки.

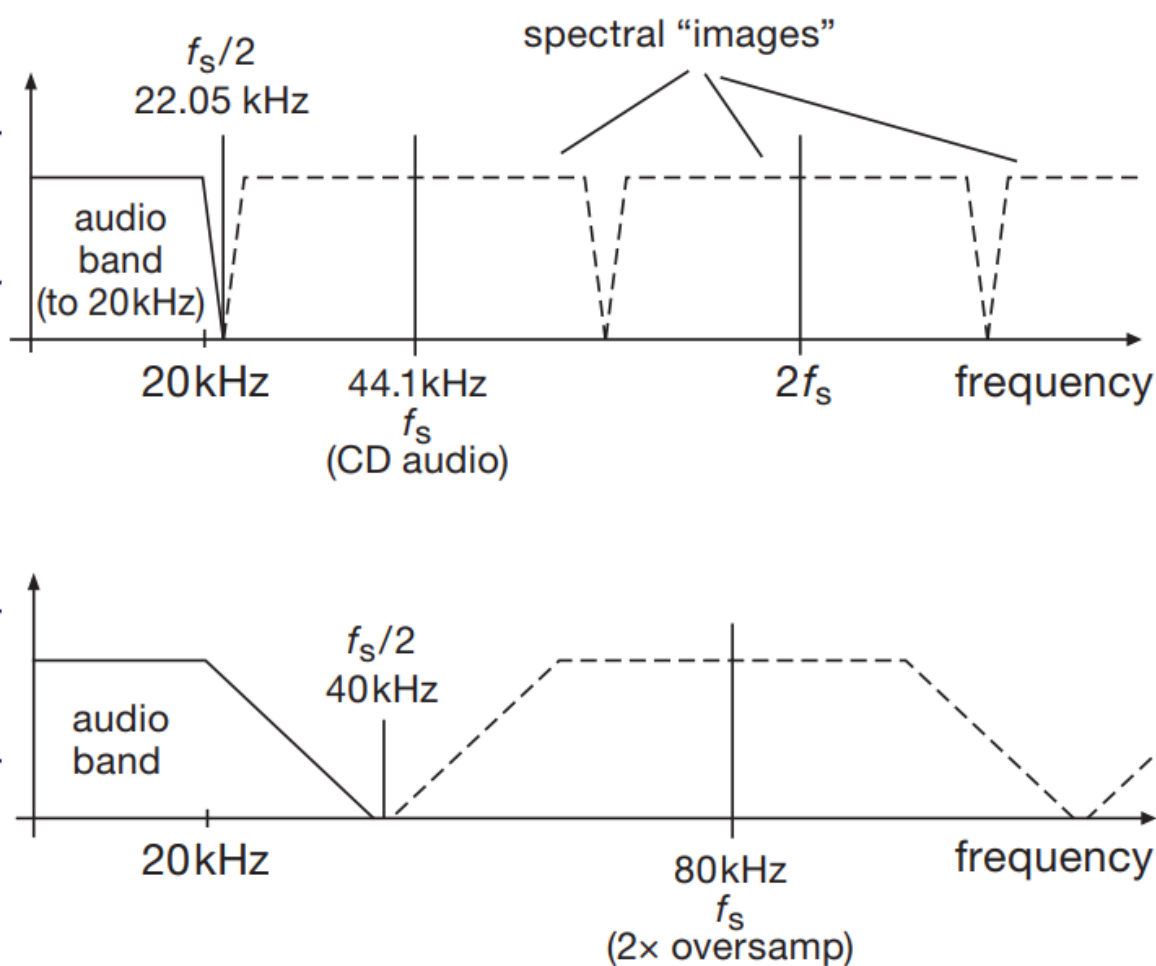


Рисунок 1.5 – Спектр аналогового сигналу, який періодично оцифровувався («відбирався») на частоті дискретизації f_s

Ці артефакти можна привести до будь-якої необхідної міри шляхом адекватного вибору глибини квантування (точність амплітуди) і швидкості

(частота дискретизації). Важливим фактом для цього прикладу фільтра є те, що сигнал, який оцифровується, не повинен містити сигналів, частота яких перевищує половину частоти дискретизації f_s ; це відоме як критерій Найквіста. Зазвичай це досягається шляхом пропускання попередньо оцифрованих сигналів через низькочастотний фільтр «згладжування», відсікання якого забезпечує ретельне ослаблення сигналів вище частоти Найквіста $f_s/2$. Це зазвичай вимагає різкого відсікання фільтра, тому що в іншому випадку доведеться перейти до набагато вищої частоти дискретизації, щоб уникнути сигналів, які проходять через м'яке відсікання; крім того, потрібен плоский фільтр по всій бажаній смузі пропускання сигналу[15].

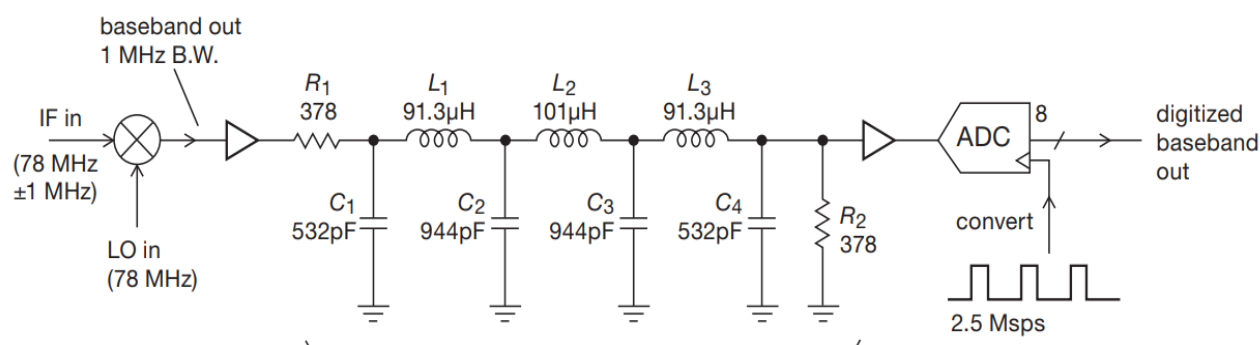


Рисунок 1.6 – Чіткий 7-секційний LC-фільтр низьких частот

Фільтр запобігає накладенню спектрів у цьому радіоастрономічному приймачі, усуваючи будь-які частоти сигналу вище частоти Найквіста (1,25 МГц або половина частоти дискретизації).

У цьому прикладі приймача радіотелескопа (рис. 1.6) використовується змішувач (пристрій, який множить два сигнали разом для отримання вихідного сигналу), щоб перетворити діапазон частот сигналу 2 МГц із центром на 78 МГц (діапазон «IF») у смугу з центром на постійному струмі (відома як «основна смуга»). Змішувач може виконувати такий вид зсуву

частоти, оскільки добуток двох синусоїд є парною хвилею на сумарній та різницевої частотах:

$$\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \{ \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t \}$$

(1.7)

Тут смуга сигналу керує одним входом змішувача, а фіксований генератор на частоті 78 МГц («локальний осцилятор» або LO) керує іншим входом. Різницева частота на виході змішувача є основною смугою, в якій смуга від постійного струму до 1 МГц містить сигнали. Підсилили базову смугу, а потім пропустили її через серйозний фільтр згладжування, зокрема «7-секційний LC-фільтр низьких частот Чебишева з частотою зрізу 1,0 МГц і 0,1 дБ пульсаціями від піку до піку». Фільтр із вхідним і вихідним імпедансами (378 Ом), щоб скористатися перевагами регульованих індукторів стандартного значення, видаляє компоненти сигналу вище 1 МГц, і ця відфільтрована базова смуга посилюється і оцифровується (пристроєм, позначеним як АЦП – аналого-цифровий перетворювач) із частотою дискретизації 2,5 Msps (мегавибірки/с). Відповідна частота Найквіста 1,25 МГц знаходиться далеко в смузі зупинки дуже різкого фільтра низьких частот. Насправді, розрахована та виміряна продуктивність узгоджуються, демонструючи, що вхідні сигнали при цьому зменшуються на 20 дБ на цій частоті, та що найгірші накладені сигнали (при 1,5 МГц) зменшуються додатково на 16 дБ. Це приголомшлива продуктивність для фільтра, особливо в порівнянні з RC-фільтром, де загасання становить $1.25 f_c$ лише 1,6 дБ відносно 1,6 дБ. Графічно показано порівняння пари фільтрів: 7-секційного RC-фільтра з відсіченням 1 МГц та фільтра Чебишева (рис.1.7, рис. 1.8).

«Хвильованість» смуги пропускання фільтра Чебишева (+0 дБ/−0,1 дБ, або ±0,6% за амплітудою) легше побачити, але деталі загасання смуги затримки втрачаються.

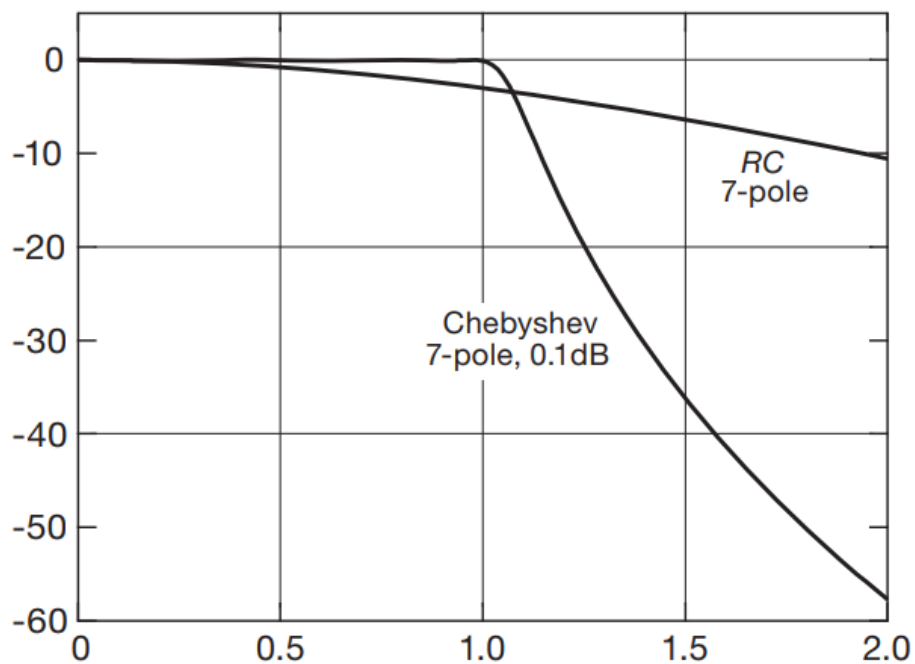


Рисунок 1.7 – М'який спад 7-секційного RC-фільтра з відсіченням 1 МГц

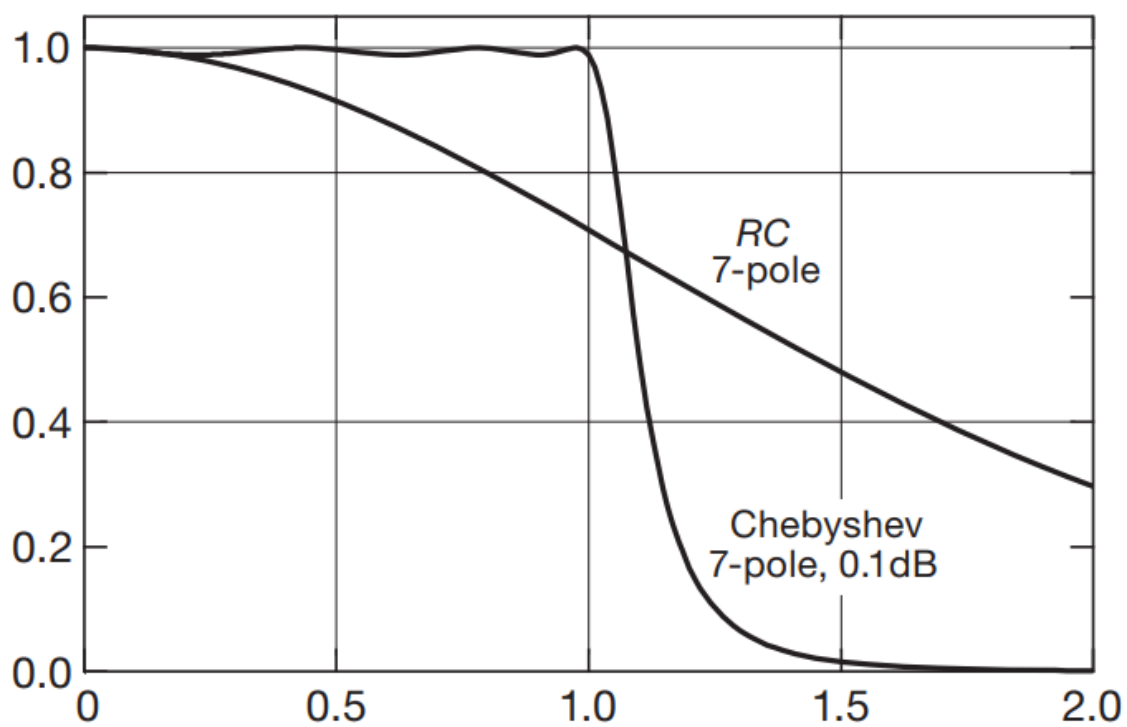


Рисунок 1.8 – Пара фільтрів, нанесена на лінійний масштаб

Синтез фільтрів з пасивних компонентів (R , L і C) є високорозвиненим напрямом, якому присвячено багато робіт, доповненим елегантними програмними засобами, що робить такі конструкції рутинним завданням. Однак індуктори як елементи схеми часто залишають бажати кращого. Вони часто громіздкі та дорогі, відходять від ідеалу через те, що є недоліки: значний послідовний опір, нелінійність, розподілена ємність обмотки та сприйнятливості до магнітних перешкод. Нарешті, класичні фільтри, зроблені з L і C , не налаштовуються електрично. Потрібен спосіб створення безіндукторних фільтрів із характеристиками ідеальних фільтрів RLC. В ідеалі існує можливість налаштування за допомогою аналогової напруги або зміни частоти імпульсів. Використовуючи операційні підсилювачі як частину конструкції фільтра, можна синтезувати будь-яку характеристику фільтра RLC без використання в індукторах. Такі безіндукторні фільтри відомі як активні фільтри через включення активного елемента (підсилювача). Ще один клас активного фільтра – фільтр із перемиканим конденсатором – який додає MOSFET-перемикачі для створення, по суті, частотно-регульованого резистора. Вони забезпечують продуктивність, подібну до продуктивності стандартного активного фільтра (іноді його називають фільтром безперервного часу), але з додатковою функцією точного налаштування його характеристичних точок переривання частоти (із зовнішньою тактовою частотою) в широкому діапазоні. Однак ця можливість налаштування має свою ціну, а саме певний шум перемикання та зменшений динамічний діапазон.

Активні фільтри можна використовувати, щоб зробити низькочастотні, високочастотні, смуговий фільтри з можливістю вибору типу фільтра відповідно до важливих особливостей, наприклад, максимальна рівнинність смуги пропускання, крутизна або рівномірність затримки часу в порівнянні з частотою. Крім того, «всепрохідні фільтри» з плоскою амплітудою реакції, можна зробити індивідуально залежними фази від частоти (вони також відомі

як «еквалайзери затримки»), а також навпаки – фільтр із постійним зсувом фази, але адаптованою амплітудною характеристикою[15].

1.6 Фільтр Баттерворта

Фільтр Баттерворта створює найплоскіший відгук смуги пропускання за рахунок крутизни в області переходу від смуги пропускання до смуги затримки. Він має лише посередні фазові та перехідні характеристики. Амплітудна характеристика задана виразом:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{[1+(f/f_c)^{2n}]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.8)$$

де n - порядок фільтра (кількість полюсів). Збільшення кількості полюсів вирівнює характеристику смуги пропускання та посилює спад смуги затримки (рис. 1.9) [6].

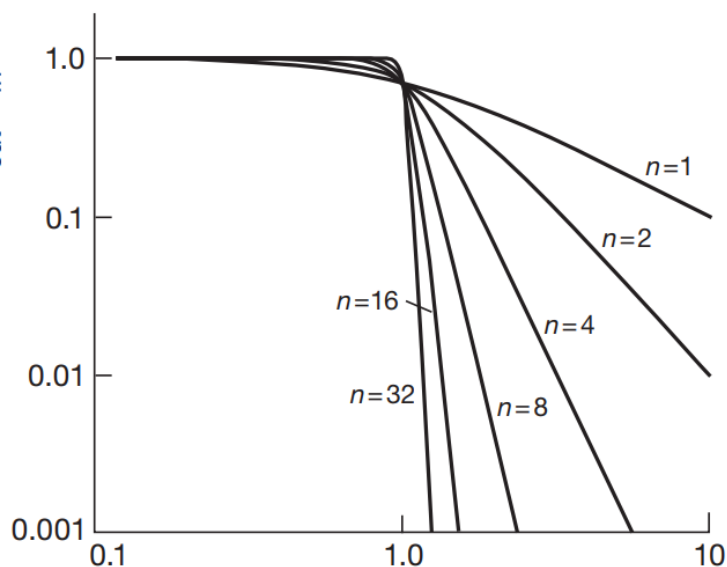


Рисунок 1.9 – Нормовані криві відгуку фільтра Баттерворта низьких частот

Фільтр Баттерворта компенсує все інше для максимальної рівномірності відгуку. Він починається надзвичайно рівномірно на нульовій частоті та

згинається поблизу частоти зрізу f_c (яка зазвичай становить точку -3 дБ). У більшості застосувань все, що дійсно має значення, це те, щоб коливання в смузі пропускання були меншими за деяку величину, скажімо, 1 дБ. Фільтр Чебишева реагує на цю реальність, допускаючи деякі хвилі по всій смузі пропускання зі значно покращеною різкістю коліна (порівняно, наприклад, з «максимально плоским» Баттервортом). Фільтр Чебишева специфікується за кількістю полюсів і пульсації смуги пропускання. Дозволяючи більшу пульсацію смуги пропускання, отримується гостріше коліно. Амплітуда визначається як:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{[1 + \varepsilon^2 C_n^2(f/f_c)^{2n}]^{1/2}} \quad (1.9)$$

де C_n – поліном Чебишева першого роду ступеня n , а ε – константа, яка задає пульсацію смуги пропускання. Як і Баттерворт (але ще більшою мірою), Чебишев має фазові та перехідні характеристики, далекі від ідеальних[7].

1.7 Фільтр Бесселя

Фільтр, що характеризується плоскою амплітудною характеристикою, може швидко змінювати фазові зрушення, що створює неоднакові часові затримки для сигналів у його смузі пропускання. У результаті сигнал у смузі пропускання зазнає спотворення форми. У ситуаціях, коли форма сигналу має першорядне значення, бажано використовувати фільтр лінійної фази (або фільтр із постійною затримкою в часі). Фільтр, фазовий зсув якого змінюється лінійно з частотою, еквівалентний постійній часовій затримці для сигналів у смузі пропускання, тобто форма сигналу не спотворена. Фільтр Бесселя (також званий фільтром Томсона) має максимально плоску часову затримку в межах своєї смуги пропускання за аналогією з фільтром Баттерворта, який має максимально плоску амплітудну характеристику.

Покращення продуктивності у часовій області отримується за допомогою фільтра Бесселя, де порівнюється фазовий зсув і час затримки від частоти для фільтра Бесселя порівняно з двома класичними фільтрами, які демонструють більш різкі частотні характеристики (фільтри Баттерворта і Чебишева). Мала затримка часу призводить до таких ефектів, як викривлення форми хвилі та перерегулювання при керуванні імпульсними сигналами (рис. 1.10).

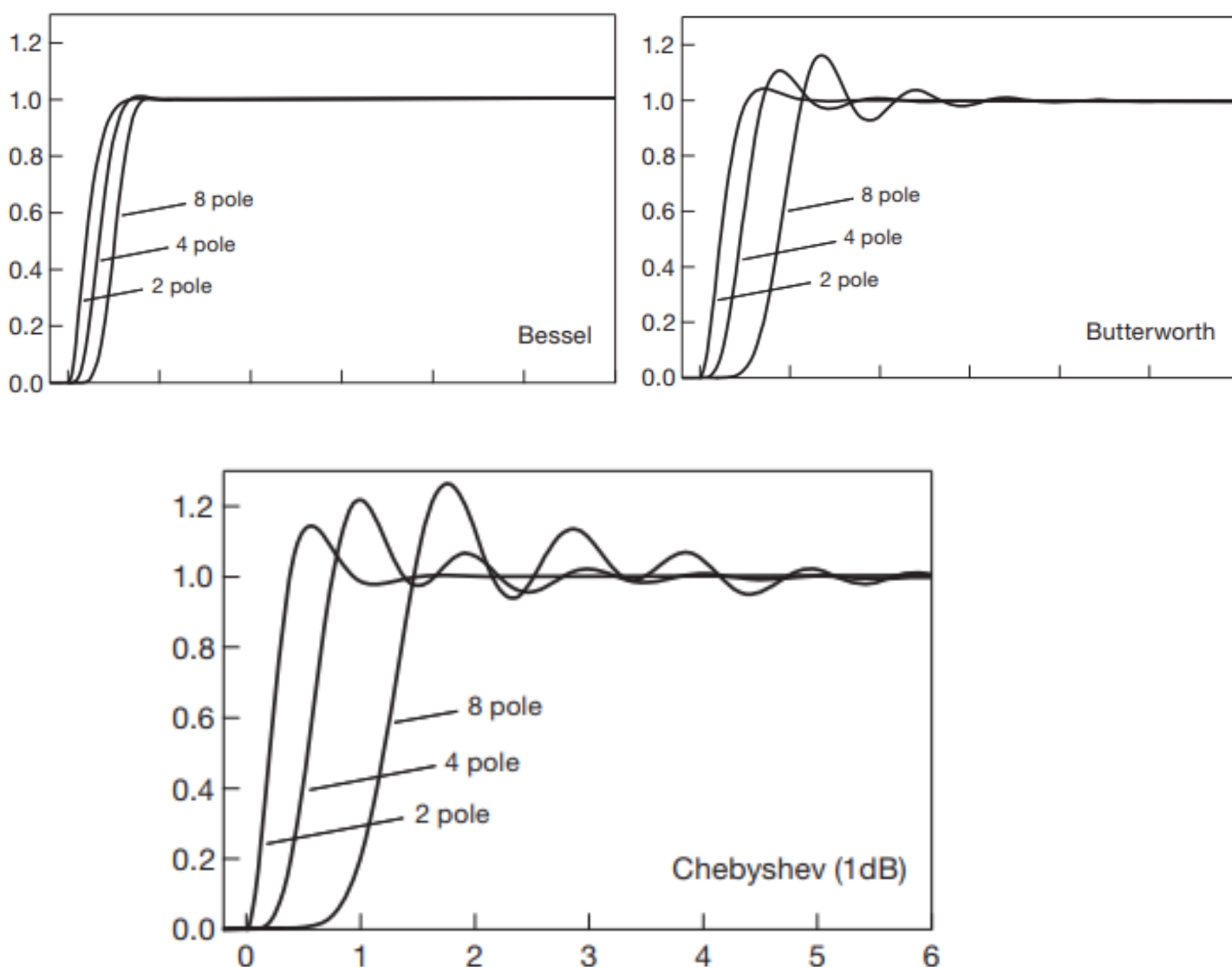


Рисунок 1.10 – Реакція на ступінчастий вхід 1 В при $t = 0$, для трьох 1 кГц фільтри низьких частот

З іншого боку, ціна постійності затримки часу Бесселя – це амплітудна характеристика з навіть меншою крутизною, ніж у Баттерворта або Чебишева в області переходу між смугою пропускання та смугою зупинки. Важливий момент: додавання ділянок до фільтра Бесселя (тобто надання йому більш високого порядку) не збільшує суттєво крутизну переходу в смугу зупинки; це, однак, покращує лінійність фази (постійність затримки часу), а також збільшує кінцеву швидкість спаду, досягаючи звичайної асимптотичної межі 6п дБ/октаву(рис. 1.11).

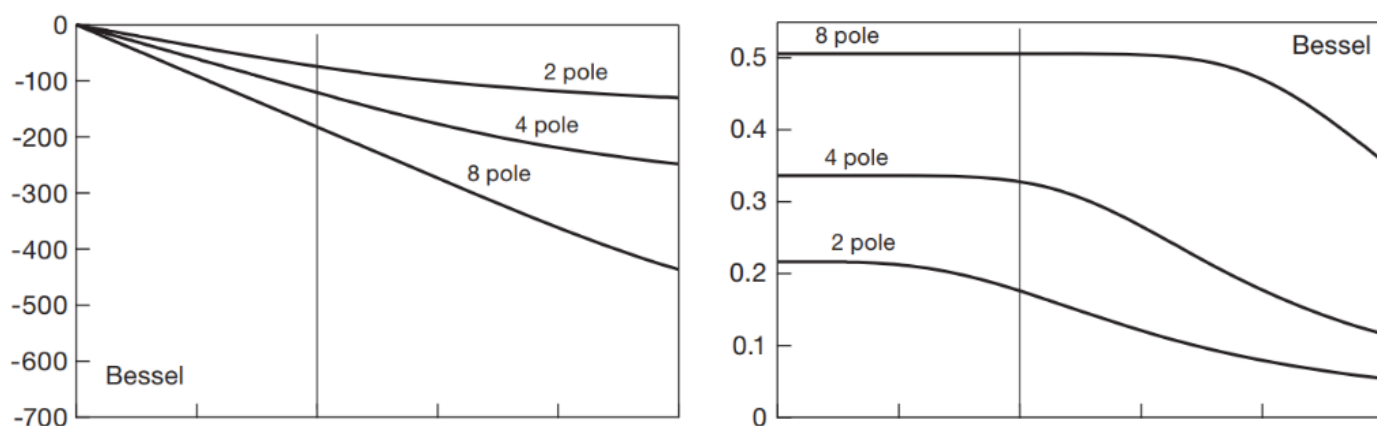


Рисунок 1.11 – Фільтр Бесселя

Існують численні конструкції фільтрів, які намагаються покращити хорошу продуктивність Бесселя у часовій області, порушуючи певну постійність затримки часу для покращеного часу наростання та амплітудно-частотних характеристик.

Гауссов фільтр має фазові характеристики, майже такі ж хороші, як і фільтр Бесселя, з покращеною ступінчастою характеристикою. В іншому класі є цікаві фільтри, які допускають рівномірні пульсації в часовій затримці смуги пропускання (за аналогією з пульсаціями Чебишева в його амплітудній характеристиці) і дають приблизно постійні часові затримки навіть для сигналів далеко в смузі зупинки; їх іноді називають просто «лінійними

фазовими» фільтрами, які характеризуються параметром, який встановлює пульсації фази (наприклад, $0,5^\circ$) у межах смуги пропускання.

Інший підхід до проблеми створення фільтрів з рівномірними часовими затримками полягає у використанні всепрохідних фільтрів (також відомих як еквалайзери затримки). Вони мають постійну амплітуду залежно від частоти зі зсувом фази, який можна адаптувати до індивідуальних вимог. Таким чином, їх можна використовувати для покращення сталості затримки часу будь-якого фільтра, включаючи типи Баттерворта та Чебишева[8].

1.8 Активні фільтри

Було використано багато винахідливості для винайдення розумних активних схем, кожна з яких можна використовувати для генерації функцій відповіді, таких як Баттерворт, Чебишев тощо.

Різні реалізації схеми перевершують ту чи іншу бажану властивість, тому не існує найкращої схеми. Активні фільтри можна побудувати з використанням дискретних операційних підсилювачів як активних елементів. У цьому випадку необхідно забезпечити резистори та конденсатори, які встановлюють характеристики фільтра. Ці пасивні компоненти, як правило, повинні бути точними та стабільними, особливо у фільтрах із чіткими частотними характеристиками. Привабливою альтернативою є використання різноманітних активних фільтрів ІС, над якими було виконано більшу частину важкої роботи, включаючи інтеграцію на мікросхемі узгоджених пасивних компонентів.

Активні фільтри бувають двох основних різновидів: фільтри безперервного часу та фільтри з перемиканням конденсаторів. Фільтри безперервної дії – це аналогові схеми, виготовлені з операційних підсилювачів, резисторів і конденсаторів; характеристики фільтра задаються значеннями компонентів і, звичайно, конфігурацією схеми. Ця схема просто діє як фільтр. Для заміни вхідного резистора в класичному інтеграторі

операційних підсилювачів у фільтрах із комутаційними конденсаторами використовується конденсатор, поєднаний із перемикачем MOSFET, який вмикається та вимикається за допомогою зовнішнього тактового сигналу. Ефективне значення резистора встановлюється тактовою частотою. Типовий фільтр із перемиканням конденсаторів використовує кілька таких інтеграторів у поєднанні з додатковими операційними підсилювачами для реалізації бажаної функції фільтра. Перемикаючі конденсаторні фільтри мають переваги простого налаштування в широкому діапазоні (за застосованою тактовою частотою), підтримки стабільних характеристик і особливо легкого виготовлення як мікросхеми. Однак вони, як правило, шумніші (тобто з меншим динамічним діапазоном), мають вищі спотворення та можуть вводити артефакти перемикання, такі як накладки і наскрізний сигнал синхронізації.

Деякі з особливостей, на які слід звернути увагу в активних фільтрах, це:

- а) невелика кількість частин, як активних, так і пасивних;
- б) легкість налаштування;
- в) малий розкид значень частин, особливо значення конденсатора;
- г) невибагливе використання операційного підсилювача, особливо вимоги до швидкості наростання, смуги пропускання та вихідного опору;
- д) здатність створювати фільтри з високою добротністю;
- е) електрична настроюваність;
- ж) чутливість характеристик фільтра до значень компонентів і посилення операційного підсилювача (зокрема, добуток посилення на смугу пропускання, f_T).

Багато в чому остання функція є однією з найважливіших. Фільтр, який потребує деталей високої точності, важко налаштувати і він дрейфує у міру старіння компонентів; крім того, є неприємність, що для цього потрібні компоненти з хорошою початковою точністю. Схема VCVS, ймовірно, здебільшого завдячує своїй популярності своїй простоті та невеликій кількості частин, але вона страждає від високої чутливості до змін компонентів. Для порівняння, недавній інтерес до більш складних реалізацій фільтрів мотивований перевагами нечутливості властивостей фільтра, де мала складова

варіативність. Починаючи з популярного VCVS, або типу контрольованого джерела, конструкції доступні як мікросхеми від кількох виробників і фільтр різкого відхилення Twin-T. Більшість нових мікросхем з активним фільтром, що впроваджуються, належать до типу комутованих конденсаторів завдяки їх простоті у використанні, малим розмірам, низькій вартості, відмінній стабільності та (у деяких випадках) повній відсутності необхідних зовнішніх компонентів[15].

1.9 VCVS фільтр

Фільтр джерела напруги з керованим напругою (VCVS), також відомий просто як фільтр з керованим джерелом. Це різновид простішої схеми з одиничним підсиленням, у якій повторювач з одиничним підсиленням замінено неінвертуючим підсилювачем з підсиленням, більшим за одиницю. Резистори на виходах операційних підсилювачів створюють неінвертуючий підсилювач напруги з посиленням напруги K , а решта R і C сприяють властивостям частотної характеристики фільтра. Це 2-полосні фільтри, і вони можуть бути Баттерворта, Бесселя тощо, шляхом відповідного вибору значень компонентів.

Будь-яка кількість 2-полосних секцій VCVS може каскадуватися для створення фільтрів вищого порядку. Коли це зроблено, окремі секції фільтра, як правило, не ідентичні. Насправді кожна секція представляє квадратичний поліноміальний коефіцієнт полінома n -го порядку, що описує загальний фільтр.

Фільтри VCVS мінімізують кількість необхідних компонентів (два полюси на операційний підсилювач) і пропонують додаткові переваги неінвертованого підсилення, низького вихідного опору, менше 28 А[11].

1.10 Фільтр Allpass

Фільтри Allpass (рис.1.12), також відомі як еквалайзери затримки або еквалайзери фази, є фільтрами з плоскою амплітудною характеристикою, але зі зсувом фази, який змінюється залежно від частоти. Вони використовуються для компенсації фазових зрушень (або часових затримок) у певному тракті сигналу. Можуть існувати різні конфігурації allpass-фільтрів, такі як фазові різниці та кількоступеневі фільтри, кожен з яких може впливати на фазу сигналу у різний спосіб.

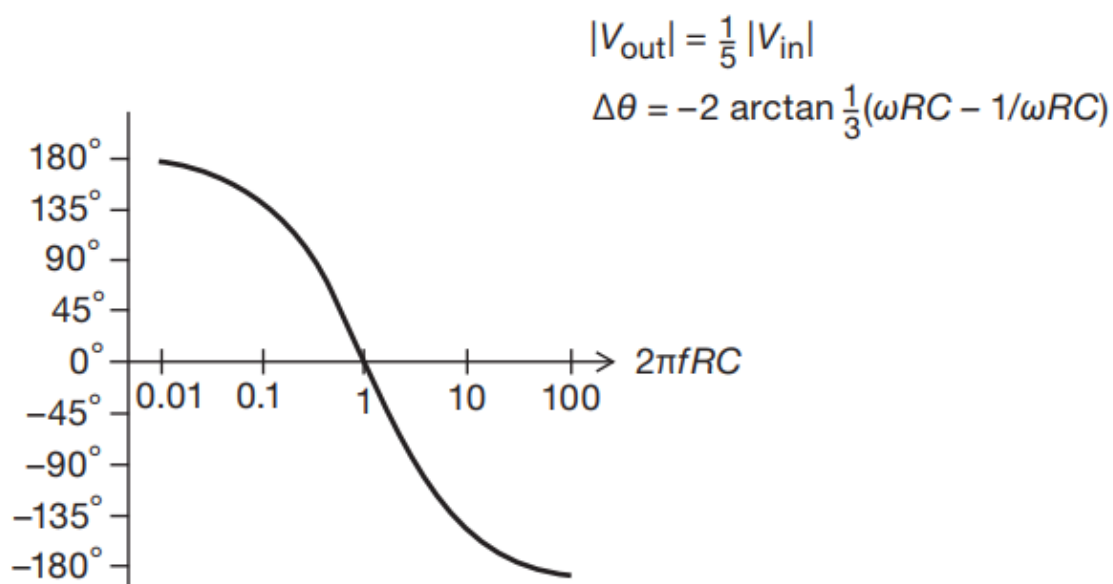


Рисунок 1.12 – Всепрохідний фільтр із повним діапазоном фазового зсуву на 360°

Одним із недоліків цих фільтрів зі змінною стану або біквдратних фільтрів є потреба в точно підібраних конденсаторах. Якщо створюється схема з операційних підсилювачів, знадобляться пари стабільних конденсаторів (не електrolітичних, танталових або керамічних з високим κ), можливо, узгоджених більше ніж на 1% для оптимальної продуктивності. Також необхідно зробити багато з'єднань, оскільки схеми використовують

щонайменше три операційні підсилювачі та шість резисторів для кожної 2-полюсної секції. Крім того, придбати мікросхему з фільтром, яка дозволить виробнику визначити, як інтегрувати узгоджені конденсатори 1000 пФ ($\pm 0,5\%$) у мікросхему. Виробники напівпровідників вирішили ці проблеми, але за певну ціну: мікросхеми UAF42 (рис. 1.13) і MAX274 «Універсальний активний фільтр», реалізовані за допомогою гібридної або лазерної технології[11]. Ці фільтри «безперервного часу» також не піддаються легкому налаштуванню.

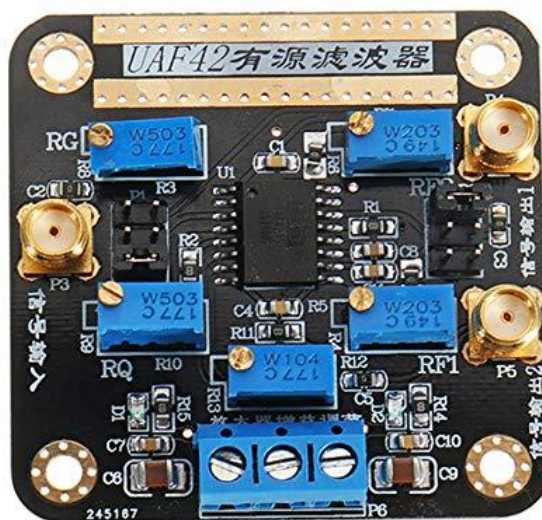


Рисунок 1.13 – UAF42

1.10 Цифрова обробка сигналів

Обговорення електронних фільтрів було б неповним без вступу до широко поширеної техніки цифрової обробки сигналів (DSP), також відомої як дискретна обробка сигналів. Сучасні системи, які містять мікропроцесори, віддають перевагу цифровим методам фільтрації через їхню гнучкість і продуктивність.

Цифрова обробка сигналу — це маніпулювання сигналами в цифровій області, під час якого сигнал (наприклад, сигнал мовлення) перетворюється на послідовність чисел, що представляють його вибіркові значення амплітуди через однакові проміжки часу [17].

2 КОЛИВАННЯ В ШУМІ

2.1 Операційні підсилювачі

Операційний підсилювач (ОП) – пристрій для підсилення напруги з прямими зв'язками між каскадами, що має значний коефіцієнт підсилення, низький рівень шумів, високий вхідний опір, малий опір на виході і досить широку смугу одиничного підсилення. ОП це підсилювач постійного струму (ППС), здатний підсилювати постійну напругу. ОП спочатку були підсилювачі з великим коефіцієнтом підсилення, розроблені для здійснення математичних операцій: складання, віднімання, множення та ділення. Від цього і пішла назва операційні. В наш час інтегральні ОП використовують для конструювання будь яких функціональних вузлів.

Види операційних підсилювачів:

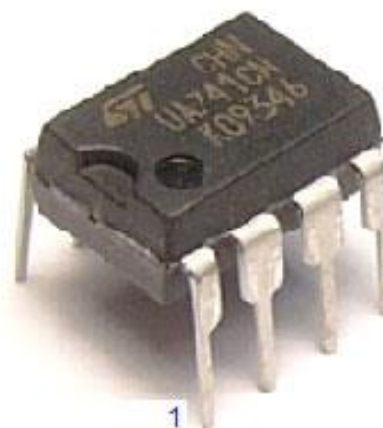
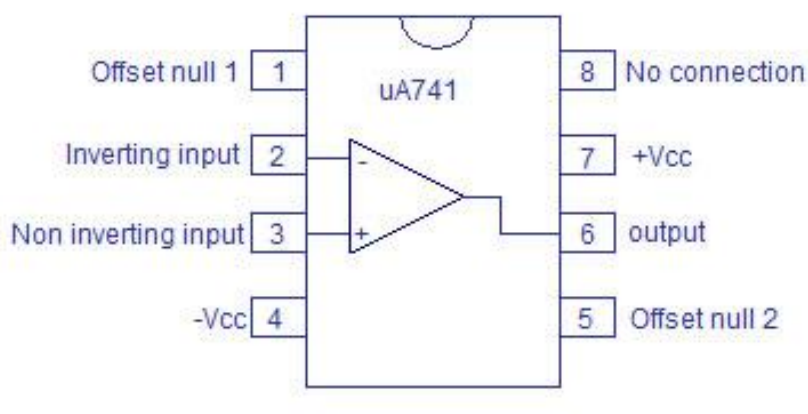


Рисунок 2.1 – Операційний підсилювач UA741

- загального призначення (General Purpose): це операційні підсилювачі, які широко використовуються; найвідомішим прикладом є UA741 (рис. 2.1);
- інструментальні (Instrumentation) – використовуються для вимірювання напруг чи струмів у вимірювальних приладах;

– високочастотні (High-Frequency) – призначені для роботи на високих частотах; вони знаходять застосування у схемах радіопередавачів і інших високочастотних пристроях;

– низькошумні (Low-Noise) – використовуються в дуже чутливих додатках, таких як прилади для збору даних з датчиків чи аудіоапаратури;

– високовольтні (High-Voltage) – призначені для роботи з високими напругами, що знаходять застосування в індустріальних та високовольтних додатках;

– високовимірювальні точності (Precision) – забезпечують високу точність у вимірювальних системах та приладах;

– операційні підсилювачі зі змінним зсувом (Programmable Gain) – мають можливість програмованого зміщення підсилення, що забезпечує гнучкість в застосуваннях змінюваного підсилення.

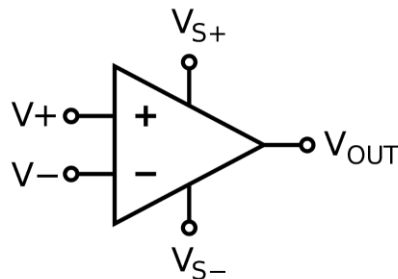


Рисунок 2.2 – Позначення операційного підсилювача на схемах

Позначення на рис.2.2:

- $V+$ — неінвертуючий вхід;
- $V-$ — інвертуючий вхід;
- V_{out} — вихід;
- V_{S+} — позитивний вхід джерела живлення (V_{DD} , V_{CC} , або V_{CC+})
- V_{S-} — негативний вхід джерела живлення (V_{SS} , V_{EE} , або V_{CC-}).

Виводи живлення (V_{S+} і V_{S-}) можуть бути позначені по іншому, але це не змінює їх призначення. Їх дуже часто не позначають на самій схемі, щоб не

захламляти її не такими важливими деталями. При цьому, спосіб підключення цих виводів точно не вказується, або навіть вважається очевидним (особливо часто це відбувається при зображенні одного ОП, з мікросхеми, що має 4 ОП в одному корпусі, і містить загальні виходи живлення для всіх 4-х ОП). Інвертуючий та неінвертуючий входи можна міняти місцями, якщо це потрібно; виводи живлення, як правило, завжди розміщують позитивним вгорі[16].

2.2 Ідеальний операційний підсилювач

Для того, щоб розглянути функціонування ОП у режимі із зворотним зв'язком, для початку необхідно ознайомитися з ідеальним операційним підсилювачем. Ідеальний ОП не може існувати в реальності, а є лише фізичною абстракцією. Не зважаючи на це він істотно спрощує розгляд роботи схем на ОП, тим, що використовує прості математичні моделі.

Ідеальний ОП описується формулою (2.1) і має такі параметри:

$$V_{out} = (V_+ - V_-)G_{openloop}, \quad (2.1)$$

- нескінченно великий коефіцієнт підсилення з розімкненим колом зворотного зв'язку $G_{openloop}$;
- нескінченно великий опір на входах V_- і V_+ (струм, що протікає через ці входи, дорівнює нулю);
- нескінченно малий опір на виході;
- нескінченно велика інтенсивність наростання вихідної напруги;
- смуга пропускання: від постійного струму до нескінченності.

Останні два пункти впливають з формули (2.1), оскільки в ній не враховані часові затримки і фазові зсуви.

З параметрів, перерахованих вище, впливає властивість ідеального ОП, що спрощує розгляд схем з його використанням: ідеальний ОП, охоплений колом негативного зворотного зв'язку, утримує напругу на одному рівні на своїх входах. Тобто істинна наступна рівність:

$$V_+ - V_- = 0. \quad (2.2)$$

Це легко перевірити. Припустимо, формула (2.2) не достовірна, і на входах є невелика різниця у значеннях напруг. У такому випадку, підсилена вхідна диференційна напруга, призвела б до нескінченно великої напруги на виході ОП внаслідок нескінченного коефіцієнта підсилення. Ця напруга, відповідно до визначення VSS, ще більше б зменшила б різницю напруги на вході ОП. І так до тих пір, поки рівність (2.2) не була б виконана. Слід зазначити, що вихідна напруга може бути будь-якою – вона визначається вхідною напругою і видом зворотного зв'язку[16].

2.3 Спектральні густини шумів

Генератор шуму – це ще один загальний модуль синтезу, класифікований як генератор. Як впливає з назви, генератор шуму видає шум. Хоча генератори виводять частоти в дискретних спектрах (іншими словами, вони генерують конкретні частоти, що складають форму хвилі), генератори шуму виводять всі частоти, розподілені хаотично по всьому звуковому спектру. У цьому контексті шум означає "шиплячий" тип звуку, що містить усі частоти в межах чутного діапазону.

Системи синтезу часто дозволяють користувачеві вибирати між декількома видами шуму. Найпоширеніші варіанти – білий та рожевий. Білий шум складається з випадкового розподілу всіх звукових частот однакової амплітуди між будь-якими рівними смугами пропускання. Білий шум має тенденцію звучати як шипіння. Рожевий шум складається з випадкового

розподілу всіх звукових частот однакової амплітуди між будь-якими октавами. Рожевий шум, як правило, звучить більше як помірний вітер.

Шум - це сигнал, що займає всі частоти, із спектральною плоскістю (на кожній полосі пропускання) пропорційною (або проти пропорційною) f_β (частотою в ступенях β). До прикладу, у випадку білого шуму $\beta = 0$.

Кольори шуму – система термінів, що приписує деяким видам шумових сигналів певні кольори виходячи з аналогії між спектром сигналу довільної природи (точніше, його спектральної щільністю або, кажучи математично, параметрами розподілу випадкового процесу) і спектрами різних кольорів видимого світла. Ця абстракція широко використовується в галузях техніки, що мають справу з шумом (акустика, електроніка, фізика). Багато з таких визначень розглядають спектр сигналу на всіх частотах. Кольорові відповідності різних типів шумового сигналу визначаються за допомогою графіків (гістограм) спектральної щільності.

Спектральна густина шуму (або спектральна густина потужності шуму) - це міра, що описує розподіл енергії шуму за різними частотами в спектрі. Ця характеристика часто використовується у сигнальній обробці та телекомунікаціях. Математично спектральна щільність шуму визначається як квадрат амплітуди шуму в різних частотних компонентах, поділений на ширину частотного діапазону:

$$S(f) = \frac{|x(f)|^2}{\Delta f} \quad (2.3)$$

де $S(f)$ - спектральна щільність шуму;

$x(f)$ - перетворення Фур'є сигналу (спектр сигналу);

Δf – ширина частотного діапазону.

Білий шум - спектральна щільність звуку розподілена рівномірно за всіма частотами (на всіх частотах потужності сигналів однакова). Інакше говорячи, білий шум має плоский спектр частот у лінійному просторі. До прикладу, енергія полоси між 40 і 60 Гц буде рівною енергією полоси між 4000 і 4020 Гц (і повідомляє будь-яку позицію ширини в 20 Гц). Білий шум - це

ідеальний конструктор, набуває абсолютно чорного тіла. Так як всі частоти білого шуму надають енергію, а загальна потужність такого сигналу буде рівною нескінченності. На практиці сигнал називається «білим», якщо він має плоский спектр (рис. 2.3) в обмеженому діапазоні частот[13].

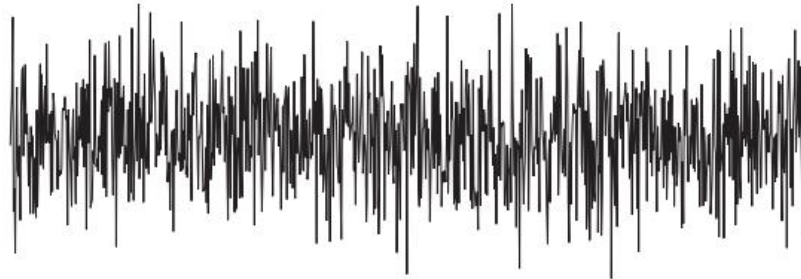


Рисунок 2.3 – Спектр білого шуму

Термін «білий шум» (рис. 2.5) зазвичай застосовується до тона, що має автокорреляційну функцію, математично описується дельта-функцією Дірака по всіх вимірах багатовимірного простору, в якому цей сигнал розглядається. Сигнали, що володіють цією властивістю, можуть розглядатися як білий шум. Дана статистична властивість є основним для сигналів такого типу.

Те, що білий шум некоррельований за часом (або по іншому аргументу), не визначає його значень у часовій (або будь-який інший розглянутої аргументної) області. Набори, що приймаються сигналом, можуть бути довільними з точністю до головної статистичної властивості (проте постійна складова такого сигналу повинна дорівнювати нулю). Наприклад, двійковий сигнал, який може приймати тільки значення, рівні нулю або одиниці, буде білим шумом тільки якщо послідовність нулів і одиниць буде некоррельованою. Сигнали, які мають безперервний розподіл (наприклад, нормальний розподіл), також можуть бути білим шумом. Іноді помилково передбачається, що Гаусовий шум (тобто шум з Гаусовим розподілом по амплітуді - нормальний розподіл) обов'язково є білим шумом. Однак ці поняття нееквівалентні. Гаусовий шум передбачає розподіл значень сигналу у

вигляді нормального розподілу, тоді як термін «білий» має відношення до кореляції сигналу в два різних моменту часу (ця кореляція не залежить від розподілу амплітуди шуму).

Білий шум може мати як розподіл Гаусса (рис. 2.4), так і розподіл Пуассона, Коші і т. д. Гауссовський білий шум в якості моделі добре підходить для математичного опису багатьох природних процесів.

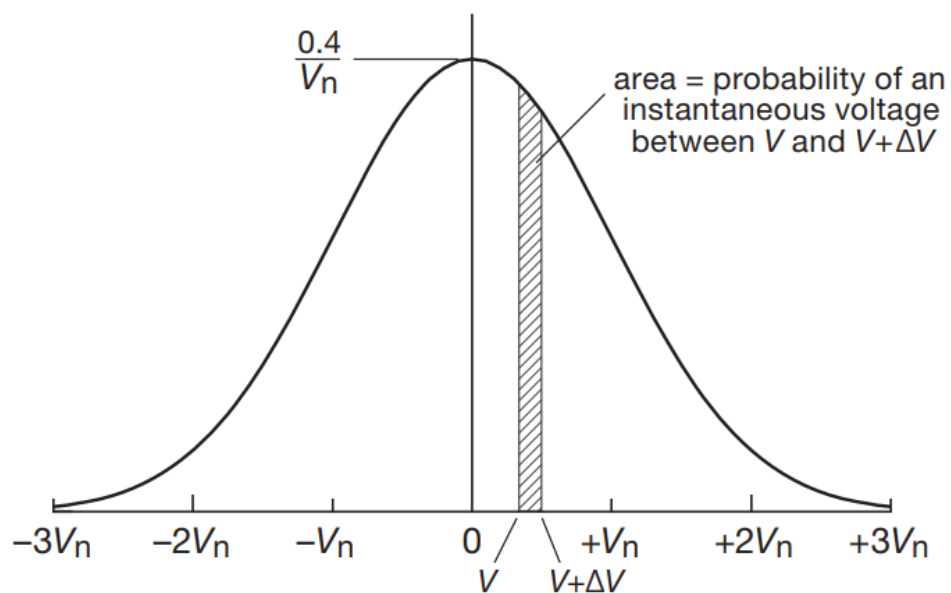


Рисунок 2.4 – Розподіл Гаусса

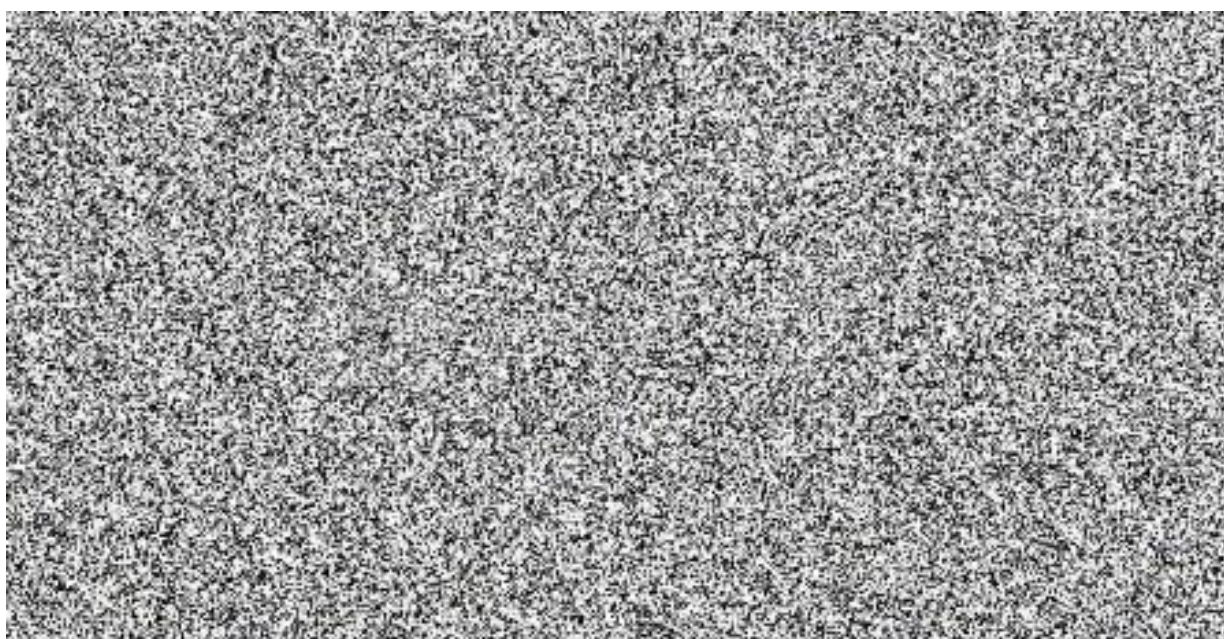


Рисунок 2.5 – Білий шум

Рожевий шум (фліккер-шум, $1/f$ -шум) - з підвищенням частот спектральної щільності зменшується на 3 дБ на кожен октаву (щільність протилежно пропорційна частоті). Так як рожевий шум має плоский спектр частот у логарифмічному просторі.

Приклад рожевого шуму - звук пролітаючого гелікоптера. Рожевий шум виявляється, наприклад, в серцевих ритмах, в графіках електричної активності мозку, в електромагнітному виведенні космічних тіл.

Спектральна щільність рожевого шуму визначається формулою $\sim 1 / f$ (щільність обернено пропорційна частоті), тобто він є рівномірним за логарифмічною шкалою частот.

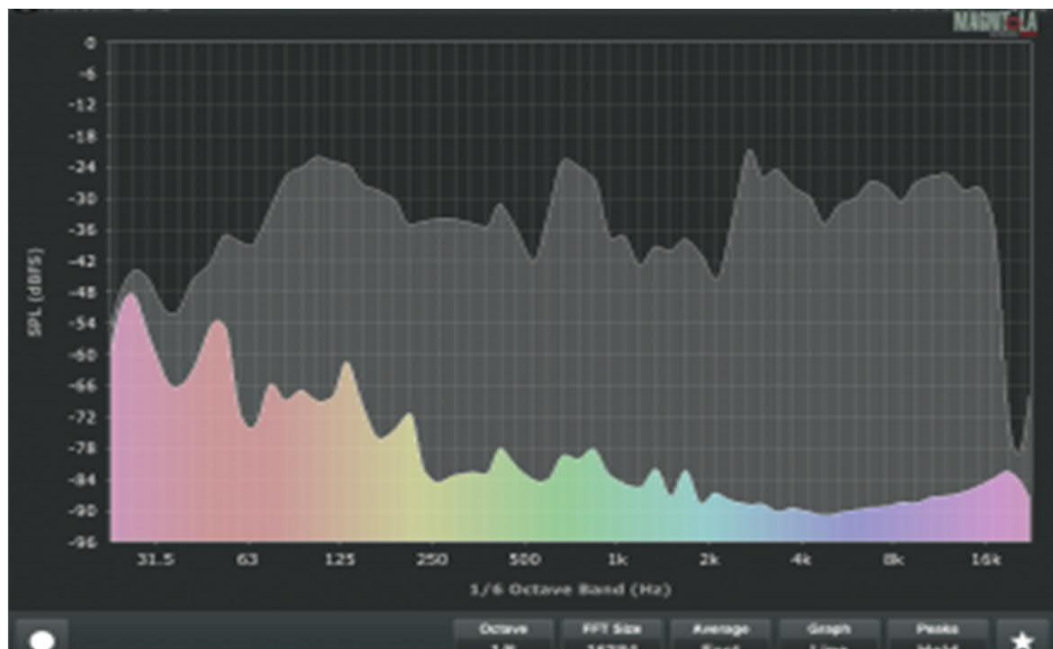
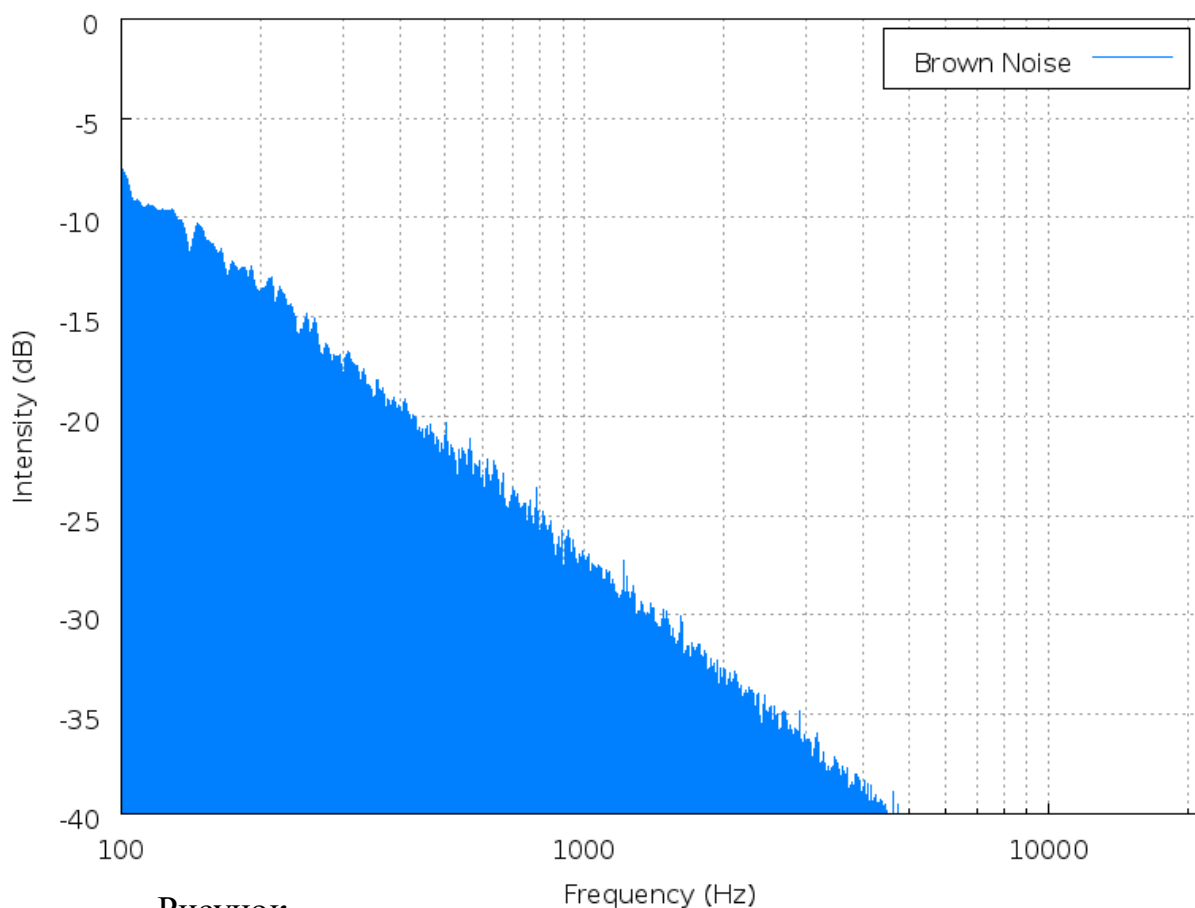


Рисунок 2.6 – Рожевий шум

Наприклад, потужність сигналу в смузі частот між 40 і 60 герц дорівнює потужності в смузі між 4000 і 6000 герц. Спектральна щільність такого сигналу в порівнянні з білим шумом загасає на 3 децибелі на кожен октаву. Приклад рожевого шуму - звук пролітаючого вертольота. Рожевий шум виявляється, наприклад, в серцевих ритмах, в графіках електричної активності мозку, в

електромагнітному випромінюванні космічних тіл. Іноді рожевим шумом називають будь-який шум, спектральна щільність якого зменшується зі збільшенням частоти[12].

Спектральна щільність червоного шуму пропорційна $1 / f^2$, де f - частота. Це означає, що на низьких частотах шум має більше енергії, навіть більше, ніж рожевий шум. Енергія шуму падає на 6 децибел на октаву. Акустичний червоний шум чується як приглушений, в порівнянні з білим або рожевим шумом. Може бути отриманий, якщо проінтегрувати білий шум, або за допомогою алгоритму, що симулює броунівський рух. Спектр червоного шуму (в логарифмічній шкалою) дзеркально протилежний спектру фіолетового.



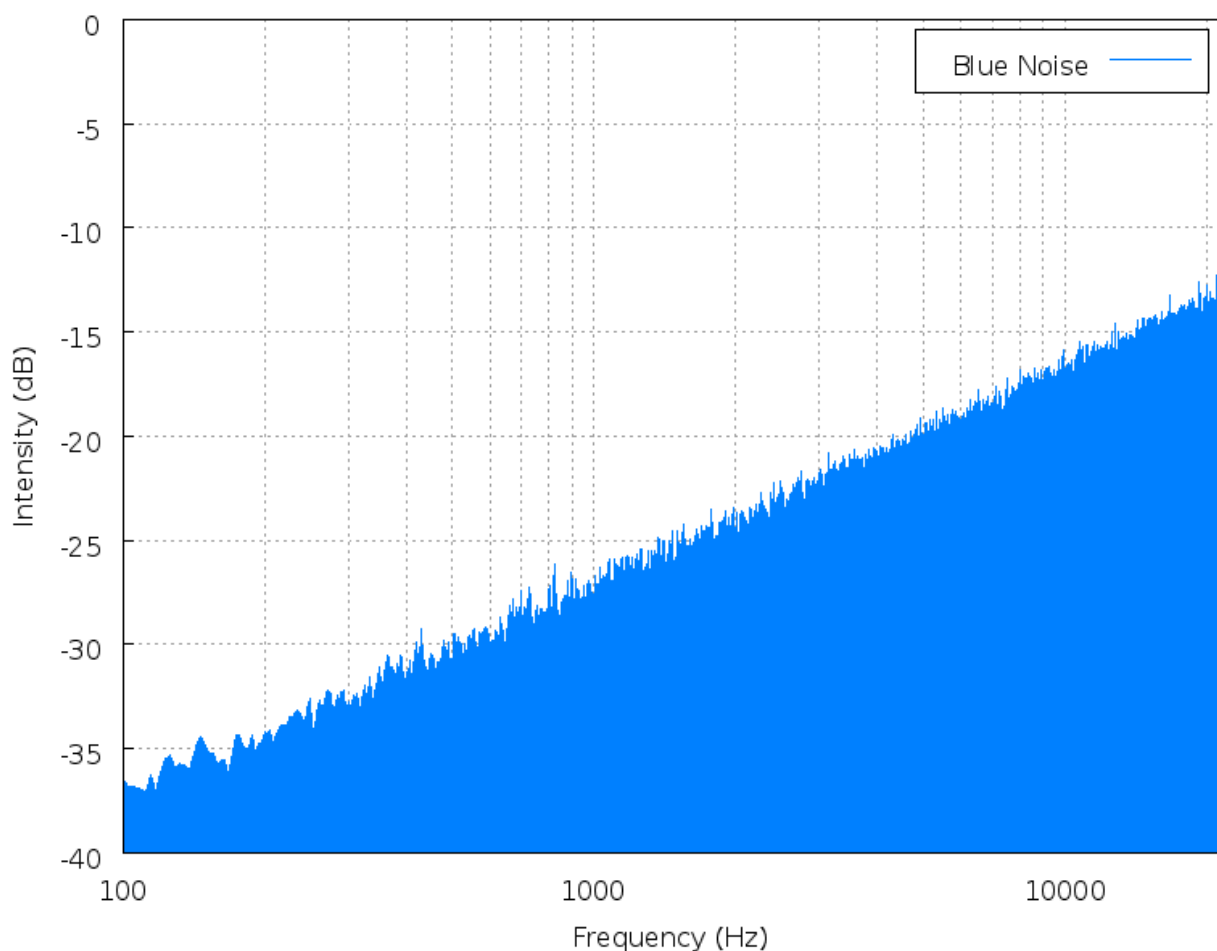
Рисунок

2.7 – Спектр броунівського шуму

На слух броунівський шум (рис. 2.7) сприймається більш «теплим», ніж білий. Іноді цей шум називають також коричневим, сліпо переводячи прізвище

Роберта Броуна (Brown), хоча Броун був шотландцем. Втім, коричневий і червоний кольори спектрально дуже близькі.

Синій шум - вид сигналу, чия спектральна щільність збільшується на 3 дБ на октаву. Тобто його спектральна щільність пропорційна частоті f , аналогічно білому шуму, на практиці він повинен бути обмежений за частотою. На слух синій шум сприймається більш «холодним», «кислим», ніж білий. Синій шум виходить, якщо продифференціювати рожевий шум; їх спектри дзеркальні (рис. 2.8).



Рисуно 2.8 – Спектр синього шуму

Фіолетовий шум - вид сигналу, чия спектральна щільність збільшується на 6 дБ на октаву. Тобто його спектральна щільність пропорційна квадрату частоти f , аналогічно білого шуму, на практиці він повинен бути органічний

по частоті. Фіолетовий шум виходить, якщо продифференціювати білий шум. Спектр фіолетового шуму дзеркально протилежний спектру червоного.

Термін сірий шум відноситься до шумового сигналу, який має однакову гучність для людського вуха на всім діапазоні частот. Спектр сірого шуму виходить, якщо скласти спектри броунівського і фіолетового шумів. В спектрі сірого шуму видно великий «провал» на середніх частотах, проте людське вухо сприймає сірий шум точно так же, як і білий. Існують також інші, «менш офіційні» кольори.

Помаранчевий шум - квазістаціонарний шум з кінцевої спектральної щільністю. Спектр такого шуму має смужки нульової енергії, розсіяні по всьому спектру. Ці смужки розташовуються на частотах музичних нот.

Зелений шум - шум природного середовища. Подібний рожевому шуму з посиленою областю частот в районі 500 Гц

Термін «чорний шум» має кілька визначень:

- тиша;
- шум зі спектром $1 / f^\beta$, де $\beta > 2$ (Manfred Schroeder, «Fractals, chaos, power laws»). Використовується для моделювання різних природних процесів;
- вважається характеристикою "природних і штучних катастроф, таких як повені, обвали ринку";
- ультразвуковий білий шум (з частотою більше 20 кГц), аналогічний т. з. «Чорному світлу» (з частотами занадто високими, щоб його можна було сприймати, але здатному впливати на спостерігача або прилади);
- шум, спектр якого має переважно нульову енергію за винятком декількох піків.

Адитивний білий Гаусовий шум є одним із типів перешкод в каналі передачі інформації. Характеризується рівномірністю, тобто однаковою на всіх частотах, спектральною щільністю потужності, нормально розподіленими значеннями часу та адитивним способом впливу на сигнал. Найпоширеніший тип шуму, що використовується для розрахунку та моделювання систем

радіозв'язку. Термін "добавка" означає, що цей тип шуму додається до корисного сигналу і статистично не залежить від сигналу. На відміну від адитивного, можна вказати мультиплікативний шум - шум, який множиться із сигналом[20].

2.4 Цифрова генерація сигналів

Для генерування сигналів (синусоїдальних, трикутних або прямокутних) використовується віртуальний функціональний генератор (Function Generator). Умовне позначення функціонального генератора (рис 2.9, а), вікно з його налаштуваннями (рис. 2.9, б). Налаштування дають змогу змінювати форму сигналу, його частоту, амплітуду, робочий цикл та задавати зміщення постійного струму.

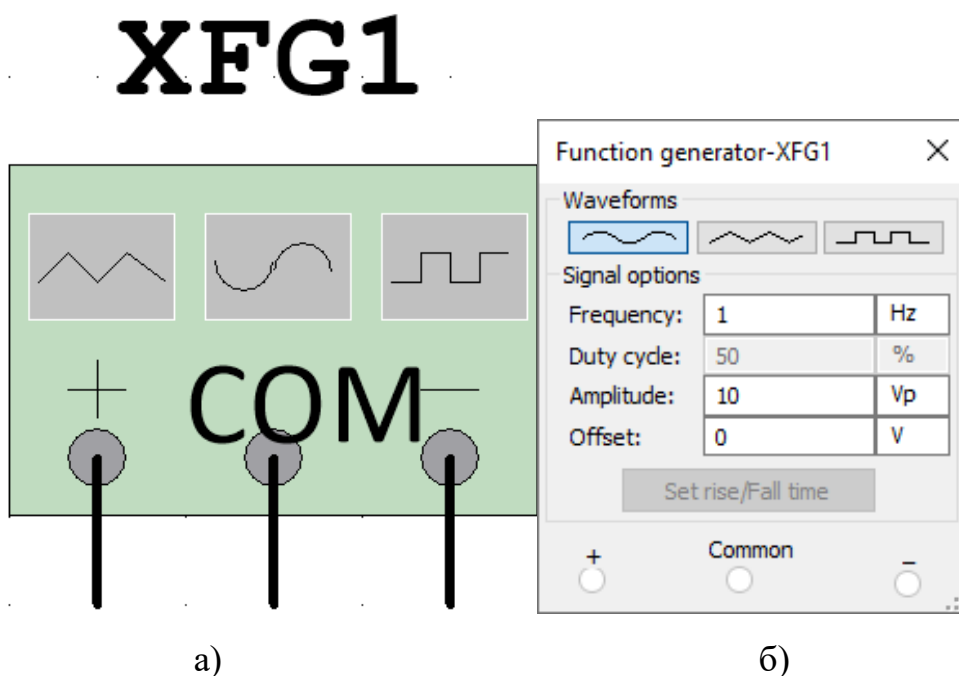


Рисунок 2.9 – Функціональний генератор (Function Generator): умовне позначення – а), вікно налаштування – б)

Генератор (рис. 2.9, а) має три клеми для підключення до схеми. Центральний термінал відповідає за опорний рівень сигналу та з'єднується із загальною точкою схеми.

Елемент Multimeter (рис. 2.10) дозволяє вимірювати змінну або постійну напругу та струм, а також опір або спад децибел між двома вузлами в колі. Внутрішній опір та струм Мультиметра попередньо встановлені до майже ідеальних значень, але, якщо це потрібно, їх можна змінити.

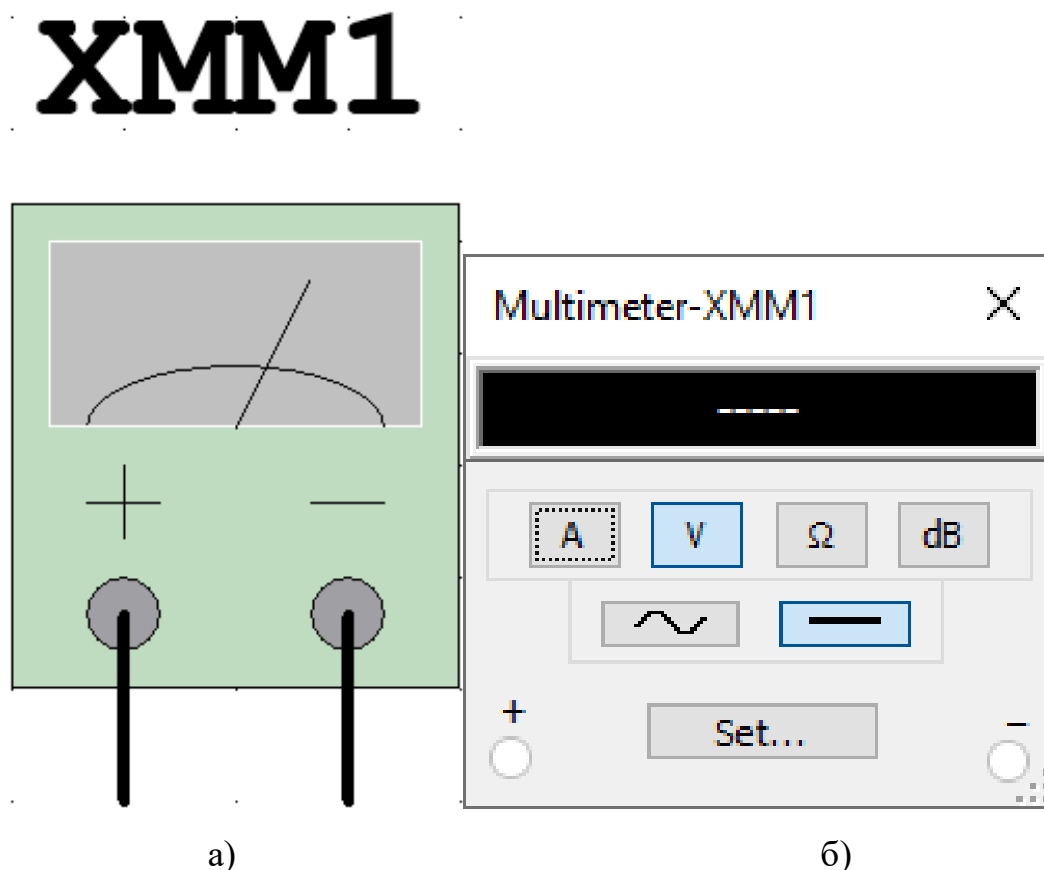


Рисунок 2.10 – Мультиметр (Multimeter):
умовне позначення – а), вікно налаштування – б)

Для вимірювання активної потужності, що виділяється на елементах схем використовується віртуальний ватметр (Wattmeter). Він дає змогу вимірювати величину активної потужності у ватах, а також косинус кута між струмом і спадом напруги.

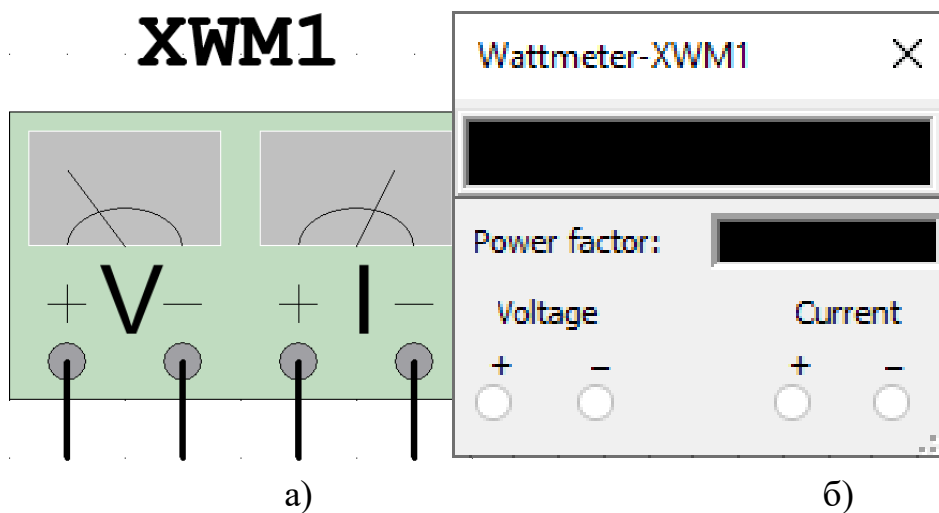


Рисунок 2.11 – Ватметр (Wattmeter)
умовне позначення – а), вікно налаштування – б)

Двоканальний та чотириканальний осцилографи дають змогу показати зміну електронних сигналів у вузлах схеми з часом у вигляді двох (чотирьох) часових графіків або у вигляді залежності сигналу одного каналу до іншого.

Графічні позначення двоканального та чотириканального осцилографів (рис 2.12).

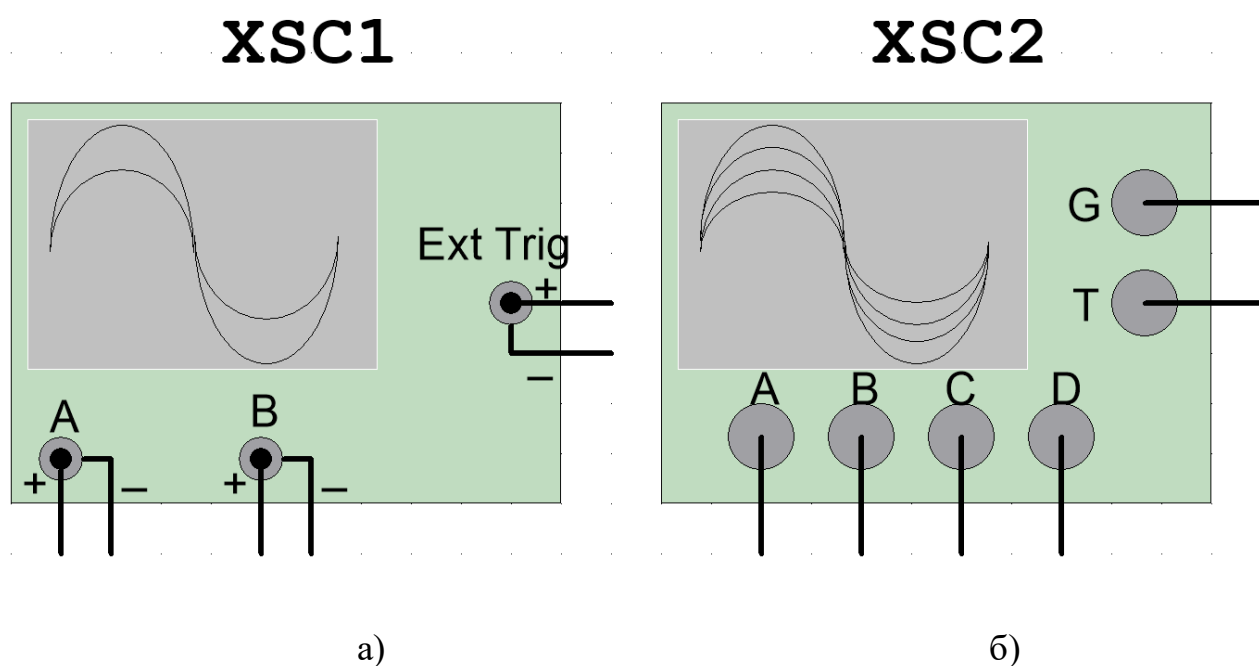


Рисунок 2.12 – Графічне позначення двоканального а) та чотириканального б) осцилографів

3 РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ГЕНЕРАТОРА РОЖЕВОГО ШУМУ

3.1 NI Multisim для моделювання радіотехнічних пристроїв

Для реалізації проекту було використано програмний застосунок Multisim

Середовище Multisim – це спеціалізоване ПЗ, яке призначене для моделювання електричних принципових схем радіо- та електротехнічних пристроїв, розроблене компанією National Instruments.

До складу Multisim входить набір інструментів Circuit Design Suite, що призначені для автоматизації технологічних процесів проектування схем.

Інтерфейс користувача Multisim містить набір окремих панелей інструментів (Toolbars), до складу яких входить набір команд різноманітних функцій. Панель із набором віртуальних приладів містить кнопки для виклику вікон із налаштуваннями приладів.

Панель віртуальних приладів, використаних в роботі, включає в себе наступні елементи:

- функціональний генератор (Function Generator)(рис. 2.9);
- мультиметр (Multimeter) (рис. 2.10) ;
- ватметр (Wattmeter) (рис. 2.11);
- осцилограф з двома та чотирьома входами (Oscilloscope, Four Channel Oscilloscope) (рис. 2.12);
- логічний аналізатор (Logic Analyzer);
- логічний перетворювач (Logic Converter);
- аналізатор спотворень сигналу (Distortion Analyzer);
- аналізатор спектру (Spectrum Analyzer);
- амперметр (Ammeter) та вольтметр (Voltmeter).

3.2 Генератор рожевого шуму

Принципова схема базового фільтра, який може використовувати різноманітні подвійні операційні підсилювачі. Я використовував TL072 (рис. 3.1), але можна використовувати подвійний операційний підсилювач RC4558 або LM1458 для економії.

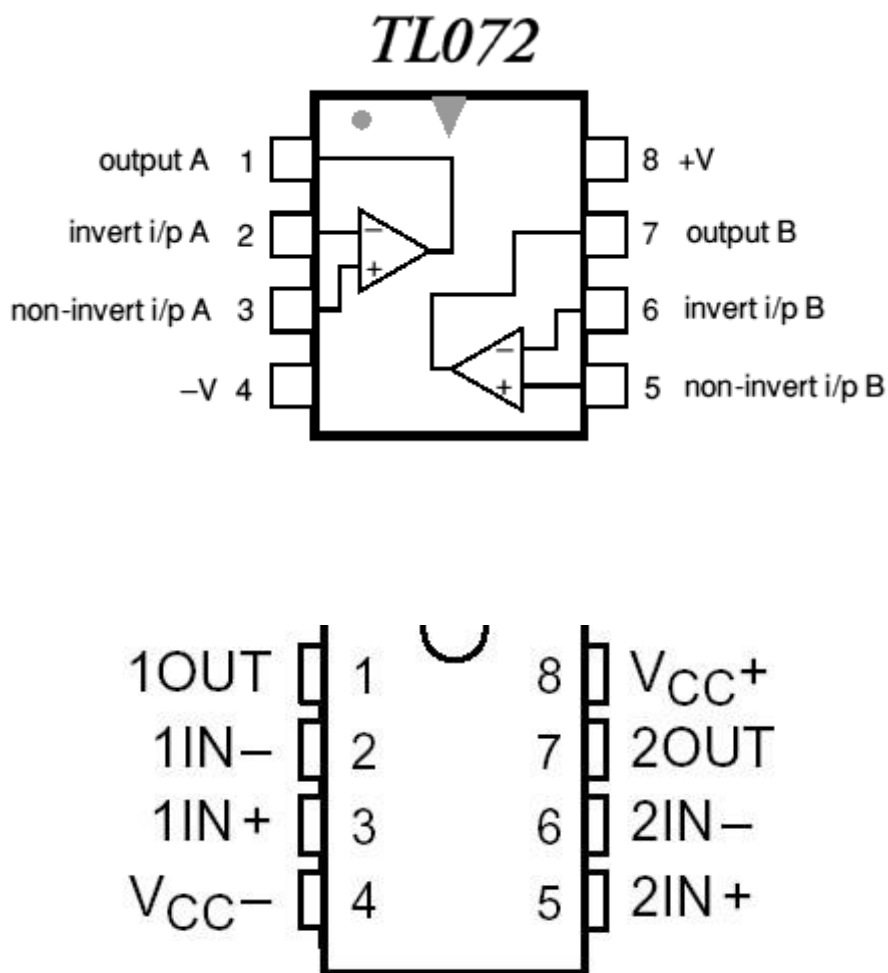


Рисунок 3.1 – RC4558 та TL072

TL072 має перевагу дуже високого входного опору, тому зміщення постійного струму не є проблемою. Немає сенсу використовувати малoshумний пристрій у пристрої, спеціально розробленому для створення шуму, тому більшість операційних підсилювачів підходять для цієї мети. Ця

хороша і проста схема і буде прийнятною для більшості застосувань, вона має обмежений частотний діапазон, і її можна покращити за рахунок ускладнення.

Фільтр не має достатньо точок розриву, щоб охопити аудіо діапазон особливо точно, хоча він краще, ніж можна собі уявити [1].

Порівняння операційних підсилювачів TL072 та RC4885, які можна використовувати у схемі генератора рожевого шуму (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння TL072 і RC4885

	TL072	RC4885
К-сть каналів	2	2
V_{OS} , мВ	10	6
V_{CC} , В	від 6 до 36	від 10 до 30
I_{CC} на канал (макс.), мА	1.4	1.25
T_A , °С	від -40 до 105	від -40 до 85
CMRR (тип.), дБ	86	90

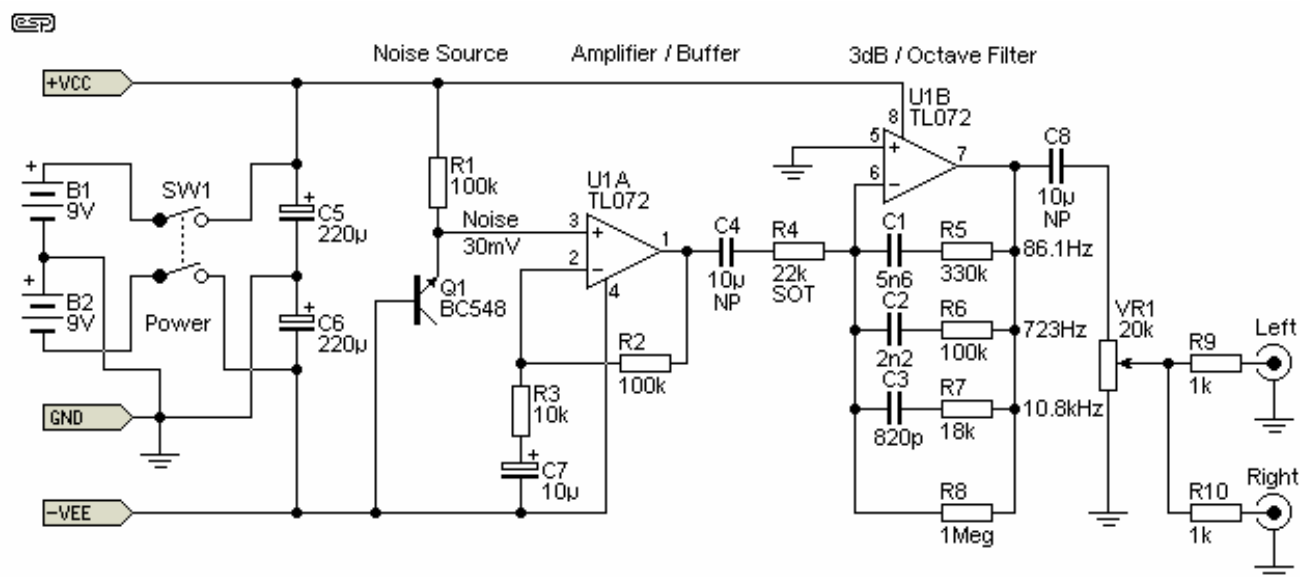


Рисунок 3.2 – Схема генератора рожевого шуму (основний фільтр)

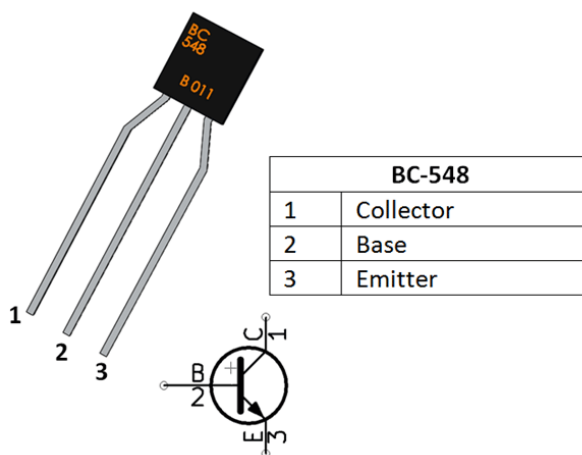


Рисунок 3.3 – Транзистор BC548

Транзистор BC548 підключений таким чином, що його перехід емітер-база мав зворотне зміщення, що створює гарний шумний стабілітрон. З наведеними значеннями середній вихідний шум становить близько 30 мВ (широкосмуговий). Моя напруга стабілітрона на транзисторі працює приблизно на 9 В, але може бути від 5 В до 10 В. У деяких випадках можна виявити, що транзистор недостатньо шумний, отже, будемо підбирати, поки не отримаємо такий, який видає багато шуму. Не будемо використовувати ті, що все «відкинули», оскільки вони, імовірно, будуть дуже шумними, якщо використовувати їх як підсилювач, і підсилення, ймовірно, також буде значно зменшено.

Якщо напруга живлення не регулюється, може виникнути проблема із низькочастотним зворотним зв'язком від джерела шуму. Результатом є коливання дуже низької частоти, які можуть проявлятися як коливання або, частіше, як нестабільність постійного струму. Найпростіше використовувати регульовані джерела живлення, хоча батареї повинні бути досить стабільними при прямому підключенні. Якщо відчуваються надмірні коливання постійного струму, може знадобитися використовувати окремі регулятори для джерела шуму та фільтра. Але це малоймовірно, оскільки джерело шуму працює на дуже низькому струмі.

Перший каскад операційного підсилювача виконує роль підсилювача/буфера, забезпечуючи дуже високий вхідний опір (щоб не навантажувати джерело шуму) і коефіцієнт посилення 11 (20,8 дБ). Напруга постійного струму на виході буфера має бути такою ж (або дуже близькою) як і напруга на стабілітроні транзистора.

Позитивна батарея підключається до контакту 8 операційного підсилювача, а негативна – до контакту 4. Якщо підключити навпаки – операційний підсилювач вийде з ладу.

Конденсатори ємністю 10 мкФ з позначкою «NP» є біполярними (неполяризованими) електролітичними. Хоча плівкові конденсатори можна використовувати, вони не внесуть нічого, окрім витрат на проект. Неполяризовані конденсатори необхідні через непередбачувану полярність для C4 і невеликий постійний струм на C8, але C8 може бути звичайним поляризованим електролітичним конденсатором (напруга на ньому буде значно нижче 1 В). Точку з позначкою «Вихід» використовується фільтром ІЕС.

Другий каскад являє собою 3 дБ/октавний фільтр, який є досить лінійним у смузі частот від 20 Гц до 20 кГц. Це перетворює білий шум на рожевий шум з однаковою енергією у всіх 10 октавах аудіо діапазону. Хоча цей фільтр має лише три точки розриву, він цілком підходить для більшості застосувань. R4, показаний як «SOT». R4 можна змінювати, якщо потрібно більше (або менше) посилення. R4 не можна ставити нижче ніж 2,2к, інакше це може перевантажити перший операційний підсилювач.

Через порівняно високу напругу стабілітрона на транзисторі, напруга живлення має бути дещо вищою - 2 стандартного розміру 9 В лужні батареї, з'єднані послідовно (18 В) повинні дати пристрою працювати набагато довше, ніж користувач захоче його слухати. Через обмежену ємність батарей 9 В не було включено світлодіодний індикатор, оскільки це споживає більше струму, ніж решта ланцюга. Перемикач живлення має бути двополюсним (DPST),

оскільки обидві батареї необхідно від'єднати. Центральний кран батарей є заземленням для пристрою. Всі точки заземлення повинні бути з'єднані разом. Пристрій також може живитися від мережі (наприклад, за допомогою P05) +/- 15 В. Хоча спочатку це дорожча альтернатива, інструменти ІМО, що живляться від батарей, часто доставляють більше клопоту, ніж живлення від мережі, особливо для інструментів, які використовуються не так часто. Акумулятори розряджаються і на них витікає корозійний наліт, коли наступного разу знадобиться пристрій.

3.3 Альтернативний 3дБ / октавний фільтр

Фільтр рожевого шуму (рис. 3.4) є складнішим, але більш лінійним у ширшому діапазоні від 1 Гц до 100 кГц у межах 1 дБ у всьому діапазоні 50 дБ. Він розроблений так, щоб бути максимально плоским, тому має набагато більше секцій. Можна зробити його ще кращим, ніж показано, але кількість секцій зросте в такому випадку.

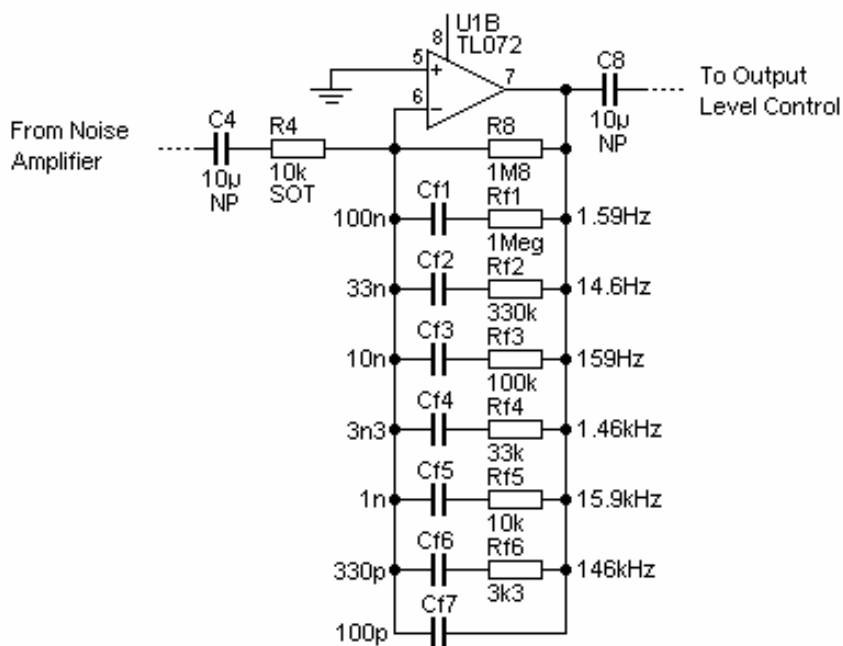


Рисунок 3.4 – Схема альтернативного 3дБ / октавного фільтру

Всю схему можна розкласти на площі прототипної плати і вмонтувати в відповідну пластикову або металеву коробку. Ніяких особливих запобіжних заходів не потрібно, окрім того, щоб поляризовані компоненти (транзистор, операційний підсилювач і електролітичні конденсатори) були підключені правильно. Використання металевих плівкових резисторів 1% для мінімізації шуму в цій схемі не потрібно. Насправді транзистор може бути з будь-яким невеликим типом сигналу, який є під рукою, а також подвійним операційним підсилювачем (або можна використовувати пару одинарних операційних підсилювачів, їх розведення повністю відрізняються).

За допомогою осцилографа, якщо він є в наявності, можна переконатися, що вихідний шум не відсікається – ми не зможемо його почути, але якщо він відсікається, енергетичний спектр буде змінено. Якщо спостерігається відсікання (або ми його підозрюємо), можна збільшити значення R3 або R4. Подвоєння значення (одного чи іншого - не обох) зменшить вихід вдвічі. Існують цифрові «псевдовипадкові» генератори шуму, але вони мають цикл, який з часом повторюється, і це дуже чутно. Навпаки, описаний блок є абсолютно випадковим, оскільки може бути тільки аналоговим.

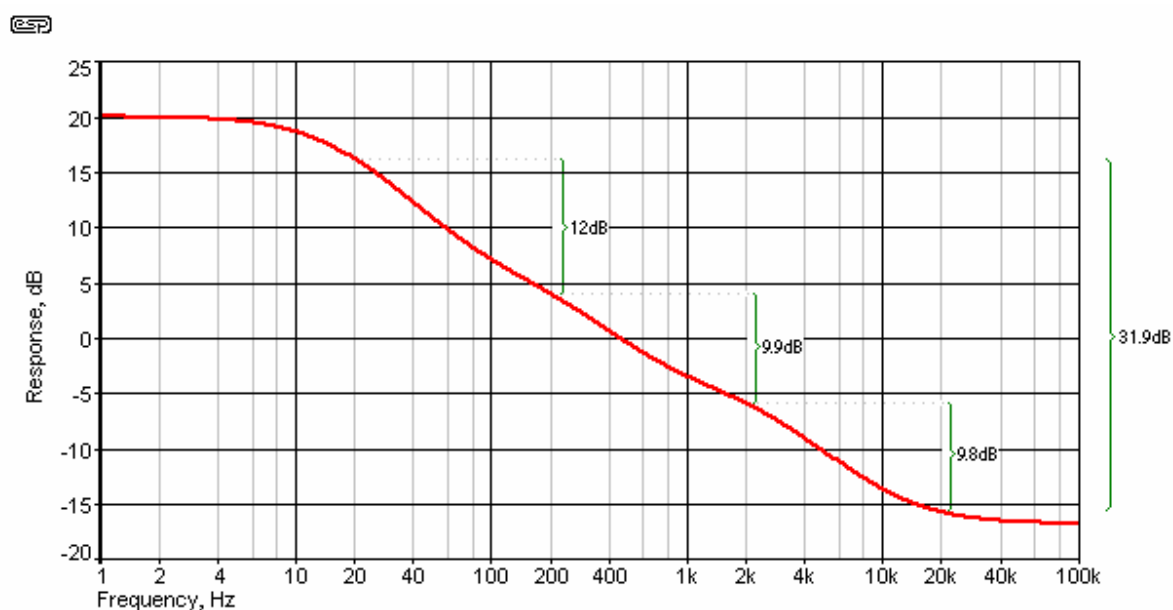


Рисунок 3.5 – Частотна характеристика базового фільтра

Характеристика базового фільтра (рис. 3.5), отримана від базової схеми. Вона не ідеальна, але вона більш ніж достатньо близька для всіх, крім найвибагливіших вимог. Існує додаткове зниження низьких частот, створене С4 і С8, але вони не включені в графік. Похибка зазвичай становить менше 1 дБ у діапазоні аудіо, хоча окремі точки можуть перевищувати її. Пульсація в схилі згортання є характерною для фільтра, який є прийнятним, але не оптимізованим.

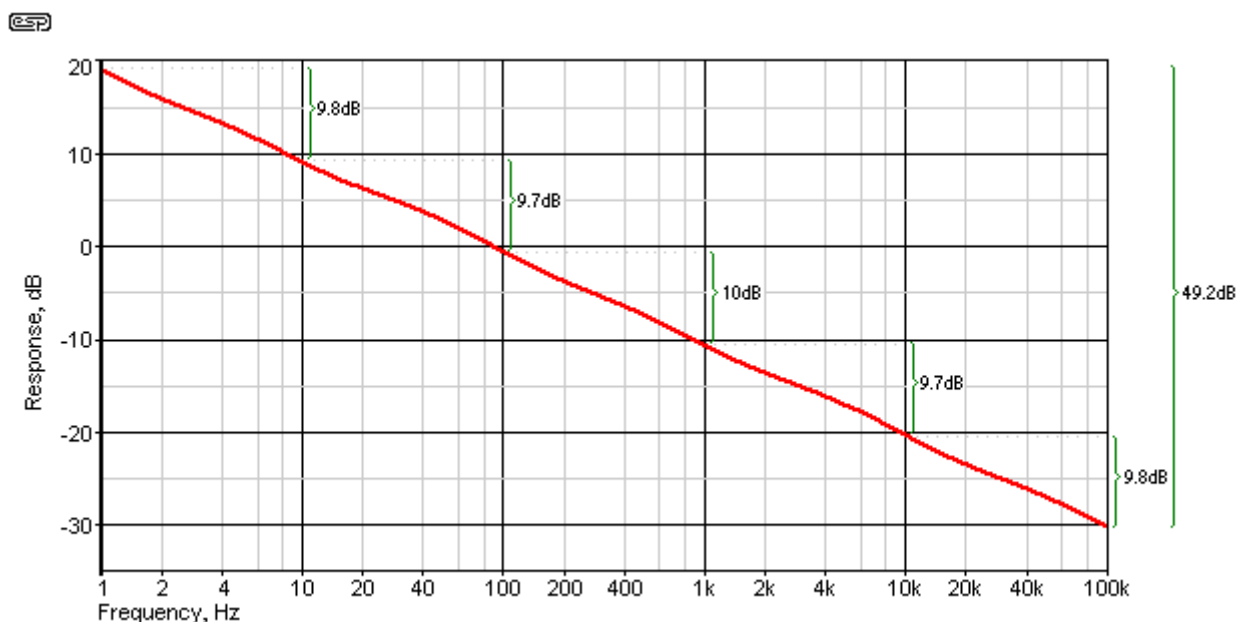


Рисунок 3.6 – Частотна характеристика 3дБ / октавного фільтра

Крива являє собою майже ідеальну пряму лінію від 1 Гц до 100 кГц. Також показано ослаблення для кожної декади – вони не доводяться до загальної суми, оскільки окремі значення декади були округлені до одного десяткового знака. Для будь-якого окремої декади (наприклад, від 400 Гц до 4 кГц або від 27 Гц до 270 Гц) похибка становить менше 1 дБ, а в більшості випадків буде менше 0,5 дБ. Практично неможливо отримати будь-який шумовий сигнал, щоб мати ідеальну характеристику рожевого шуму, тому існують невеликі похибки. Додавання додаткових частот точок розриву не покращує відгук, показаний вище, насправді він стає гіршим. Декадний інтервал, здається, близький до оптимального. На схилі фільтра є невелика

пульсація (це видно на графіку відповіді). Це характеристика всіх 3дБ / октавних фільтрів.

Цілком допустимо видалити фільтр найнижчої частоти, якщо не потрібна повна пропускна здатність, але компоненти фільтра не можна просто видалити. Існуючий резистор 1.8М (R8) замінюється на 1М, а фільтр 1М + 100 нФ (Rf1 і Cf1) потім видаляється. На високочастотному закінченні Cf7 має залишатися таким, як показано.

Потрібно зауважити, що частоти нижче 20 Гц можуть мати високу амплітуду і можуть легко викликати відсікання підсилювача та/або надмірне зміщення конуса, якщо не використовується фільтр високих частот. Якщо сигнал підключений до високочастотного динаміка через підсилювач, але без фільтра, практично гарантовано, що динамік вийде з ладу. Фільтр підтримує підсилення значно нижче 1 Гц - він має максимум на 0,1 Гц (підвищення 25 дБ), але C4 обмежить усе нижче 0,16 Гц - все ще потенційно небезпечно низька частота.

Можна дослідити, що буде відбуватися, якщо в схемі, видалити декілька RC ланок, та як зміниться частотна характеристика.

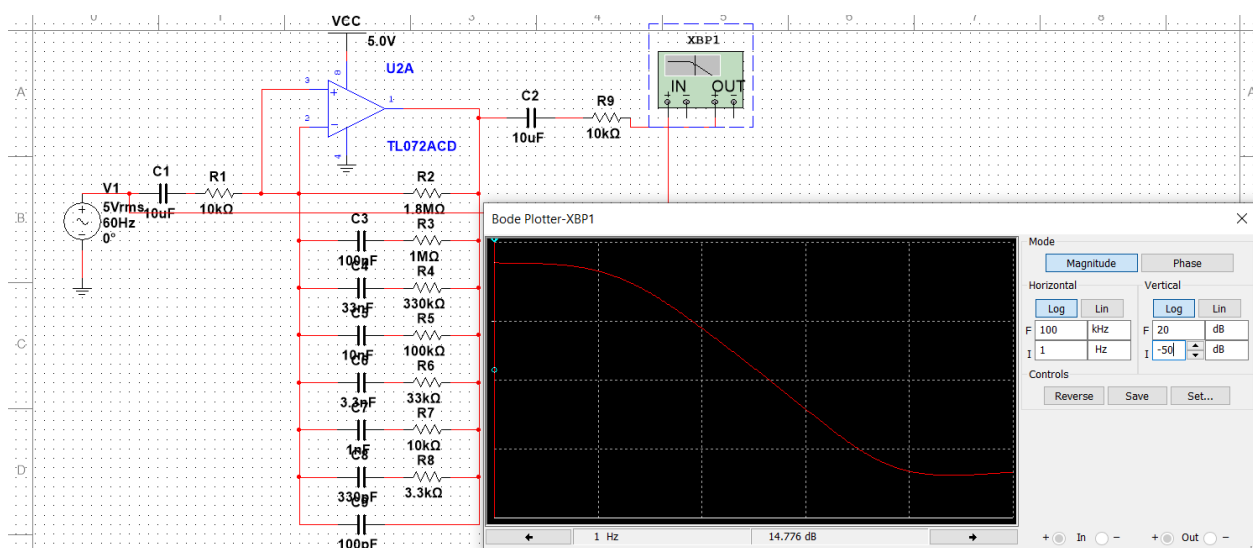


Рисунок 3.7 – Моделювання 3дБ / октавного фільтра з 7 RC ланками

Для моделювання будемо використовувати програму NI Multisim. Зберемо нашу схему та проведемо моделювання.

Тепер будемо прибирати зі схеми по 1 ланці, моделювати та спостерігати за залежністю.

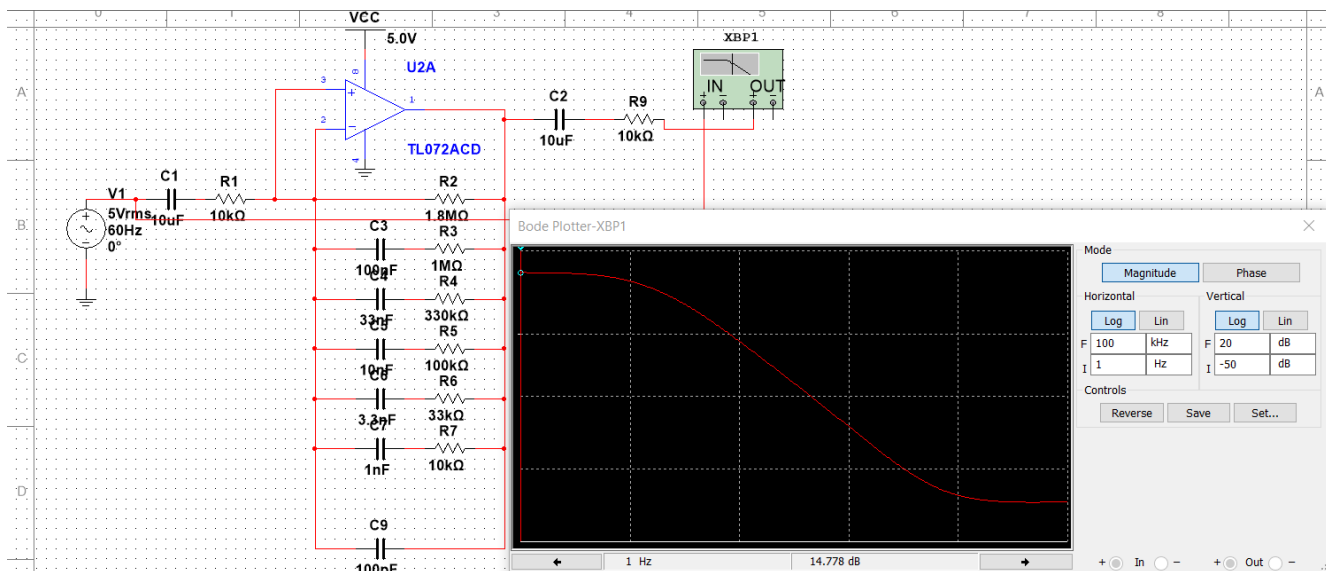


Рисунок 3.8 – Моделювання ЗДБ / октавного фільтру з 6 РС ланками

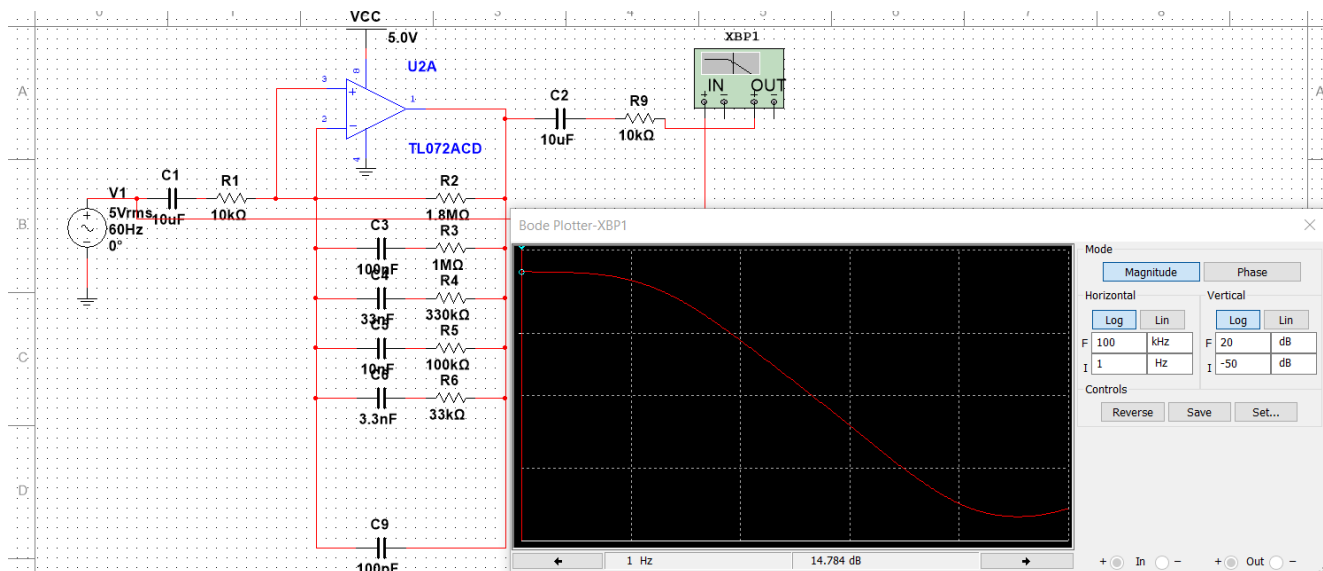


Рисунок 3.9 – Моделювання ЗДБ / октавного фільтру з 5 РС ланками

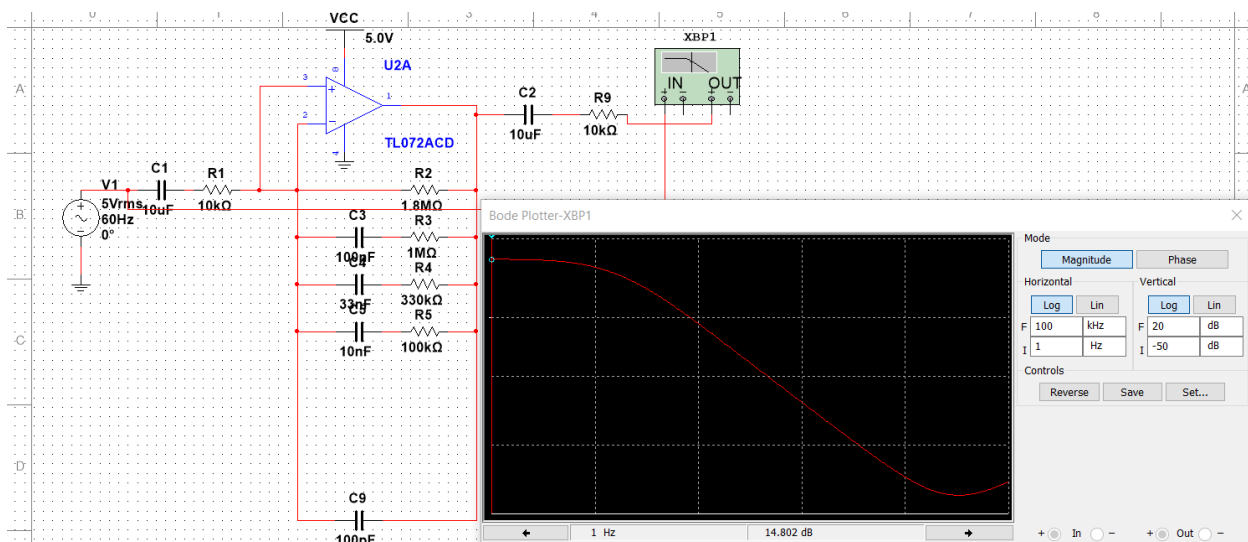


Рисунок 3.10 – Моделювання 3дБ / октавного фільтру з 4 RC ланками

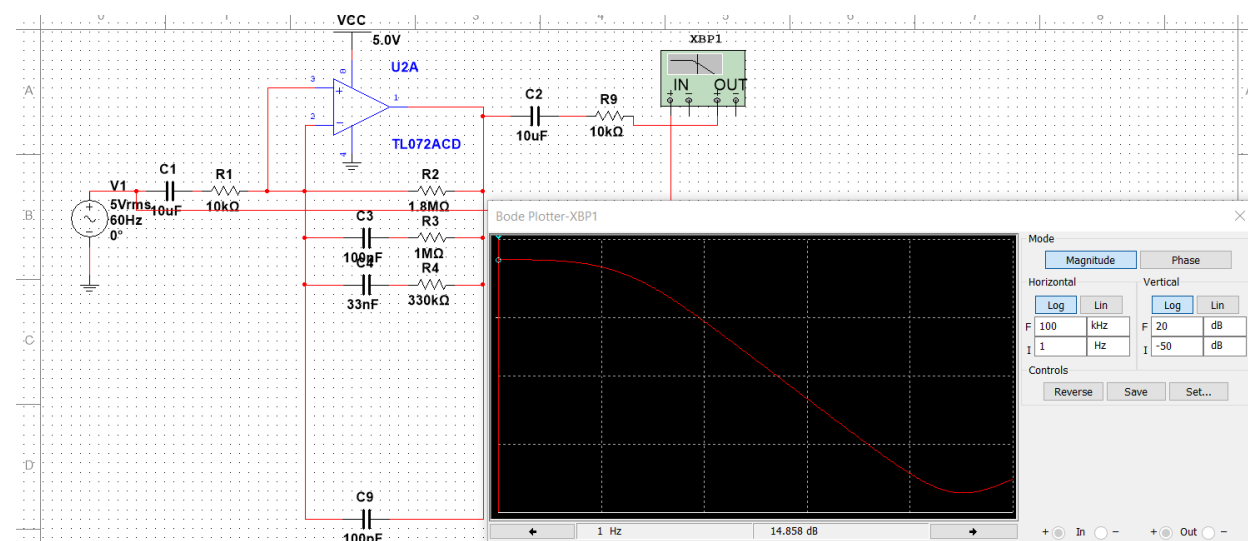


Рисунок 3.11 – Моделювання 3дБ / октавного фільтру з 3 RC ланками

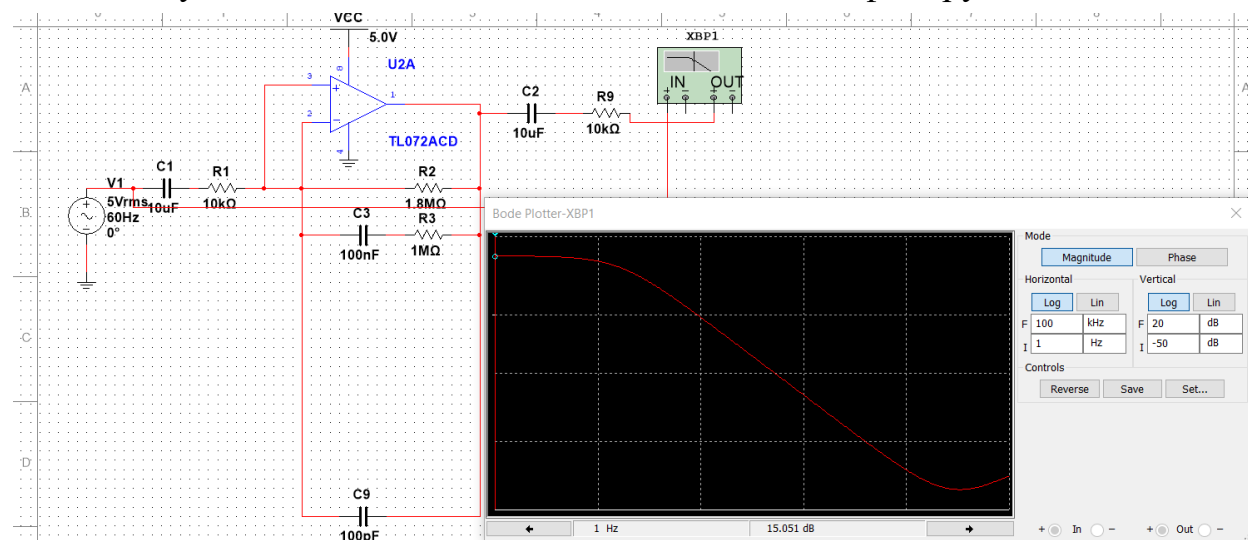


Рисунок 3.12 – Моделювання 3дБ / октавного фільтру з 2 RC ланками

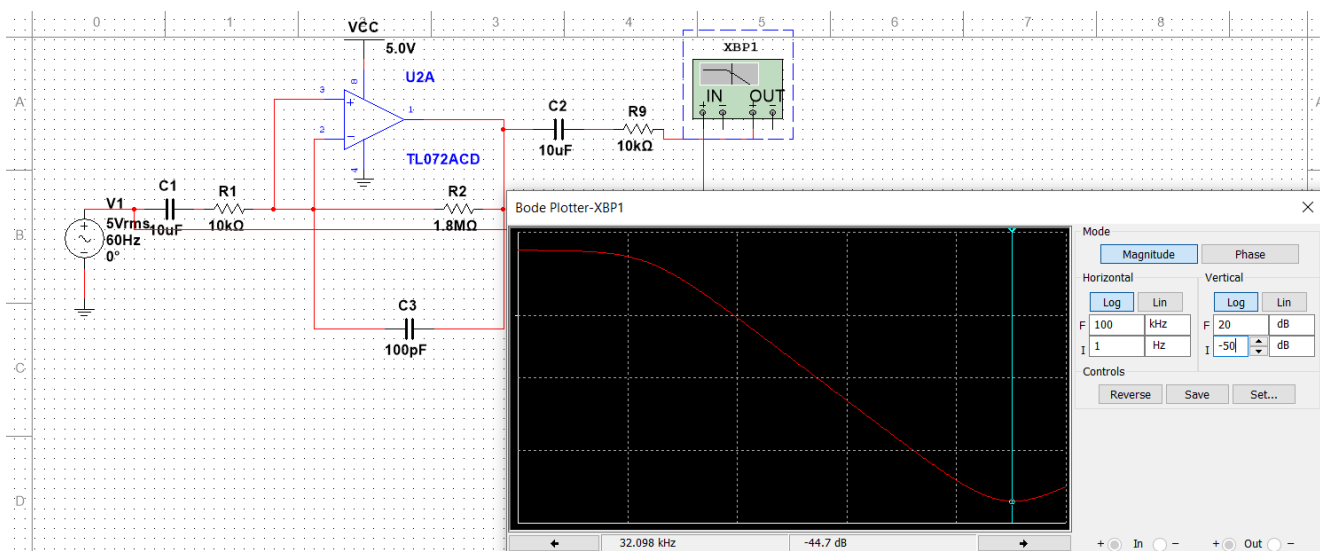


Рисунок 3.13 – Моделювання ЗдБ / октавного фільтру з 1 RC ланкою

Починаючи з частоти 32 кГц, частотна характеристика не має лінійного характеру, як у колі з 7 RC ланками. Після проходження точки 32 кГц ми спостерігаємо зростання на графіку. Це дозволило нам побачити чому саме у схемі використовується саме така кількість RC ланок.

3.4 Фільтри рожевого шуму ІЕС

Через потенціал високої енергії на дуже низьких частотах і пошкодження високих частот, ІЕС (International Electrotechnical Commission; укр. Міжнародна електротехнічна комісія) визначив стандартний фільтр, який можна використовувати з генераторами рожевого шуму [2].

ІЕС 60268-1 (рис.3.14) визначає фільтр, який є практично плоским між 22,4 Гц і 22,4 кГц.

Мета полягає в тому, щоб кінцева відповідь фільтра залишалася в межах області, обмеженої червоною та зеленою кривими. Це дає передбачувану остаточну відповідь, але виникає зайве надмірне ускладнення. Було б набагато простіше просто вказати необхідні нахили фільтра (як показано) і призначити частоти -3 дБ. Якщо значення потім розраховані точно, відповідь автоматично відповідатиме необхідній кривій.

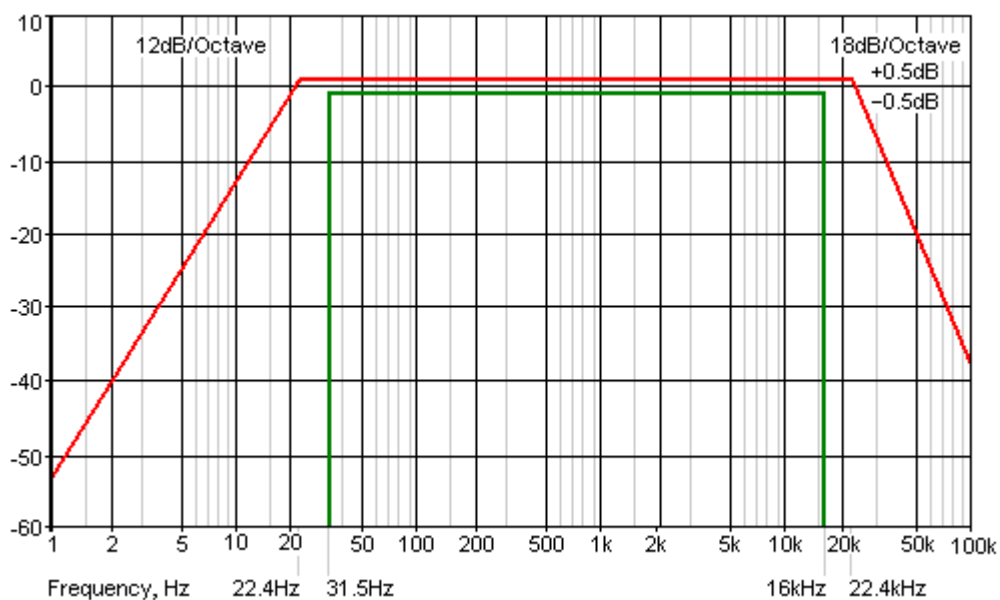


Рисунок 3.14 – Відповідь фільтра рожевого шуму ІЕС

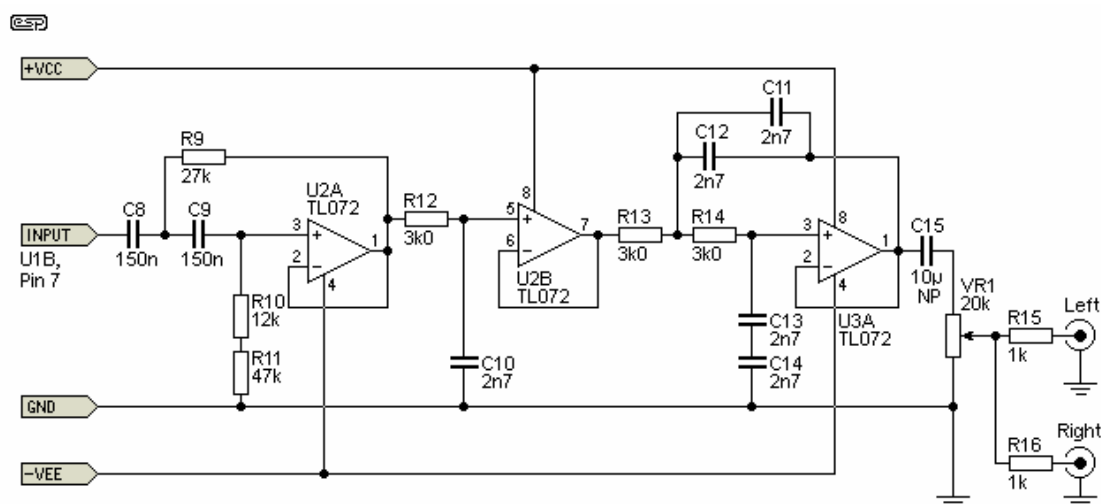


Рисунок 3.15 – Схема фільтра рожевого шуму

Реалізація фільтра, який відповідає вимогам (рис. 3.15), описана нижче. Вхід береться безпосередньо з контакту 7 U1B. Перший етап - це фільтр високих частот 12 дБ/октаву з частотою -3 дБ 22,7 Гц, а потім 18 дБ/октавний фільтр низьких частот, встановлений на 19,6 кГц.

Частина схеми виглядає складнішою, ніж вона є насправді, тому що я навмисно спроектував її так, щоб була мінімальна кількість різних значень

компонентів, і щоб можна було отримати всі значення. Використовуючи конденсатори 2,7 нФ послідовно і паралельно, якщо потрібно, вимога щодо неможливих значень повністю усувається. Резистори 3,0 кОм мають стандартні значення у серії E24.

Як показано, є запасний операційний підсилювач (U2B). Він повинен бути з'єднаний з контактами 6 і 7 закороченими, а контакт 5 повернутий на землю. Звичайно, ми можемо використовувати операційний підсилювач, якщо потрібно. Його можна використовувати як додатковий каскад підсилення або для буферизації виходу після контролю рівня.

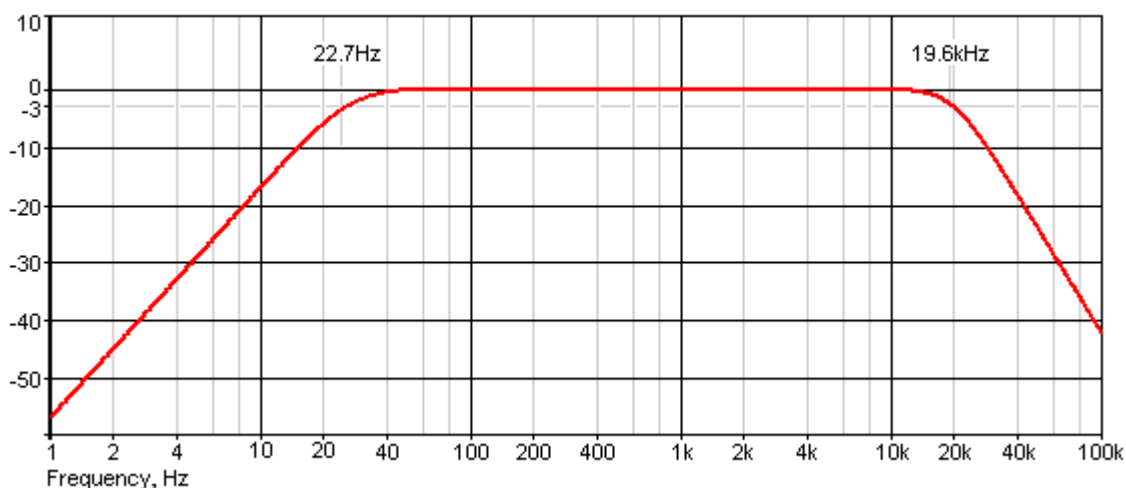


Рисунок 3.16 – Відповідь фільтра рожевого шуму

Це (близька до) частотна характеристика схеми фільтра (рис. 3.16) - насправді вона дуже незначно змінена через переглянуті значення компонентів. Це відповідає вимогам IEC 60268-1, але, що більш важливо, має відповідати потребам людей, які проводять тестування рожевим шумом. Усунувши значну позасмугову енергію, тести будуть більш надійними та передбачуваними, з меншою ймовірністю пошкодження гучномовців або підсилювачів.

ВИСНОВОК

Рожевий шум – це джерело широкосмугового сигналу, що охоплює всю звукову смугу. Він підходить для тестування аудіо пристроїв, таких як підсилювачі, коригувальні передпідсилювачі, акустичні системи, кросовери.

Робота спрямована на розробку цифрового генератора рожевого шуму, який дозволяє збільшити швидкодію тестування звуку та зменшити енерговитрати за рахунок використання подвійних операційних підсилювачів RC4558 або LM1458. Вирішено задачі, пов'язані з розробкою структури цифрового генератора рожевого шуму, схеми електричної принципової цифрового генератора рожевого шуму, здійснено моделювання 3дБ/октавного фільтру.

Рожевий шум можна використати для тестування відгуку, на відміну від білого шуму. За допомогою комбінування 3 дБ / октавного фільтру та джерела білого шуму можна отримати наближення до «ідеального» рожевого шуму, але найпростіший фільтр згортається на рівні 6 дБ / октаву, тому для його реалізації повинні використовувати кілька секцій фільтрів.

Схема генератора рожевого шуму на основі TL072 або RC4558, реалізована в роботі, що дає отримати лінійну відповідь в межах від 22.7 Гц до 19.6 кГц. Визначено, як саме впливає кількість RC ланок у схемі альтернативного 3 дБ / октавного фільтру на АЧХ.

Генератор шуму може використовуватися в різних галузях науки та техніки, а саме: випробування та вимірювання, комунікації, радіоприймачі, тестування пристроїв, криптографія, наукові дослідження, імітація середовища.

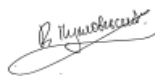



ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Electronics Today International, November 1981 - Audio White Noise Generator Employs Digital Technique.
2. IEC 60065, Annex C (Normative), Band-pass filter for wide-band noise Measurement.
3. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных : пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. — М. : Мир, 1989. — 540 с. — ISBN 5-03-001071-8.
4. Ashby, D., ed., Circuit Design: Know It All. Newnes (2008)
5. Camenzind, H., Much Ado About Almost Nothing, Man's Encounter with the Electron. Booklocker.com (2007).
6. Williams, J., ed., The Art and Science of Analog Circuit Design. Butterworth–Heinemann (1998).
7. Williams, J., ed., Analog Circuit Design: Art, Science, and Personalities. Butterworth–Heinemann (1991).
8. Sheingold, D. H., ed., The Best of Analog Dialog, 1967 to 1991.
9. Pease, R. A., Troubleshooting Analog Circuits. Butterworth–Heinemann (1991).
10. Buckingham, M. J., Noise in Electronic Devices and Systems. Wiley (1983).
11. Hollister, A. L., Wideband Amplifier Design. Scitech (2007).
12. Netzer, Y., “The design of low-noise amplifiers.” Proc. IEEE 69:728–741 (1981).
13. Ott, H., Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. Wiley (1988).
14. Radeka, V., “Low-noise techniques in detectors.” Ann. Rev. Nucl. and Part. Physics, 38:217–277 (1988).
15. Hilburn, J. L., and Johnson, D. E., Manual of Active Filter Design. McGraw-Hill (1982).

16. Parzen, B., Design of Crystal and Other Harmonic Oscillators. Wiley (1983).
17. Williams, A. and Taylor, F., Electronic Filter Design Handbook. McGraw-Hill (4th ed., 2006).
18. Johnson, H. and Graham, M., High Speed Signal Propagation: Advanced Black Magic. Prentice-Hall (2003).
19. Best, R. E., Phase-locked Loops. McGraw-Hill (6th ed., 2007).
20. Sheingold, D. H., ed., Transducer Interfacing Handbook. Analog Devices (1980).

Відомість кваліфікаційної роботи

«Генератор рожевого шуму для тестування звуку»

	Прізвище та ініціали відповідальної особи	Підпис	Дата
Роботу виконав студент групи СКСм-22-2. Структура кваліфікаційної роботи: – пояснювальна записка <u>56</u> с.; – графічний матеріал <u>16</u> арк..	Пупловський Д.С.		15.01.2024
Керівник роботи	Литвинова Є.І.		15.01.2024
Перевірка на плагіат здійснена. Оригінальність авторського тексту складає _____ 97 %	Литвинова Є.І.		16.01.2024
Нормоконтроль проведено :	Литвинова Є.І.		15.01.2024