НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___»_____20__ р.

Дипломна робота

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
на тему: «Перетворювач імпедансу для активних п'єзоелектричних фільтрів»**

Виконав :
студент IV курсу, групи ДП-01
Кулаков Андрій Сергійович _____

Керівник: проф. каф. МЕ, к.т.н., проф.
Орлов Анатолій Тимофійович _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Свєчніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,
Діденко Юрій Вікторович _____

Рецензент: доц.каф.ЕІ, к.т.н., доц.,
Попов Антон Олександрович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Кулакову Андрію Сергійовичу

1. Тема роботи «Перетворювач імпедансу для активних п’єзоелектричних фільтрів», керівник роботи Орлов Анатолій Тимофійович, кандидат технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом роботи 03.06.2024

3. Вихідні дані до роботи

Моделі транзисторів для 180 нм CMOS інтегральної технології.

4. Зміст роботи

Окреслення сфер застосування перетворювачів імпедансу. Створення моделі радіочастотного перетворювача імпедансу. Моделювання роботи схем із використанням гіратора.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Презентація для захисту дипломної роботи, ілюстрації електричних схем створених у ПЗ Cadence Virtuoso, графіки залежностей.

6. Дата видачі завдання 15.04.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Проходження інструктажу з ТБ та ППБ.	17.04.2024	
2	Вивчення наукової літератури на тему перетворювачів імпедансу	17.04.2024	
3	Ознайомлення із ПЗ Cadence Virtuoso	24.04.2024	
4	Вивчення наукової літератури на тему пасивних п’єзоелектричних фільтрів	24.04.2024	
5	Створення моделі радіочастотного перетворювача імпедансу - гіратора	01.05.2024	
6	Дослідження можливостей створення активних фільтрів на основі спроектованого гіратора	01.05.2024	
7	Формування висновків із приводу застосування гіраторів для активних п’єзоелектричних фільтрів	08.05.2024	
8	Написання пояснювальної записки до дипломної роботи	02.06.2024	

Студент Андрій Кулаков

Керівник Анатолій Орлов

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 54 сторінки, 26 ілюстації, і посилається на 20 наукових праць.

Мета роботи – розробити схемну модель радіочастотного перетворювача імпедансу, висвітлити обмеження які виникають при проектуванні таких приладів та оцінити можливість його використання у активних п’єзоелектричних фільтрах.

Об’єкт дослідження – Перетворювач імпедансу для активних п'єзоелектричних фільтрів.

Предмет дослідження – радіочастотні параметри перетворювача імпедансу для активних п'єзоелектричних фільтрів.

Методи дослідження – математичне моделювання роботи приладу, обробка та аналіз отриманих результатів.

В першому розділі приведений огляд сучасної літератури, яка охоплює п’єзоелектричні фільтри і перетворювачі імпедансу.

В другому розділі розглянуто теоретичні засади, на яких працюють гіратори. Наведені підходи для схемної реалізації даних приладів. Розглянуті сфери застосування гіраторів.

В третьому розділі проведено моделювання схем із використанням створеної моделі гіратора. Показано створення активного RLC фільтра із використанням еквівалентної індуктивності та його порівняння із пасивним RLC фільтром.

Ключові слова: перетворювач імпедансу, операційний підсилювач, гіратор, ОТА, активні п’єзоелектричні фільтри.

ABSTRACT

This work consists from 54 pages, contain 26 illustrations, and refers to 20 science sources.

Goal of this work is to develop schematic of radiofrequency impedance converter, show limitations which occur while creating those devices and evaluate possibility of usage of such devices in active piezoelectric filters.

Object of research is impedance converter for active piezoelectric filters.

Subject of research is radiofrequency parameters of impedance converter for active piezoelectric filters.

Research methods are: mathematic modeling of device, result processing and analysis.

First chapter consist of processing of science literature about piezoelectric filters and impedance converters/

Second chapter looks into theory behind gyrators. Describes methods for schematic realization of those devices. Shows fields where gyrators can be used.

Third chapter include modeling of schemes with created gyrator model. Shows creation of active RLC filter with equivalent inductance and its comparison with passive RLC filter.

Key words: impedance converter, operational amplifier, OTA, gyrator, active piezoelectric filters.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, одиниць і термінів.....7
Вступ.....8
Розділ 1: Літературний огляд.....11
1.1 П'єзоелектричні резонатори.....11
1.2 Пасивні п’єзоелектричні фільтри.....14
1.3 Перетворювачі імпедансу.....16
Розділ 2: Гіратор.....22
2.1 Принцип роботи гіраторів.....22
2.2 Схемна реалізація гіраторів.....25
2.3 Застосування гіраторів.....29
Розділ 3: Модель перетворювача імпедансу для активних п’єзоелектричних фільтрів.....33
3.1 Створення моделі перетворювача імпедансу.....33
3.2 Моделювання схеми еквівалентної індуктивності у ПЗ Cadence Virtuoso.....40
3.3 Моделювання схеми смуго пропускного фільтра у ПЗ Cadence Virtuoso.....43
3.4 Перетворення імпедансу моделі п’єзоелектричного резонатора.....46
Висновки.....50
Перелік використаних джерел.....52

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ОАХ – об’ємні акустичні хвилі

ПАХ – поверхневі акустичні хвилі

ПЗ – програмне забезпечення

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

ОТА – операційний підсилювач транспровідності

САПР – Система автоматизованого проєктування

RLC – електронне коло яке складається з послідовно з’єднаних опору індуктивності і ємності

ВСТУП

Із мініатюризацією електричних схем використання індуктивностей почало визивати певні складнощі, основні із них це великі розміри цього елементу та розбіжність параметрів при виготовлені на різних технічних процесах. Тому виникла потреба у зменшені розмірів індуктивності і покращені стабільності її параметрів. Окрім того використання пасивних фільтрів має свої обмеження, такі як необхідність збільшувати кількість пасивних елементів для підвищення добротності фільтра та важкість точного налагодження пасивного фільтра на задану частоту.

Інші проблеми з якими стикається сучасна схемотехніка це необхідність узгодження імпедансу для якісної передачі сигналу без спотворень та отримання фільтрів із різким затуханням сигналу на всіх частотах крім частоти пропускання.

Вирішення вище перерахованих проблем потребує використання перетворювачів імпедансу. Оскільки використання ємностей у порівнянні із індуктивностями у інтегральній технології займає менше місця, то при можливості реалізувати індуктивність на основі ємнісного елементу, якщо це не вплине негативно на роботу схеми, потрібно надавати перевагу саме еквівалентним індуктивним елементам. Можливість отримувати такі елементи нам дають перетворювачі імпедансу, які перетворюють імпеданс у обернений – гіратори, завдяки цій властивості вони знайшли широке застосування в електроніці.

Перетворювачі імпедансу також використовуються для узгодження імпедансів різних каскадів схеми. Це часто застосовується у радіочастотній електроніці і електроакустиці.

У цій роботі будуть описані задачі, які ставляться перед перетворювачами імпедансу і коротко описана різниця між перетворювачами імпедансу різного призначення.

У даній роботі буде розглянуто реалізацію моделей: радіочастотного перетворювача імпедансу – гіратора, еквівалентної індуктивності побудовоної із його використанням та порівняння смуго пропускного фільтра із звичайною індуктивністю та еквівалентною індуктивністю однакового номіналу.

Гіратор буде побудований на основі операційного підсилювача, будуть наведені міркування з приводу розробки як операційного підсилювача так і гіратора на його основі. Особлива увага буде приділятись обмеженням, які варто враховувати, при використанні операційних підсилювачів для реалізації гіраторів та принципам побудови схем із гіраторами.

У даній роботі буде висвітлено можливе використання перетворювачів імпедансу для їх застосування у активних п’єзоелектричних фільтрах та обмеження, які виникають при використанні перетворювачів імпедансу у фільтрах даного типу.

Дана робота покаже як визначити на якій частоті операційний підсилювач перестане виконувати свої задачі, а отже і гіратор, який побудований на цьому операційному підсилювачі. Будуть запропоновані методи для підвищення максимальної робочої частоти операційного підсилювача і, у випадку якщо операційний підсилювач не зможе працювати на потрібній частоті після модифікації, будуть запропоновані підсилювачі, які працюють на більших частотах.

Моделювання схем у даній роботі відбувалось у ПЗ Cadence Virtuoso, буде наведений метод перевірки насичення транзисторів із використання САПР, даний метод перевірки дозволяє значно зекономити час при роботі із великою кількістю транзисторів.

Розробка операційного підсилювача і перетворювача імпедансу проводилась для 180 нм технології із використанням транзисторів розрахованих на напругу живлення рівній 3.3 В.

РОЗДІЛ 1: ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 П'єзоелектричні резонатори

Із потребою у збільшенні швидкості передачі інформації, виникла потреба у використанні більших частот. Довгий час резонатори на основі ПАХ використовувались для даних цілей. Однак із подальшою потребою збільшення частоти виготовлення ПАХ резонаторів стає складнішим. Частота резонансу f_p для ПАХ резонаторів напряму залежить від відстані між штиревими електродами на підкладці рис. 1.1.

$$f_p = V_{пх} / \lambda, \text{ де}$$

$V_{пх}$ – швидкість поширення поверхневої хвилі, λ – період візерунка штирьового електрода

Підвищення f_p примушує до зменшення товщини електродів, що призводить до збільшення опору електродів, а це в свою чергу зменшує добротність резонатора.

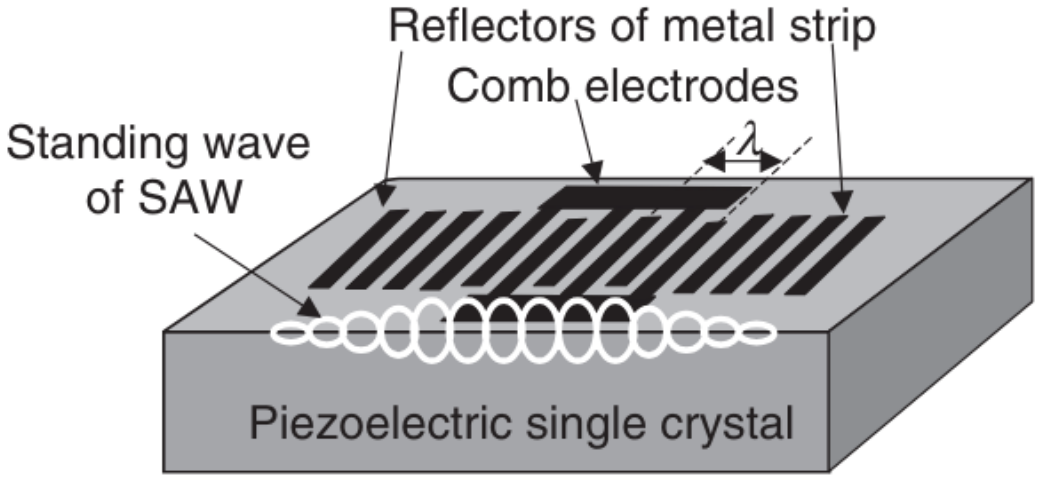

Рисунок 1.1 – Будова ПАХ резонатора [8]

Для підтримання збільшення частот перспективною розробкою є ОАХ резонатори рис. 1.2. У таких резонаторах f_p залежить від товщини електродів і товщини п'єзоелектричної плівки. Приблизне значення f_p для ОАХ резонаторів можна знайти з формули:

$$f_p = V_{ox} / 2h_c, \text{ де}$$

V_{ox} – швидкість поширення об'ємної хвилі, h_c – суміщена товщина електродів і плівки.

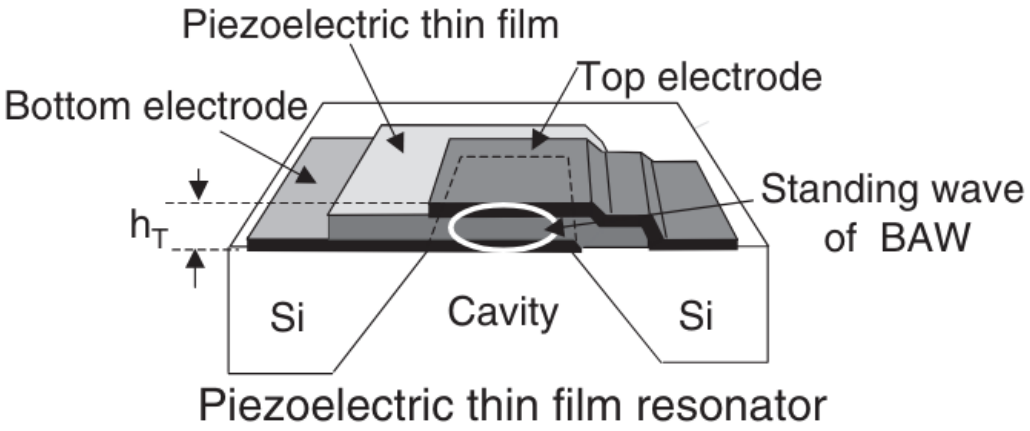

Рисунок 1.2 – Будова ОАХ резонатора [8]

Для 5 ГГц п'єзоелектричних резонаторів на ПАХ необхідний період візерунка штирьового електрода дорівнює 180 нм, зменшення періоду візерунку, як вказувалось раніше, призводить до зменшення добротності.

Суміщена товщина електродів і плівки ОАХ резонаторів для досягненя частоти 5 ГГц є рівною 400 нм. Для виготовлення таких приладів субмікронна фотолітографія на відміну від ПАХ резонаторів не є обов'язковою [8].

Основним недоліком ОАХ резонаторів є необхідність точно контролювати розміри утворених резонаторів, це напряму відображається на вартості таких пристроїв.

Для спрощення обрахунку параметрів резонаторів при їх використанні у електронних схемах застосовують еквівалентні електричні схеми. Однією із найпростіших є модель Баттерворта-Ван Дайка (БВД) рис. 1.3. Використання моделей значно пришвидшує розрахунок схем із використанням резонаторів.

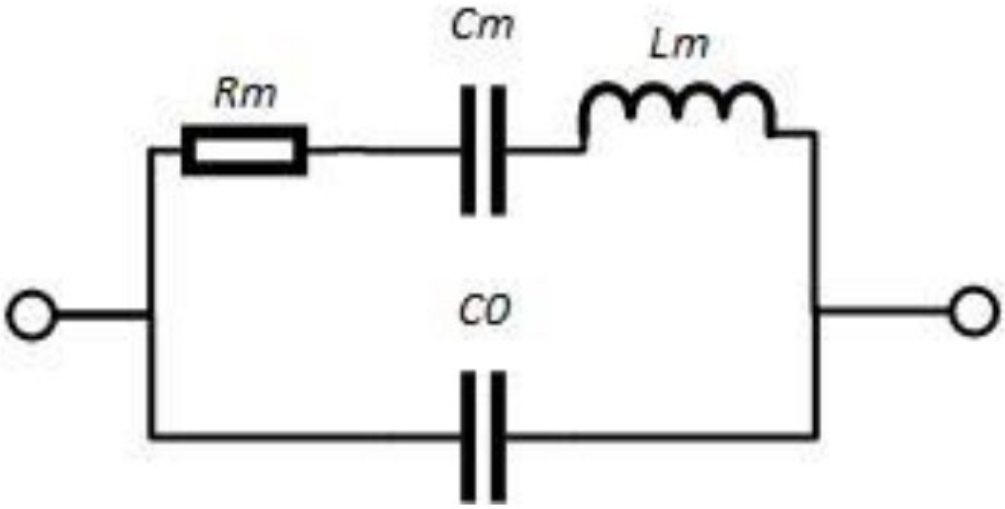

Рисунок 1.3 – Еквівалента електрична модель для п’єзоелектричного резонатора (БВД) [9]

1.2 Пасивні п’єзоелектричні фільтри

Пасивні п’єзоелектричні фільтри можна отримати на основі п’єзоелектричних резонаторів. При використанні резонаторів ПАХ можна отримати більш дешеві фільтри із ширшою смугою пропускання. Використовуючи ОАХ резонатори досягають вужчої смуги пропускання, менших втрат та крутіший спад амплітуди на нижній і верхній частотах пропускання.

Оскільки нас цікавить робота фільтрів на високих частотах, використання ПАХ фільтрів є недоцільним. Розглянемо структуру ОАХ фільтрів на основі тонкоплівкових резонаторів. Такі фільтри найчастіше реалізують на основі сходової і мостової топологій наведених на рис 1.4. Також можливий третій тип топології, який є поєднанням сходової і мостової топологій.

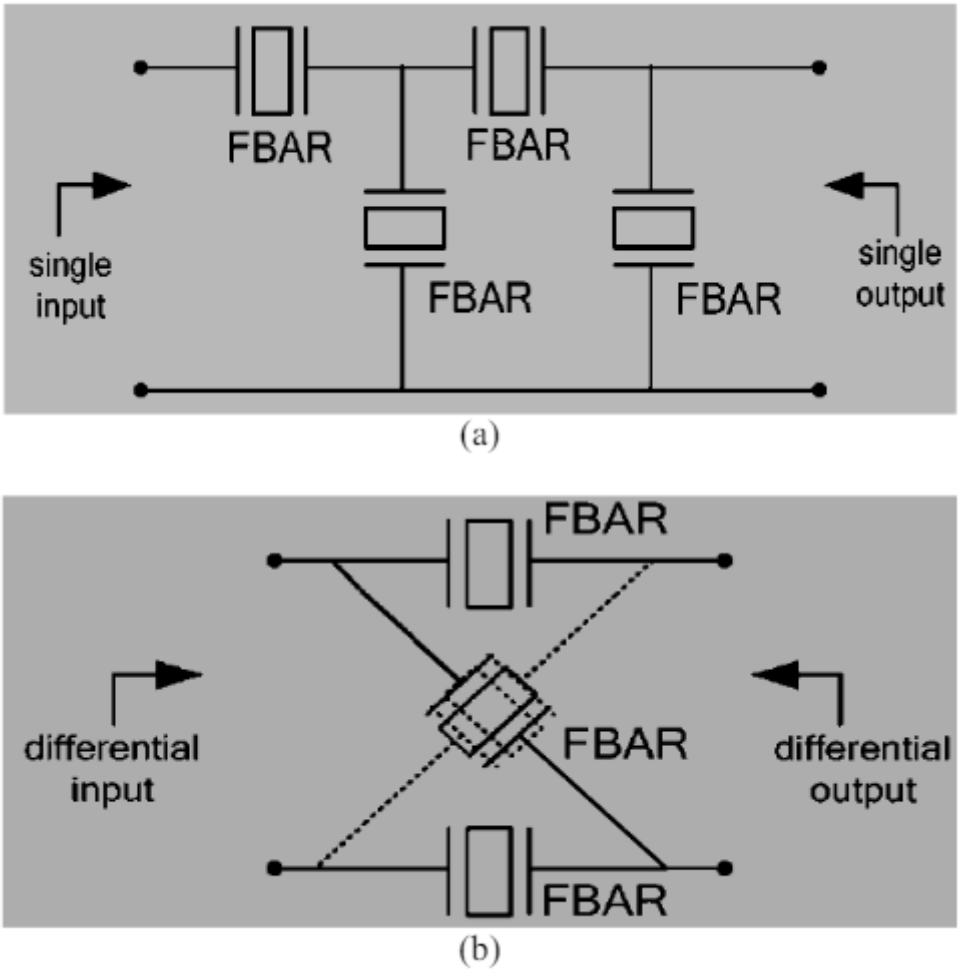

Рисунок 1.4 – Топологія пасивних фільтрів: (а) – сходова, (б) – мостова [6]

Сходова топологія поетапно відфільтровує вхідний сигнал, даний підхід дозволяє отримувати більш точний та стабільний вихідний сигнал. Для сходової топології притаманні: низькі втрати, різкий зріз смуги пропускання та низький рівень загасання поза смугою пропускання.

Мостова топологія пропускає вхідний сигнал через дві пари резонаторів, змінюючи конфігурацію яких, можна отримувати різні типи фільтрації. Для мостової топології притамонні: менша крутизна зрізу ніж у сходової топології, проте мостові топології мають більший рівень відхилення смуги затримки у порівнянні із сходовою схемою.

1.3 Перетворювачі імпедансу

Перетворювач імпедансу – це електричне коло, яке змінює імпеданс вхідного сигналу, без значного впливу на амплітуду та інші характеристики цього сигналу.

Типи перетворювачів імпедансу:

- Електричні схеми для підтримання цілісності сигналу – змінюючи імпеданс вони, допомагають запобігти спотворенням сигналу при його передачі по довгим лініям передач.
- Перетворювачі сигналу у вигляді напруги у струмовий сигнал і навпаки – такі перетворювачі часто використовуються у сенсориці, сигнал із сенсору може поступати у вигляді струму, а для його подальшої обробки, сигнал необхідно перетворити у напругу.
- Буферні підсилювачі – схеми, які мають високий вхідний імпеданс і низький вихідний, їх використовують для ізоляції різних каскадів схем. Завдяки таким схемам, каскад, який виступає навантаженням не впливає на вхідний сигнал. Прикладом такої схеми є повторювач напруги на операційному підсилювачі.
- Узгоджувачі імпедансу – для передачі максимальної потужності імпеданс генератора має бути рівним імпедансу навантаження. Узгоджувачі імпедансу виконують цю роль, особливо важливим це є для радіо-частотної і електроакустичної електроніки, адже неспівпадіння імпедансу призводить до втрати або спотворення сигналу.

Головна роль перетворювачів імпедансу – оптимізація передачі сигналу у електричних колах, із забезпеченням максимальної передачі потужності, мінімізації втрат та спотворення сигналу.

Часто використовуємим є схема інвертора імпедансу наведена на рис 1.5. Про її використання у системі бездротової передачі потужності описано у статті [3].

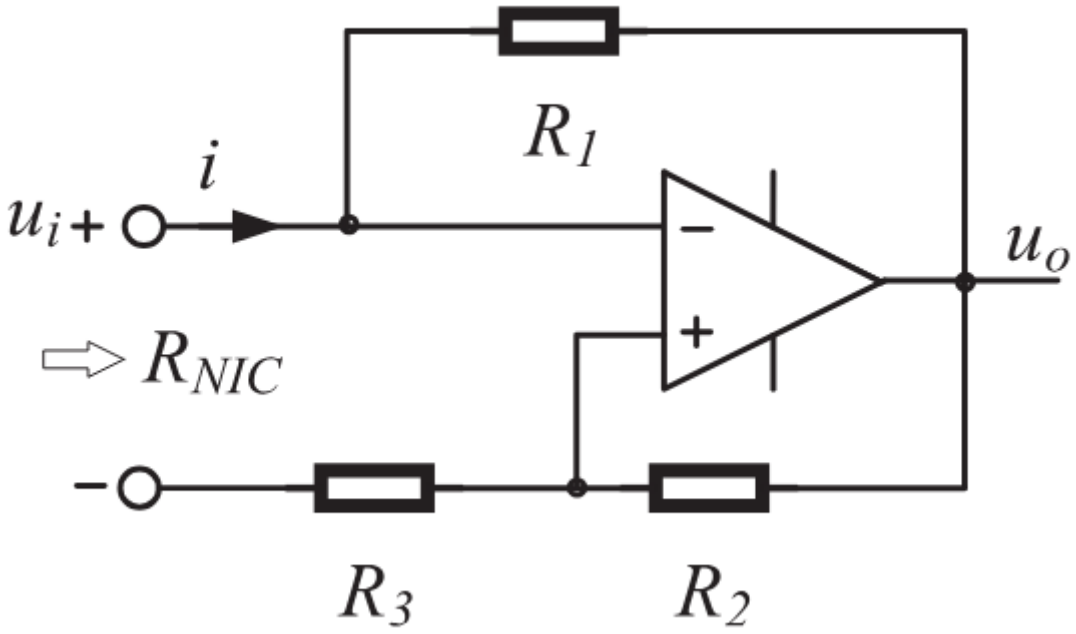

Рисунок 1.5 – Схема інвертора імпедансу [3]

Гіратор – це один із перетворювачів імпедансу, який примушую ємністі кола проявляти властивості індуктивності і навпаки індуктивні кола проявляти властивості ємності. У інтегральній технології, наприклад CMOS, схеми із використанням гіраторів часто використовують для заміни індиктивних участків електричного кола. Це пов’язано із тим, що створення індуктивностей у інтегральній технології потребує використання більшої площі, ніж аналогічна схема із використанням ємності і гіратора. Оскільки займана площа

напряму впливає на вартість продукції, варто намагатись використовувати як найменше місця на кристалі.

Існують різні схеми реалізації гіратора. На рис. 1.6 наведена ідеальна схемна модель гіратора. У цій моделі є два джерела струму керованих напругою, струм вхідного джерела залежить від вихідної напруги, а струм вихідного джерела залежить від вхідної напруги.

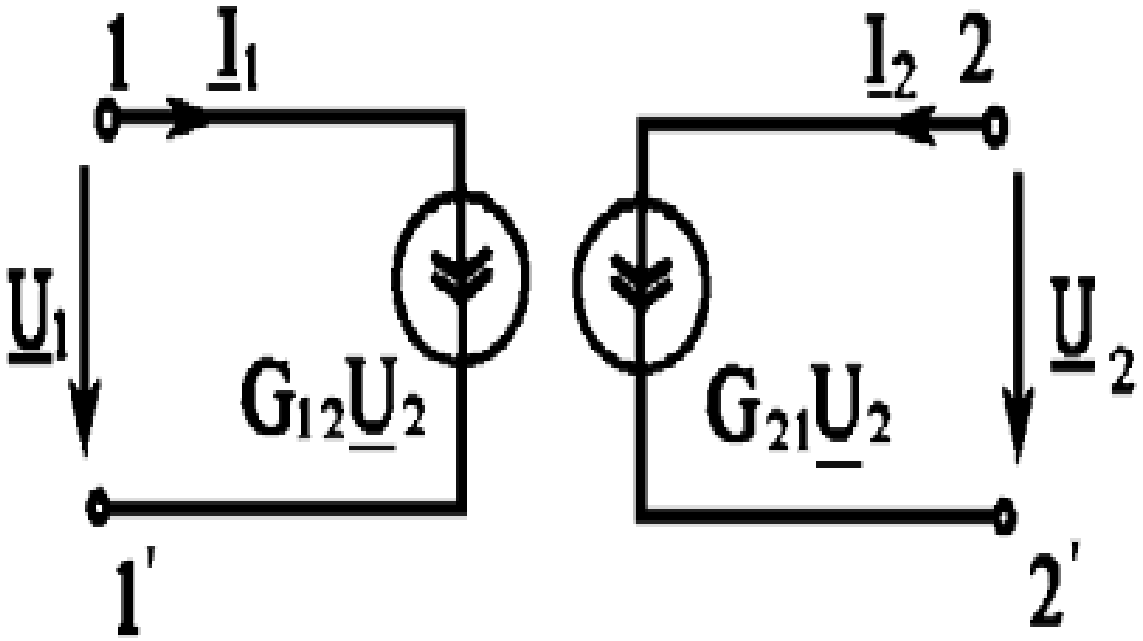

Рисунок 1.6 – Ідеальна модель гіратора [19]

Реальні моделі гіраторів можуть бути побудовані на транзисторах, операційних підсилювачах, негативних перетворювачах імпедансу або ОТА.

Схема гіратора побудованого на основі транзисторів наведена на рис 1.7. Схеми гіраторів на транзисторах підтримують більші частоти ніж гіратори на операційних підсилювачах, мають більше значення добротності та кращу

можливість налаштування. В свою чергу гіратори на операційних підсилювачах є легшими у впровадженні, споживають менше потужності та є більш стабільними за рахунок зворотнього зв’язку. Схемна реалізація гіратора на операційних підсилювачах наведена на рис. 1.8.

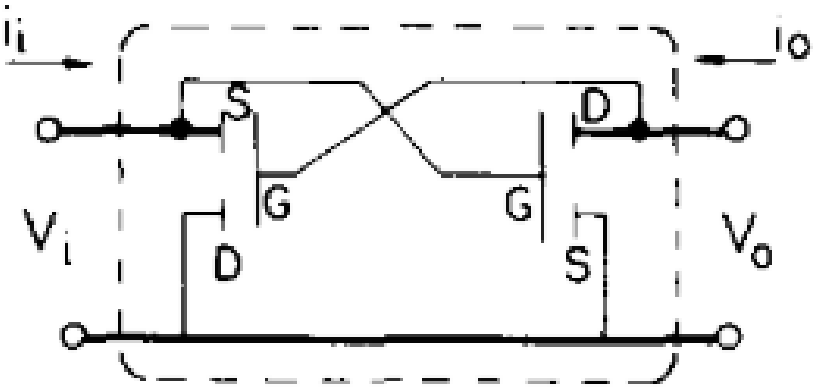

Рисунок 1.7 – Гіратор на основі транзисторів [18]

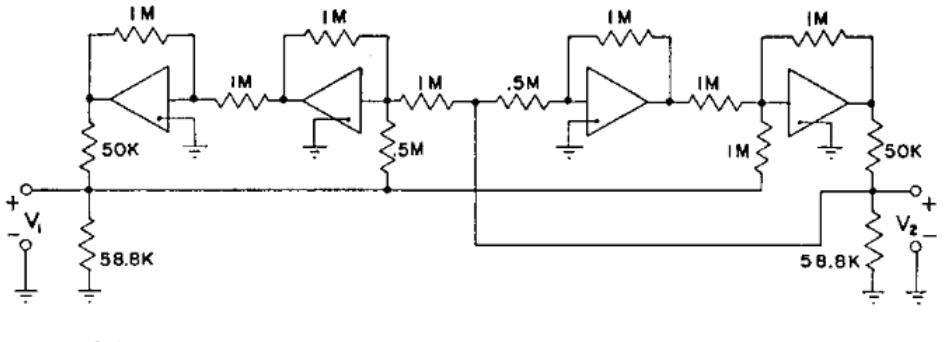

Рисунок 1.7 – Гіратор на основі операційних підсилювачів [11]

Перспективними є гіратори на основі ОТА. Вони мають переваги операційних підсилювачів при чому можуть працювати на високих частотах, коли операційні підсилювачі обмежені декількома МГц. Проте їх будова є набагато складнішою і розрахунок моделей, які включають всі елементи з яких складається ОТА не є доцільним. Використовуючи макромоделі можна отримати результати набагато швидше при майже незмінній точності результатів [20]. Схема гіратора із використанням ОТА наведена на рис. 1.8.

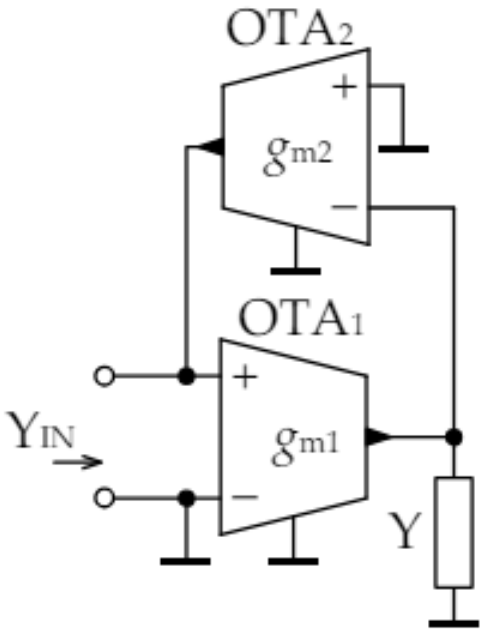

Рисунок 1.8 – Гіратор на основі ОТА [14]

Реалізація і моделювання роботи гіратора на основі ОТА описано у статті [14].

Висновки до розділу 1:

1. П’єзоелектричні фільтри на ОАХ краще підходять для роботи із великими частотами ніж ПАХ. Це пов’язано із технологіями виробництва даних пристроїв.

2. Використання індуктивностей у інтегральній технології часто не є раціональним, тому для заміни індуктивностей використовуються альтернативні схеми із використанням гіраторів.

3. Реалізація гіраторів можлива із використанням транзисторів, ОТА, операційних підсилювачів і негативних перетворювачів імпедансу.

4. Реалізація гіраторів із використанням ОТА має переваги операційних підсилювачів, і може працювати на більших частотах ніж гіратори із використанням операційних підсилювачів.

5. Використання макромоделей для ОТА і еквівалентних електричних схем для ОАХ резонаторів значно прискорює розрахунки і має мінімальний вплив на кінцеві результати.

РОЗДІЛ 2: ГІРАТОР

2.1 Принцип роботи гіраторів

Гіратори реалізують взаємне перетворення імпедансу між двома портами. В ідеальній моделі гіратора, яка зображена на рисунку 1.6, перетворення відбувається за будь якої частоти і без впливу на вхідний сигнал. Проте у реальних схемах можливі як невелика зміна амплітуди сигналу, так і неправильна роботи на великій частоті.

Ідеальний гіратор – це чотирьох полюсник, який описується такими рівняннями:

$$U_1 = R_{12}I_2 \quad (1)$$

$$U_2 = R_{21}I_1$$

$$I_1 = G_{12}U_2$$

$$I_2 = G_{21}U_1$$

R_{12} – це опір передачі холостого ходу, між портами 22', R_{21} – це опір передачі холостого ходу, між портами 11', G_{12} – це провідність передачі короткого замикання, між портами 22', G_{21} – це провідність передачі короткого замикання, між портами 11'. Для гіраторів характеристично, що опори передачі холостого ходу і провідності передачі короткого замикання завжди мають зворотній знак відносно один одного.

$$R_{12}\,R_{21} < 0 \quad (2)$$

$$G_{12}\,G_{21} < 0$$

Зазвичай параметри передачі таких чотирьохполюсників вважають рівними, тоді можна прирівняти опори передачі холостого ходу $|R_{12}| = |R_{21}| = R_g$ і провідності короткого замикання $|G_{12}| = |G_{21}| = G_g$.

$$U_1 = R_g I_2 \quad (3)$$

$$U_2 = -R_g I_1$$

$$I_1 = -G_g U_2$$

$$I_2 = G_g U_1$$

Приймемо порти 22’ за вихід, а порти 11’ за вхід, тоді при підключенні імпедансу Z до виходу, за умови, що параметри передачі є рівними ми отримаємо, що еквівалентний вхідний опір буде дорівнювати:

$$Z_{евх} = \frac{R_G^2}{Z} \quad (4)$$

Тей самий результат (4) ми отримаємо якщо візьмемо за вхід порт 22’, а за вихід порт 11’.

Вираз (4) показує, що гіратор має властивість інвертувати підключений до нього імпеданс. Ця властивість гіраторів широко застосовується, наприклад якщо в якості комплексного імпедансу буде виступати ємність $Z_c = 1 / jwC$, то як еквівалентний вхідний опір ми матимемо $L = |R_{12} R_{21}|C$.

Еквівалентний вхідний опір також можна отримати використовуючи провідності, у такому випадку ми матимемо:

$$Z_{евх} = \frac{1}{ZG_g^2} \quad (5)$$

Із виразів (4) та (5) виходить, у випадку коли параметри передачі є чисельно однаковими:

$$R_g^2 = \frac{1}{G_g^2} \quad (6)$$

Загальний вираз для еквівалентного вхідного імпедансу при різних значеннях параметрів передачі має вигляд:

$$Z_{евх} = К\frac{1}{Z}, \text{ де} \quad (7)$$

$$К = R_{12}R_{21} = \frac{1}{G_{12}G_{21}}$$

Однак таке відношення (6) є вірним тільки для ідеального гіратора, у випадку із реальними гіраторами залежність між параметрами передачі холостого ходу і короткого замикання є більш складною. Ідеальні гіратори можуть перетворювати імпеданс у обернений на будь якій частоті, проте у реальних гіраторах є обмеження.

Якщо параметри передачі крім $R_{12}R_{21}$ та $G_{12}G_{21}$ при режимах роботи холостого ходу і короткого замикання не дорівнюють нулю, то такий гіратор має втрати і не є ідеальним.

Для гіратора із втратами ми можемо записати:

$$U_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 \quad (8)$$

$$U_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2$$

$$I_1 = G_{11}U_1 + G_{12}U_2$$

$$I_2 = G_{21}U_1 + G_{22}U_2$$

Із рівнянь (8) отримаємо матриці параметрів передачі:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$$

Для реальних гіраторів, у яких присутні втрати, які можна описати використовуючи (8), є бажаним мати передавальні параметри $R_{12}R_{21}$ та $G_{12}G_{21}$

якнайбільшими, завдяки чому досягається менший вплив втрат на роботу схеми.

2.2 Схемна реалізація гіраторів

Розглянемо схемні реалізації гіраторів із використанням операційних підсилювачів. Для схеми наведеної на рисунку 2.1 вирази, які описують струм мають наступний вигляд [4]:

$$I_1 = U_1(G_1 - \frac{G_2 G_4}{G_3}) + U_2\frac{G_2 G_4}{G_3} \quad (10)$$

$$I_2 = -U_1 G_4 + U_2(G_4 - \frac{G_5 G_7}{G_6})$$

Використовуючи рівняння (8) та (10) ми отримаємо вирази для параметрів провідності G_{11} G_{22} та параметрів передачі провідності G_{12} G_{22}.

$$G_{11} = G_1 - G_2 \cdot G3\frac{G_4}{G_3} \quad (11)$$

$$G_{12} = G_2 \cdot \frac{G_4}{G_3}$$

$$G_{21} = -G_4$$

$$G_{22} = G_4 - G_5 \cdot \frac{G_7}{G_6}$$

G_{11} – провідність при короткому замиканні для терміналу 11’, G_{22} – провідність при короткому замиканні для терміналу 22’. G_{12} та G_{21} це провідності передачі при короткому замиканні. Із виразів (11) видно, що

продукт множення провідностей передачі ($G_{12}G_{21} < 0$) є меншим за нуль це підтверджує, що схема зображена на рисунку 2.1 маж властивості гіратора.

В залежності від значень провідностей ($G_1...G_7$) схема зображена на рисунку 2.1 може бути або ідеальним гіратором, або гіратором із втратами. Для того аби отримати ідеальний гіратор необхідно, щоб G_{11} та G_{22} були рівними нулю. Для досягнення цього провідності мають задовільняти такі рівняння:

$$G_1 \cdot G_3 = G_2 \cdot G_4 \qquad (12)$$

$$G_4 \cdot G_6 = G_5 \cdot G_7$$

У випадку, коли умова (12) не задовільняється гіратор буде мати втрати. Отже якщо взяти що операційні підсилювачі є ідеальними з їх допомогою можна отримати схему ідеального гіратора.

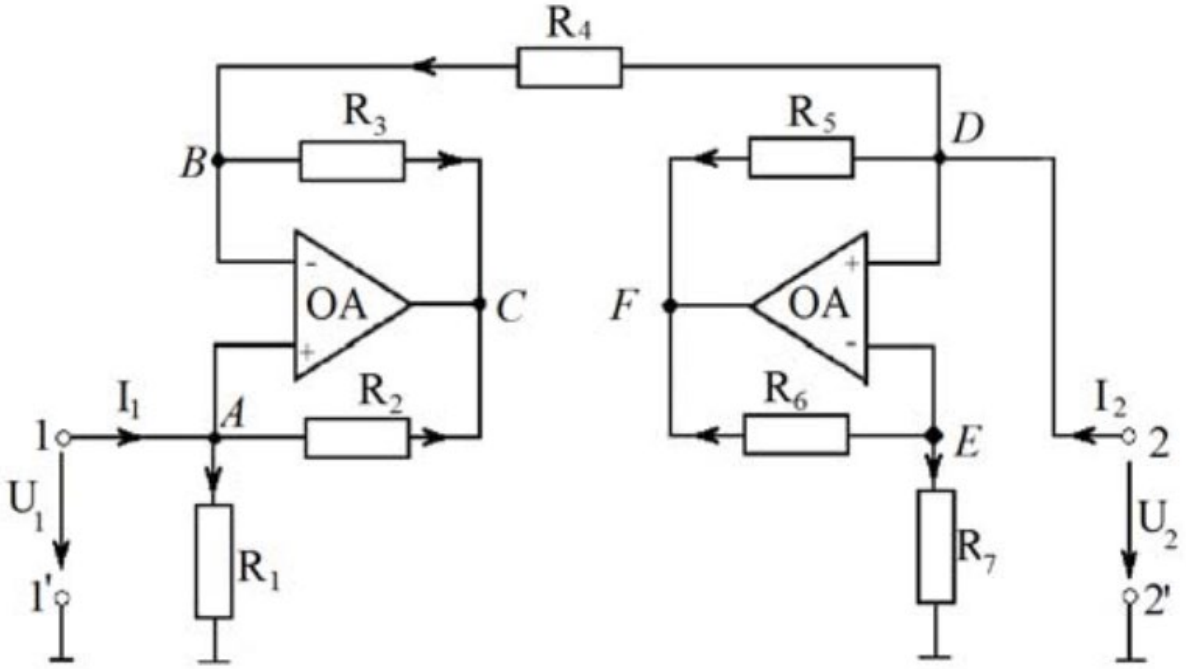

Рисунок 2.1 – Схема гіратора Антоніо [4]

Даний приклад реалізації гіратора ілюструє основні підходи до проектування приладів такого типу. Можливе виконання гіраторів із різним схемним виконанням, проте основна мета таких приладів – мати передавальні параметри, які перетворюють імпеданс у обернений.

При реальному проектуванні потрібно враховувати безліч інших факторів. Найважливішими із цих факторів слід зазначити частотні залежності операційних підсилювачів, коефіцієнт підсилення реальних операційних підсилювачів та неіденальності резисторів при їх виконанні у інтегральній технології.

Схемна реалізація гіратора без втрат описана у статті [18]. Інші варіанти реалізації схем гіраторів наведені у статтях [14] та [10].

При рості частоти для якої ми проектуємо гіратор коефіцієнт підсилення операційного підсилювача буде зменшуватись і коли коефіцієнт підсилення стане рівним 0 дБ схема гіратора побудована навколо цього операційного підсилювача перестане працювати. Наприклад, якщо проектувався гіратор, який перетворює імпеданс ємності до індуктивного, у момент коли коефіцієнт підсилення стане рівним 0 дБ перетворення імпедансу не відбуватиметься і ми отримаємо ємнісний імпеданс.

Неідеальність операційних підсилювачів виражена у вигляді не нескінченного коефіцієнта підсилення також впливає на роботу гіраторів. Оскільки резистори R_1 та R_7 на схемі зображеної на рисунку 2.1 під’єднані до землі, якщо їх опір буде замалим, через них буде протікати струм до землі. При протіканні струму певної величини операційний підсилювач не зможе підтримувати напругу на необхідному для роботи схеми рівні, і бажаної інвертації імпедансу не відбуватиметься.

Ще одним важливим ефектом, який необхідно враховувати при розробці гіраторів в інтегральній технології є неідеальність резисторів. Даний ефект

може призвести до різності значень резисторів (R_1...R_7), а це, із умови накладеної рівнянням (12), призведе до утворення гіратора із втратами, що зазвичай є небажаним. Ці втрати призведуть до збільшення споживаної потужності та зміни значення еквівалентного вхідного імпедансу, із рівнянь (7) виходить, що зміна значень резисторів призведе до зміни еквівалентного вхідного імпедансу.

Вибір схеми реалізації гіратора залежить від задач, які він повинен виконувати. У випадках коли важлива дешевизна і немає строгих вимог до точності схеми варто застосовувати схеми із використанням більш простих операційних підсилювачів та намагатись зменшити їх кількість. У разі необхідності підтримки роботи на більшій частоті потрібно використовувати операційні підсилювачі із меншим максимальним коефіцієнтом підсилення для збільшення максимальної робочої частоти, при потребі у більшому коефіцієнті підсилення можна зробити каскадне підключення операційних підсилювачів, це дозволить перемножити їх коефіцієнти підсилення без зменшення максимальної робочої частоти.

Алгоритм для створення гіраторів можна розбити на такі кроки:

- Визначити який тип гіратора необхідно отримати без втрат, або із втратами.
- Визначити робочу частоту / діапазон частот
- В залежності від частоти обрати необхідний підсилювач, який може працювати на цій частоті
- Створити схему, яка реалізує передавальні параметри обраного типу гіратора (із втратами або без втрат)

2.3 Застосування гіраторів

Властивість гіраторів перетворювати імпеданс у обернений часто застосовується для створення еквівалентних індуктивностей, покращення характеристик фільтрів (селективності і стабільності) та для контролю частотного відгуку фільтра.

Еквівалентні індуктивності широко застосовуються у різних сферах електроніки. Основними сферами електроніки для використання гіраторів є електроакустична, радіочастотна та інтегральна.

У професійній електроакустичній електроніці часто використовуються схеми гіраторів. У електроакустичній електроніці узгодження імпедансів є необхідним, для ефективної передачі потужності і цілісності сигналу. Схеми гіраторів використовуються для узгодження імпедансу між різними частинами електричного кола. Для електроакустичних приладів необхідність у узгодженні імпедансу є настільки важливою, оскільки без узгодження звуковий сигнал зазнає спотворення і його запис або відтворення буде відрізнятись від оригіналу, що не є допустимим.

У електроніці для електроакустичної сфери гіратори також використовуються у еквалайзерах, які відповідають за налаштування частотного відгуку сигналу, що необхідно для точного відтворення звуку.

Особливо часто схеми гіраторів використовують для створення активних фільтрів. Використання гіраторів дозволяє отримувати еквівалентні індуктивності, які мають значні переваги над звичайними при їх використанні у інтегральній технології. Еквівалентні індуктивності займають менше місця на кристалі, можуть бути налаштовані за рахунок зміни напруги зміщення або

значень відповідних резисторів. Ця властивість дає можливість більш точно налаштувати фільтр на задану частоту.

Електричні кола із використанням гіраторів мають кращу стабільність і стійкість до змін виробничих процесів. Тому їх використання є більш передбачуваним ніж використання звичайних індуктивностей.

У радіочастотній електроніці використання гіраторів зумовлено необхідністю зменшення шумів, узгодженням імпедансів, синтезу і змішування сигналів.

Гіратори можуть використовуватись для створення налаштовуємих смуго пропускних і смуго затримуючих фільтрів. Це дає можливість вибирати потрібні радіо сигнали і відхиляти інші. Іншою важливою для радіочастотної електроніки задачею є генерація стабільного радіочастотного сигналу, із використанням гіраторів можна створити осцилятори, які можуть генерувати цей самий стабільний сигнал. Схеми гіраторів можуть бути використані в конструкціях частотного змішувача для генерації суми і різниці частот, що дозволяє транслювати сигнали в різні частотні діапазони. Це має вирішальне значення для таких задач, як понижувальне перетворення в приймачах і підвищення в передавачах.

Застосування гіраторів також має місце у активних п’єзоелектричних фільтрах. Такі фільтри мають дуже високу добротність і можуть працювати на високих частотах. Пасивний п’єзоелектричний фільтр зображено на рисунку 2.2.

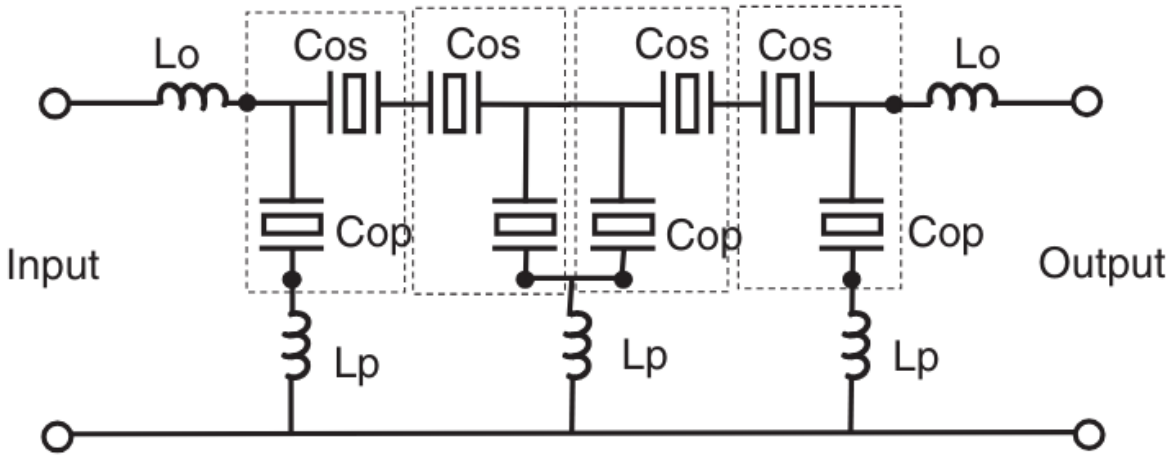

Рисунок 2.2 – Пасивний п’єзоелектричний фільтр [8]

Індуктивності L_o і L_p можна замінити на еквівалентні із використанням гіратора. Це зменшить розміри, які буде займати схема зображена на рисунку 2.2, також ми отримаємо більш точний контроль над характеристиками індуктивностей.

Результатом заміни реальних індуктивностей на еквівалентні стане отримання активного п’єзоелектричного фільтра, який матиме кращі характеристики ніж його пасивний аналог.

Висновки до розділу 2:

1. Гіратор – це електрична схема, яка інвертує під’єднаний до нього імпеданс.

2. Гіратори часто застосовуються для утворення еквівалентних індуктивностей. Індуктивності побудовані на основі гіраторів можуть бути налаштовані більш точно ніж звичайні.

3. Гіратори застосовують у багатьох електричних сферах, особливо часто їх використовують в електроакустичній і радіочастотній електроніці через потребу в узгодженні імпедансу для якісної передачі сигналу та необхідності у фільтрах із високою добротністю.

4. Використання гіраторів для побудови активних п’єзоелектричних фільтрів дозволяє зменшити розміри даних фільтрів у порівнянні із пасивними п’єзоелектричними фільтрами.

5. У порівнянні із пасивними фільтрами фільтри на базі гіраторів менше залежать від технічного процесу на якому вони виготовляються.

РОЗДІЛ 3: МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІМПЕДАНСУ ДЛЯ АКТИВНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

3.1 Створення моделі перетворювача імпедансу

У цій роботі розглядається перетворювач імпедансу на основі операційного підсилювача. Схему використаного операційного підсилювача наведено на рис. 3.1.

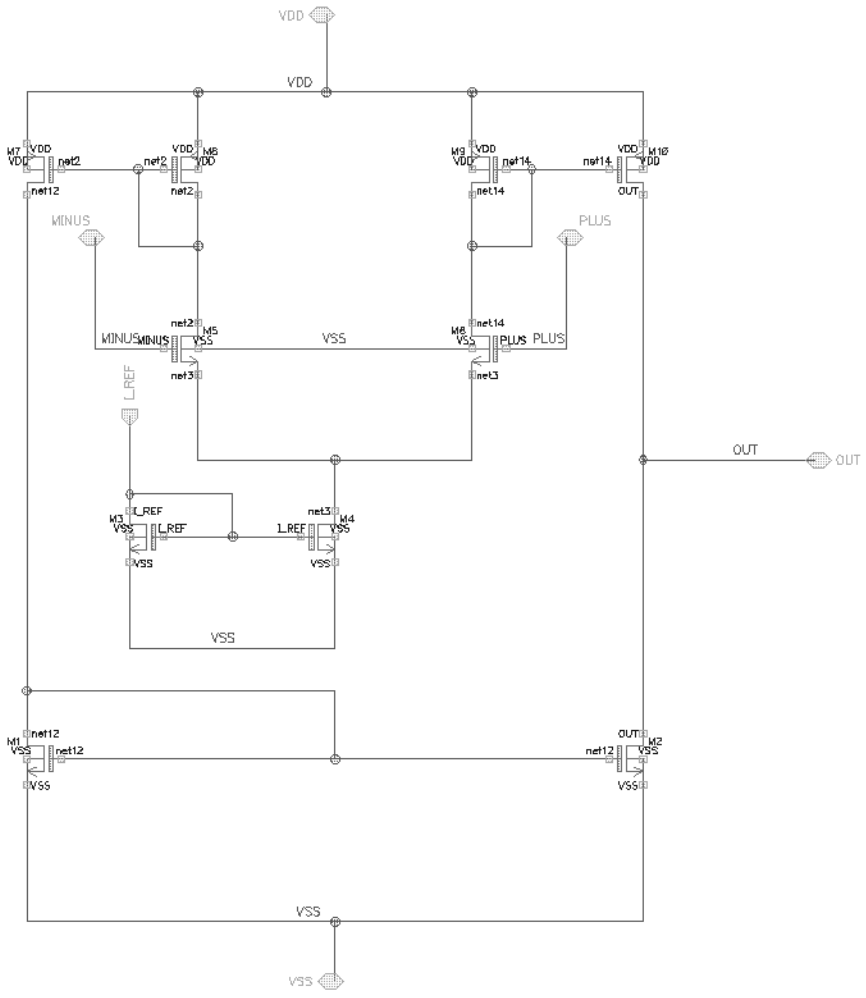

Рисунок 3.1 – Схема операційного підсилювача

Схему операційного підсилювача розроблено для 180 нано метрової комплементарної технології, розміри транзисторів наведені у таб. 3.1. Де W – ширина каналу, L – довжина каналу, m – множник, який показує скільки однакових транзисторів із заданими розмірами потрібно розмістити на топології.

Таблиця 3.1

Транзистор	Тип провідності	W, мкм	L, мкм	m
M1	n	8	0,8	1
M2	n	8	0,8	1
M3	n	0,22	0,35	1
M4	n	0,22	0,35	20
M5	n	5	0,35	1
M6	n	5	0,35	1
M7	p	20	1,2	1
M8	p	20	1,2	1
M9	p	20	1,2	1
M10	p	20	1,2	1

Наведена схема складається із диференційної пари і чотирьох струмових дзеркал. Для правильної роботи операційного підсилювача необхідно, аби він знаходився у лінійному режимі, для цього усі транзистори мають знаходитись у насиченні. У САПР Cadence Virtuoso була проведена перевірка, мета якої дізнатись чи перебувають транзистори в насиченні. Результати перевірки наведені на рис 3.2.

Метод який використовувався для даної перевірки базується на можливості САПР розраховувати одразу всі значення напруг у гілках і струмів у вузлах. Знаючи значення діючої напруги на затворі і порогової напруги транзистора, віднявши від значення діючої напруги значення порогової напруги транзистора із n – провідністю, якщо в результаті ми отримаємо значення більше 0 це буде означати, що транзистор буде відкритим і проводитиме певний струм, для транзисторів із p – провідністю отримане значення буде меншим за 0. Додатково перевіряється щоб значення напруги витік-стік було більше необхідної напруги для переходу транзистора із лінійного режиму в режим насичення, тобто що струм, який протікає через транзистор є незмінним при подальшому збільшенні напруги витік-стік. Така перевірка дозволяє набагато швидше перевіряти у якому режимі працює транзистор і чи достатня напруга подається на його затвор.

Name	Type	Details	Value	Plot	Save	Spec
Filter	Filter	Filter	Filter			Filter
	expr	OP("/M1" "vsat")	657.3m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M2" "vsat")	657.3m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M3" "vsat")	686.6m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M4" "vsat")	795.4m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M5" "vsat")	1.19	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M6" "vsat")	1.19	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M7" "vsat")	-2.208	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M8" "vsat")	-643.8m	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M9" "vsat")	-643.8m	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M10" "vsat")	-2.208	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M1" "vgt")	204.1m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M2" "vgt")	204.1m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M3" "vgt")	272.4m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M4" "vgt")	273.9m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M5" "vgt")	183.9m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M6" "vgt")	183.9m	☑	☐	> 100m
	expr	OP("/M7" "vgt")	-219.5m	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M8" "vgt")	-205.3m	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M9" "vgt")	-205.3m	☑	☐	< -100m
	expr	OP("/M10" "vgt")	-219.5m	☑	☐	< -100m

Рисунок 3.2 – Перевірка, що транзистори знаходяться в насиченні

Для забезпечення роботи операційного підсилювача на більшій частоті потрібно було знизити його коефіцієнт підсилення. АЧХ операційного підсилювача, який розглядається у даній роботі, у децибелах наведено на рисунку 3.3. Максимальне значення коефіцієнту підсилення дорівнює 11 дБ.

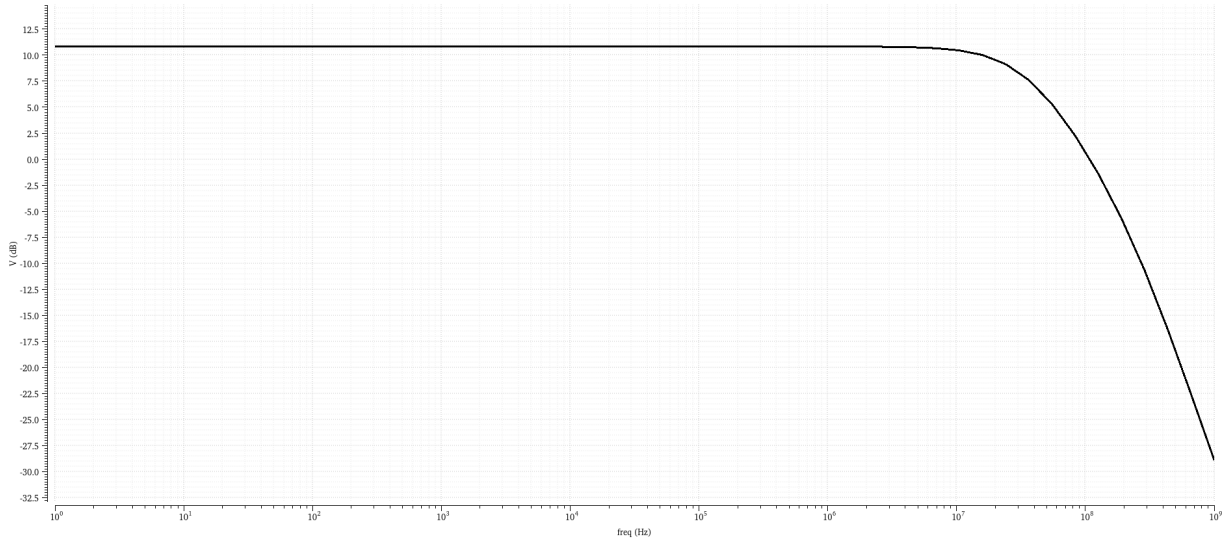

Рисунок 3.3 – АЧХ операційного підсилювача у децибелах

Гіратор є одним із найбільш розповсюджених перетворювачів імпедансу. Схема гіратора, який розглядається у даній роботі наведено на рис. 3.4. Наведена схема перетворює імпеданс Z0 у обернений.

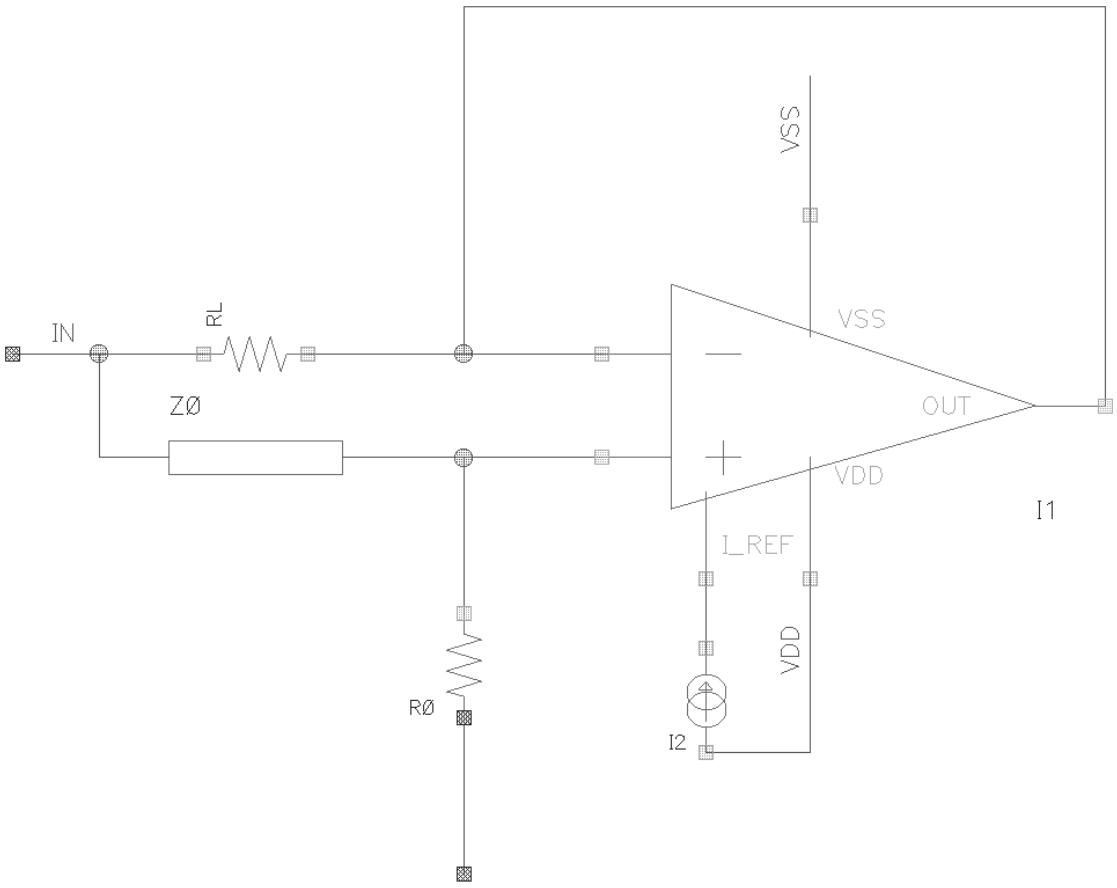

Рисунок 3.4 – Гіратор

Подібні схеми часто використовуються у інтегральній технології саме як еквівалентні індуктивності. Це дає змогу не утворювати реальні індуктивності на топології.

Використаємо схему зображену на рис. 3.4 для отримання еквівалентної індуктивності. На рисунку 3.5 зображено еквівалентну індуктивність, яка реалізована із використанням гіратора. Наведені схеми побудовані на основі раніше створеного операційного підсилювача.

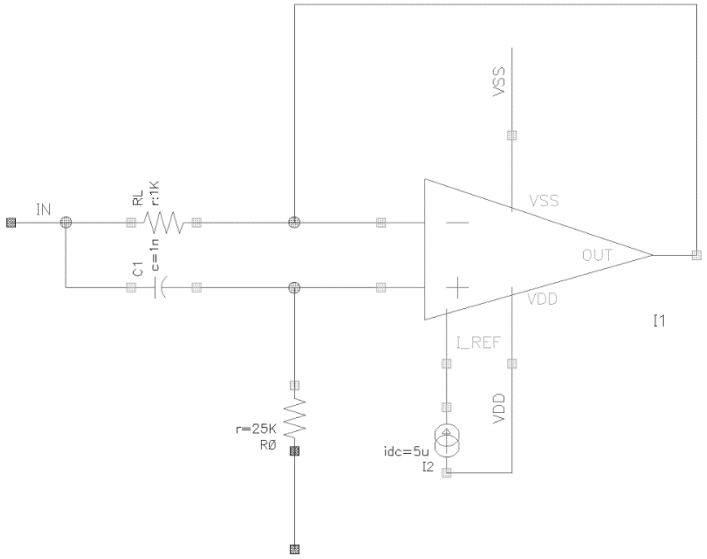

Рисунок 3.5 – Еквівалентна індуктивність

Для розрахунку еквівалентної ємності наведеної на рис. 3.5 потрібно:

Використаємо концепт віртуальної землі для операційного підсилювача, тоді

$$V_- = V_+ = V_1.$$

Використаємо перший закон Кірхгофа:

$$I_{вх} = I_1 + I_2 \quad (13)$$

$$I_1 = \frac{(V_{вх} - V_-)}{R_L} = \frac{(V_{вх} - V_1)}{R_L} \quad (14)$$

$$I_1 = \frac{V_{вх} - V_+}{X_C} = \frac{V_{вх} - V_1}{X_C} \quad (15)$$

$$I_3 = \frac{V_1}{R} \quad (16)$$

$$I_2 = I_3 \quad (17)$$

Підставимо значення I_2 та I_3

$$\frac{(V_{вх} - V_1)}{X_C} = \frac{V_1}{R} \quad (18)$$

$$V_1 = \frac{V_{вх}}{X_C(\frac{1}{R} + \frac{1}{X_C})} \quad (19)$$

$$\mathrm{I_{вх}} = (V_{\mathrm{вх}} - V_1)\,(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{X_C}) \quad (20)$$

$$\frac{I_{\mathrm{вх}}}{V_{\mathrm{вх}}} = (1 - \frac{1}{X_C(\frac{1}{R}+\frac{1}{X_C})})(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{X_C}) \quad (21)$$

Замінимо X_C на $\frac{1}{jwC}$, тоді отримаємо:

$$\frac{I_{\mathrm{вх}}}{V_{\mathrm{вх}}} = (1 - \frac{1}{\frac{1}{jwC}(\frac{1}{R}+jwC)})(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{\frac{1}{jwC}})$$

$$\mathrm{Z_{вх}} = \frac{V_{\mathrm{вх}}}{I_{\mathrm{вх}}} = \frac{R_L+jwCRR_L}{1+jwCR_L}$$

Після спрощень маємо: (22)

$$\mathrm{Z_{вх}} = (\mathrm{R} + \frac{1}{jwC}) \,||\, (R_L + jwCRR_L)$$

Звідки маємо що $\boldsymbol{L = CRR_L}$ (23)

Оскільки схема зображена на рис. 3.5 побудована на операційному підсилювачі, із збільшенням частоти вона перестає виконувати своє призначення, у зв’язку із зменшенням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача. Для подолання цієї проблеми потрібно використовувати ОТА, які працюють при більших частотах. Однак операційні підсилювачі є більш розповсюдженими і дешевшими і свою задачу при створенні низько частотних фільтрів виконують без нарікань. В даній роботі використовувався операційний підсилювач, коефіцієнт підсилення якого був рівний 0 дБ на частоті 100 МГц.

3.2 Моделювання схеми еквівалентної індуктивності у ПЗ Cadence Virtuoso

Для перевірки коректності роботи схеми зображеної на рис. 3.5 складемо перевірочну схему наведену на рис. 3.6. Номінали її компонентів: R0 = 120 КОм, R1 = 5 КОм, R_L = 1КОм, C0 = 100 пФ, V0 = 3.3 В, V1 – змінний сигнал з амплітудою 2 В, I1 = 5 мкА.

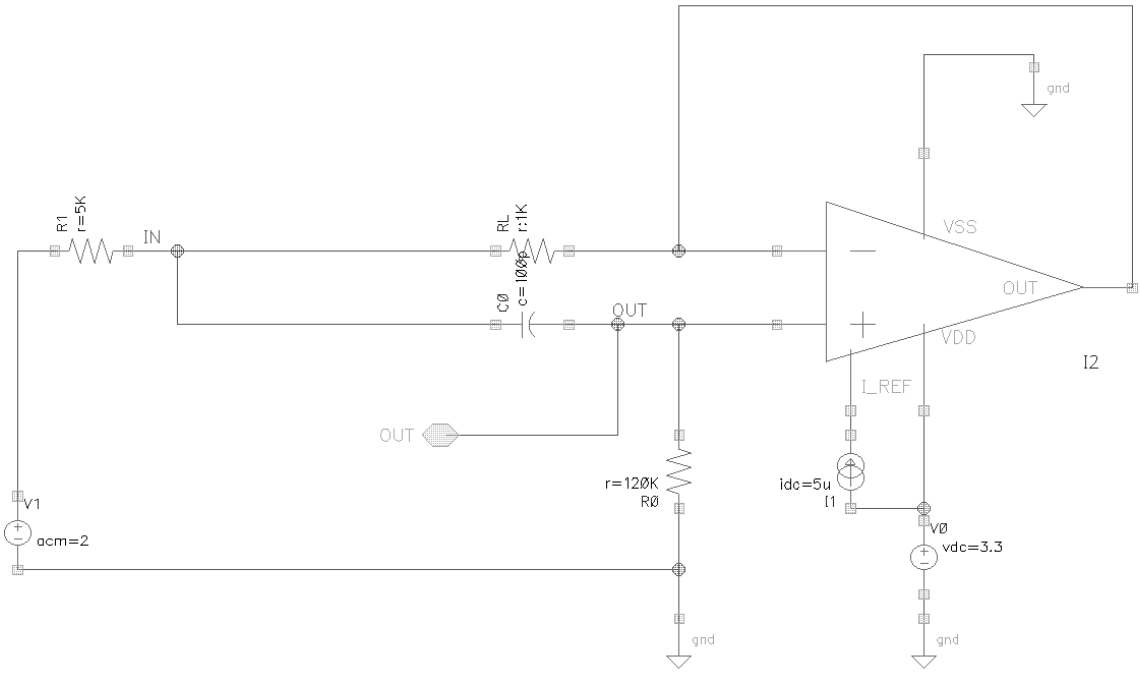

Рисунок 3.6 – Схема для перевірки роботи еквівалентної індуктивності

Проведемо порівняння АЧХ схеми еквівалентної індуктивності і АЧХ конденсатора із ємністю 100 пФ. Графік наведений на рис. 3.7, де синім

зображено АЧХ конденсатора, а червоним – еквівалентної індуктивності.

Еквівалентна індуктивність має меншу амплітуду оскільки при включенні операційного підсилювача як повторювача напруги його коефіцієнт підсилення є меншим одиниці. Завдяки гіратору, ми отримали обернений імпеданс конденсатора, що дозволило отримати еквівалентний індуктивний імпеданс.

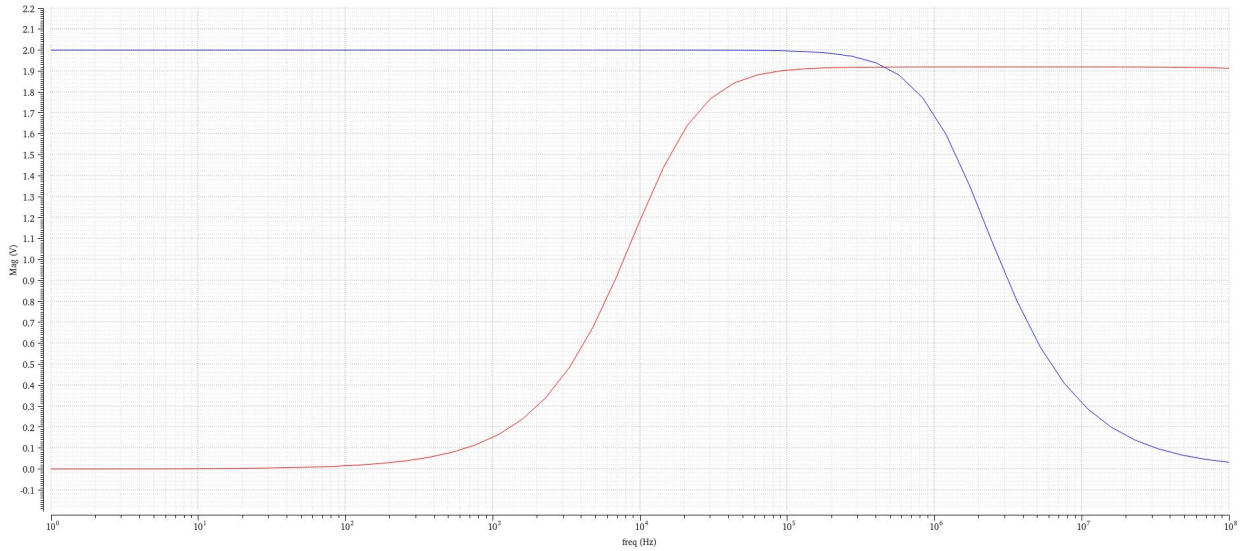

Рисунок 3.7 – Порівняння АЧХ конденсатора і еквівалентної індуктивності

Моделювання показало, що гіратор працює коректно за умови, що коефіцієнт підсилення операційного підсилювача у розімкненому колі не дорівнює нулю. Для збільшення максимальної робочої частоти схеми наведеної на рис. 2.6 необхідно зменшувати максимальне підсилення операційного підсилювача у розімкненому колі.

Ми перевірили коректність роботи створеної схеми гіратора. Використовуючи створений гіратор ми можемо створювати індуктивності для інтегральної технології і застосовувати їх разом із пасивними п’єзоелектричними фільтрами в результаті отримуючи активні п’єзоелектричні фільтри. Оскільки активні фільтри мають кращу добротність,

менше реагують на шуми, можуть бути налаштовуваними та мають більш різкий спад амплітуди їх використання є вигіднішим.

Використовуючи схему наведену на рисунку 3.4 ми також можемо перетворити смуго пропускний і смуго затримуючий п’єзоелектричні фільтри до обернених.

Необхідно пам’ятати, що при збільшенні частоти на якій працює гіратор, у момент коли коефіцієнт підсилення операційного підсилювача у розімкненому колі стане рівним 0 дБ, схема перестане коректно працювати, і не буде перетворювати імпеданс. Якщо розглядати схему зображену на рис. 3.6, то при збільшенні частоти схема почне проявляти властивості ємності це явище зображено на рис. 3.8.

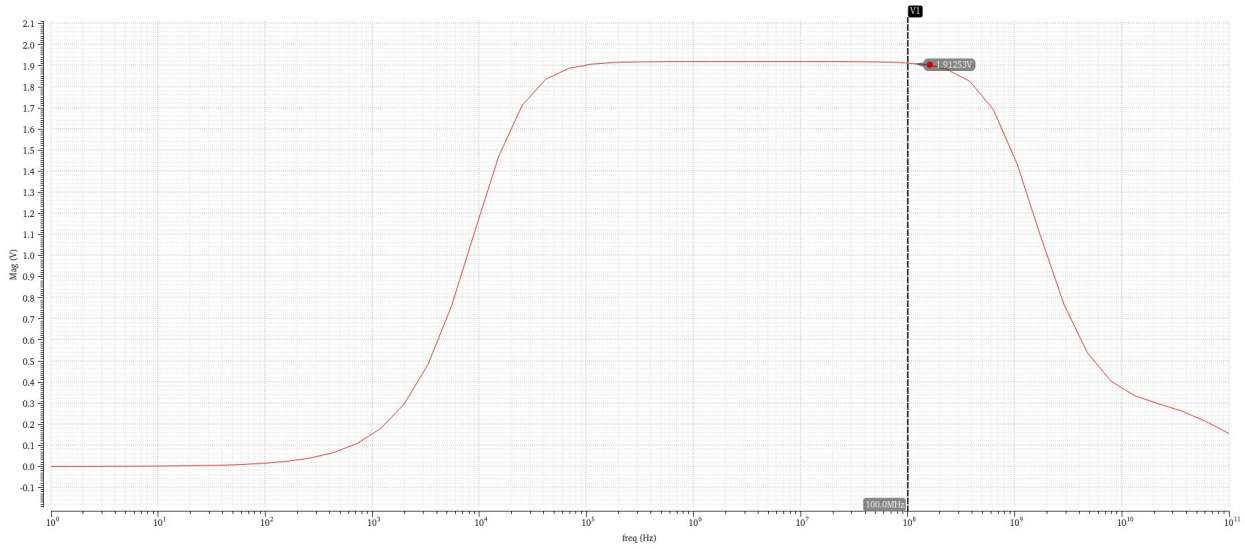

Рисунок 3.8 – Результат падіння коефіцієнта підсилення операційного підсилювача у розімкненому колі до 0 дБ

Як видно із рисунка 3.8, після досягнення частоти 100 МГц, значення амплітуди починає зменшуватись, це підтверджує, що гіратор перестав виконувати свої функції.

Для роботи із високочастотними п’єзоелектричними фільтрами необхідно використовувати перетворювачі імпедансу на основі ОТА, адже зменшення коефіцієнта підсилення у них настає пізніше.

3.3 Моделювання схеми смуго пропускного фільтра у ПЗ Cadence Virtuoso

Проведемо моделювання пасивного смуго пропускного фільтра, і активного смуго пропускного фільтра на основі гіратора. Після чого виконаємо порівняння їх АЧХ. Чисельні значення індуктивності і еквівалентної індуктивності є однаковими.

Моделювання проводилось для діапазону частот від 1МГц до 1ГГц

Схема яка використовувалась для моделювання пасивного смуго пропускного фільтра наведена на рисунку 3.9.

Схема яка використовувалась для моделювання смуго пропускного фільтра на основі гіратора зображена на рисунку 3.10.

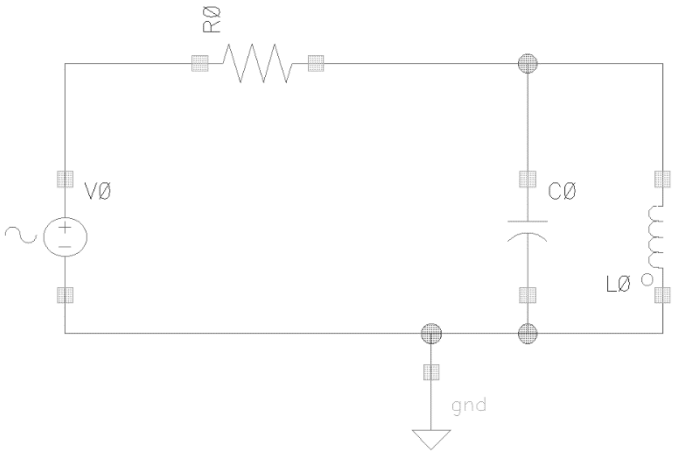

Рисунок 3.9 – Пасивний смуго пропускний фільтр.

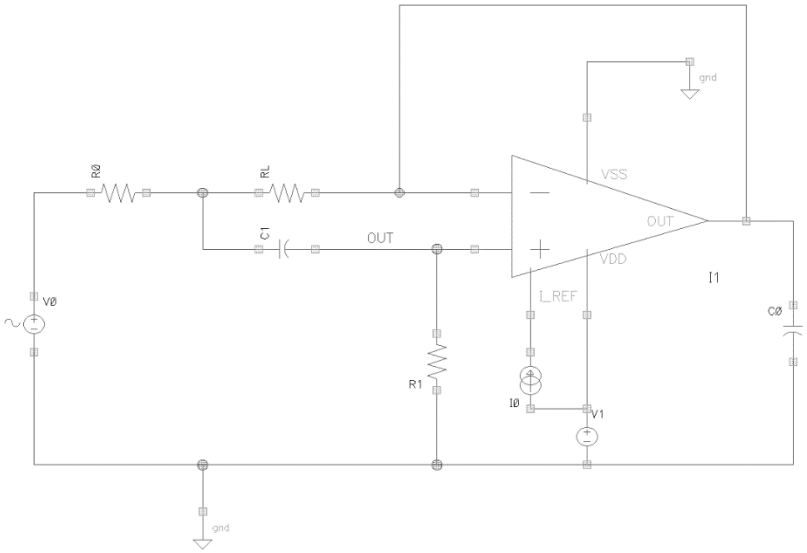

Рисунок 3.10 – Смуго пропускний фільтр на основі гіратора.

Номінали компонентів для схеми зображеної на рисунку 3.9 наступні: V0 = 2 В, R0 = 5 КОм, C0 = 159 фФ, L0 = 63.6 мкГн. Значення центральної частоти для такого фільтру знаходиться за формулою:

$$f_ц = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (24)$$

Центральна частота даного фільтра дорівнює 50 МГц.

Номінали компонентів для схеми зображеної на рисунку 3.10 наступні: V0 = 2 В, V1 = 3.3 В, I0 = 5 мкА, R0 = 5 КОм, R1 = 120 КОм, R_L = 1 КОм, C0 = 159 фФ, C1 = 75 фФ.

Компоненти R0 та C0 для обох схем є однаковими, метою даного моделювання є визначення впливу еквівалентної індуктивності при заміні нею звичайної індуктивності. Отримані результати моделювання наведені на рисунку 3.11, де синій – це фільтр із звичайною індуктивністю, червоний – фільтр із гіратором.

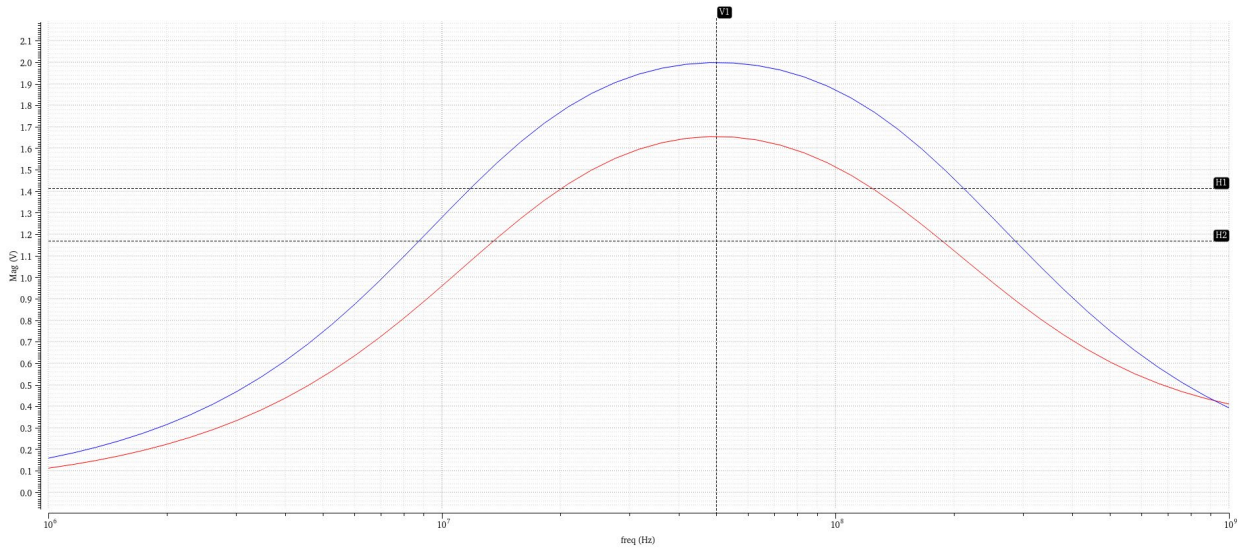

Рисунок 3.11 – АЧХ двох фільтрів

Із графіку зображеного на рисунку 3.11 видно, що центральна частота обох фільтрів є однаковою. Фільтр у якому застосований гіратор має меншу амплітуду і більш вузьку смугу пропускання. Можливість отримувати вужчу смугу пропускання важлива для радіочастотної електроніки, це дозволяє краще виділяти необхідний сигнал і пригнічувати інші. Максимальна амплітуда фільтру із використанням гіратора зменшилась, оскільки коефіцієнт підсилення операційного підсилювача при підключені як повторювача має коефіцієнт підсилення менше одиниці. При необхідності збільшення амплітуди можна використовувати або підсилюючий каскад, або у випадку коли необхідно отримати чистий нуль чи одиницю треба використати триггер Шмітта.

Результати моделювання показали, що схема розробленого гіратора виконує задачу з перетворення імпедансу у обернений і може бути використаною для створення активних фільтрів.

3.4 Перетворення імпедансу моделі п’єзоелектричного резонатора

Складемо схему для перевірки роботи радіочастотного перетворювача імпедансу при підключенні до нього моделі п’єзоелектричного резонатора, ми очікуємо отримати обернене значення імпедансу п’єзоелектричного резонатора. Схема для перевірки наведена на рисунку 3.12.

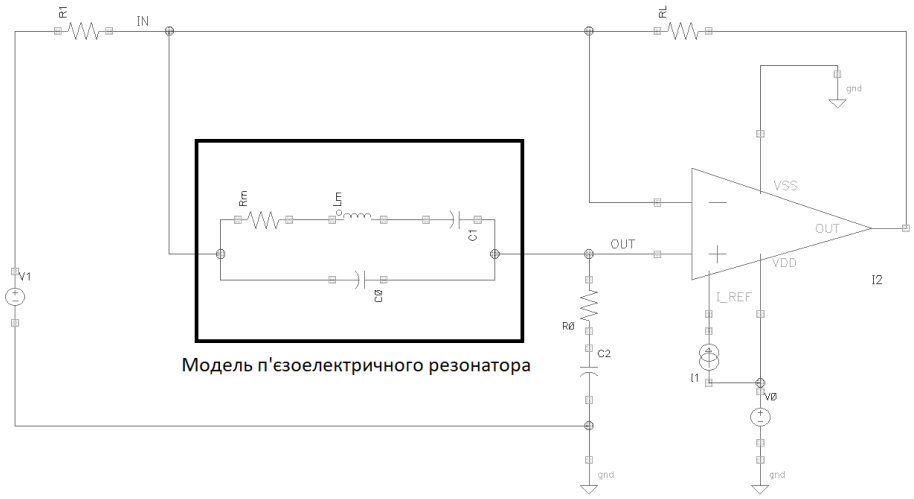

Рисунок 3.12 – Схема гіратора із під’єднаною моделлю п’єзоелектричного резонатора

Значення імпедансу моделі п’єзоелектричного резонатора наведено на рисунку 3.13. Перший пік виникає на частоті резонансу, а другий на частоті антирезонансу. При резонансі відбувається зменшення імпедансу, а під час антирезонансу значення імпедансу зростає.

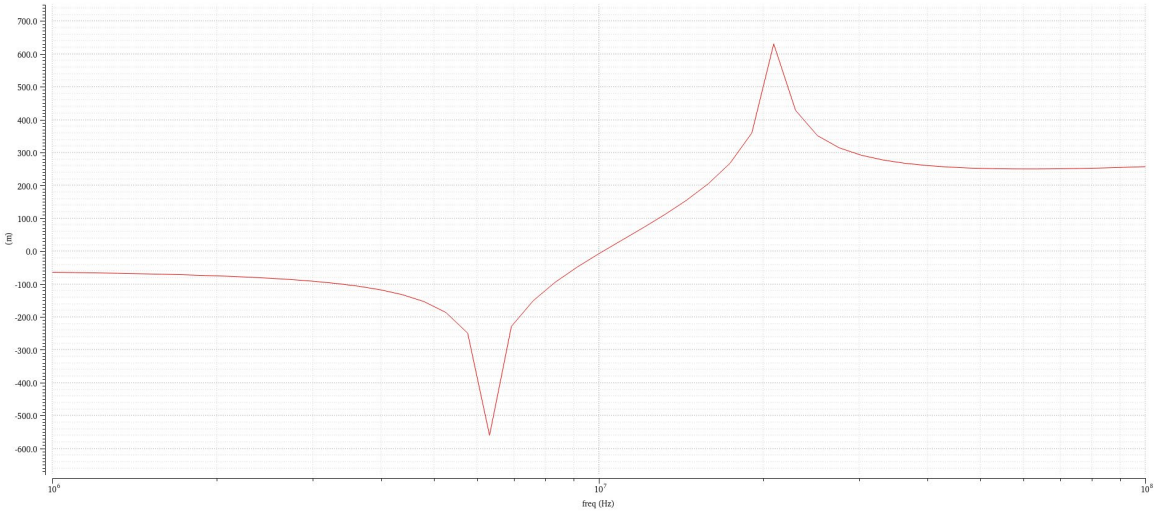

Рисунок 3.13 – Імпеданс п’єзоелектричного резонатора

Значення імпедансу при підключенні моделі п’єзоелектричного резонатора до гіратора наведено на рисунку 3.14. Із отриманих результатів видно, що відбулась інвертація імпедансу моделі п’єзоелектричного резонатора. На рисунку 3.14 першим спостерігається пік, при якому відбувається збільшення імпедансу, а другим пік, при якому імпеданс зменшується. Ми отримали обернену поведінку ніж зображену на рисунку 3.13, це свідчить про те, що схема гіратора, наведена на рисунку 3.12, перетворює імпеданс моделі п’єзоелектричного резонатора на обернений.

Абсолютне значення імпедансу після гіратора зменшилось, це пов’язано із зменшенням струму, який протікая через вхідний порт, це визвано опорами, які необхідні для роботи гіратора. Для підвищення абсолютного значення імпедансу, у схемі наведеній на рисунку 3.12, потрібно збільшити струм, який буде протікати через резистор R1.

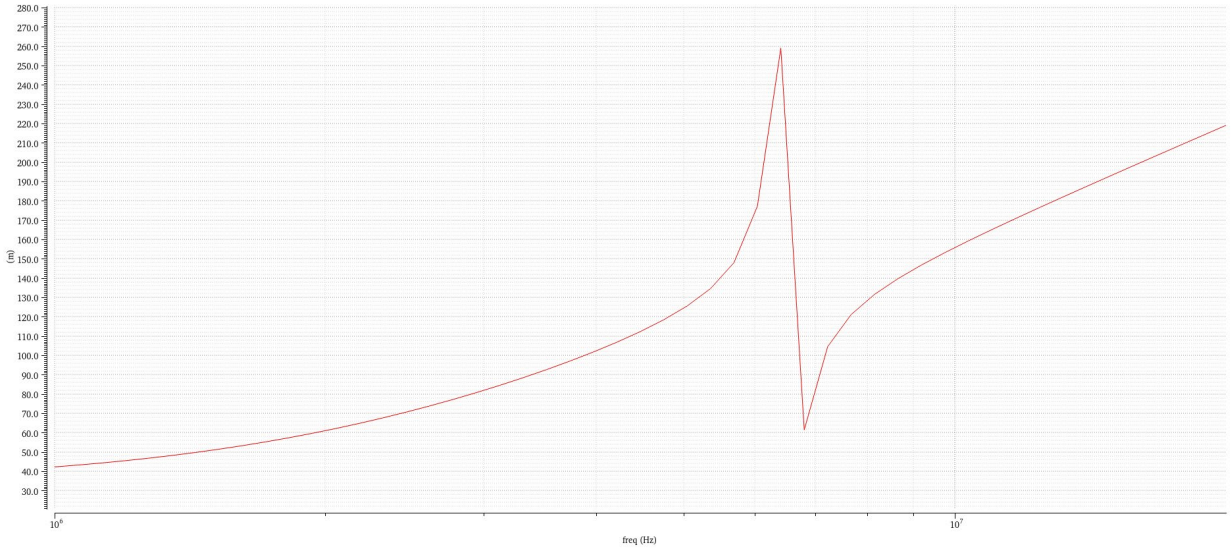

Рисунок 3.14 – Значення імпедансу при підключені моделі п’єзоелектричного резонатора до гіратора.

Висновки до розділу 3:

1. Для створення операційних фільтрів, які можуть працювати на більших частотах необхідно зменшити максимальний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача.

2. При збільшенні частоти коефіцієнт підсилення операційного підсилювача зменшується. Коли він досягає 0 дБ схема гіратора перестає працювати.

3. Гіратор дозволяє отримувати еквівалентну індуктивність, що дозволяє замінити реальні індуктивності у інтегральній технології для економії місця.

4. Результати моделювання показали, що використання еквівалентної індуктивності дозволяє отримувати індуктивні властивості із використанням операційного підсилювача ємності і опорів, які отримуються в інтегральній технології набагато легше.

5. При необхідності перетворювати імпеданс на більших частотах схему на операційних підсилювачах нелбхідно замінити на гіратор побудований на ОТА.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі був проведений комплексний аналіз принципів побудови та моделювання схем гіраторів, зокрема, на основі операційних підсилювачів.

Результати проведеного моделювання показали, що розглянута у даній роботі модель гіратора виконує поставлену перед нею задачу перетворення імпедансу у обернений. Розроблена схема працює на частотах до 100 МГц, після чого в результаті падіння коефіцієнта підсилення операційного підсилювача вона перестає виконувати свої функції.

Для подальшого збільшення робочої частоти радіочастотного перетворювача імпедансу слід звернути увагу на ОТА, падіння коефіцієнта підсилення у підсилювачах даного типу відбувається при більшій частоті, тому і гіратори побудовані на їх основі будуть працювати на більших частотах.

Отримана еквівалентна індуктивність на основі радіочастотного перетворювача імпедансу може бути використана для заміни стандартних індуктивностей у інтегральній технології, що дозволить зекономити місце яке займає індуктивний елемент.

Було проведено моделювання активного фільтра із використанням гіратора, і його порівняння із пасивним фільтром у якому використовувалась реальна індуктивність. Дане моделювання показало, що використання схем гіраторів дозволяє отримати активні RLC фільтри замінивши справжні індуктивності у пасивних RLC фільтрах на еквівалентні індуктивності.

Аналогічно гіратори можуть бути застосовані для утворення і активних п’єзоелектричних фільтрів.

В залежності від схеми гіратора, яка використовується значення еквівалентної індуктивності по різному буде залежати від ємностей і опорів, які складають дану схему. Це дає можливість більш точно налаштовувати значення еквівалентної індуктивності, у сферах електроніки, таких як радіоелектроніка, де важлива велика прецизійність, використання активних фільтрів із гіраторами дозволяє збільшити точність без значного збільшення кількості пасивних елементів таких як ємності і індуктивності.

Перелік використаних джерел

1. Active rc-filter with differential input for signal processing of piezoelectric sensors / D. Y. Denisenko et al. *2019 20th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*, Erlagol (Altai Republic), Russia, 29 June – 3 July 2019. 2019. URL: https://doi.org/10.1109/edm.2019.8823386 (date of access: 31.05.2024).
2. Agrawal A., Ajnar D. S., Khatri R. Design of two stage OTA based sixth order butter-worth low pass filter using CMOS 180nm technology. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2022. Vol. 1272, no. 1. P. 012008. URL: https://doi.org/10.1088/1757-899x/1272/1/012008 (date of access: 31.05.2024).
3. Analysis of wireless power transmission system with negative impedance converter / L. Jian et al. *Review of scientific instruments*. 2021. Vol. 92, no. 1. P. 014708. URL: https://doi.org/10.1063/5.0028917 (date of access: 31.05.2024).
4. Aspects regarding the unidirectional two-port circuits implemented by means of electronic gyrators / G. Tont et al. *Advances in electrical and computer engineering*. 2016. Vol. 16, no. 1. P. 87–92. URL: https://doi.org/10.4316/aece.2016.01012 (date of access: 31.05.2024).
5. Das J. C. Passive filters–potentialities and limitations. *IEEE transactions on industry applications*. 2004. Vol. 40, no. 1. P. 232–241. URL: https://doi.org/10.1109/tia.2003.821666 (date of access: 31.05.2024).
6. Design and analysis of film bulk acoustic wave resonator in Ku-band frequency for wireless communication / N. I. M. Nor et al. *SPIE smart structures and materials + nondestructive evaluation and health monitoring*,

San Diego, California / ed. by H. A. Sodano. 2012. URL: https://doi.org/10.1117/12.915042 (date of access: 31.05.2024).

7. Design and realization of broadband active inductor based band pass filter / A. Belen et al. *Chinese journal of electronics*. 2023. Vol. 32, no. 4. P. 731–735. URL: https://doi.org/10.23919/cje.2021.00.322 (date of access: 31.05.2024).
8. Development of piezoelectric thin film resonator and its impact on future wireless communication systems / Y. Satoh et al. *Japanese journal of applied physics*. 2005. Vol. 44, no. 5A. P. 2883–2894. URL: https://doi.org/10.1143/jjap.44.2883 (date of access: 31.05.2024).
9. Enabling the 5G: modelling and design of high Q film bulk acoustic wave resonator (FBAR) for high frequency applications / N. Ashraf et al. *2020 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS)*, Sevilla, 12–14 October 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/iscas45731.2020.9180652 (date of access: 31.05.2024).
10. High-sensitivity in various gyrator-based circuits with exceptional points of degeneracy / K. Rouhi et al. *EPJ applied metamaterials*. 2022. Vol. 9. P. 8. URL: https://doi.org/10.1051/epjam/2022005 (date of access: 31.05.2024).
11. Morse A., Huelsman L. A gyrator realization using operational amplifiers. *IEEE transactions on circuit theory*. 1964. Vol. 11, no. 2. P. 277–278. URL: https://doi.org/10.1109/tct.1964.1082279 (date of access: 31.05.2024).
12. Moschytz G. S. Active filter design techniques. *Analog circuit theory and filter design in the digital world*. Cham, 2019. P. 269–298. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00096-7_10 (date of access: 31.05.2024).
13. Operational amplifiers. Elsevier, 2003. URL: https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5914-7.x5000-9 (date of access: 31.05.2024).

14. Optimized design of ota-based gyrator realizing fractional-order inductance simulator: a comprehensive analysis / D. Kubanek et al. *Applied sciences*. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 291. URL: https://doi.org/10.3390/app11010291 (date of access: 31.05.2024).
15. Prameela B., Daniel A. E. A novel high Q active inductor design for wireless applications. *Procedia computer science*. 2020. Vol. 171. P. 2626–2634. URL: https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.285 (date of access: 31.05.2024).
16. Romanova A., Barzdenas V. A review of modern CMOS transimpedance amplifiers for OTDR applications. *Electronics*. 2019. Vol. 8, no. 10. P. 1073. URL: https://doi.org/10.3390/electronics8101073 (date of access: 31.05.2024).
17. Series sensor current loop from a generalized impedance converter circuit with reference current input / D. Ramirez-Munoz et al. *2006 IEEE instrumentation and measurement technology*, Sorrento, Italy, 24–27 April 2006. 2006. URL: https://doi.org/10.1109/imtc.2006.328576 (date of access: 31.05.2024).
18. Singer S. Loss-free gyrator realization. *IEEE transactions on circuits and systems*. 1988. Vol. 35, no. 1. P. 26–34. URL: https://doi.org/10.1109/31.1697 (date of access: 31.05.2024).
19. Tont D. G., Tont G., Vladareanu L. A quadripolar parameter-based approach of ideal gyrators structured on operational amplifier circuits. 2009.
20. Zazerin A., Orlov A., Bogdan O. Operational transconductance amplifier macromodel optimization for active piezoelectric filter design. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2013. Vol. 6, no. 12(66). P. 30. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19687 (date of access: 31.05.2024).