

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДИЗАЙН ЦИФРОВИХ ТА АНАЛОГОВИХ СХЕМ. ЧАСТИНА 1 Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Автори: *Лащевська Н.О., к.т.н, доцент*
Кирпатенко І.М., к.т.н.
Мовчанюк А.В., к.т.н, доцент
Адаменко В.О.

Рецензент *Шпилька О.О., к.т.н., доцент,*
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Відповідальний редактор *Шульга А.В., кандидат технічних наук, доцент, Національний*
технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради Радіотехнічного факультету
(протокол № 01/2023 від 30.01.2023 р.)

Лащевська Наталія Олександрівна, доцент кафедри прикладної
радіоелектроніки
Кирпатенко Ілля Миколайович, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки
Мовчанюк Андрій Валерійович, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки
Адаменко Володимир Олексійович, старший викладач кафедри прикладної
радіоелектроніки

Дизайн цифрових та аналогових схем. Частина 1: лабораторний практикум
[Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Електронні
комунікації та радіотехніка» / Н.О. Лащевська, І.М. Кирпатенко, А.В. Мовчанюк,
В.О. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл
705 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 47 с.

Посібник містить теоретичний та практичний матеріал з дисципліни Дизайн цифрових та аналогових
схем. Частина 1, вивчаються основи понять про операційні підсилювачі, їх внутрішню схемотехніку,
характеристики, а також різні області застосування операційних підсилювачів, починаючи від
елементарних схем інвертуючих та неінвертуючих підсилювачів та суматорів та до різноманітних
активних фільтрів.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Мета та основні завдання лабораторних робіт.....	5
Опис програми Tina-TI	6
Лабораторна робота № 1 Дослідження підсилювальних пристроїв на основі ОП. Частина 1.	9
Лабораторна робота №2 Дослідження підсилювальних схем на основі ОП. Частина 2.	12
Лабораторна робота №3 Дослідження підсилювальних схем на основі ОП. Частина 3.	17
Лабораторна робота №4 Дослідження пристроїв для виконання лінійних математичних операцій на основі ОП.	21
Лабораторна робота №5 Дослідження активних фільтрів основі ОП.	28
Лабораторна робота №6 Дослідження генераторів на ОП	36
Лабораторна робота №7 Дослідження генераторів на ОП	39
Лабораторна робота №8 Дослідження підсилювачів потужності з оп.....	44
Перелік джерел посилань	46
ДОДАТКИ.....	47

ВСТУП

Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Дизайн цифрових та аналогових схем. Частина 1» призначений для студентів радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського очної та заочної форми навчання.

Матеріал навчального посібника включає в себе:

- опис симулятора Tina-TI розробки фірми Texas Instruments;
- програми виконання робіт;
- роз'яснення та завдання до виконання робіт;
- перелік теоретичного матеріалу, який має бути засвоєний для успішного виконання лабораторних робіт;
- базові теоретичні відомості з деяких галузей схемотехніки електронних пристроїв на основі операційних підсилювачів (ОП);
- список необхідної літератури;
- контрольні питання.

МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мета лабораторних робіт – набуття студентами навичок з аналізу та синтезу електронних пристроїв на базі ОП.

Кожна з лабораторних робіт включає етапи:

- побудови в програмі Tina-TI схеми електричної принципової пристрою;
- дослідження заданих в завданні до роботи характеристик пристрою засобами, наявними в симуляторі Tina-TI;
- корегування, в разі необхідності, схеми електричної принципової пристрою з метою отримання заданих в завданні до лабораторної роботи характеристик.

При оформленні звіту з лабораторної роботи згідно встановленої форми (див. додаток 1), мають бути наведені:

- схема електрична принципова пристрою;
- розрахунки номіналів елементів схеми електричної принципової, які забезпечують отримання заданих характеристик;
- показання відповідних вимірювальних пристроїв, що підтверджують відповідність характеристик пристрою заданим;
- відповіді на контрольні питання;
- висновки, в яких слід навести результати випробувань пристрою на предмет відповідності його технічному завданню.

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідним є засвоєння здобувачем відповідного теоретичного матеріалу. Обсяг необхідного теоретичного матеріалу (у вигляді контрольних питань) з посиланнями на джерела відповідної інформації вказується при описі кожної лабораторної роботи.

ОПИС ПРОГРАМИ TINA-TI

Tina-TI є звичайним SPICE-симулятором з простим, інтуїтивно зрозумілим графічним інтерфейсом, що дозволяє освоїти програму в найкоротші терміни. Цей софт не має обмежень на кількість використовуваних пристроїв та вузлів, компоненти, представлені в Tina-TI, розподілені по шести групах: основні пасивні радіодеталі, ключі, напівпровідники, вимірювальні прилади, макромоделі складних пристроїв та джерела. (рис. 1.)

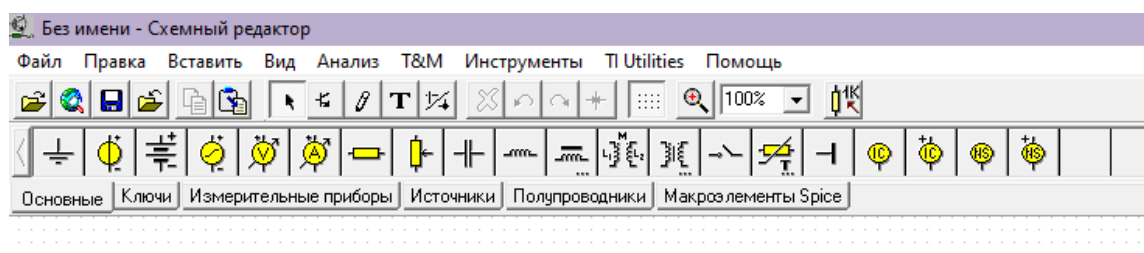


Рисунок 1 – Розподіл компонентів, представлених в Tina-TI

Tina-TI надає широкі можливості для створення, редагування та симуляції електронних схем. Є такі види аналізів: за постійним і змінним струмом (сюди входить: обчислення вузлових напруг, створення таблиці результатів, побудова перехідних показників і температурний аналіз), перехідних процесів, шумів, перетворення Фур'є та інших. (рис.2)

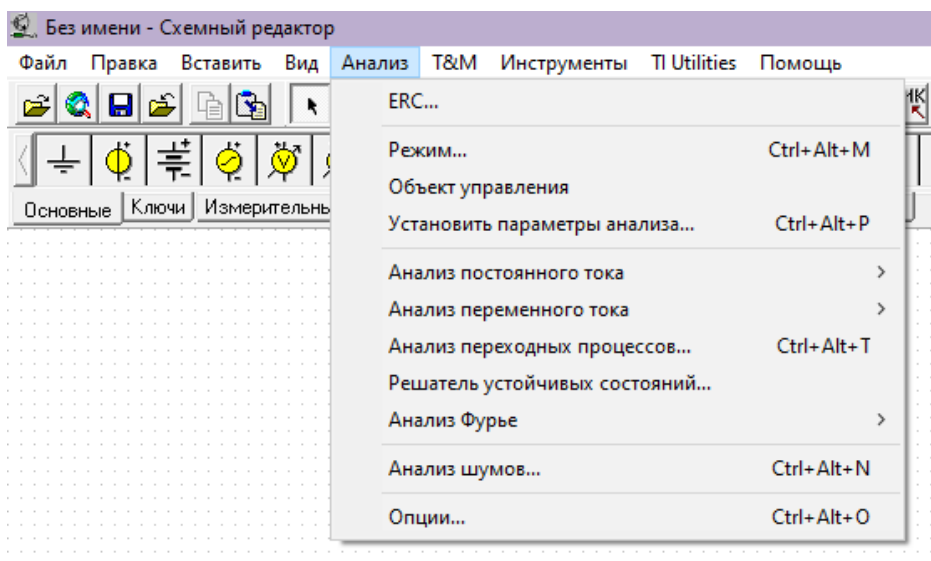


Рисунок 2 – Засоби аналізу електронних схем в Tina-TI

У програмі TINA-TI також доступні можливості тестування та вимірювання сигналів. Для цього існують наступні віртуальні прилади: осцилограф, аналізатор сигналів, цифровий тестер (з вимірювачем частоти), генератор функцій та пристрій для запису (рис.3).

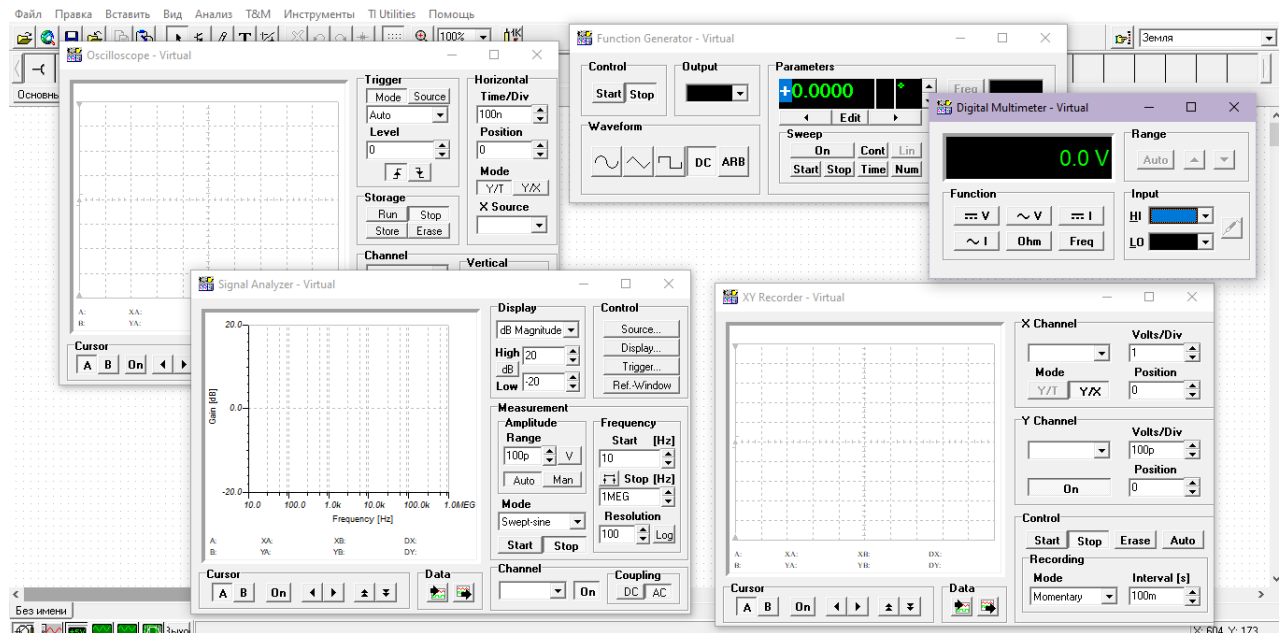


Рисунок 3 – Віртуальні прилади TINA-TI

Віртуальні прилади програмного комплексу максимально наближені до реальних пристроїв. «Підключити» їх можна до будь-якої точки схеми, що розглядається. Уся інформація, знята віртуальними приладами, може зберігатися у пам'яті комп'ютера. Підтримується псевдо-реальний режим роботи, в якому дані пристрої можуть використовуватися для спостереження прямо під час функціонування схеми.

Моделі ОП знаходяться в закладці «Напівпровідники». Присутня модель ідеального ОП, а також моделі реальних ОП (рис. 4).

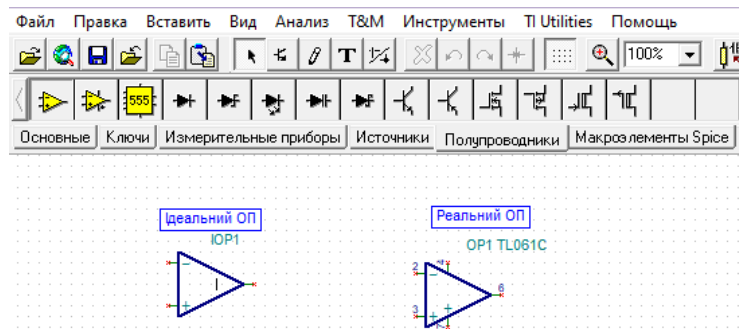


Рисунок 4 – Моделі ОП

Для підключення віртуальних вимірювальних пристроїв необхідно до вузлів схеми, в яких планується проводити вимірювання, підключити «зовнішній вивід для виміру напруги», який знаходиться в закладці «Вимірювальні пристрої» (рис.5, VF1, VF2).

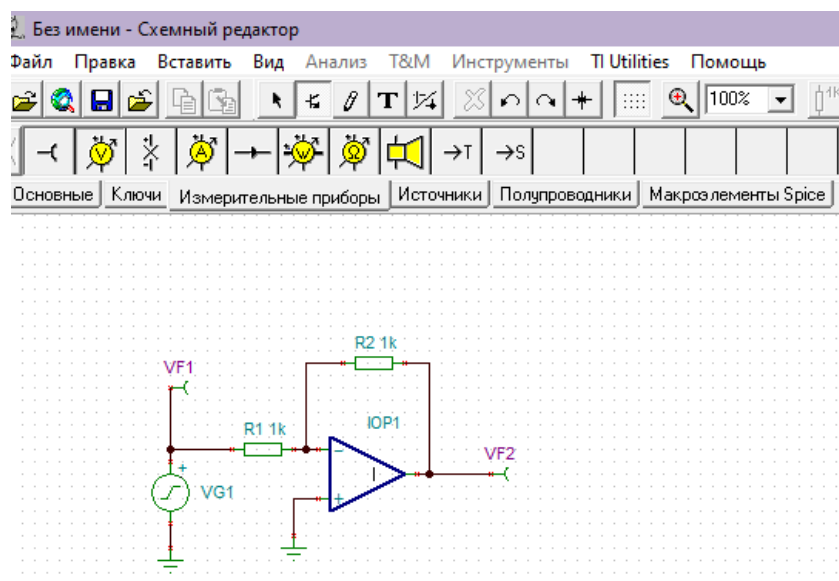


Рисунок 5 – Інвертуючий підсилювач з виводами для підключення віртуальних вимірювальних пристроїв.

Більш детальний опис функцій програми TINA-TI, за потреби, дається в лабораторних роботах. Програму TINA-TI можна безкоштовно завантажити на сайті Texas Instruments за посиланням: <https://www.ti.com/tool/TINA-TI>

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ОП.

ЧАСТИНА 1.

Мета роботи: дослідження характеристик інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів на основі ОП.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI інвертуючий та неінвертуючий підсилювачі з заданими характеристиками. Використовуючи відповідні засоби стимулятора, переконатися у відповідності отриманих характеристик підсилювачів заданим.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати інвертуючий підсилювач з заданими коефіцієнтом підсилення K та входним опором R_{in} . Для побудови підсилювача використати ідеальний ОП.
2. Підключити до входу підсилювача джерело сигналу (генератор напруги), вибрати синусоїдальний сигнал, встановити амплітуду сигналу 10 мВ, частоту 1 кГц, внутрішній опір джерела сигналу зробити нульовим.
3. До входу та виходу підсилювача підключити «зовнішні виводи для вимірювання напруги».
4. Для візуального контролю правильності функціонування схеми застосувати осцилограф, як показано на рис.6.
5. Для точного визначення коефіцієнта підсилення схеми застосувати мультиметр, як показано на рис.7.
6. Для перевірки входного опору підсилювача в джерелі сигналу встановити внутрішній опір, який дорівнює номіналу резистора R_1 .
7. За допомогою осцилографа переконатись, що амплітуди входного і вихідного сигналів зменшились.
8. За допомогою мультиметра виміряти точне значення входної напруги. Розрахувати значення входного опору.
9. Аналогічні дії (пп. 1-8) провести для неінвертуючого підсилювача.

Варіанти завдань: Коефіцієнт підсилення – останні дві цифри номеру залікової книжки +10. Вхідний опір – останні дві цифри номеру залікової книжки, кОм.

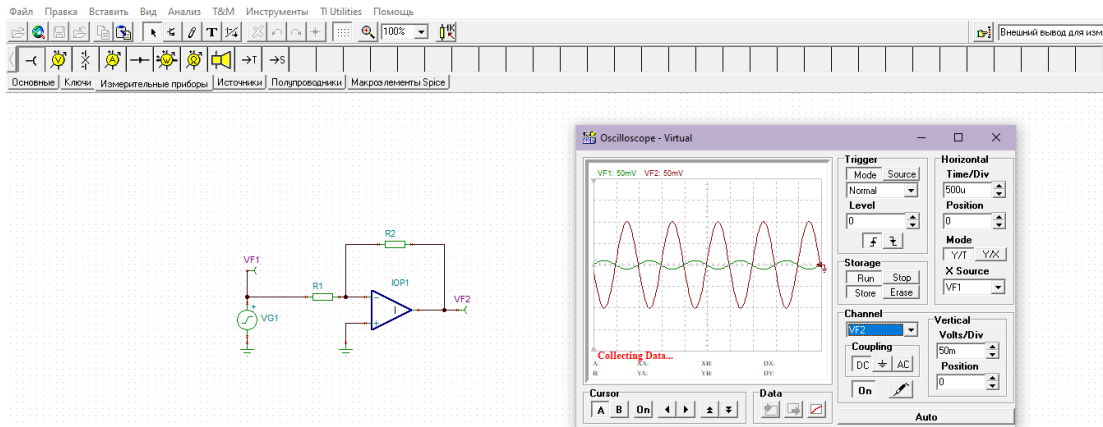


Рисунок 6 – Інвертуючий підсилювач, візуальний контроль правильності функціонування схеми

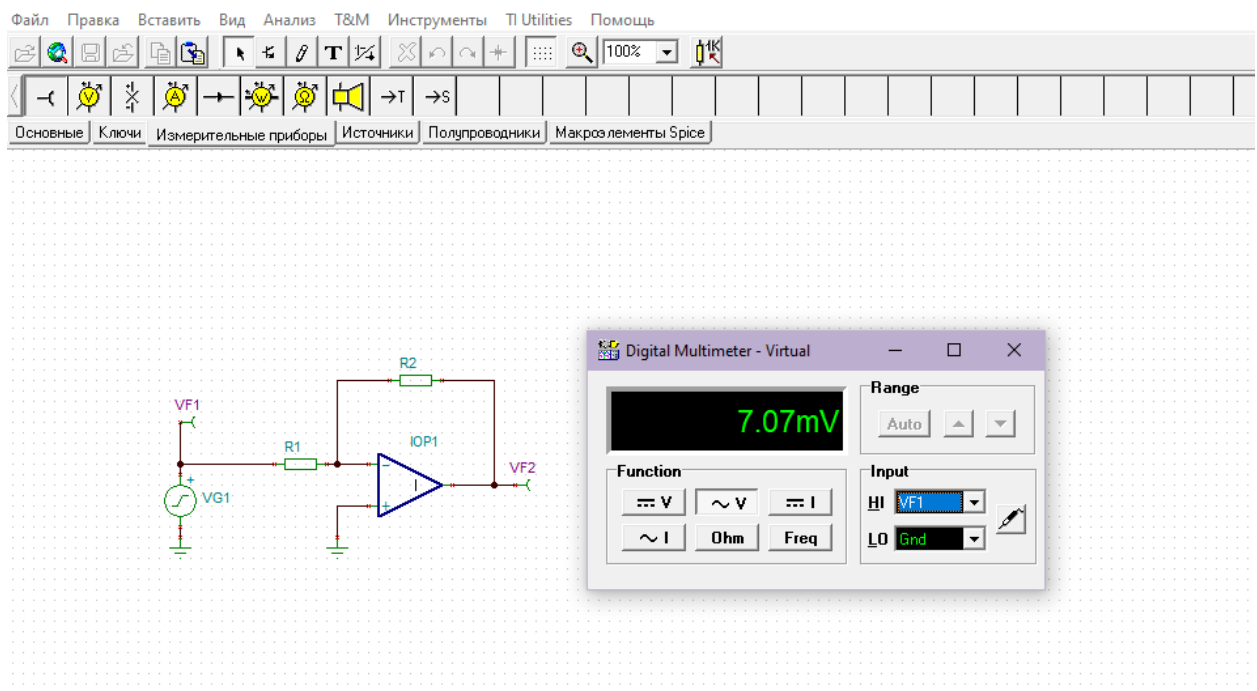


Рисунок 7 – Точне вимірювання коефіцієнту підсилення за допомогою мультиметру

Контрольні питання:

1. Вивести вираз для коефіцієнту підсилення інвертуючого підсилювача. ОП вважати ідеальним.
2. Показати, що вхідний опір інвертуючого підсилювача дорівнює опору резистора, який включено між інвертуючим входом і джерелом сигналу.
3. Вивести вираз для коефіцієнту підсилення неінвертуючого підсилювача, ОП вважати ідеальним.
4. Показати, що вхідний опір неінвертуючого підсилювача у випадку ідеального ОП є нескінченно великим.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ СХЕМ НА ОСНОВІ ОП.

ЧАСТИНА 2.

Мета роботи: дослідження характеристик інвертуючого підсилювача з Т-подібним негативним зворотним зв'язком (НЗЗ) та неінвертуючого підсилювача з одиничним коефіцієнтом підсилення для постійної складової.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Тіпа-ТІ інвертуючий підсилювач з Т-подібним зворотним зв'язком та неінвертуючий підсилювач з одиничним коефіцієнтом підсилення для постійної складової з заданими характеристиками. Використовуючи відповідні засоби симулятора, переконатися у відповідності отриманих характеристик підсилювачів заданим.

Короткі теоретичні відомості

Топологія підсилювачів з Т-подібним мостом в колі НЗЗ використовується при необхідності отримання високого входного опору підсилювача і високого коефіцієнту підсилення одночасно [1, 2]. Як відомо, коефіцієнт підсилення K_u класичного неінвертуючого підсилювача визначається як (рис.7):

$$K_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Вхідний опір підсилювача визначається резистором R_1 . У випадку необхідності отримання високого входного опору (десятки і сотні кОм) і великого коефіцієнту підсилення (на рівні декількох десятків або сотень), необхідно використовувати резистор R_2 великого номіналу (десятки і сотні МОм). Використання резисторів великого номіналу є небажаним, оскільки вони зазвичай відзначаються невисокою стабільністю. Окрім того, при використанні високоомних резисторів збільшується вплив на частотну характеристику підсилювача паразитних ємностей. Уникнути використання в колі НЗЗ високоомних резисторів можливо при використанні схеми з Т-подібним НЗЗ (рис. 8).

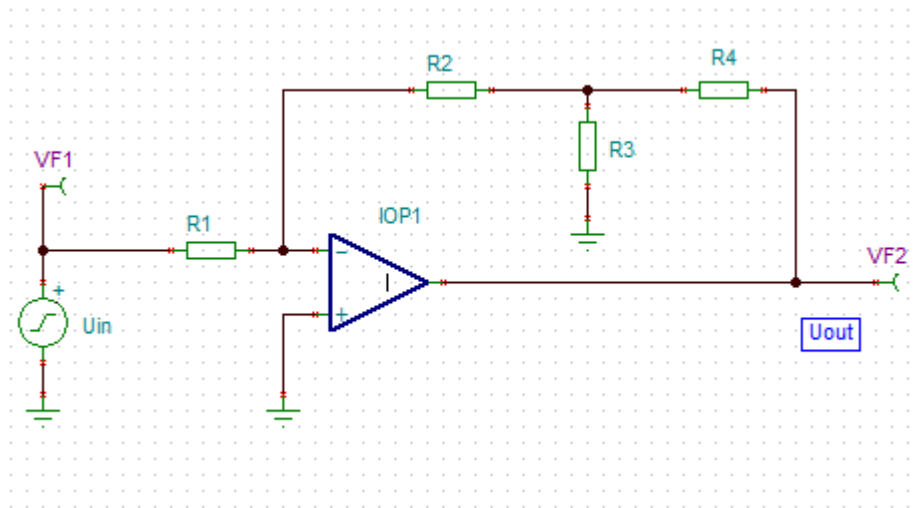


Рисунок 8 – Інвертуючий підсилювач з Т-подібним НЗЗ

Для знаходження коефіцієнта підсилення даної схеми скористаємося еквівалентною схемою, представленою на рис.9

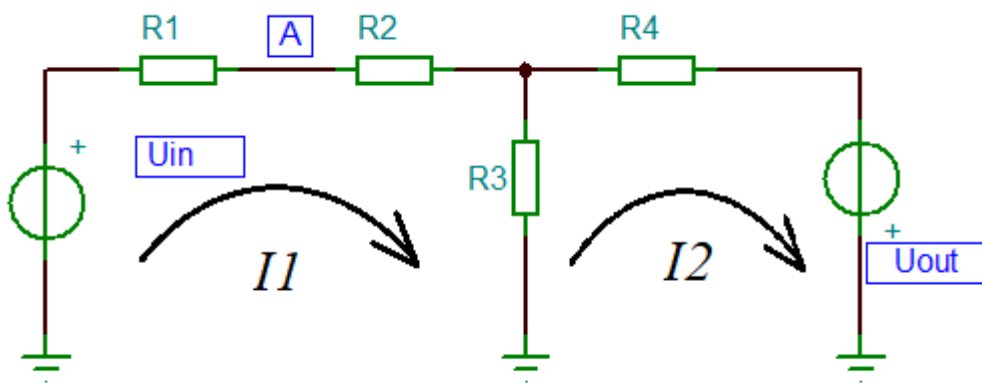


Рисунок 9 – Еквівалентна схема підсилювача з Т-подібним зворотним зв'язком

На даній еквівалентній схемі точка А – інвертуючий вхід підсилювача – «віртуальна земля», потенціал цієї точки дорівнює нулю.

Система рівнянь, яка описує дану схему:

$$\begin{cases} U_{in} = (R1 + R2 + R3) I1 - R3 I2 \\ U_{out} = (R3 + R4) I2 - R2 I1 \\ U_{in} = I1 R1 \end{cases}$$

З цієї системи рівнянь знаходимо вираз для коефіцієнту підсилення:

$$K_u = \frac{R2}{R1} \left(1 + \frac{R4}{R3} \right) + \frac{R4}{R1}$$

При проектуванні неінвертуючих підсилювачів змінного струму на основі ОП виникає необхідність зменшення до одиниці коефіцієнту підсилення для постійного струму. Це обумовлено тим, що реальні підсилювачі мають такий параметр, як вхідна напруга зміщення, яка підсилюється разом з вхідним сигналом і утворює на виході підсилювача постійну напругу величиною [3]

$$U_{out_{зм}} = K_u U_{зм}$$

За великих значень K_u (декілька десятків – сотень) ця напруга може складати одиниці вольт, що в багатьох випадках є неприпустимим. Для забезпечення одиничного коефіцієнта підсилення на постійному струмі використовується схема, приведена на рис.10.

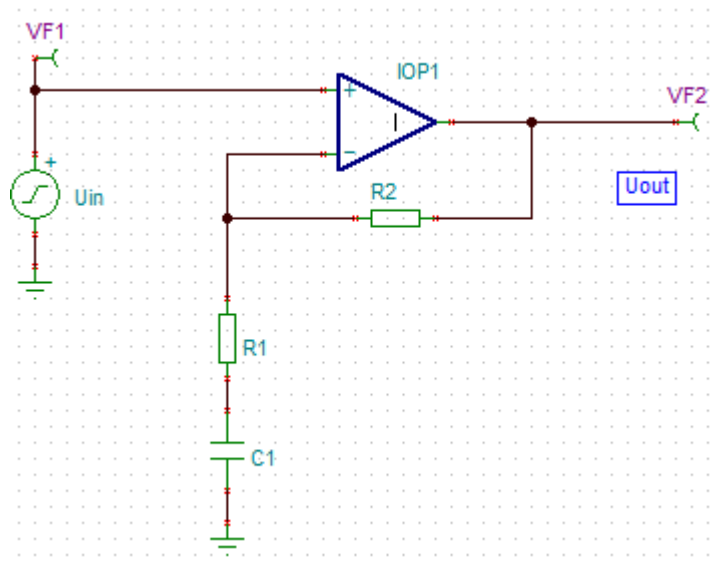


Рисунок 10 – Неінвертуючий підсилювач з одиничним коефіцієнтом підсилення на постійному струмі

Передатна функція такого підсилювача має вигляд:

$$K_u(p) = 1 + \frac{R2}{R1 + \frac{1}{pC1}} = 1 + \frac{pR2C1}{1 + pR1C1} = \frac{1 + pC1(R2 + R1)}{1 + pR1C1}$$

і містить один полюс на частоті $f_p = \frac{1}{2\pi R1C1}$ Гц і один нуль на частоті

$$f_n = \frac{1}{2\pi C1(R2 + R1)} \text{ Гц.}$$

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати інвертуючий підсилювач з заданими коефіцієнтом підсилення K та Т-подібним НЗЗ і вхідним опором R_{in} . Для побудови підсилювача використати ідеальний ОП (схема рис.8).
2. Підключити до входу підсилювача джерело сигналу (генератор напруги), вибрати синусоїдальний сигнал, встановити амплітуду сигналу 10 мВ, частоту 1 кГц, внутрішній опір джерела сигналу зробити нульовим.
3. До входу та виходу підсилювача підключити «зовнішні виводи для вимірювання напруги».
4. Для візуального контролю правильності функціонування схеми застосувати осцилограф.
5. Для точного визначення коефіцієнту підсилення схеми застосувати мультиметр.
6. Для перевірки вхідного опору підсилювача в джерелі сигналу встановити внутрішній опір, який дорівнює номіналу резистора R_1 .
7. За допомогою осцилографа переконатись, що амплітуди вхідного і вихідного сигналів зменшились.
8. За допомогою мультиметра виміряти точне значення вхідної напруги. Розрахувати значення вхідного опору.
9. Зібрати інвертуючий підсилювач з заданими коефіцієнтом підсилення K та одиничним коефіцієнтом підсилення на постійному струмі (рис.10).
10. Повторити пп. 2-4.
11. Для контролю АЧХ застосувати віртуальний вимірювальний пристрій «Аналізатор сигналів» (рис. 11). Вимірювання частоти нуля здійснити за допомогою курсора.

Варіанти завдань: Для підсилювача з Т-подібним НЗЗ: коефіцієнт підсилення – останні дві цифри номеру залікової книжки *10. Вхідний опір – останні дві цифри номеру залікової книжки, *20кОм. Для підсилювача з одиничним підсиленням на постійному струмі: коефіцієнт підсилення на

частоті 10 кГц – останні дві цифри номеру залікової книжки + 10, частота нуля – останні дві цифри номеру залікової книжки*10Гц.

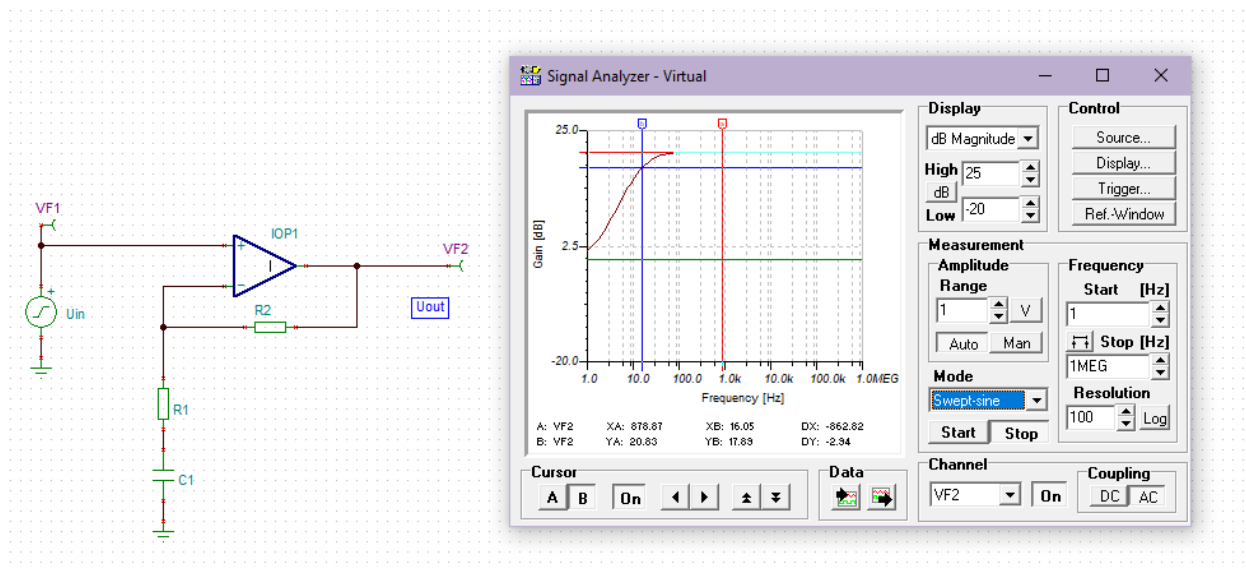


Рисунок 11 – Визначення частоти нуля за допомогою курсорів віртуального аналізатора сигналів

Контрольні питання:

1. Вивести формулу для коефіцієнту підсилення інвертуючого підсилювача з Т – подібним НЗЗ. ОП вважати ідеальним.
2. Пояснити, чому використання високоомних резисторів в колі НЗЗ є небажаним.
3. Пояснити, для чого треба мінімізувати коефіцієнт підсилення на постійному струмі в підсилювачах змінного струму на основі ОП.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ СХЕМ НА ОСНОВІ ОП.

ЧАСТИНА 3.

Мета роботи: дослідження характеристик диференціального підсилювача та інструментального підсилювача на його основі.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI диференціальний підсилювач та інструментальний підсилювач на його основі. Використовуючи відповідні засоби симулятора, переконатися у відповідності отриманих характеристик підсилювачів заданим.

Короткі теоретичні відомості

Диференціальний підсилювач (рис. 12) призначений для підсилення різниці сигналів, прикладених до його інвертуючого та неінвертуючого входів.

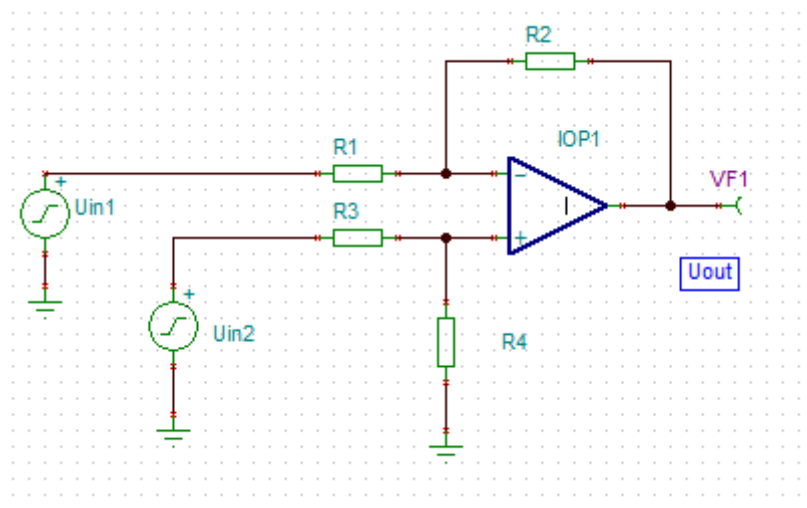


Рисунок 12 – Диференціальний підсилювач

Напруга на неінвертуючому вході:

$$U_{+} = \frac{R4}{R4 + R3} U_{in2}$$

Напруга на інвертуючому згідно моделі ідеального ОП дорівнює напрузі на неінвертуючому вході. Звідси можна знайти струм через резистори R1 і R2:

$$I = \frac{\left(U_{in1} - \frac{R4}{R4 + R3} U_{in2} \right)}{R1} = \frac{-U_{out} + \frac{R4}{R4 + R3} U_{in2}}{R2}$$

Звідси:

$$U_{out} = -U_{in1} \frac{R2}{R1} + U_{in2} \frac{R4}{R3+R4} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

Якщо $R1 = R3$, $R2 = R4$

$$U_{out} = -U_{in1} \frac{R2}{R1} + U_{in2} \frac{R2}{R1}$$

$$K_u = \frac{U_{out}}{U_{in2} - U_{in1}} = \frac{R2}{R1}$$

Вхідний опір підсилювача є різним для різних входів, для інвертуючого входу він залежить від напруги на неінвертуючому вході [4].

При підсиленні сигналів від джерел, що мають співставний з входами підсилювача вхідний опір, виникатимуть похибки. Для уникання цих похибок у вимірювальних підсилювачах часто використовуються топології так званих інструментальних підсилювачів, одна з яких приведена на рис.13.

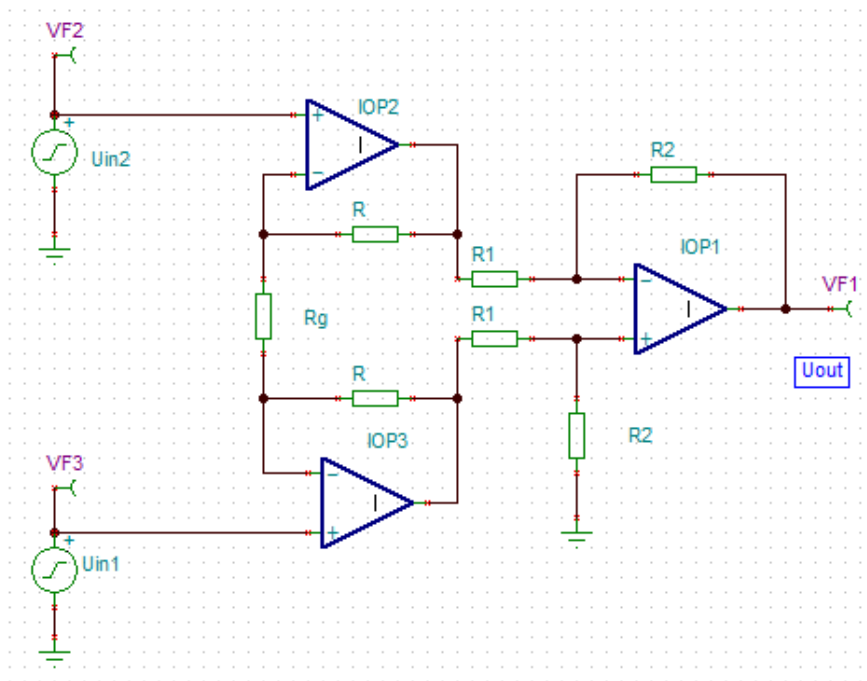


Рисунок 13 – Інструментальний підсилювач

Коефіцієнт підсилення даного підсилювача для диференціального сигналу дорівнює:

$$K_u = \left(1 + 2 \frac{R}{R_g} \right) \frac{R_2}{R_1}$$

Вхідні опори є однаковими для обох входів і у випадку ідеального ОП є нескінченно великими.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати диференціальний підсилювач з заданим коефіцієнтом підсилення диференціального сигналу K . Для побудови підсилювача використати ідеальний ОП (схема рис.12).
2. Підключити до входів підсилювача джерела сигналу (генератори напруги), вибрати синусоїдальний сигнал, встановити амплітуду сигналу 1В, частоту 1 кГц, внутрішній опір джерела сигналу зробити нульовим.
3. До входу та виходу підсилювача підключити «зовнішні виводи для вимірювання напруги».
4. Напруга на виході підсилювача повинна дорівнювати нулю.
5. Для візуального контролю правильності функціонування схеми застосувати осцилограф.
6. Збільшити напругу на неінвертуючому вході на 100мВ.
7. Для візуального контролю правильності функціонування схеми застосувати осцилограф.
8. Визначити коефіцієнт підсилення схеми як відношення різниці вхідних сигналів (100мВ) до вихідного сигналу.
9. Встановити внутрішні опори джерел сигналу рівними опорам резисторів на інвертуючому та неінвертуючому входах.
10. Визначити вхідний опір підсилювача зі сторони інвертуючого та неінвертуючого входу.
11. Збільшити напругу джерела сигналу на неінвертуючому вході підсилювача до 1,5В.
12. Визначити вхідний опір зі сторони неінвертуючого входу.
13. Зменшити напругу джерела сигналу на неінвертуючому вході підсилювача до 0,5В.

14. Визначити вхідний опір зі сторони неінвертуючого входу.
15. Визначити коефіцієнт впливу напруги на неінвертуючому вході на вхідний опір зі сторони інвертуючого входу $k_d = \frac{\Delta R_{in-}}{\Delta U_+}$.
16. Зібрати інструментальний підсилювач з заданим коефіцієнтом підсилення диференціального сигналу K . Для побудови підсилювача використати ідеальний ОП (схема рис.13).
17. Повторити пп.2-15.(коефіцієнт впливу напруги на неінвертуючому вході на вхідний опір зі сторони інвертуючого входу позначити як k_i)
18. Порівняти k_d і k_i .

Варіанти завдань: для диференціального підсилювача (рис.12, $R1 = R3, R2 = R4$) – коефіцієнт підсилення K = останні дві цифри номеру залікової книжки +10, вхідний опір зі сторони неінвертуючого входу – останні дві цифри номеру залікової книжки +5 кОм, для інструментального підсилювача – коефіцієнт підсилення K = останні дві цифри номеру залікової книжки +10.

Контрольні питання:

1. Пояснити, чому диференціальний підсилювач має різні вхідні опори інвертуючого та неінвертуючого входів.
2. Вивести формулу для коефіцієнта підсилення інструментального підсилювача, ОП вважати ідеальним.
3. Пояснити відсутність впливу на вхідний опір зі сторони інвертуючого входу напруги на неінвертуючому вході у інструментального підсилювача і наявність такого впливу у диференціального підсилювача.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ОСНОВІ ОП.

Мета роботи: дослідження лінійних електронних пристроїв для виконання математичних операцій.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI інтегратор, суматор та диференціатор. Використовуючи відповідні засоби симулятора, дослідити виконання пристроями вказаних математичних операцій на прикладі розв'язування лінійного диференціального рівняння.

Короткі теоретичні відомості

Схема суматора представлена на рис.14 [2].

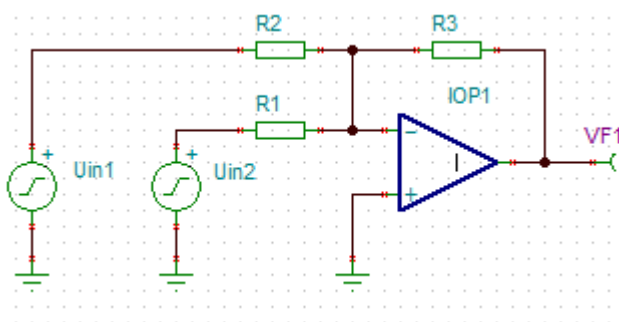


Рисунок 14 – Суматор

Виведемо коефіцієнт підсилення суматора. Струм через резистор $R3$ дорівнює сумі струмів через резистори $R1$ і $R2$. Напряга виходу дорівнює падінню напруги на резисторі $R3$. Можемо записати:

$$I_{R3} = I_{R1} + I_{R2} = \frac{U_{in1}}{R2} + \frac{U_{in2}}{R1}$$
$$U_{out} = I_{R3}R3 = -\left(\frac{R3}{R2}U_{in1} + \frac{R3}{R1}U_{in2}\right)$$

Суматор реалізує зважене складання вхідних напруг. Вхідних напруг може бути скільки завгодно.

Якщо в схемі інвертуючого підсилювача замість резистора в колі негативного зворотного зв'язку включити конденсатор, схема матиме

властивість інтегрувати вхідну напругу. Схема інтегратора приведена на рис.15 [2,4].

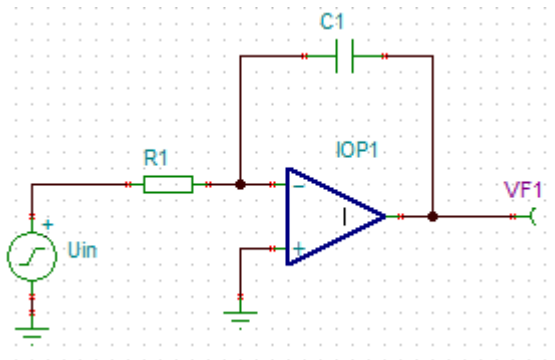


Рисунок 15 – Інтегратор

Згідно моделі ідеального ОП струм через конденсатор дорівнює струму через вхідний резистор, оскільки входи ідеального ОП не споживають струму. Потенціал інвертуючого входу дорівнює потенціалу неінвертуючого, тобто потенціалу землі через наявність НЗЗ та нескінченості коефіцієнту підсилення ОП. Тобто, можемо записати:

$$U_{out} = -\frac{1}{C} \int_0^t I_{R1}(t) dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{in}(t) dt$$

Відтак передавальна характеристика:

$$K(p) = \frac{U_{out}(p)}{U_{in}(p)} = -\frac{1}{pRC}$$

Якщо поміняти місцями конденсатор і резистор, отримаємо диференціатор.

Використовуючи інтегратори та суматори, можна розв'язувати диференціальні рівняння, в яких шукана функція є залежністю напруги від часу.

Для прикладу розглянемо розв'язання лінійного диференціального рівняння третього порядку з постійними коефіцієнтами без похідних від вхідної величини.

$$a_3 \frac{d^3 U_{out}(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 U_{out}(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dU_{out}(t)}{dt} + a_0 U_{out}(t) = U_{in}(t)$$

Перепишемо дане рівняння наступним чином:

$$\frac{d^3 U_{out}(t)}{dt^3} = \frac{1}{a_3} U_{in}(t) - \frac{a_2}{a_3} \frac{d^2 U_{out}(t)}{dt^2} - \frac{a_1}{a_3} \frac{dU_{out}(t)}{dt} - \frac{a_0}{a_3} U_{out}(t)$$

Припустимо, що старша похідна цього рівняння відома. Якщо цю похідну тричі проінтегрувати з відповідними коефіцієнтами, скласти результати інтегрування і додати до цієї суми помножену на відповідний коефіцієнт вхідну величину, отримаємо схему для розв'язування цього рівняння (рис.16). Початкові умови задаються зарядами на конденсаторах інтегратора. У випадку нульових початкових умов початкові заряди конденсаторів інтеграторів дорівнюють нулю.

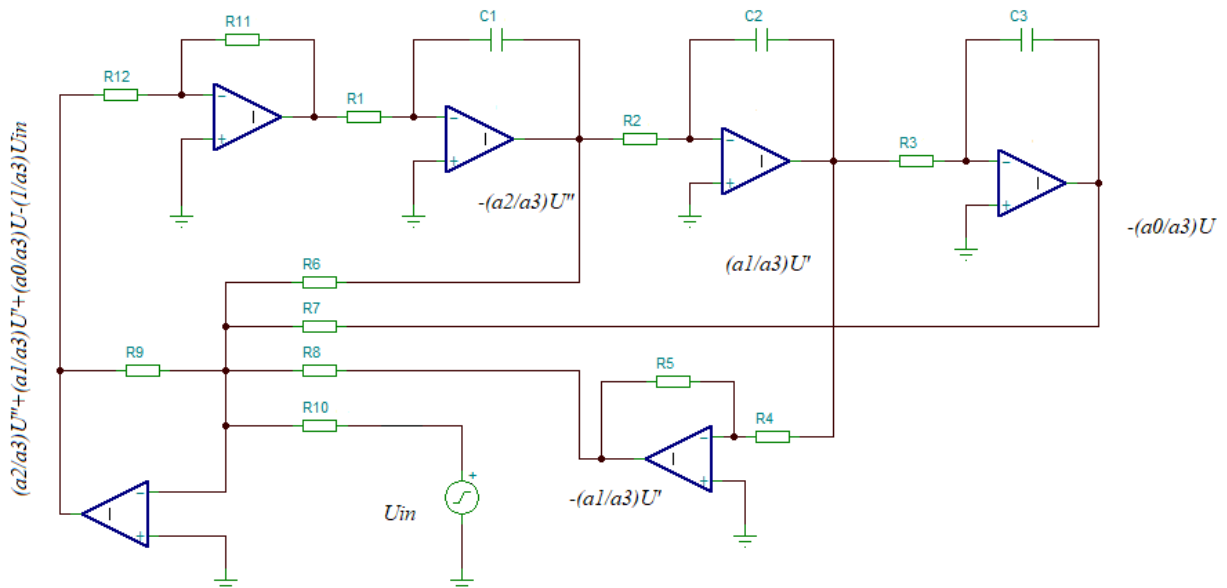


Рисунок 16 – Схема для розв'язування лінійного диференціального рівняння третього порядку без похідних від вхідної величини

Номінали елементів можна визначити, використовуючі наступні співвідношення:

$$\left\{ \begin{array}{l} R1C1 = \frac{a_3}{a_2} \\ R1C1R2C2 = \frac{a_3}{a_1} \\ R1C1R2C2R3C3 = \frac{a_3}{a_0} \end{array} \right\}$$

При цьому номінали всіх інших резисторів мають бути однаковими.

Можна використати неодиначні вагові коефіцієнти в суматорі. Тоді:

$$\begin{cases} R1C1 \frac{R6}{R9} = \frac{a_3}{a_2} \\ R1C1R2C2 \frac{R8}{R9} = \frac{a_3}{a_1} \\ R1C1R2C2R3C3 \frac{R7}{R9} = \frac{a_3}{a_0} \end{cases}$$

При цьому номінали всіх інших резисторів мають бути однаковими.

Для прикладу розв'яжемо наступне диференціальне рівняння:

$$10^{-3} \frac{d^3 U_{out}(t)}{dt^3} + 10^{-2} \frac{d^2 U_{out}(t)}{dt^2} + 10^{-1} \frac{d U_{out}(t)}{dt} + U_{out}(t) = U_{in}(t)$$

Перепишемо його відносно старшої похідної:

$$\frac{d^3 U_{out}(t)}{dt^3} = 1000 \cdot U_{in}(t) - 10 \cdot \frac{d^2 U_{out}(t)}{dt^2} - 100 \cdot \frac{d U_{out}(t)}{dt} - 1000 \cdot U_{out}(t) \quad (1)$$

Схема для розв'язання цього рівняння та приведена на рис.17.

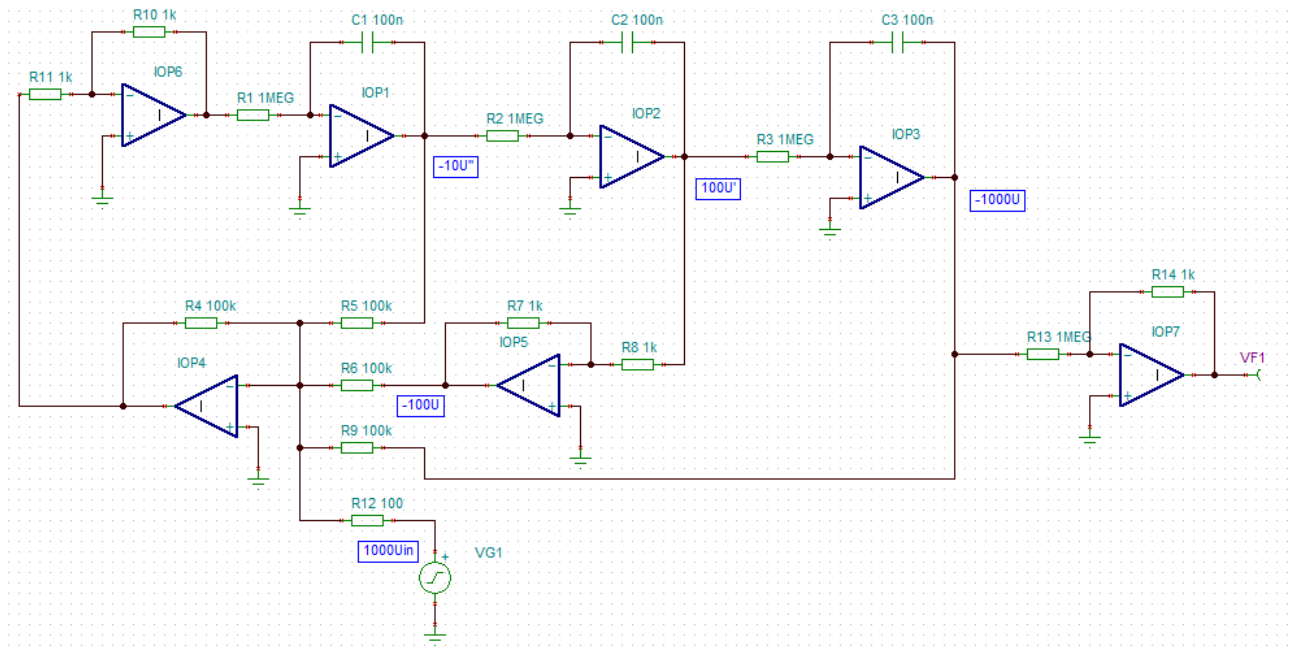


Рисунок 17 – Схема для розв'язування диференціального рівняння (1)

Реакція схеми на вхідний сигнал у вигляді одиничної сходинок приведена на рис.18.

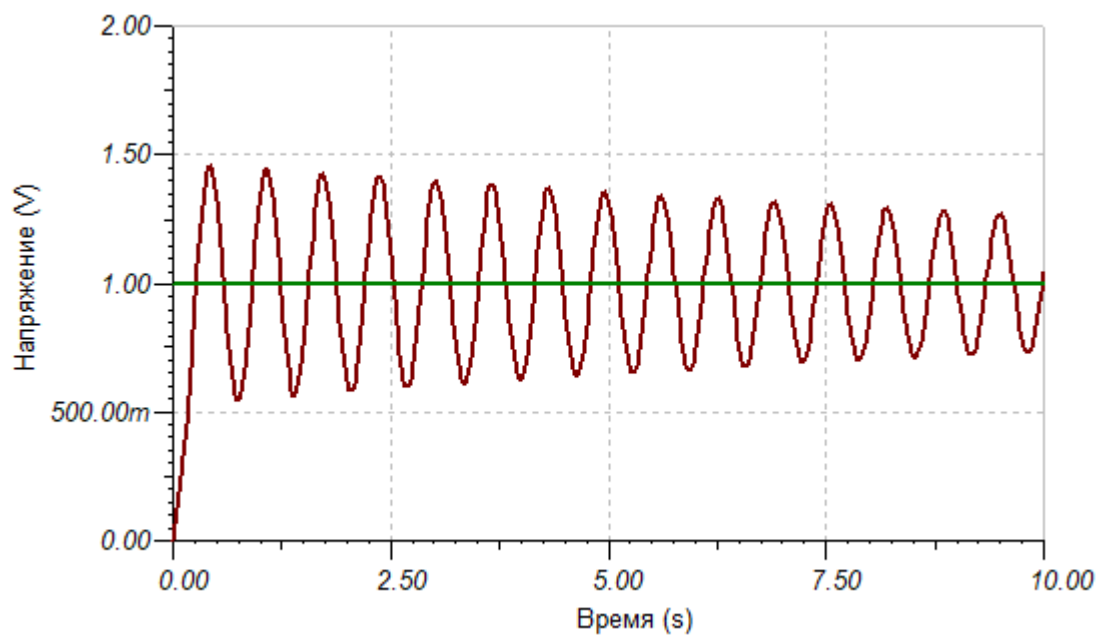


Рисунок 18 – Реакція схеми на рис.18 на вхідний сигнал у вигляді сходинок

Приведена на рис.17 топологія схеми не є єдино можливою. На рис. 19 приведена схема для розв'язування того ж самого рівняння (1). На рис. 20 подана реакція схеми на вхідний сигнал у вигляді одиначної сходинок.

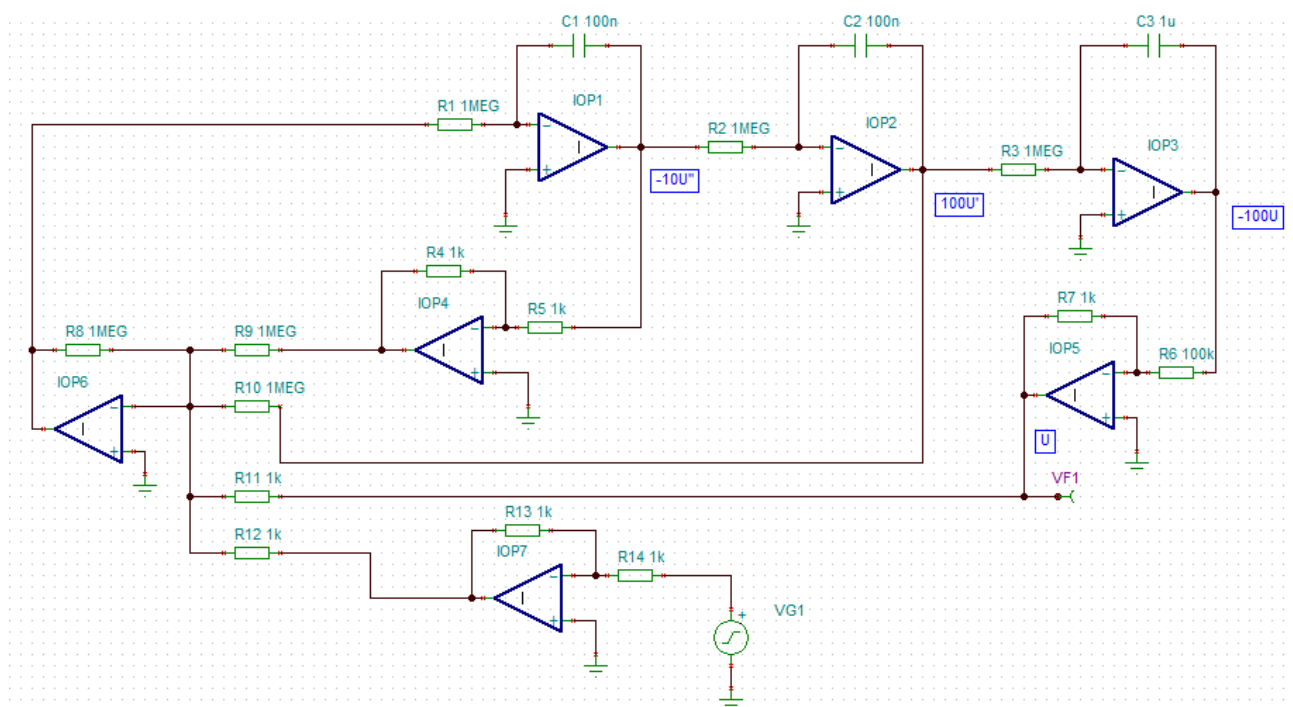


Рисунок 19 – Схема для розв'язування диференціального рівняння (1)

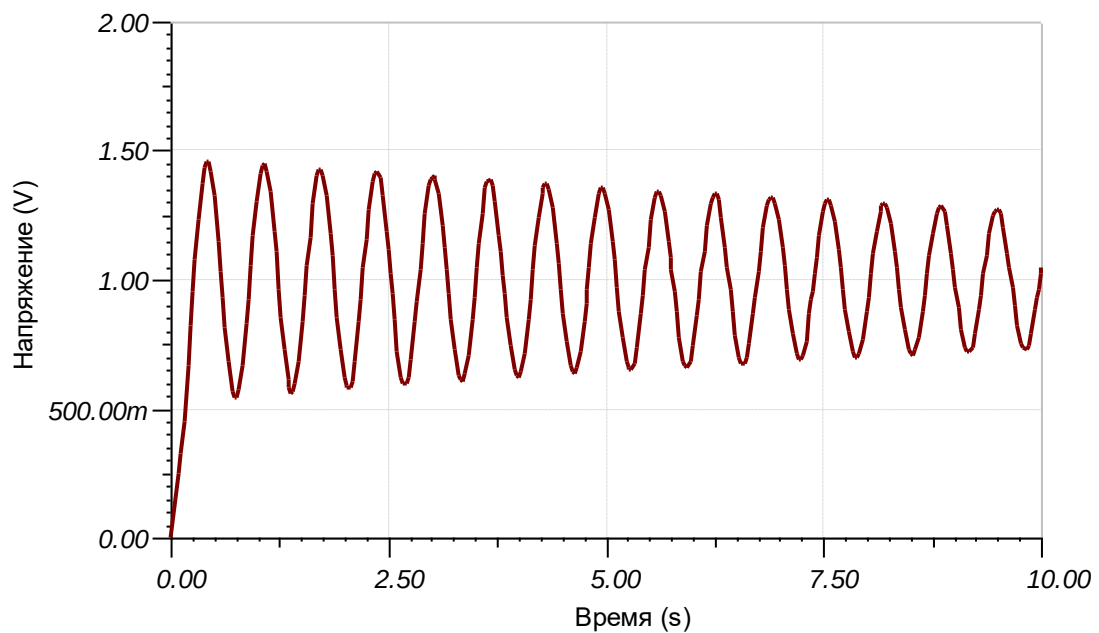


Рисунок 20 – Реакція схеми на рис.20 на вхідний сигнал у вигляді сходинок

З графіків на рис. 18 та 20 видно, що реакції схем ідентичні.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати схему для розв'язування диференціального рівняння $a_2 \frac{d^2 U_{out}(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dU_{out}(t)}{dt} + a_0 U_{out}(t) = U_{in}(t)$. Коефіцієнти рівнянь задаються викладачем.
2. Підключити до входу схеми джерело сигналу, вибрати одиничну сходинок, встановити амплітуду сходинок 1В.
3. До виходу схеми підключити вивід для вимірювання напруги.
4. Використовуючи віртуальний прилад «Аналізатор перехідних процесів» запустити процес моделювання.
5. Прийняти $a_1 = 0$. Запустити моделювання.
6. Порівняти графіки вихідного сигналу п.4 та п.5.
7. Пояснити різницю.

Варіанти завдань: $a_2 = 1$ для номерів варіантів від 1 до 10 (номер варіанту – дві останні цифри номеру залікової книжки) $a_2 = 5$ для номерів варіантів, більших десяти. $a_1 = 15 * n + 2$ $a_0 = 200 * n$. n - номер варіанту.

Контрольні питання:

1. Вивести диференціальне рівняння, яке описує роботу диференціатора.
2. Пояснити, чому для розв'язування диференціальних рівнянь не використовуються диференціатори, а лише інтегратори.
3. Як можна організувати операцію віднімання?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ОСНОВІ ОП.

Мета роботи: Дослідження активних фільтрів топології Салена – Кі, синтез фільтру методом змінних стану.

Постановка задачі: Розрахувати і реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI ФНЧ та ФВЧ Салена – Кі другого порядку, синтезувати методом змінних стану смуговий фільтр, реалізувати його й вигляді моделі в симуляторі Tina-TI.

Короткі теоретичні відомості

Фільтр – це частотно-вибірковий пристрій, який призначено для пропускання або придушення сигналів, які лежать в певних смугах частот. До 60-х років для реалізації фільтрів використовувались, в основному, пасивні елементи, такі як конденсатори, індуктивності та резистори. З появою в 60-х роках інтегральних операційних підсилювачів з'явився новий напрямок – проектування активних фільтрів на основі ОП. В активних фільтрах використовуються тільки резистори, конденсатори та підсилювачі, в них немає котушок індуктивності. В подальшому, активні фільтри майже повністю замінили пасивні. Зараз пасивні фільтри використовуються тільки в діапазоні частот вище 1 МГц, за межею частотного діапазону більшості ОП широкого призначення [5].

Фільтри можна класифікувати по їх частотним характеристикам, що в умовному вигляді показано на рис.21

За допомогою активних RC – фільтрів неможливо отримати ідеальні форми частотних характеристик, як на рис.21. Проектування активного фільтру завжди є компромісом між формою його характеристики і складністю реалізації. В багатьох випадках вимоги до якості фільтрації дозволяють обійтися найпростішими фільтрами першого та другого порядку. В цій лабораторній роботі досліджуватимуться фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ) та смугові фільтри (СФ) другого порядку різних топологій.

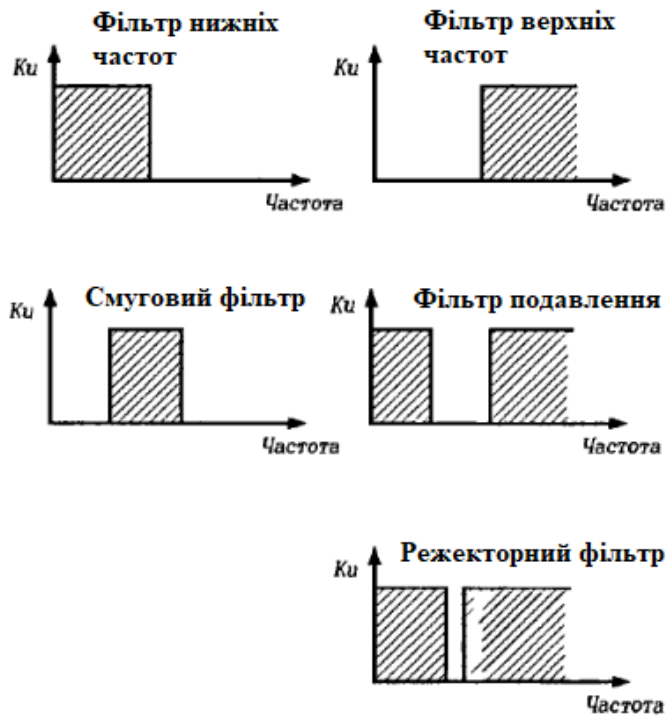


Рисунок 21 — Основні типи фільтрів

Передатна характеристика ФНЧ другого порядку має вигляд:

$$K_u(p) = \frac{K_f \omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_f} p + \omega_0^2}$$

Графік амплітудно – частотної (АЧХ) і фазо – частотної (ФЧХ) характеристик ФНЧ другого порядку приведено на рис. 22.

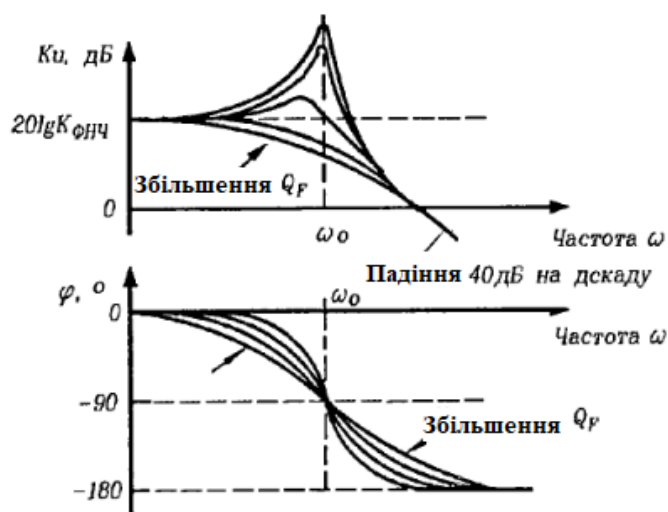


Рисунок 22 – АЧХ і ФЧХ ФНЧ другого порядку

Передатна характеристика ФВЧ другого порядку має вигляд:

$$K_u(p) = \frac{K_{hf} p^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_f} + \omega_0^2}$$

Графік АЧХ і ФНЧ ФВЧ другого порядку приведено на рис. 23.

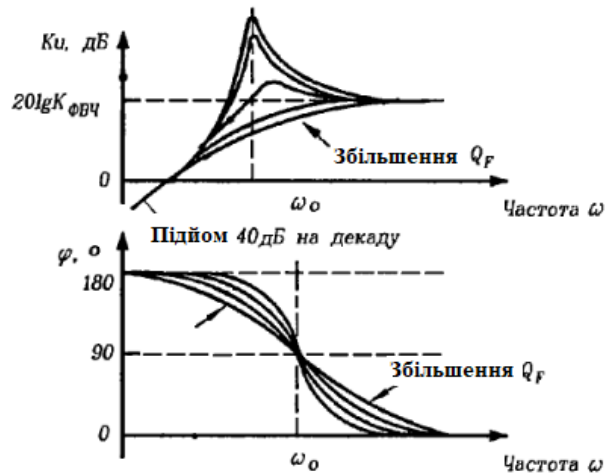


Рисунок 23 – АЧХ і ФЧХ ФВЧ другого порядку

Передатна характеристика СФ другого порядку має вигляд:

$$K_u(p) = \frac{K_{res} \frac{\omega_0}{Q_f}}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_f} + \omega_0^2}$$

Графік АЧХ і ФЧХ СФ другого порядку приведено на рис. 24.

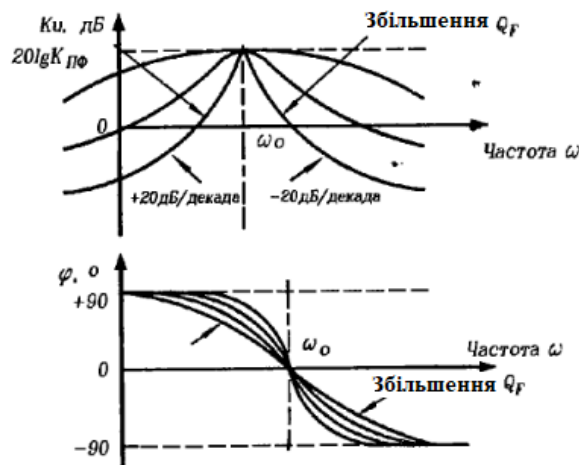


Рисунок 24 – АЧХ і ФЧХ СФ другого порядку

Реалізація всіх цих характеристик може бути здійснена на основі багатьох топологій. В цій лабораторній роботі будуть досліджуватися ФНЧ та ФВЧ на основі топології Саллена-Кі та СФ, реалізований методом змінних стану. Топологія ФНЧ Саллена – Кі подана на рис.25, ФВЧ Саллена – Кі на рис. 26.

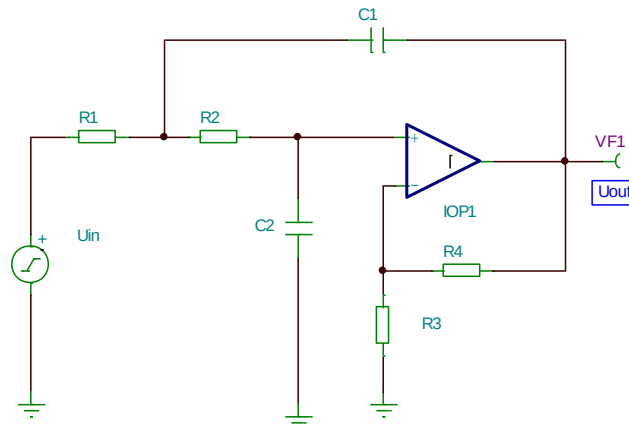


Рисунок 25 – ФНЧ топології Саллена – Кі

Передавальна характеристика ФНЧ Саллена – Кі другого порядку:

$$K_u(p) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right)}{p^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} - \frac{R_4}{R_2 R_3 C_2} \right) p + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$K_{lf} = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$Q_f = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} - \frac{R_4}{R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}}}$$

Якщо прийняти $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, вирази для характеристик значно спрощуються, зокрема $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, $Q_f = \frac{1}{3 - K_{lf}}$.

На рис.26 приведена схема ФВЧ другого порядку топології Саллена – Кі.

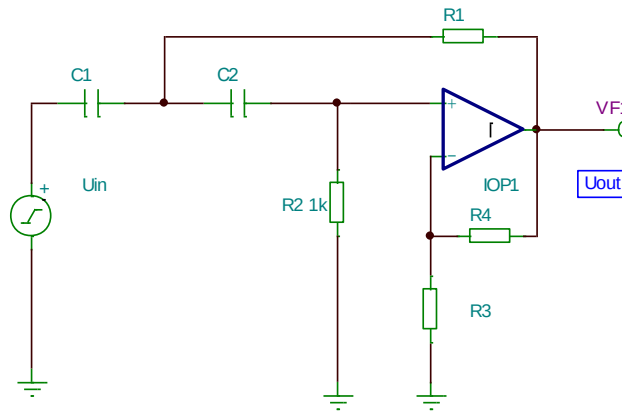


Рисунок 26 – ФВЧ другого порядку топології Саллена – Кі

Передатна характеристика ФВЧ Саллена – Кі другого порядку:

$$Ku(p) = \frac{\left(1 + \frac{R4}{R3}\right) p^2}{p^2 + \left(\frac{1}{R2C1} + \frac{1}{R1C1} - \frac{R4}{R2R3C2}\right) p + \frac{1}{R1R2C1C2}}$$

Аналогічно випадку ФВЧ Саллена – Кі, вираз для передатної характеристики і параметрів фільтру спрощується, якщо прийняти $R1 = R2 = R$, $C1 = C2 = C$.

Методика синтезу фільтрів методом змінних стану аналогічна методиці складання схеми для розв'язку диференціального рівняння. Розглянемо її на прикладі синтезу схеми ФВЧ другого порядку. Передатна характеристика ФВЧ в загальному вигляді дається формулою:

$$Ku(p) = \frac{K_{hf} p^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}$$

Прийmemo $K_{hf} = 1$ і виконаємо наступні перетворення;

$$\frac{U_{out}(p)}{U_{in}(p)} = \frac{p^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}$$

$$U_{out}(p) \left(p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2 \right) = U_{in}(p) p^2$$

Помножимо обидві частини рівняння на $\frac{1}{p^2}$. Матимемо:

$$U_{out}(p) + \frac{\omega_0}{Qp} U_{out}(p) + \omega_0^2 \frac{U_{out}(p)}{p^2} = U_{in}(p)$$

$$U_{out}(p) = U_{in}(p) - \frac{\omega_0}{Qp} U_{out}(p) - \omega_0^2 \frac{U_{out}(p)}{p^2}$$

Оригінал цього рівняння за нульових початкових умов:

$$U_{out}(t) = U_{in}(t) - \frac{\omega_0}{Q} \int U_{out}(t) dt - \omega_0^2 \int \left(\int U_{out}(t) dt \right) dt$$

Вхідний сигнал треба двічі проінтегрувати (інтеграли мають бути зі знаком мінус) і скласти з вхідним сигналом. Для прикладу $Q=10$, $\omega_0=100$ Схема фільтру приведена на рис. 27., АЧХ та ФЧХ фільтру приведена на рис.28.

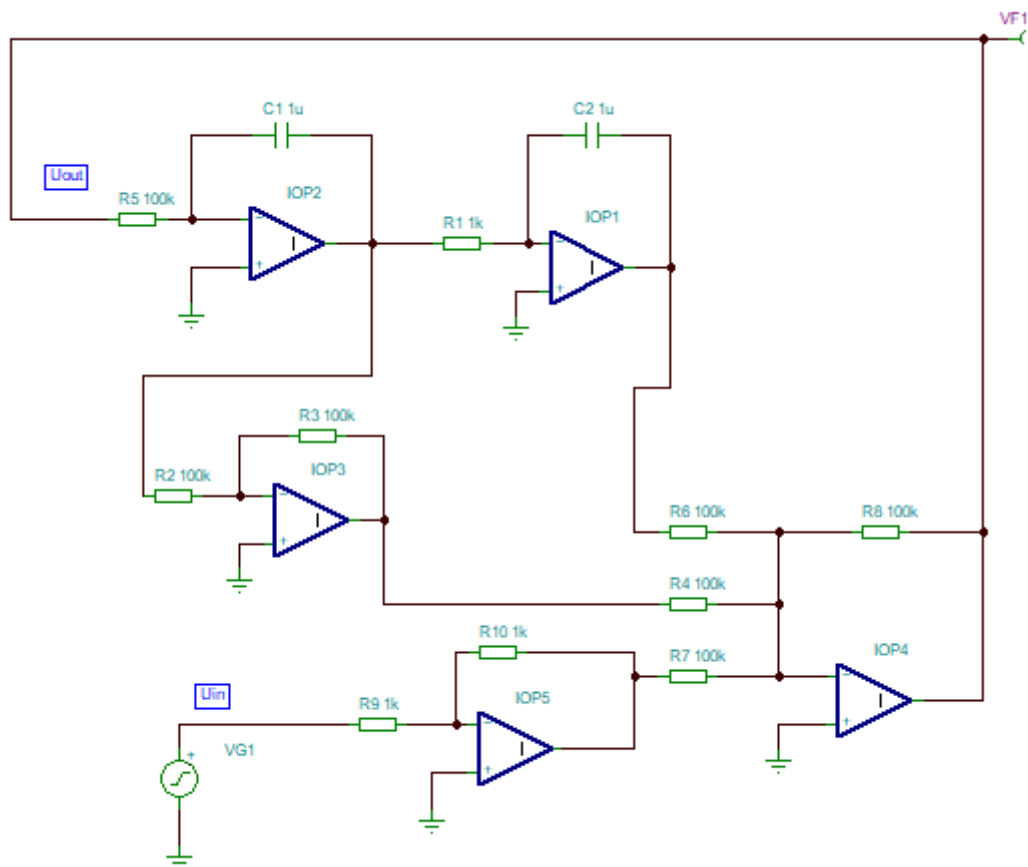


Рисунок 27 – Схема ФВЧ другого порядку синтезованого методом змінних стану

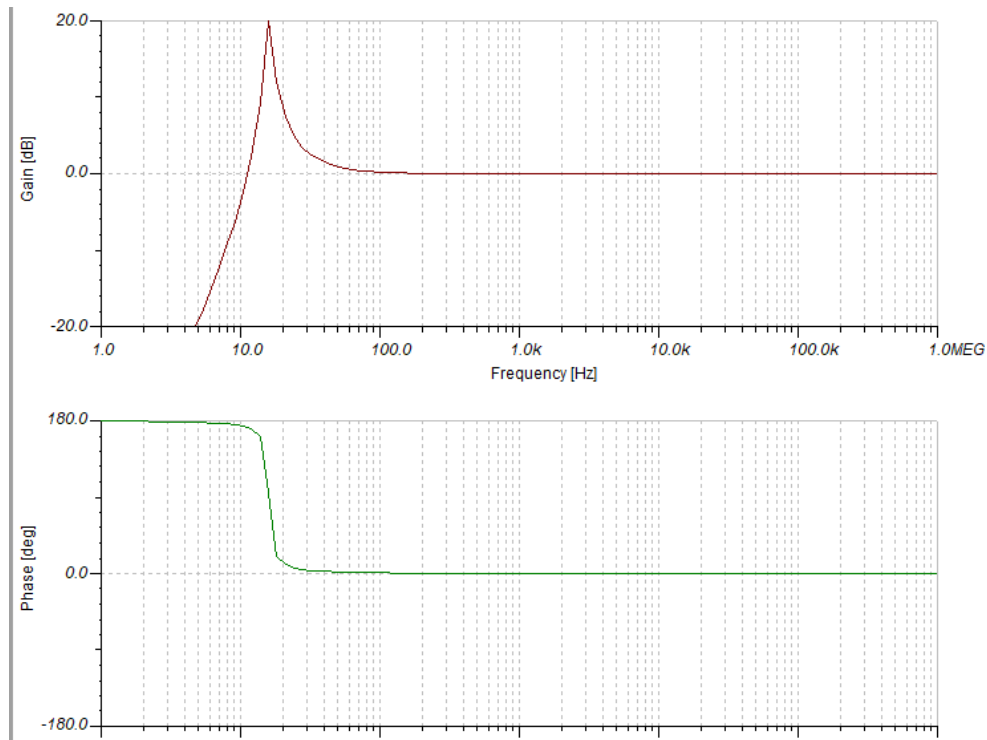


Рисунок 28 – АЧХ та ФЧХ ФВЧ другого порядку, синтезованого методом змінних стану

Порядок виконання роботи:

1. Розрахувати номінали елементів ФНЧ Саллена – Кі для отримання характеристик, заданих викладачем.
2. В симуляторі Tina-TI зібрати схему ФНЧ Саллена – Кі.
3. За допомогою віртуального аналізатора сигналів переконатися у відповідності характеристик фільтру характеристикам ФНЧ другого порядку.
4. За допомогою курсорів віртуального аналізатора перевірити відповідність резонансної частоти та добротності заданим.
5. Розрахувати номінали елементів ФВЧ Саллена – Кі для отримання характеристик, заданих викладачем.
6. Повторити пп.2-4.

7. Синтезувати методом змінних стану СФ з передатною характеристикою

$$Ku(p) = \frac{K_{res} \frac{\omega_0}{Q_f}}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_f} p + \omega_0^2}$$

8. В стимуляторі Тіпа-ТІ зібрати схему синтезованого фільтру.

9. Повторити пп. 3,4.

Варіанти завдань: для фільтрів всіх типів: $\omega_0 = 100 * n$, $Q = 5 + n$, $K = n$

n - останні дві цифри номеру залікової книжки.

Контрольні питання:

1. Чим відрізняється АЧХ та ФЧХ фільтрів першого і другого порядків?
2. Як по графіку АЧХ оцінити добротність?
3. Дайте відповідь, які на вашу думку, переваги та недоліки фільтрів топології Саллена – Кі у порівнянні з фільтрами, синтезованими за методом змінних стану?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОП

ЧАСТИНА 1

Мета роботи: дослідження властивостей релаксаційних і функціональних генераторів на основі ОП.

Постановка задачі: Розрахувати і реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI релаксаційний генератор і генератор трикутних коливань. Визначити залежність частоти генерації від параметрів кола задавання частоти.

Короткі теоретичні відомості

Релаксаційним називається генератор, у якого коефіцієнт підсилення є значно більшим, ніж це необхідно для виконання умови балансу амплітуд. Внаслідок цього, підсилювальний пристрій, в нашому випадку ОП, періодично переходить з одного стану насичення в друге. Період коливань визначається швидкістю заряду реактивного елемента генератора. Найчастіше в якості такого елемента виступає ємність. Схема релаксаційного генератора на основі ОП приведена на рис.29, осцилограми напруг в характерних точках схеми приведені на рис. 30. Для моделювання генератора використовується модель реального операційного підсилювача [1,2].

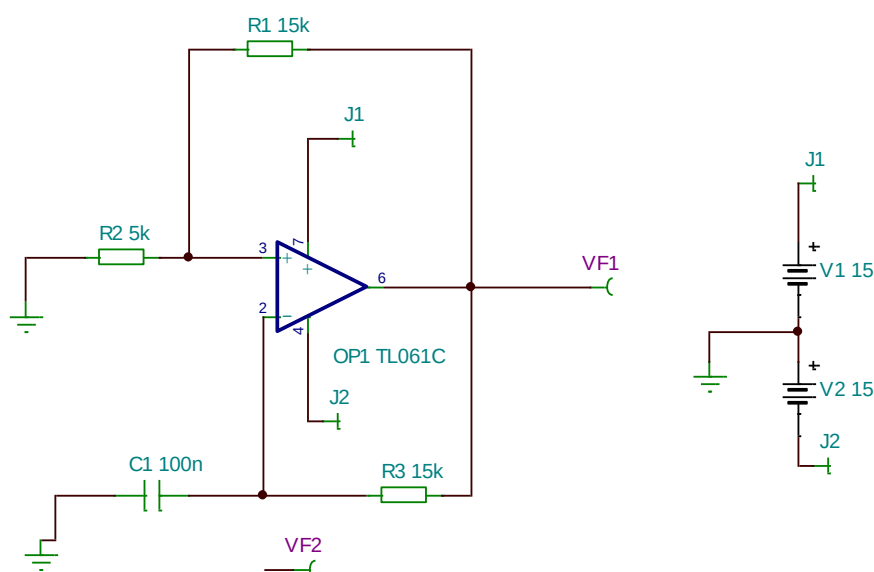


Рисунок 29 – Схема релаксаційного генератора на основі ОП

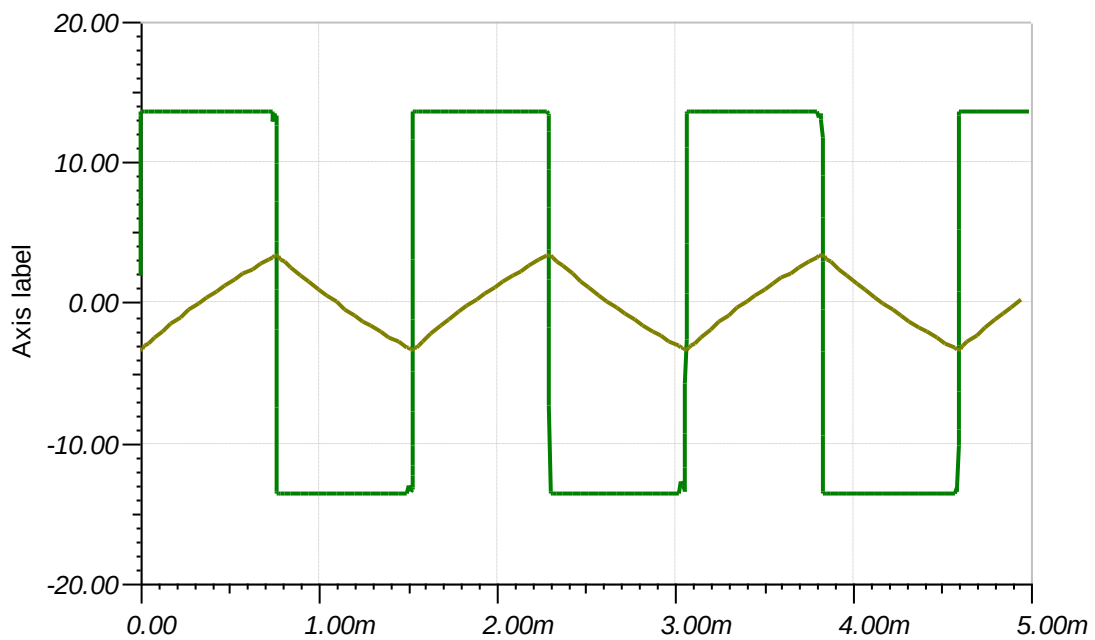


Рисунок 30 – Осцилограми напруг в характерних точках релаксаційного генератора

Принцип роботи генератора полягає в наступному. Після подачі напруги живлення напруга на конденсаторі C1 дорівнює нулю, тобто інвертуючий вхід ОП має нульову напругу відносно спільного проводу. Через наявність напруги зміщення і позитивного зворотного зв'язку через резистори R1, R2 на виході підсилювача встановлюється або позитивна напруга, або негативна напруга, яка приблизно дорівнює напрузі живлення. Починається процес заряду конденсатора C1 через резистор R3. При досягненні напруги на конденсаторі C1 рівня напруги на неінвертуючому вході відбувається лавиноподібна зміна напруги на виході підсилювача на протилежну за знаком. Починається процес перезаряду конденсатора. При досягненні напруги на конденсаторі рівня напруги на неінвертуючому вході процес повторюється. Ці процеси відображені на рис.30. Напруга у вигляді меандру – це напруга на виході ОП, інша крива – напруга на конденсаторі C1.

Порядок виконання роботи:

1. Вивести формулу для визначенні частоти генерації релаксаційного генератора (рис.29)

2. Розрахувати елементи генератора для отримання необхідної частоти генерації. Частота генерації задається викладачем. Рекомендується в моделі використовувати резистори з опором більше 10кОм.
3. Змодельовати схему релаксаційного генератора.
4. Використовуючи віртуальний осцилограф пересвідчитися у відповідності частоти генерації заданій.
5. Використовуючи принцип роботи релаксаційного генератора синтезувати і змодельовати схему функціонального генератора, який би генерував трикутний сигнал з заданою частотою і амплітудою, рівній третині напруги живлення.
6. За допомогою віртуального осцилографа пересвідчитись у коректності роботи функціонального генератора.

Варіанти завдань: частота генерації $f = 100 \cdot n$ n – дві останні цифри номеру залікової книжки.

Контрольні питання:

1. Чому для моделювання релаксаційного генератора не можна використовувати модель ідеального ОП?
2. Що таке баланс фаз і баланс амплітуд?
3. В чому полягає різниця між релаксаційним генератором і генератором синусоїдальних коливань?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОП

ЧАСТИНА 2

Мета роботи: дослідження властивостей RC генераторів синусоїдальних коливань на основі ОП.

Постановка задачі: Розрахувати і реалізувати у вигляді моделі в симуляторі Tina-TI генератори синусоїдальних коливань: квадратурного генератора та генератора з фазовим зсувом.

Короткі теоретичні відомості

Як відомо, генераторами є кола, в яких виконується дві умови – умова балансу фаз і балансу амплітуд. Спрощено, баланс фаз – це наявність на певній частоті петльового фазового зсуву, якій дорівнює 2π . Тобто зворотній зв'язок є позитивним. Баланс амплітуд – петльове підсилення на частоті, де виконується баланс фаз, дорівнює або більше одиниці. У випадку, коли петльове підсилення значно більше одиниці, отримаємо релаксаційний генератор, у випадку, коли петльове підсилення дорівнює одиниці – генератор синусоїдальних коливань [3].

Схемотехніка генераторів синусоїдальних коливань є різною для різних частотних діапазонів. В діапазоні звукових частот і в нижній частині ультразвукового діапазону використовуються генератори, в яких підсилювальним елементом є ОП. Існує багато різновидів таких генераторів, серед яких можна відмітити генератор Віна, квадратурний генератор, генератор Бубба, генератора з фазовим зсувом.

В лабораторній роботі буде досліджуватися функціонування квадратурного генератора і генератора з фазовим зсувом. Схема квадратурного генератора приведена на рис.31

Розглянемо принцип роботи квадратурного генератора. Як відомо, функція $U(t) = \sin t$ є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{d^2 U(t)}{dt^2} + U(t) = 0$$

Покажемо, що схема на рис. 31 описується саме цим диференціальним рівнянням.

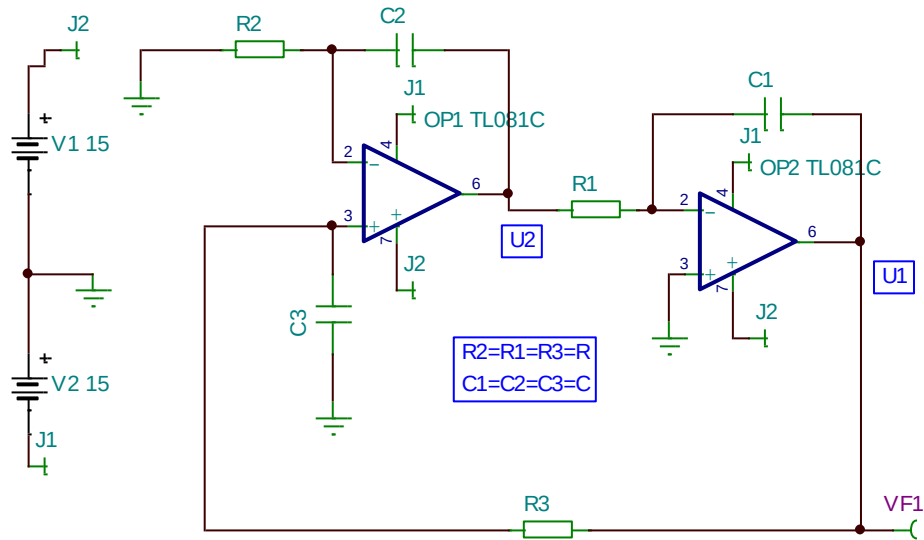


Рисунок 31 – Квадратурний генератор

Для цього, розірвемо зворотний зв'язок в точці з'єднання виходу ОП2 і резистора R3, тобто в точці, позначеній на схемі як VF1.

Тоді, для цієї схеми можна записати систему рівнянь в операторній формі:

$$\begin{cases} U2(p) = U1(p) \cdot \frac{1}{1 + pRC} \cdot \left(1 + \frac{1}{pRC}\right) \\ U1(p) = -\frac{1}{pRC} U2(p) \end{cases}$$

З цієї системи рівнянь отримаємо рівняння:

$$p^2 U1(p) + \frac{U1(p)}{(RC)^2} = 0$$

Оригінал цього рівняння:

$$\frac{d^2 U1(t)}{dt^2} + \frac{1}{(RC)^2} \cdot U1(t) = 0$$

Розв'язком цього рівняння є функція $U(t) = \sin \omega t$, $\omega = \frac{1}{RC}$

На практиці, для стійкого збудження генератора опір резистора R2 обирають дещо меншим розрахованого (на 5-10%) для мінімізації нелінійних спотворень і обмеження амплітуди вихідного сигналу паралельно конденсатору

C1 включають нелінійні кола, наприклад, з двох стабілітронів, як показано на рис. 32.

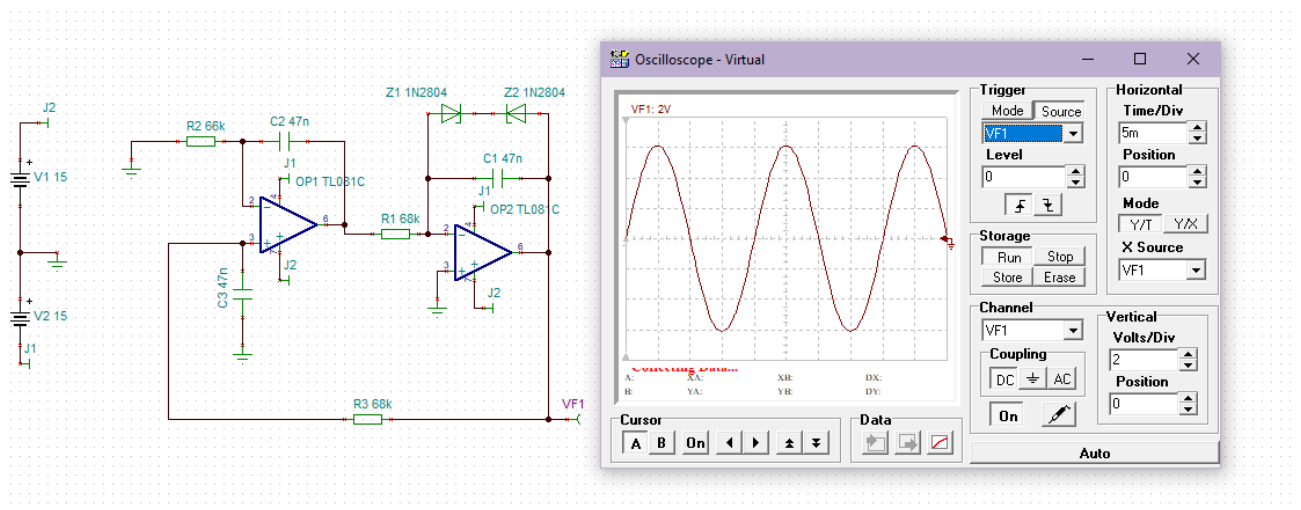


Рисунок 32 – Повна схема квадратурного генератора і осцилограма вихідної напруги

Генератор з фазовим зсувом показано на рис. 33.

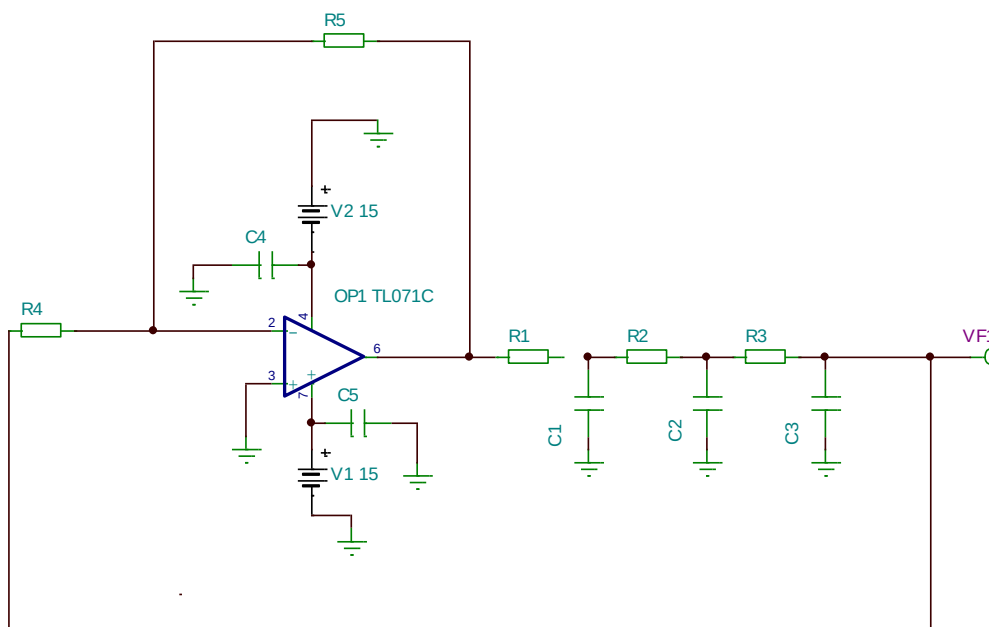


Рисунок 33 – Генератор з фазовим зсувом

В цій схемі баланс фаз виконується на частоті, де фазовий зсув, який вносить кожне RC коло дорівнює $\frac{\pi}{3}$ (60°) це відбувається на частоті $\omega = \frac{1,732}{RC}$.

Петльове підсилення для цієї схеми приблизно дорівнює:

$$K\beta \approx K \left(\frac{1}{1 + pRC} \right)^3$$

Звідси можна визначити необхідний коефіцієнт підсилення. Оскільки модуль

$\beta = \left(\frac{1}{1 + pRC} \right)^3$ на частоті $\omega = \frac{1,732}{RC}$ дорівнює $\left(\frac{1}{2} \right)^3$, то для виконання балансу фаз коефіцієнт підсилення має дорівнювати 8.

Порядок виконання роботи:

1. Розрахувати елементи генератора для отримання необхідної частоти генерації. Частота генерації задається викладачем. Рекомендується в моделі використовувати резистори з опором більше 10кОм.
2. Змінюючи опір резистора R2 в сторону зменшення, отримати стійку генерацію.
3. За допомогою віртуального осцилографа визначити частоту генерації. За необхідності корегувати значення номіналів елементів.
4. За допомогою віртуального осцилографа зняти осцилограми сигналів на виходах ОП. Переконатися, що зсув фаз між сигналами дорівнює 90° .
5. Зібрати в стимуляторі схему генератора з фазовим зсувом.
6. Розрахувати елементи, що задають частоту генерації. Опори резисторів рекомендується брати менше 5кОм.
7. Встановити опір резистора R4=100кОм. Змінюючи опір резистора R5 в сторону збільшення, отримати стійку генерацію.
8. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, при якому починається генерація. Пояснити, чому коефіцієнт підсилення більше розрахункового значення 8.

Варіанти завдань: частота генерації $f = 10 \cdot n$ Гц. n - дві останні цифри номеру залікової книжки.

Контрольні питання:

1. Пояснити, чому генератор називається квадратурним.
2. Пояснити фізичний смисл умов генерації.
3. Пояснити причину відмінності коефіцієнту підсилення, при якому відбувається стабільне збудження генератора з фазовим зсувом, від теоретичного.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ З ОП

Мета роботи: дослідження властивостей підсилювачів потужності на з ОП.

Постановка задачі: Реалізувати у вигляді моделі в стимуляторі Tina-TI підсилювач потужності з ОП, визначити його основні параметри і дослідити вплив зворотного зв'язку на нелінійні спотворення.

Порядок виконання роботи:

1. В симуляторі Tina-TI зібрати неінвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення K_u , який заданий викладачем. Для моделі використати реальний ОП з бібліотеки Tina-TI за власним вибором. Живлення підсилювача двополярне, $\pm 15\text{В}$.
2. До входу підсилювача підключити джерело синусоїдального сигналу з амплітудою $U_{in} = \frac{10}{K_u}$ і частотою 1 кГц.
3. Підключити до виходу ОП резистор R такого номіналу, при якому візуально спостерігаються спотворення форми вихідного сигналу («зріз» вершини синусоїди). Візуальний контроль форми вихідного сигналу на виході ОП реалізувати за допомогою віртуального осцилографа.
4. Зберегти осцилограму вихідного сигналу на виході ОП.
5. Підключити до виходу підсилювача двотактний емітерний повторювач зібраний на транзисторах бібліотеки Tina-TI. Максимально допустимий струм колекторів транзисторів має бути більшим 1 А.
6. До емітерів двотактного емітерного повторювача підключити резистор R .
7. За допомогою віртуального осцилографа спостерігати форму сигналу на виході ОП. Зберегти осцилограму, пояснити різницю в осцилограмах, пп.4 і 7.
8. Підключити вивід для вимірювання напруги до емітерів двотактного емітерного повторювача. Зняти осцилограму напруги.

9. Підключити той вивід резистора в колі НЗЗ, який був підключений до виходу ОП, на емітери двотактного емітерного перетворювача. Зняти осцилограму напруги. Пояснити різницю в осцилограмах пп.8 і 9.
10. Встановити частоту вхідного сигналу 10 кГц. Зняти осцилограму напруги на емітерах двотактного емітерного повторювача. Порівняти осцилограми пп.9 і 10, пояснити різницю.

Варіанти завдань: Коефіцієнт підсилення $K_u = 3 + n$, n – останні дві цифри номеру залікової книжки.

Контрольні питання:

1. Пояснити причину виникнення спотворень типу «сходінка» в вихідному двотактному емітерному повторювачі, не охопленому НЗЗ.
2. Пояснити зменшення спотворень типу «сходінка» при включенні вихідного повторювача в коло НЗЗ.
3. Пояснити збільшення спотворень типу «сходінка» у вихідному емітерному повторювачі, охопленому колом НЗЗ при збільшенні частоти сигналу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. U. Tietze, Ch. Schenk The semiconductor circuit design (set of 2 books). Volume 1., Book on Demand Ltd., 2018. – 830 p.
2. B. Carter, R. Mancini Op Amps for Everyone 5th Edition ., Newnes; 5th edition, 2017. – 484 p.
3. P. Horowitz, W. Hill. The Art of Electronics 3rd Edition., Cambridge University Press; 3rd edition, 2015. – 1020 p.
4. Сєдов С.О. Аналогове оброблення сигналів. Схемотехніка. Розрахунки: підручник – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 298 с.
5. Сєдов С.О. Оброблення сигналів на базі операційних підсилювачів. Схемотехніка. Розрахунки: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 132 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Кафедра прикладної радіоелектроніки

ЗВІТ

про виконання лабораторної роботи № ____
«ТЕМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ»

Зараховано

Виконав(ла) студент(ка) групи _____:

Посада

П.І.Б.

Підпис

" ____ " _____ 202_ р.

П.І.Б.

Підпис

" ____ " _____ 202_ р.