

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни  
«Схемотехніка телекомунікаційних систем»  
Частина 2.  
для студентів спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
денної форми навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2022

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Схемотехніка телекомунікаційних систем». Частина 2 / укладач: В. В. Гриненко, О.В. Д'яченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 59 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

## ЗМІСТ

С.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІНВЕРТУВАЛЬНОГО ТА ІНВЕРТУВАЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧІВ. ....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. ДОДАВАННЯ І ВІДНІМАННЯ НАПРУГ У СХЕМАХ НА ОП. ....	13
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СХЕМ ІНТЕГРАТОРІВ ТА ДИФЕРЕНЦІАТОРІВ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ. ....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. ПРОЕКТУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ .....	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ .....	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПРЯМОКУТНИХ ТА ТРИКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ. ....	46
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	58

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІНВЕРТУВАЛЬНОГО ТА ІНВЕРТУВАЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧІВ.

Мета роботи

–Вимірювання вхідних струмів операційного підсилювача (ОП). Оцінка величин середнього вхідного струму і різниці вхідних струмів ОП. Вимірювання напруги зсуву ОП. Вимірювання диференціального вхідного опору ОП. Обчислення вихідного опору ОП.

–Вимірювання коефіцієнта підсилення неінвертувального підсилювача на ОП. Визначення різниць фаз між вихідним і вхідним синусоїдальної напруги ОП. Дослідження впливу коефіцієнта підсилення підсилювача на постійну складову вихідної напруги.

–Вимірювання коефіцієнта підсилення інвертувального підсилювача на ОП. Визначення різниці фаз між вихідним і вхідним синусоїдальної напруги ОП. Дослідження впливу коефіцієнта підсилення схеми на постійну складову вихідної напруги.

### 5.1. Короткі теоретичні відомості

Інтегральний операційний підсилювач характеризується рядом параметрів, що описують цей компонент з точки зору якості виконання ним своїх функцій. Серед параметрів, зазвичай приводяться в довідкових даних, основними є наступні.

Середній вхідний струм  $I_{BX}$  за відсутності сигналу на входах ОП через його вхідні виводи протікають струми, обумовлені базовими струмами вхідних біполярних транзисторів або струмами витоку затворів для ОП з польовими транзисторами на вході. Вхідні струми, проходячи через внутрішній опір джерела вхідного сигналу, створюють падіння напруги на вході ОП, які можуть викликати появу напруги на

виході в відсутність сигналу на вході. Компенсація цього падіння напруги ускладнена тим, що струми входів реальних ОП можуть відрізнятись один від одного на 10 ... 20%

Вхідні струми ОП можна оцінити за середнім вхідним струмом, обчислюваному як середнє арифметичне струмів інвертувального та неінвертувального входів:

$$I_{BX} = \frac{I_{BX1} + I_{BX2}}{2},$$

де  $I_{BX1}$  та  $I_{BX2}$  відповідно струми інвертувального і неінвертувального входів.

Різниця вхідних струмів  $\Delta I_{BX}$  визначається виразом:

$$\Delta I_{BX} = I_{BX1} - I_{BX2}.$$

У довідниках вказують модуль цієї величини.

Схема для вимірювання вхідних струмів представлена на рис. 5.1.

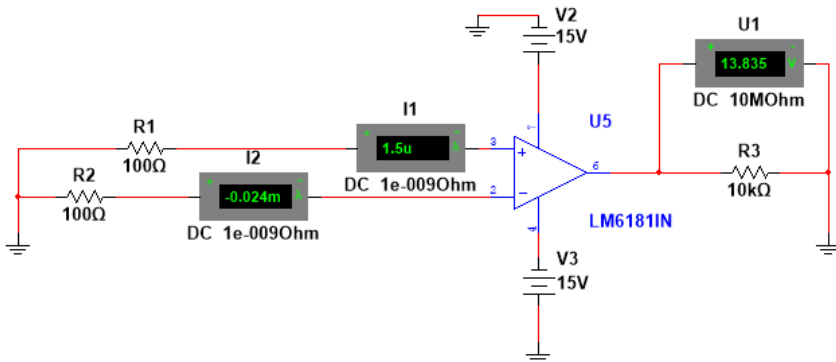


Рисунок 5.1 – Схема для вимірювання вхідних струмів

Коефіцієнт підсилення напруги на постійному струмі  $K_0$  - показник ОП, що визначає наскільки добре виконує ОП основну функцію - підсилення вхідних сигналів. В ідеального підсилювача коефіцієнт підсилення повинен прагнути до нескінченності.

Коефіцієнт підсилення напруги схеми підсилювача на ОП (рис. 5.2) обчислюється за формулою:

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

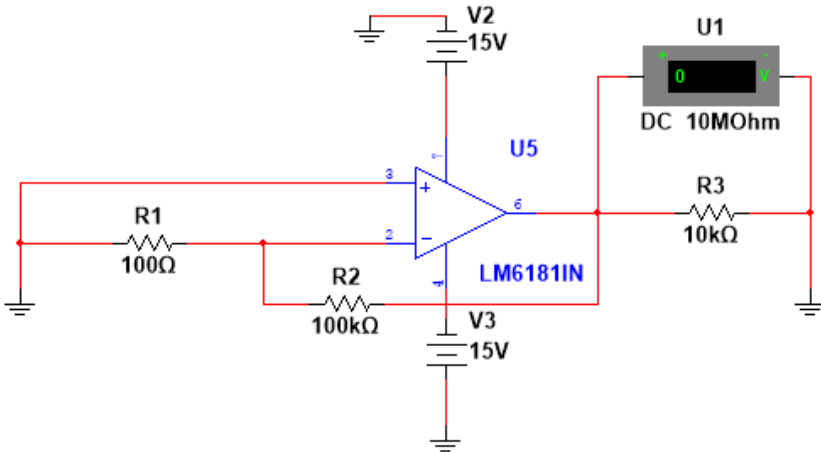


Рисунок 5.2 – Підсилювач на ОП

Напруга зміщення  $U_{3M}$  - значення напруги, яку необхідно подати на вхід ОП, щоб напруга на його виході дорівнювала нулю.

Напругу зміщення  $U_{3M}$  можна обчислити, знаючи вихідну напругу  $\Delta U_{ВИХ}$  при відсутності напруги на вході і коефіцієнт підсилення:

$$U_{3M} = \frac{U_{ВИХ}}{K_U}$$

Вхідний опір  $R_{ВХ}$ . Розрізняють дві складові вхідного опору: диференціальний вхідний опір і вхідний опір по синфазному сигналу. Вхідний опір по синфазному сигналу визначається як відношення приросту вхідної синфазної напруги

$\Delta U_{BX.C\Phi}$  до збільшення середнього вхідного струму  $\Delta I_{BX.CP}$ :

$$R_{BX.C\Phi} = \frac{\Delta U_{BX.C\Phi}}{\Delta I_{BX.CP}}$$

Диференціальний вхідний опір може бути визначений за формулою:

$$R_{BX.ДИФ} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}},$$

де  $\Delta U_{BX}$  - зміна напруга між входами ОП,

$\Delta I_{BX}$  - зміна вхідного струму.

Схема для вимірювання диференціального вхідного опору ОП і вихідного опору наведена на рис. 5.3.

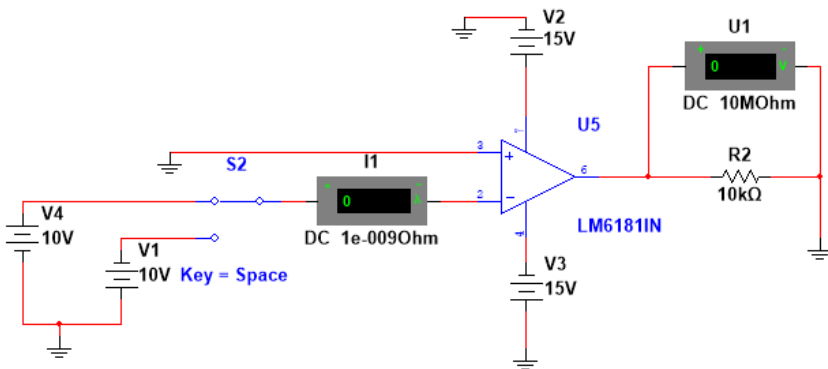


Рисунок 5.3 – Схема для вимірювання диференціального вхідного опору ОП і вихідного опору.

### 5.1.1. Неінвертувальний підсилювач

Коефіцієнт підсилення схеми неінвертувального підсилювача на ОП (рис. 5.4) обчислюється за формулою:

$$K_U = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

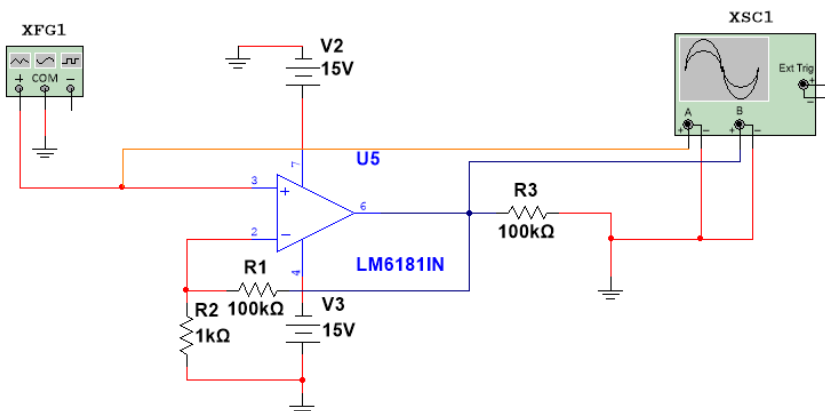


Рисунок 5.4 – Неінвертувальний підсилювач

Постійна складова вихідної напруги підсилювача  $U_{ОВИХ}$  визначається співвідношенням напруги зсуву  $U_{ЗМ}$  на коефіцієнт підсилення схеми  $K_U$  :

$$U_{ОВИХ} = U_{ЗМ} \cdot K_U$$

### 5.1.2. Інвертувальний підсилювач

Коефіцієнт підсилення інвертувального підсилювача на ОП зі зворотним зв'язком (рис. 5.5) обчислюється за формулою:

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

Знак "мінус" у формулі означає, що вихідна напруга інвертувального підсилювача знаходиться в протифазі з вхідною напругою.



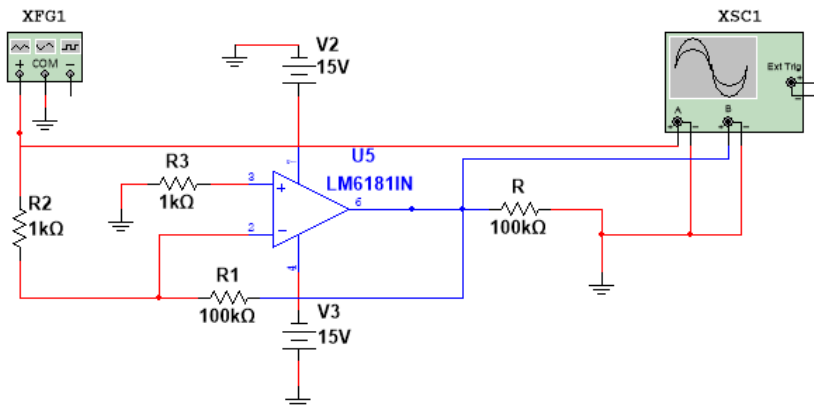


Рисунок 5.5 – Інвертувальний підсилювач

Постійна складова вихідної напруги  $U_{0ВИХ}$  підсилювача залежить від коефіцієнта підсилення  $K_U$  схеми і напруги зсуву  $U_{ЗМ}$  і обчислюється за формулою:

$$U_{0ВИХ} = U_{ЗМ} \cdot K_U$$

## 5.2. Порядок проведення експериментів

Виберіть тип операційного підсилювача за номером варіанту (табл 5.1).

Таблиця 5.1 – Варіанти завдань

Номер варіанту	Тип операційного підсилювача	Номер варіанту	Тип операційного підсилювача
1	LM 6181N	5	LM 759CP
2	AD826AN	6	LF453CM
3	LM 6171AIM	7	LM 7341 AIM
4	LF147J	8	LH4161

### 5.2.1. Вимірювання вхідних струмів.

Відкрийте файл Lab5\_1 (рис. 5.1). Увімкніть схему. Виміряйте вхідні струми ОП. За результатами вимірювань обчисліть середній вхідний струм  $I_{BX}$  і різницю  $\Delta I_{BX}$  вхідних струмів ОП.

### 5.2.2. Вимірювання напруги зсуву

Відкрийте файл Lab5\_2 (рис. 5.2). Увімкніть схему. Запишіть показання вольтметра. За результатами вимірювання, обчисліть напругу зміщення  $U_{3M}$ , використовуючи коефіцієнт підсилення схеми на ОП.

### 5.2.3. Вимірювання вхідного і вихідного опорів

1). Відкрийте файл Lab5\_3 (рис. 5.3). Увімкніть схему. Виміряйте вхідний струм  $I_{BX}$  і вихідну напругу  $U_{ВИХ}$ , запишіть показання. Переведіть ключ клавішею [Space]. Виміряйте вхідний струм після перемикавання ключа. Розрахуйте зміни вхідних напруги і струму. За отриманими результатами обчисліть диференціальне вхідний опір ОП.

2). Зменшуйте опір навантаження  $R$  до тих пір, поки вихідна напруга  $U_{ВИХ}$  не буде приблизно дорівнювати половині значення отриманого в п. 1.

3). Запишіть значення опору  $R$ , який в цьому випадку приблизно дорівнює вихідному опору  $R_{ВИХ}$ .

5.2.4. Робота неінвертувального підсилювача в режимі підсилення синусоїдальної напруги.

1). Відкрийте файл Lab5\_4 (рис. 5.4). Розрахуйте коефіцієнт підсилення напруги  $K_U$  підсилювача по заданим значенням параметрів компонентів схеми. Увімкніть схему. Виміряйте амплітуди вхідного  $U_{BX}$  і вихідного  $U_{ВИХ}$  синусоїдальних напруги. Також виміряйте постійну складову вихідної напруги  $U_{0ВИХ}$  і різниця фаз між вхідним і вихідним

напругами. За результатами вимірювань обчисліть коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  підсилювача.

2). Використовуючи значення напруги зсуву  $U_{ЗМ}$ , обчислене в попередній лабораторній роботі, і обчислене теоретичне значення коефіцієнта підсилення, обчисліть постійну складову вихідної напруги  $U_{ОВИХ}$ .

5.2.5. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

У схемі (рис. 5.4) зменшить значення опору  $R_I$  з 100кОм до 10кОм, амплітуду синусоїдальної напруги генератора збільште до 100 мВ. Встановіть масштаб напруги на вході А осцилографа 100 mV / div, а на каналі В - 500 mV / div. Увімкніть схему. Повторіть всі операції експерименту 5.2.5. при нових параметрах компонентів.

5.2.6. Робота підсилювача в режимі підсилення синусоїдальної напруги.

1). Відкрийте файл Lab5\_5 (рис. 5.5). Розрахуйте коефіцієнт підсилення напруги  $K_U$  підсилювача за значеннями параметрів компонентів схеми. Увімкніть схему. Виміряйте амплітуду вхідного  $U_{ВХ}$  і вхідного  $U_{ВИХ}$  синусоїдальної напруги, постійну складову вихідної напруги  $U_{ОВИХ}$  і різниця фаз між вхідним і вихідним напругою. За результатами вимірювань обчисліть коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  підсилювача.

2). Використовуючи значення напруги зсуву  $U_{ЗМ}$ , обчислене в попередній лабораторній роботі, і знайдене значення коефіцієнта підсилення, обчисліть постійну складову вихідної напруги  $U_{ОВИХ}$ .

5.2.7. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

Встановіть значення опору рівним 10 кОм, амплітуду синусоїдальної напруги генератора - 100 мВ. Встановіть масштаб напруги на вході А осцилографа 100 mV / div, а на каналі В - 500 mV/div. Увімкніть схему. Для нових параметрів схеми повторіть всі виміри та обчислення експерименту 5.2.6.

### **5.3. Зміст звіту**

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Досліджувані схеми.
4. Результати вимірювань.
5. Результати розрахунків.
6. Висновки по роботі.

### **5.4. Контрольні запитання**

1. Назвіть основні параметри ОП.
2. Назвіть основні помилки підсилення постійної складової.
3. У чому причина виникнення вхідних струмів ОП і різниці вхідних струмів? До чого вони призводять при роботі схем на ОП? Методи компенсації впливу вхідних струмів.
4. У чому причина виникнення напруги зсуву? Як впливає напруги зсуву на роботі схем? Методи компенсації впливу напруги зсуву.
5. З яких умов виводиться вираз для коефіцієнта підсилення схеми на рис. 4.4?
6. Чим визначається постійна складова вихідної напруги схеми на рис. 4.4?
7. Як розрахувати коефіцієнт підсилення схеми показаної на рис. 4.5?
8. Які параметри схеми на рис. 4.5 впливають на її коефіцієнт підсилення?
9. Порівняйте неінвертувальне та інвертувальне включення ОП по вхідному опору та коефіцієнту підсилення.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. ДОДАВАННЯ І ВІДНІМАННЯ НАПРУГ У СХЕМАХ НА ОП.

Мета роботи – аналіз роботи схеми суматора на ОП.  
Дослідження схеми додавання і віднімання напруги.

### 6.1. Короткі теоретичні відомості

#### 6.1.1. Інвертувальний суматор.

В інвертувальному суматорі (рис. 6.1), нехтуючи вхідними струмами і напругою зсуву, виконуються наступні співвідношення:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_2}, I = I_1 + I_2,$$

$$I_{33} = I_1 + I_2 = -U_{ВИХ} / R_{33}.$$

З отриманих співвідношень можна отримати вираз для вихідної напруги:

$$U_{ВИХ} = -(I_1 + I_2) \cdot R_{33} = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}\right) \cdot R_{33} = -\frac{R_{33}}{R} (U_1 + U_2).$$

Останній вираз виконується за умови  $R = R_1 = R_2$ .

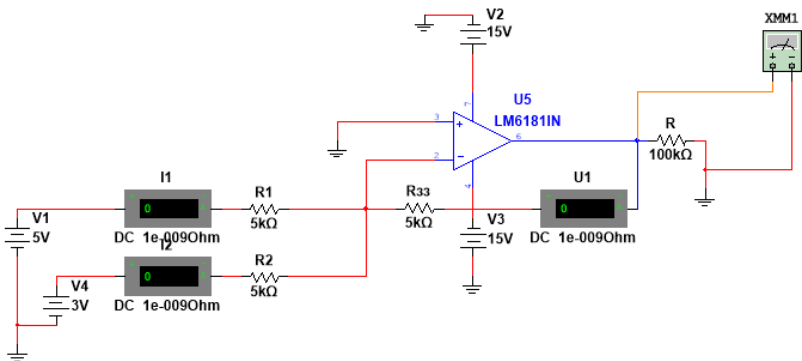


Рисунок 6.1 – Інвертувальний суматор

## 6.2. Порядок проведення експериментів

### 6.2.1. Дослідження схеми додавання постійних напруги

Відкрийте файл Lab6\_1 зі схемою, наведеною на рис. 6.1. Увімкніть схему. Запишіть показання приладів. За заданими номіналами елементів схеми розрахуйте значення струмів  $I_1, I_2, I_{33}$  і використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$  обчисліть вихідну напругу  $U_{ВИХ}$ .

6.2.2. Дослідження схеми додавання постійної та змінної напруги.

а). Відкрийте файл Lab6\_2 зі схемою, наведеною на рис. 6.2. Увімкніть схему. Замалюйте осцилографами вхідної і вихідної напруги. Виміряйте постійну складову і амплітуду вихідної напруги  $U_{ВИХ}$ . Обчисліть постійну складову і амплітуду вихідної напруги  $U_{ВИХ}$  використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$ .

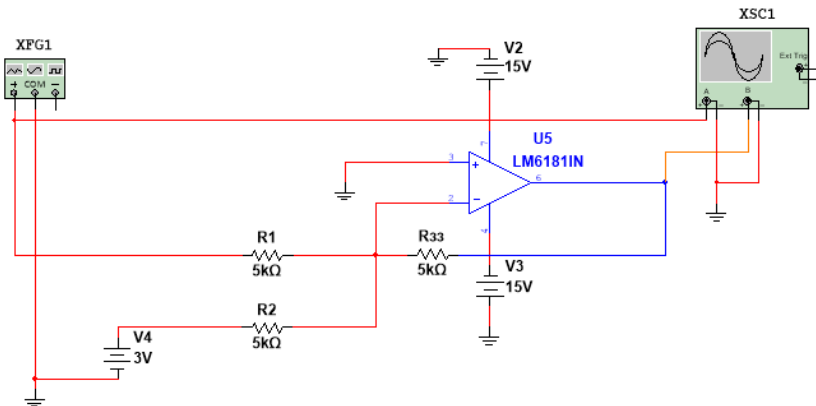


Рисунок 6.2 – Інвертувальний суматор постійної і змінної напруги

б). Встановіть значення опору  $R_2$  на рівні 2,5 кОм. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Виміряйте постійну складову і амплітуду вихідної

напруги  $U_{ВІХ}$ . Обчисліть постійну складову і амплітуду вихідної напруги використовуючи значення напруги  $U_{ВІХ}$  використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$ .

6.2.3. Дослідження схеми додавання змінних напруг.

Відкрийте файл Lab6\_3 зі схемою, наведеною на рис. 6.3. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Виміряйте амплітуди вхідної і вихідної напруги.

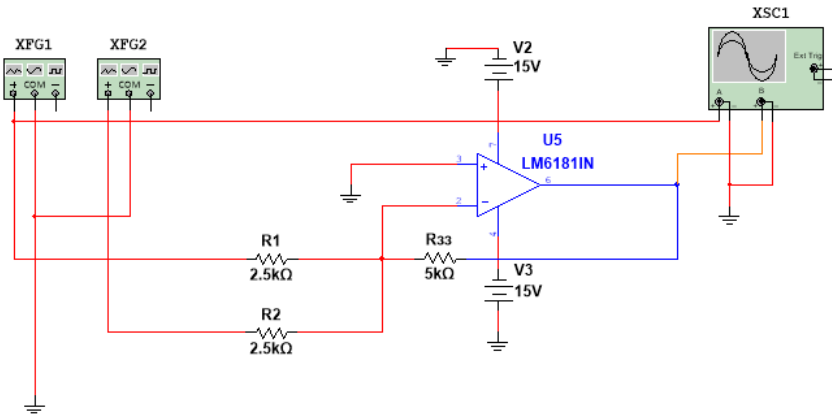


Рисунок 6.3 – Інвертувальний суматор змінних напруг

Обчисліть амплітуду вихідної напруги  $U_{ВІХ}$  за відомими значеннями амплітуд напруг  $U_1$  і  $U_2$ .

6.2.4. Дослідження схеми віднімання постійних напруг

Відкрийте файл Lab6\_4 зі схемою, наведеною на рис. 6.4. Встановіть параметри елементів відповідно до значень зазначених в табл. 6.1. Увімкніть схему. Запишіть показання приладів. За заданими номіналами елементів схеми розрахуйте значення струмів  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_{33}$  і використовуючи значення напруг  $U_1$  и  $U_2$ , обчисліть вихідну напругу  $U_{ВІХ}$ .

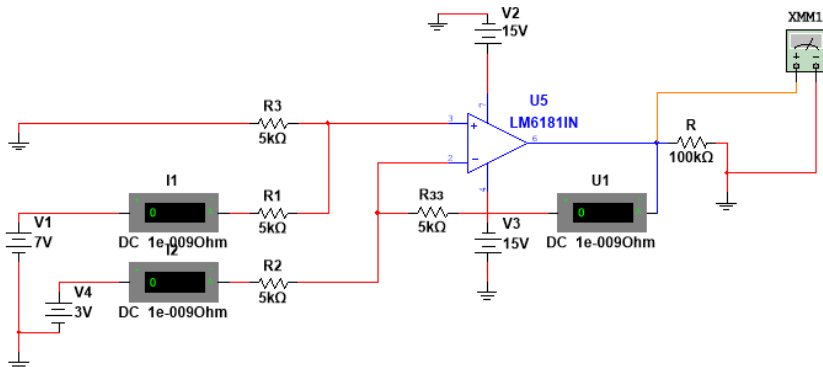


Рисунок 6.4 – Підсилювач з відніманням входних напруг

Таблиця 6.1 – Номінали елементів схеми

№ варіанту	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R33, кОм
1	5	10	5	5
2	10	5	5	10
3	5	5	5	10
4	5	5	10	5
5	5	10	5	10
6	10	5	10	5
7	10	5	5	5
8	5	15	5	10

### 6.3. Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Структурні схеми досліджуваних систем.
4. Отримані графіки і характеристики.
5. Розрахункова частина.
6. Основні висновки.
7. Тема роботи.



#### **6.4. Контрольні запитання**

1. З яких умов виводиться співвідношення між вхідною вихідною напругою в схемі суматора на основі ОП?
2. Як можна реалізувати схеми для підсумування трьох або більше вхідних напруг?
3. Як зміняться основні співвідношення для схеми на рис. 5.1, якщо на неінвертувальний вхід ОП подати постійну напругу?
4. Перерахуйте можливі способи зміни коефіцієнтів підсумовування сигналів в схемі рис. 5.1.
5. За яких умов виводиться співвідношення між вхідною і вихідною напругою в схемі підсилювача з відніманням вхідних напруг на основі ОП?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СХЕМ ІНТЕГРАТОРІВ ТА ДИФЕРЕНЦІАТОРІВ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ.

Мета роботи - дослідити поведінку інтегратора та диференціатора на основі ОП. Побудувати амплітудно-частотні характеристики.

### 7.1. Короткі теоретичні відомості

#### 7.1.1. Інтегратор

Інтегратором називається пристрій, у якого вихідна напруга пропорційна інтегралу за часом від вхідної напруги. Схему інвертувального інтегратора на операційному підсилювачі наведено на рис. 7.1.

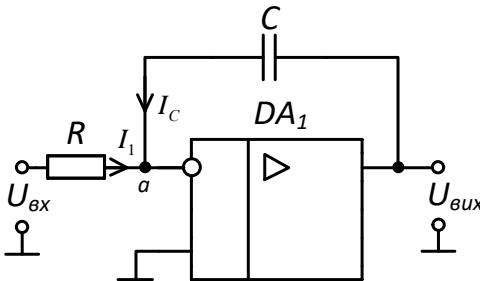


Рисунок 7.1 – Інтегратор на основі ОП

Якщо вважати ОП ідеальним, то вихідну напругу можна обчислити виходячи із рівності струмів у вузлі  $a$ :

$$\frac{U_{вх}}{R} = -C \frac{dU_{вих}}{dt}, \quad (7.1)$$

звідси

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} dt + A, \quad (7.2)$$

де  $A$  – постійна, що враховує початкові умови.

У разі, коли вхідним сигналом є струм, резистор  $R$  у схемі не потрібний.

Для зменшення впливу на точність перетворення вхідного струму ОП, враховуючи  $I_{ex}^- = I_{ex}^+$ , до неінвертувального входу необхідно підключати такий самий резистор  $R$ , як це робиться і у звичайних підсилювачах..

Для зменшення похибки, зумовленої дрейфом напруги зміщення, необхідно або будувати інтегратор на базі прецизійного ОП, або застосовувати алгоритми автоматичної корекції.

Оскільки  $u_{вих}(t)$  є також напругою, до якої заряджений конденсатор на початковий момент часу, це створює певні труднощі під час практичної реалізації схем інтеграторів – конденсатор заряджається постійним вхідним струмом ОП, що зрештою призводить до переходу в режим насичення. Щоб уникнути цього явища, використовують два методи боротьби:

–періодичного розряду ємності у результаті замикання ключа  $SA_1$ , що стоїть паралельно конденсатору (рисунок 7.2);

–забезпечення умов, за яких вхідний струм ОП був би значно меншим струмів, обумовлених вхідним сигналом.

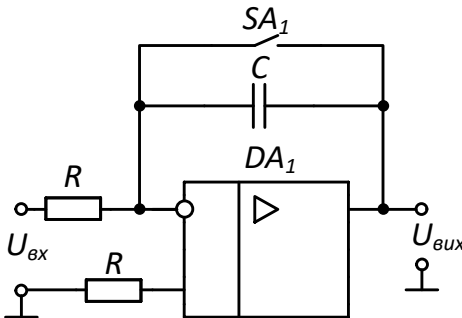


Рисунок 7.2 – Інтегратор зі схемою встановлення нульової початкової умови

### 7.1.2. Диференціатор

Диференціатором називають пристрій, у якого вихідна напруга пропорційна диференціалу вхідної напруги. Схема простого диференціатора складається із резистора і конденсатора (рисунок 7.3.), але на відміну від інтегратора вони міняються місцями.

Якщо напруга змінюється в часі, то виникає вхідний струм

$$I_{ex} = C \frac{dU_{ex}}{dt}, \quad (7.3)$$

що врівноважується струмом, що проходить у ланцюзі зворотного зв'язку  $I = U_{вих} / R$ .

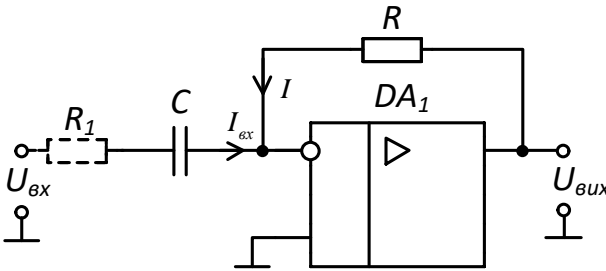


Рисунок 7.3 – Диференціатор

При цьому вихідна напруга пропорційна похідній від вхідної напруги:

$$U_{вих} = -RC \frac{dU_{ex}}{dt}. \quad (7.4)$$

Практична реалізація диференціатора, показаної на рисунку 7.3, пов'язана зі значними труднощами з таких причин:

по-перше, схема має чисто ємнісний вхідний опір, у цьому випадку, якщо джерелом вхідного сигналу є інший операційний підсилювач, то це може викликати його нестійкість;

по-друге на роботу простого диференціатора істотно впливають високочастотні вхідні шуми (при ідеальному диференціюванні коефіцієнт підсилення зростає пропорційно частоті вхідного сигналу), що погіршує співвідношення сигнал/шум;

по-третє, в цій схемі у петлі зворотного зв'язку ОП підключена інерційна ланка першого порядку, що створює в області високих частот запізнення за фазою до  $90^\circ$ , цей фазовий зсув додається до фазового запізнення операційного підсилювача, що може становити або навіть перевищувати  $90^\circ$ , внаслідок цього схема стає нестійкою.

Усунути ці недоліки дозволяє підключення послідовно із конденсатором додаткового резистора  $R_1$  (на рисунку 7.3 показано пунктиром). Резистор  $R_1$ , по-перше, зменшує рівень високочастотних шумів на виході, по-друге, запобігає самозбудженню перетворювача і, по-третє, обмежує вхідний струм та напругу інвертувального входу ОП за швидких змін вхідної напруги, коли вихідна напруга не встигає відповідним чином відреагувати на нього через обмежену швидкодію ОП.

Резистор  $R_1$  обмежує діапазон робочих частот диференціатора. Такий перетворювач диференціює вхідні сигнали лише тих частот, за яких опір конденсатора  $C$  набагато більший опору  $R_1$ , тобто при  $f \ll \frac{1}{2\pi R_1 C}$ .

Передавальна функція такого диференціатора

$$K(p) = -\frac{pRC}{pR_1C + 1}.$$

## 7.2. Порядок проведення експериментів

### 7.2.1. Дослідження диференціатора

1). Відкрийте файл lab7\_1 зі схемою диференціатора (рис. 7.4).

2). За допомогою елементів керування встановіть наступний режим виміру: форма сигналу - трикутна, частота сигналу - 200 Гц. Амплітуда сигналу на вході інтегратора вибирається такої величини, щоб сигнал на виході не мав видимих спотворень і був зручний для спостереження та вимірювань. На осцилографі з'явиться вихідний сигнал

(результат інтегрування), що має форму, близьку до трикутної. Скопіюйте отримане зображення вихідного сигналу в буфер обміну та вставте на сторінку звіту.

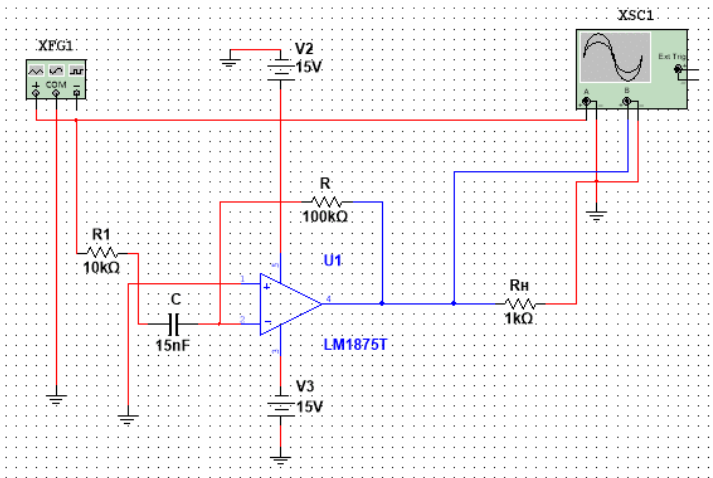


Рисунок 7.4 – Диференціатор на операційному підсилювачі LM1875T

3). Використовуючи зображення вихідного сигналу, отримане на осцилографі, визначте за допомогою горизонтальної візирної лінії його амплітуду  $U_{вих}$  в області встановленого значення. Результат запишіть у звіт.

4). Визначте та запишіть у звіт швидкість зміни вхідного сигналу трикутної форми, використовуючи для розрахунків відношення подвоєної амплітуди вхідного сигналу ( $U_{ex}$ ) до напівперіоду зміни ( $T/2$ ) вихідної напруги:

$$\frac{dU_{ex}}{dt} = \frac{4U_{ex}}{T}$$

5). За заданими параметрами схеми та знайденим у п.3 завдання значенням швидкості зміни вхідного сигналу розрахувати амплітуду вихідної напруги за формулою ідеального диференціатора:

$$U_{вих} = -RC \frac{dU_{вх}}{dt}$$

Порівняйте результати вимірювань та розрахунків. Зробіть висновок про ступінь ідеальності диференціатора напруги.

6). Отримайте та вставте у звіт зображення сигналу на виході диференціатора напруги для синусоїдальної та прямокутної форм вхідної напруги. Поясніть результати.

При синусоїдальній формі вхідного сигналу оцініть різницю фаз між вхідним та вихідним сигналами диференціатора. Поясніть результати.

7). Подайте на вхід синусоїдальну напругу максимальної амплітуди, для якої ще немає обмеження вихідного сигналу, і, збільшуючи частоту, змініть залежність вихідної напруги від частоти.

### 7.2.2. Дослідження інтегратора.

1). Відкрийте файл lab7\_2 зі схемою інтегратора (рис. 7.5).

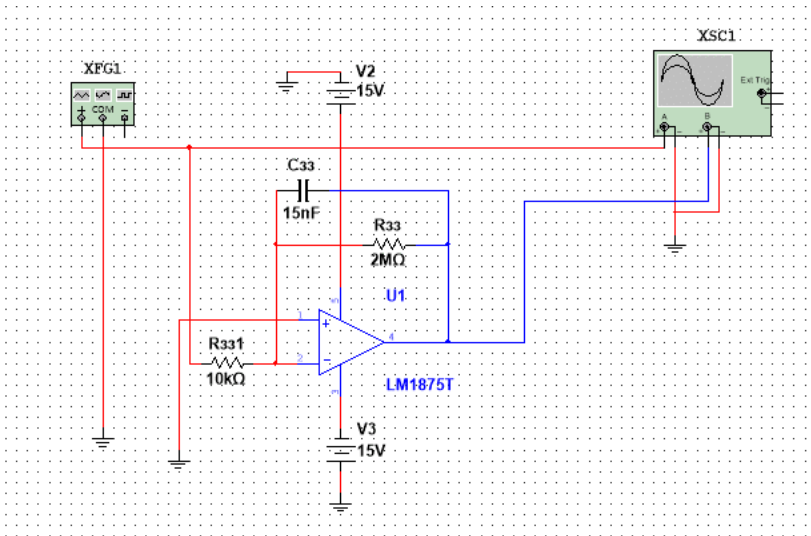


Рисунок 7.5 – Інтегратор на операційному підсилювачі LM1875T

2). За допомогою елементів керування встановіть наступний режим виміру: форма сигналу - прямокутна, частота сигналу - 200 Гц. Амплітуда сигналу на вході інтегратора вибирається такої величини, щоб сигнал на виході не мав видимих спотворень і був зручний для спостереження та вимірювань. На осцилографі з'явиться вихідний сигнал (результат інтегрування), що має форму, близьку до трикутної. Скопіюйте отримане зображення вихідного сигналу в буфер обміну та вставте на сторінку звіту.

3). Використовуючи зображення вихідного сигналу, отримане на осцилографі, визначте та запишіть у звіт швидкість його зміни. Для цього за допомогою горизонтальної візирної лінії виміряйте максимальне ( $U_{\max}$ ) та мінімальне ( $U_{\min}$ ) миттєві значення сигналу та обчислити відношення розмаху вихідного сигналу ( $U_{\text{вих.max}} - U_{\text{вих.min}}$ ) до напівперіоду його зміни  $T/2$ :

$$\frac{dU_{\text{вих}}}{dt} = -2 \frac{(U_{\text{вих.max}} - U_{\text{вих.min}})}{T},$$

Розрахуйте та запишіть у звіт швидкість зміни вихідного сигналу за значеннями параметрів компонентів схеми, використовуючи формулу ідеального інтегратора:

$$\frac{dU_{\text{вих}}}{dt} = -\frac{U_{\text{вх}}}{RC}.$$

Порівняйте значення швидкості зміни сигналу на виході інтегратора зі швидкістю, отриманою на основі результатів вимірювань та розрахунковим шляхом. Зробіть висновок про рівень ідеальності інтегратора.

4). Подайте сигнали трикутної та синусоїдальної форми на вхід генератора. Замалюйте осцилограми вихідних сигналів та поясніть отримані результати.

5). Подайте на вхід синусоїдальну напругу максимальної амплітуди, для якої ще немає обмеження вихідного сигналу, і, збільшуючи частоту, зніміть залежність вихідної напруги від частоти.



### **7.3. Зміст звіту**

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Досліджувані схеми.
4. Результати вимірювань.
5. Висновки до роботи.

### **7.4. Контрольні запитання**

1. Зобразити схеми інтегратора та диференціатора.
2. Як виглядають АЧХ інтегратора та диференціатора?
3. Вивести аналітичні вирази для інтегратора та диференціатора.
4. Як розрахувати швидкість зміни сигналу на виході інтегратора?
5. Який сигнал буде на виході диференціатора, якщо на вхід подаються прямокутні імпульси? Накреслити епюри вхідної та вихідної напруги.
6. Який сигнал буде на виході інтегратора, якщо на вхід подаються прямокутні імпульси? Накреслити епюри вхідної та вихідної напруги.
7. Який сигнал буде на виході диференціатора, якщо на вхід подається незмінний у часі додатний сигнал за напругою? Накреслити епюри вхідної та вихідної напруги.
8. Який сигнал буде на виході інтегратора, якщо на вхід подається незмінний у часі додатний сигнал за напругою? Накреслити епюри вхідної та вихідної напруги.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8. ПРОЕКТУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ**

### **8.1. Мета роботи**

Мета роботи – розрахунок параметрів та дослідження амплітудно-частотних характеристик активних фільтрів.

### **8.2. Короткі теоретичні відомості**

Фільтром називається електронна схема, що пропускає або підсилює синусоїдальні сигнали в певному діапазоні частот і послабляє сигнали з частотами, що виходять за межі заданого діапазону.

Область застосування фільтрів в електроніці та обчислювальній техніці дуже широка і схеми відрізняються великою різноманітністю. Прості пасивні фільтри будуються на резисторах, конденсаторах і котушках індуктивності. Активні – на базі операційних підсилювачів і ланцюгів з резисторів і конденсаторів.

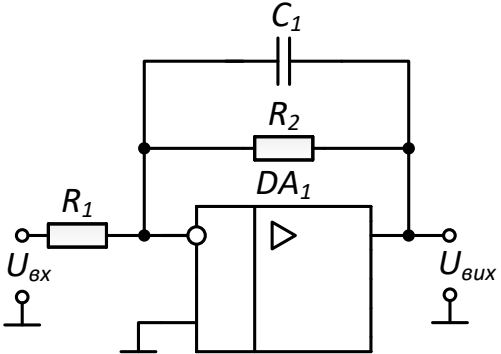
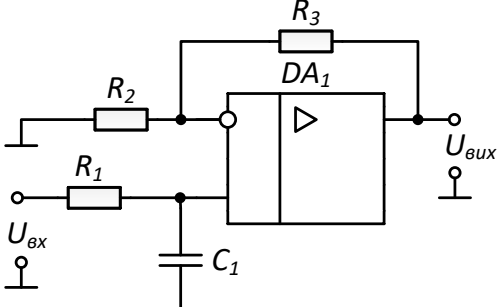
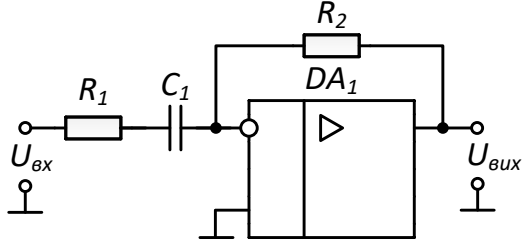
Основною характеристикою фільтра є його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ). По вигляду АЧХ пристрої зазвичай поділяються на групи. Наприклад, фільтр низької частоти (ФНЧ) пропускає низькочастотні сигнали і послаблює високочастотні, фільтр високої частоти (ФВЧ) пропускає сигнали високочастотні і послаблює низькочастотні.

Активні фільтри першого порядку на операційному підсилювачі та їх параметри наведені в табл. 8.1.

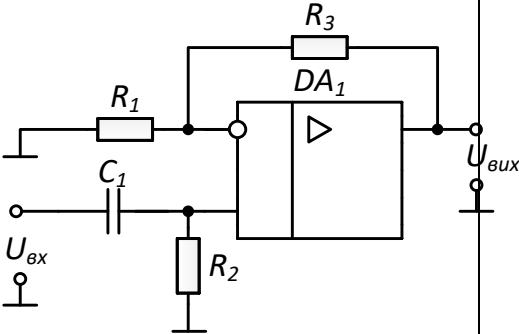
### **8.3. Порядок проведення експериментів**

8.3.1. Спроекувати активний фільтр ФНЧ по вихідним даним, наведеним в табл. 8.2. Відповідно до заданих параметрів і типу фільтру розрахувати його передавальну функцію. Скласти принципову електричну схему.

Таблиця 8.1 – Активні фільтри першого порядку

№	Тип фільтра	Схема
1	2	3
1	<p>ФНЧ першого порядку на основі інвертувального підсилювача.</p> <p>Параметри</p> $K_0 = -R_2 / R_1$ $\omega_0 = 1 / R_2 C_1$	
2	<p>ФНЧ першого порядку на основі неінвертувального підсилювача.</p> <p>Параметри</p> $K_0 = 1 + R_3 / R_2$ $\omega_0 = 1 / R_1 C_1$	
3	<p>ФВЧ першого порядку на основі інвертувального підсилювача.</p> <p>Параметри</p> $K_0 = -R_2 / R_1$ $\omega_0 = 1 / R_1 C_1$	

Продовження таблиці 8.1.

2	3
<p>ФВЧ першого порядку на основі неінвертувального підсилювача. Параметри <math>K_0 = 1 + R_3 / R_1</math> <math>\omega_0 = 1 / R_2 C_1</math></p>	

Таблиця 8.2 – Варіанти завдань

№ варіанта	ФНЧ			ФВЧ		
	схема	$ K_0 $	$f_0, \text{кГц}$	схема	$ K_0 $	$f_0, \text{кГц}$
1	1	10	10	3	22	30
2	2	15	12	4	17	35
3	1	20	16	4	12	40
4	2	25	20	3	7	45
5	1	22	14	3	10	50
6	2	17	18	4	15	60
7	1	12	22	4	20	70
8	2	7	8	3	25	80

8.3.2. Зібрати модель фільтра в пакеті Multisim. Перевірити її працездатність при синусоїдальних входних сигналах. Визначити частоту зрізу і коефіцієнт підсилення в смузі пропускання. Замалювати осцилограми сигналів при частотах  $f = 0, 1f_0, f_0, 10f_0$ .

8.3.3. Використовуючи пристрій для побудови частотних характеристик (Bode Plotter), побудувати в Multisim

АЧХ і ФЧХ фільтра в логарифмічному масштабі.

8.3.4. Спроектувати активний фільтр ФВЧ по вихідним даним, наведеними в табл. 6.2. Провести для нього дослідження відповідно до пунктів 6.3.2-6.3.3.

#### **8.4. Методика проведення експериментів**

**Завдання.** Проведіть дослідження фільтра низьких частот першого порядку на основі інвертувального підсилювача с параметрами  $K_0 = 5$ ,  $f_0 = 5$  кГц.

##### 8.4.1. Розрахунок параметрів

При розрахунку параметрів фільтрів слід врахувати, що розрахунок схеми вимагає рішення системи рівнянь першого або другого порядку. Кількість елементів, що розраховуються схеми завжди більше, ніж кількість рівнянь. Тому частина елементів схеми попередньо вибирається. Рекомендується задавати значення ємностей конденсаторів і обчислювати необхідні значення опорів резисторів.

##### 8.4.2. Вибір компонентів

При переході від розрахункових значень опорів і ємностей RC-ланцюгів слід враховувати конструктивні і технологічні особливості елементів.

Конденсатори зазвичай виготовляються з точністю 20% і при їх виготовленні зазвичай використовується ряд E12, що дозволяє вибір тільки 12 номіналів ємностей: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 30, 33, 39, 47, 56, 68, 82.

Ряд E24 застосовується при виготовленні резисторів. Він допускає використання 24 номінальних значень опорів: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 82, 91.

Використовувані значення опору і ємності з ряду можуть бути помножені на  $10^n$ , де  $n$  - ціле позитивне число або нуль. Наприклад, можна використовувати резистори: 13 Ом, 130 Ом, 1.3 кОм, 13 кОм, 130 кОм і т.д.

Використовувати в схемі резистори з опором менш 1 кОм небажано, тому що це неминуче призведе до збільшення енергоспоживання схеми і ускладнить вибір операційного підсилювача.

Визначаємо циклічну частоту:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 * 3,14 * 5000 = 31415,9 \text{ 1/с.}$$

З ряду E12 обираємо ємність:  $C1 = 2,2 \text{ нФ}$ :

$$R_2 = 1/(\omega C_1) = 14,5 \text{ кОм};$$

Знаходимо:

$$R_1 = R_2 / K_0 = 2,89 \text{ кОм.}$$

З ряду E24 обираємо:  $R_2 = 15 \text{ кОм}, R_1 = 3 \text{ кОм.}$

Будуємо схему.

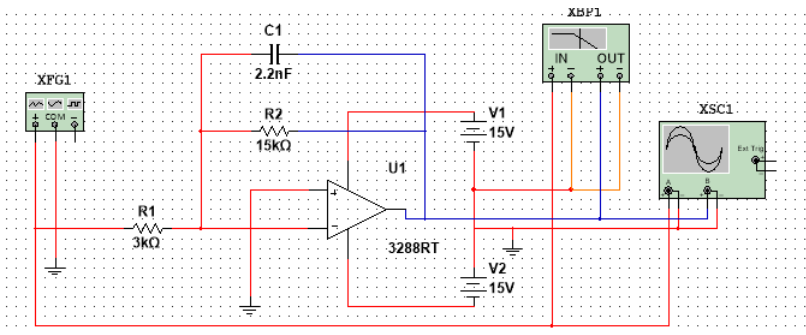


Рисунок 8.1 – Схема ФНЧ

Проводимо дослідження роботи фільтра по синусоїдальним входними сигналам. Аналізуємо АЧХ і ФЧХ фільтра. Результати відображені на рис. 6.2 – 6.5.

Співвідношення амплітуд  $4,866 / 0,993 = 4,9$  приблизно відповідає заявленому коефіцієнту посилення  $|K_0| = 5$ .

На частоті зрізу сигнал послаблюється приблизно в  $\sqrt{2}$  рази  $4,866/3,451=1,41$ .

Максимальний коефіцієнт підсилення 13,97 дБ відповідає розрахунковому  $20 \lg 5 = 13,97$ . Послаблення на частоті зрізу  $13,97-10,86=3,1$  (теоретично 3), нахил АЧХ складає 20 дБ/дек.

Фазовий зсув в смузі пропускання змінюється від 180 до 134 градусів.

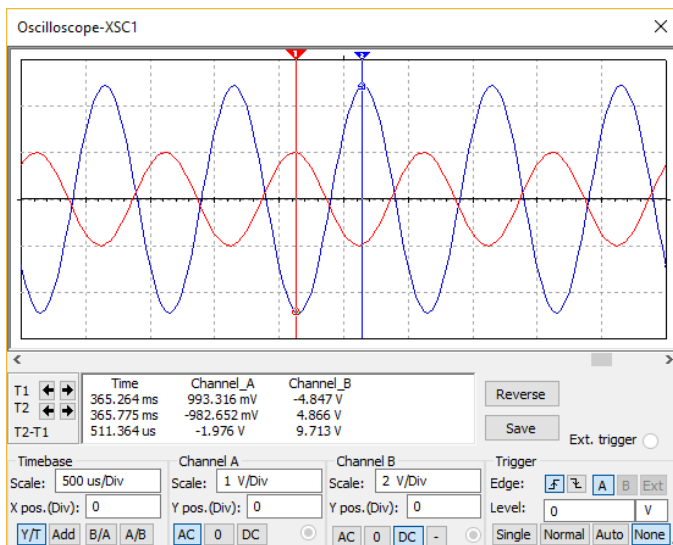


Рисунок 8.2 – Осцилограма при частоті 1 кГц

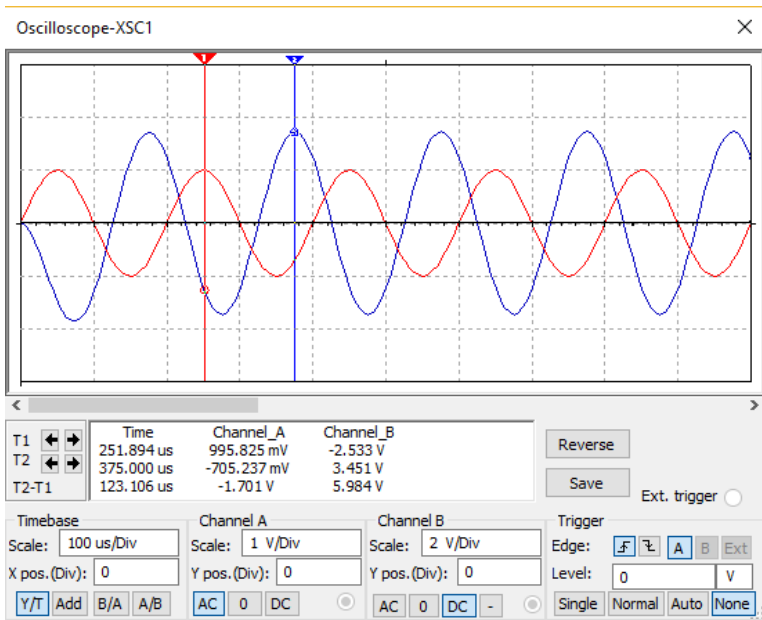
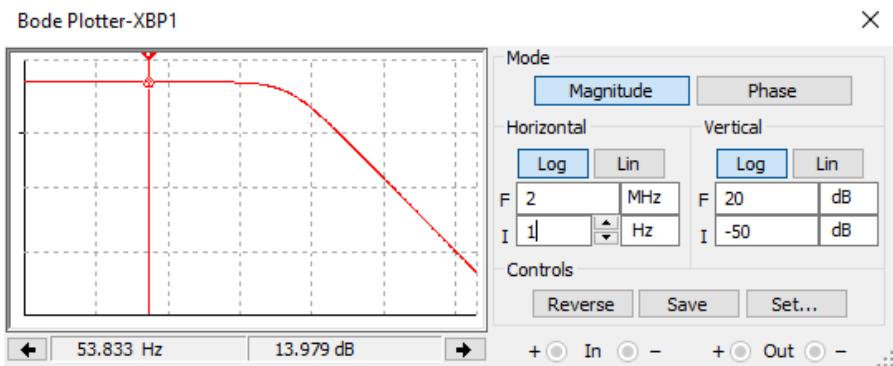


Рисунок 8.3 – Осцилограма при частоті 5 кГц





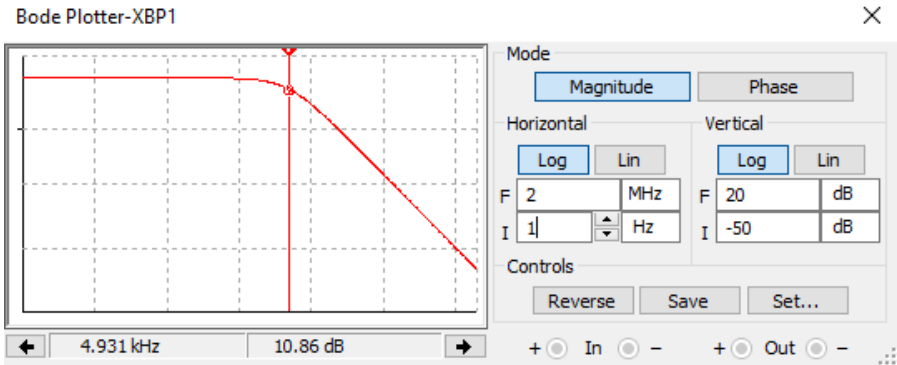


Рисунок 8.4 – АЧХ фільтра

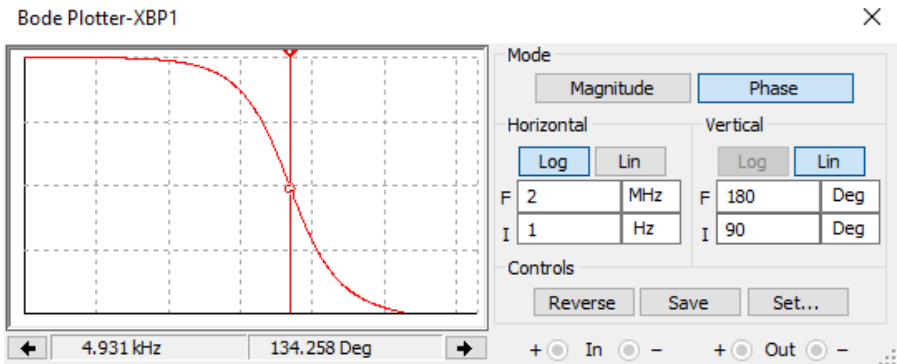


Рисунок 8.5 – ФЧХ фільтра

## 8.5. Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Досліджувані схеми.
4. Результати вимірювань.
5. Результати розрахунків.
6. Висновки по роботі.

## 8.6. Контрольні запитання

1. Що таке електричний фільтр? Назвіть типи фільтрів.
2. Чим визначається порядок фільтра?
3. Які параметри фільтрів першого та другого порядків використовуються при описі їх властивостей?
4. Які вирази передавальних функцій ФНЧ і ФВЧ першого порядку?
5. Які вирази передавальних функцій ФНЧ, ФВЧ, СФ і РФ другого порядку?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ**

Мета роботи – вивчити основні властивості та схемотехніку та принципи роботи генераторів гармонійних коливань на ОП.

### **9.1. Короткі теоретичні відомості**

#### 9.1.1. Електронні генератори

Електронними генераторами (автогенераторами) називають пристрої, що перетворюють електричну енергію джерела постійного струму (джерела живлення) в енергію електричних коливань заданої форми і частоти. Форма електричних коливань може бути різною. Основними характеристиками генератора є форма, частота коливань, коефіцієнт корисної дії і потужність, що витрачається на навантаження.

Генератори, що формують синусоїдальні коливання, називають генераторами синусоїдальних, або гармонічних, коливань. Якщо форма коливань відрізняється від синусоїдальної (прямокутні, трикутні, пилкоподібні і т. д.), то такі генератори називають імпульсними.

За принципом роботи і схемною побудовою розрізняють генератори із самозбудженням (автоколивальні генератори) і генератори із зовнішнім (незалежним) збудженням, що по суті є підсилювачами потужності коливань заданої частоти, що генеруються.

Генератори коливань синусоїдальної форми побудовані на основі підсилювальних каскадів, у вихідне коло або у коло зворотного зв'язку яких ввімкнені частотно-залежні елементи. Як такі елементи можуть використовуватися коливальні LC-контури (LC-генератори) або частотно-залежні RC-кола (RC-генератори).

Основними елементами автогенератора у загальному випадку є джерело енергії (джерело живлення), пасивні кола, де

збуджуються та підтримуються незгасні коливання із заданими параметрами (коливальна система) і активний прилад, що перетворює енергію джерела живлення в енергію генерованих коливань (рисунок 9.1).

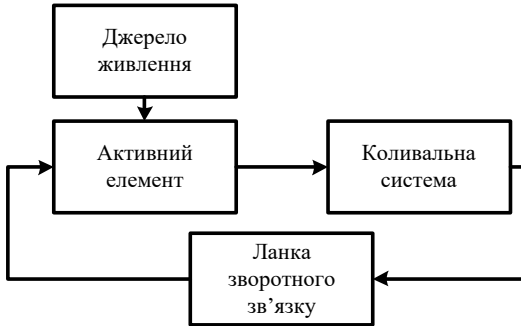


Рисунок 9.1 – Структурна схема автогенератора із ланкою позитивного зворотного зв'язку

За наявності у петлі підсилювач - ланцюг зворотного зв'язку елемента, що накопичує енергію, наприклад конденсатора, підсилювач із позитивним ЗЗ не має жодного стійкого стану і генерує напругу, що періодично змінюється. Якщо у ланцюзі підсилювача або ланцюга ЗЗ немає елемента, який накопичує електричну енергію, то підсилювач із позитивним ЗЗ перетворюється на тригер і має стійкі стани.

У автогенераторах керування роботою схеми відбувається за рахунок, як правило, позитивного зворотного зв'язку, що забезпечує стійкий режим самозбудження на необхідній частоті. Для узагальненої структурної схеми підсилювача з позитивним зворотним зв'язком

$$\dot{K}_{ПЗЗ} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\gamma}\dot{K}} \quad (9.1)$$

Коефіцієнт підсилення підсилювача  $\dot{K}$  і коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку  $\dot{\gamma}$  беруться комплексними, тобто враховується їх залежність від частоти. Вхідним сигналом

для підсилювача у схемі генератора є частина його вихідної напруги, яка передається ланкою позитивного зворотного зв'язку ( $|\dot{\gamma}| < 1$ ).

Для роботи схеми у режимі генерації необхідне виконання двох умов. Перша характеризується тим, що фазові зміщення сигналу, що створюються підсилювачем ( $\varphi_{\Pi}$ ) і ланкою зворотного зв'язку ( $\varphi_{ЗЗ}$ ), в сумі повинні бути кратними  $2\pi$ :

$$\varphi_{\Pi} + \varphi_{ЗЗ} = 2\pi n, \quad (9.2)$$

Де  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Співвідношення (3.2) визначає умову балансу фаз у підсилювачі з позитивним зворотним зв'язком. Друга умова (умова балансу амплітуд) визначається нерівністю

$$K\gamma \geq 1. \quad (9.3)$$

### 9.1.2. RC-генератори синусоїдальних коливань на ОП

Для самозбудження підсилювача, тобто для перетворення спочатку виниклих коливань на незгасні, необхідно на вхід підсилювача подавати частину вихідної напруги, що перевищує вхідну або однакова з нею за величиною і збігаються за фазою.

Для одержання синусоїдальних коливань необхідно, щоб умови балансів фаз та амплітуд виконувалися лише на одній частоті.

У підсилювачах, призначених для побудови генераторів, вихідний сигнал може знаходитися у протифазі з вхідним сигналом ( $\varphi_{\Pi} = \pi$ ) або ж збігатися з ним за фазою ( $\varphi_{\Pi} = 0$ ). У першому випадку частотно-залежний RC-ланцюг зворотного зв'язку на частоті генерації повинен здійснювати поворот фази сигналу на  $\pi$  ( $\varphi_{ЗЗ} = \pi$ ), а в другому випадку фазовий зсув має бути відсутнім ( $\varphi_{ЗЗ} = 0$ ). Вирішення обох завдань можливе завдяки схемним особливостям RC-ланцюгів.

Коли у підсилювачі сигнал на виході має зміщення відносно сигналу на вході на  $\pi$  ( $\varphi_{\Pi} = \pi$ ), здійснення повороту

фази сигналу на  $\pi$  ( $\varphi_{33} = \pi$ ) можливе за допомогою фазообертального ланцюжка, що має декілька ланок RC. Зміна фази залежить від кількості ланок  $n$  і дорівнює

$$\varphi_{33} = \pi/n$$

У зв'язку з тим, що одна ланка RC змінює фазу на кут  $\varphi < 90^\circ$ , мінімальна кількість ланок фазообертального ланцюжка  $n = 3$ . У практичних схемах однокаскадних генераторів зазвичай використовують три або чотири ланки.

На рисунку 9.2 зображені типові схеми триланкових фазообертальних ланцюжків, що залежно від використання елементів R і C одержали назву R-паралель (рисунок 9.2 а) і С-паралель (рисунок 9.2 б).

Елементи фазообертальних ланцюжків зазвичай вибирають такими, щоб усі RC-ланки створювали для коливань частоти  $f_p$  однаковий фазовий зсув. Це має місце за однакових сталих часу  $\tau = RC$  усіх ланок. За виконання умов  $R_1 = R_2 = R_3$  та  $C_1 = C_2 = C_3$  частота  $f_p$  (квазірезонансна частота), на якій  $\varphi_{33} = \pi$ , дорівнює

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} = \frac{0,065}{RC} \text{ - для схеми 9.2 а;}$$

$$f_p = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC} = \frac{0,39}{RC} \text{ - для схеми 9.2 б.}$$

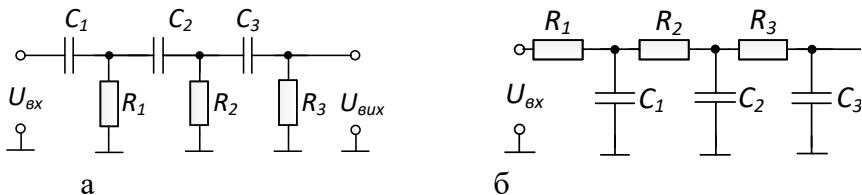


Рисунок 9.2 – Схеми триланкових фазообертальних ланцюжків:

а – типу R-паралель; б – типу С-паралель

На частоті  $f_p$  загасання амплітуди сигналу, що вноситься ланцюжком RC позитивного зворотного зв'язку, становить  $N = U_{вих} / U_{вх} = 1/29$ . Збудження генератора у цьому випадку можливе, коли  $K > 29$ .

За підсилювальну ланку зазвичай використовують підсилювачі постійного струму в інтегральному виконанні. Схема генератора на ОП наведена на рисунку 9.3.

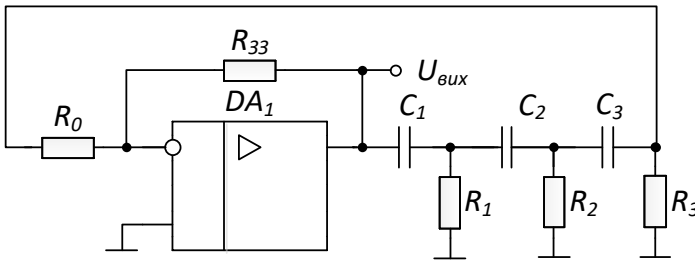


Рисунок 9.3 – Схема генератора синусоїдальних коливань на ОП із триланковим фазообертальним ланцюжком типу R-паралель

Ланцюг частотно-залежного зворотного зв'язку ввімкнений між виходом та інвертувальним входом підсилювача. Необхідний коефіцієнт підсилення підсилювальної ланки ( $K > 29$ ) досягається вибором відношення  $R_{33} / R_0 \geq 29$ .

Коли підсилювач не вносить фазовий зсув ( $\varphi_{II} = 0$ ), то фазовий зсув ланки зворотного зв'язку має бути відсутнім ( $\varphi_{33} = 0$ ). Це означає, що при охопленні такого підсилювача позитивним зворотним зв'язком достатньої глибини він може генерувати незгасні електричні коливання і без використання спеціального фазообертального ланцюжка.

Для виділення необхідної частоти синусоїдальних коливань зі всього спектра частот, що генеруються такою схемою, необхідно забезпечити виконання умов самозбудження лише для однієї частоти. Із RC кіл, що не здійснюють зміщення

за фазою передаваного сигналу на квазірезонансній частоті, великого поширення дістав послідовно-паралельний вибірний ланцюжок, що одержав назву схеми моста Віна, наведений на рисунку 9.4.

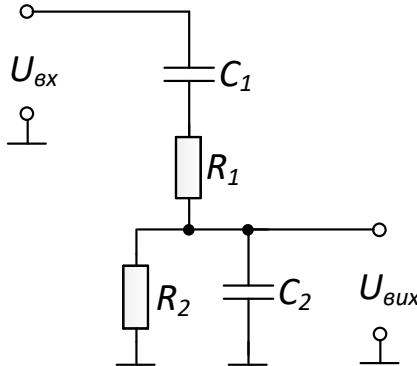


Рисунок 9.4 – Послідовно-паралельний вибірний ланцюжок (схема моста Віна)

Розглядаючи ланцюжок як подільник напруги, можна записати

$$\dot{U}_{вих} = \frac{U_{вх} z_2}{(z_1 + z_2)},$$

де  $z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1};$   $z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega_0 C_2}.$

Коефіцієнт передачі напруги цим ланцюжком

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\left( \frac{-jR_2}{\omega C_2} \right)}{\left[ R_1 R_2 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} - j \left( \frac{R_2}{\omega C_1} + \frac{R_1}{\omega C_2} + \frac{R_2}{\omega C_2} \right) \right]}.$$



На квазірезонансній частоті  $\omega_0$  коефіцієнт передачі напруги повинен дорівнювати дійсному числу. Це можливо лише у тому випадку, якщо опори, виражені відповідним математичним записом у чисельнику і знаменнику формули **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, матимуть однаковий характер. Дана вимога забезпечується за умови рівності нулю дійсної частини знаменника, тобто

$$R_1 R_2 - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} = 0.$$

Звідси частота квазірезонансу

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}},$$

або

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

Що ж до коефіцієнта передачі напруги, то на квазірезонансній частоті він дорівнює

$$\gamma_0 = \left( \frac{R_2}{\omega_0 C_2} \right) / \left( \frac{R_2}{\omega_0 C_1} + \frac{R_1}{\omega_0 C_2} + \frac{R_2}{\omega_0 C_2} \right).$$

Підставляючи значення  $\omega_0$ , отримаємо

$$\gamma_0 = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_1}{C_2}}.$$

Вважаючи  $R_1 = R_2 = R$  і  $C_1 = C_2 = C$ , знаходимо остаточні значення  $f_0$  і  $\gamma_0$ :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC},$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{3}.$$

Отже, загасання, що вноситься мостом Віна на квазірезонансній частоті, дорівнює

$$N = \frac{U_{вх}}{U_{вих}} = \frac{1}{\gamma_0} = 3$$

Це означає, що мінімальний коефіцієнт підсилення, при якому задовольняється умова балансу амплітуд, також повинен дорівнювати 3.

Схема генератора з мостом Віна на основі операційного підсилювача наведена на рисунку 9.5.

Самозбудження генератора можливе при  $K > 3$ , це відповідатиме вибору відношення  $R_{33}/R_0 \geq 2$ .

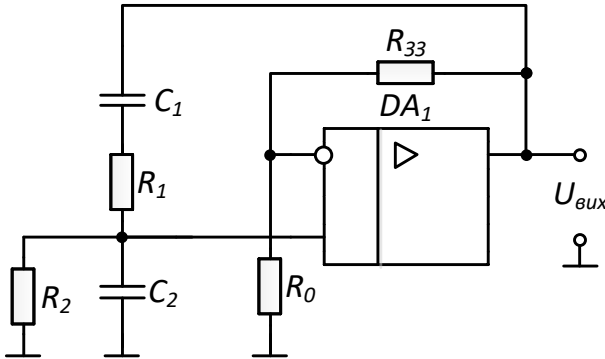


Рисунок 9.5 – Схема автогенератора з послідовно-паралельним вибірним ланцюжком на основі ОП

## 9.2. Порядок проведення експериментів

9.2.1. Дослідження генератора синусоїдальних коливань з мостом Віна.

1). Відкрийте файл lab9\_1 зі схемою генератора синусоїдальних коливань з мостом Віна. У генераторі з мостом Віна (рис. 9.6) ланцюг D1-V1, включена на його виході, відіграє роль стандартного обмежувача рівня вихідних коливань, вимкнення цього ланцюга призводить до переходу генератора з синусоїдального в релаксаційний режим.

2). Увімкніть схему та виміряйте частоту генерації схеми.

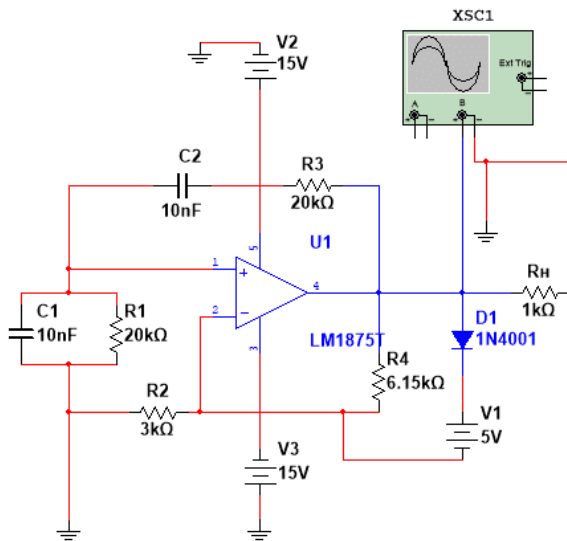


Рисунок 9.6 – Генератор синусоїдальних коливань на ОП LM1875T з мостом Віна

3). Розрахувати частоту генерації схеми. Порівняйте розрахункові значення величин ємності та опору з отриманими у схемі.

4). Спроектуйте схему генератора Віна з частотою генерації згідно таблиці 9.1. Знайти за формулою значення ємності та опору моста Віна.

Таблиця 9.1 – Параметри генератора Віна

Номер варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота генерації, кГц	15	20	25	30	35	12	17	22	27	32

5). Підбираючи значення опорів  $R$  та ємності  $C$  моста Віна необхідно досягнути частоти генерації схеми згідно таблиці 9.2.

6). Порівняйте розрахункові значення величин ємності та опорів з отриманими у схемі шляхом підбору. Визначте похибки

визначення R та C (у відсотках).

9.2.2. Дослідження генератора синусоїдальних коливань із триланковим фазообертальним ланцюжком

1). Відкрийте файл lab9\_2 (рис. 9.7) зі схемою генератора синусоїдальних коливань із триланковим фазообертальним ланцюжком типу R-паралель. Для стійкої генерації необхідно точно виконати умови появи астоколиваний. Для цього в схемі присутній змінний резистор R5. Регулюючи R5 можна досягти роботи цієї схеми, як генератора гармонійного сигналу.

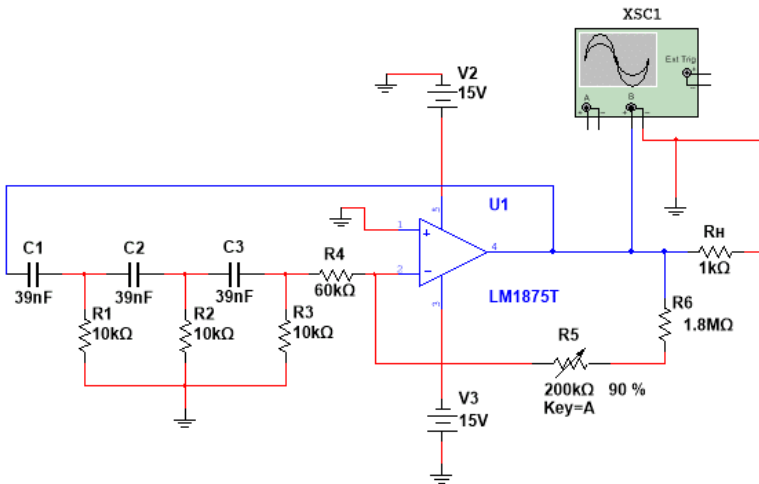


Рисунок 9.7 – Генератор синусоїдальних коливань на ОП LM1875T із триланковим фазообертальним ланцюжком типу С-паралель

- 2). Увімкніть схему та виміряйте частоту генерації схеми.
- 3). Розрахувати частоту генерації схеми. Порівняйте розрахункові значення величин ємності та опору з отриманими у схемі.
- 4). Спроектуйте схему генератора із триланковим фазообертальним ланцюжком з частотою генерації згідно таблиці 9.2. Знайти за формулою значення ємності та опору генератора із фазообертальним ланцюжком

Таблиця 9.2– Параметри генератора із фазообертальним ланцюжком

Номер варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота генерації, кГц	15	20	25	30	35	12	17	22	27	32

5). Підбираючи значення опорі  $R$  та ємності  $C$  генератора із фазообертальним ланцюжком необхідно досягнути частоти генерації схеми згідно таблиці 9.2.

6). Порівняйте розрахункові значення величин ємності та опору з отриманими у схемі шляхом підбору. Визначте похибки визначення  $R$  та  $C$  (у відсотках).

### 9.3. Зміст звіту

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.

3. Результати досліджень: електричні схеми досліджуваних пристроїв, експериментальні та розрахункові дані, зведені в таблиці, короткі висновки за основними принципами побудови досліджених пристроїв, їх схемами та результатами виконаних досліджень.

4. Висновки по роботі.

### 9.4. Контрольні запитання

1. Що таке зворотний зв'язок і для чого він використовується?

2. Сформулюйте умови балансу фаз та балансу амплітуд, поясніть їхній фізичний зміст.

3. Які особливості RC-генераторів, їх переваги та недоліки?

4. Що таке частотно-залежні ланцюги та в яких пристроях вони використовуються?

5. Завдяки чому в генераторі з мостом Віна виконується умова балансу фаз?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПРЯМОКУТНИХ ТА ТРИКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ.

Мета роботи – вивчення принципів побудови мультивібраторів в автоколебальному режимі, дослідження впливу елементів схеми на основні параметри вихідних імпульсів мультивібратора.

### 10.1. Короткі теоретичні відомості

#### 10.1.1. Симетричний мультиібратор на основі ОП

Мультивібратор в автоколебальному режимі це електронний пристрій, що генерує імпульси, форма напруги яких наближається до прямокутної.

Один із варіантів схеми мультивібратора на основі ОП представлений на рнс.10.1

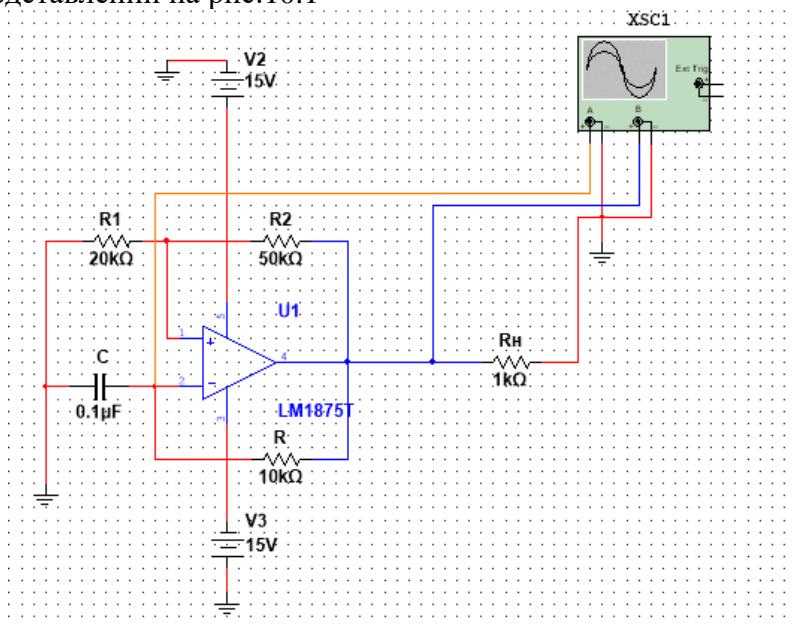


Рисунок 10.1 – Схема мультивібратора на операційному підсилювачі

Оснoву цієї схеми становить компаратор з позитивним зворотним зв'язком та гістерезисною передатною характеристикою.

У момент підключення живлення схеми до схеми, конденсатор буде не заряджений і напруга на інвертувальному вході ОП дорівнює нулю. На виході ОП може виникнути напруга довільної полярності, яка через резисторний ланцюг позитивного зворотного зв'язку ОП на опорах  $R_1$ - $R_2$ , буде передаватися на неінвертувальний вхід. Таким чином, на входах ОП виникає диференціальний сигнал з полярністю вихідної напруги, який підсилюється і з ще більшим значенням (порівняно з початковим) передається на вихід. Цей процес обумовлений ПЗЗ розвивається лавиноподібно та призводить до швидкого зростання вихідної напруги, і закінчується тим, що напруга досягає величини  $U_{вих.мах}$  з полярністю сигналу, що спочатку з'явився на вході ОП.

Припустимо, що на виході ОУ встановилася напруга позитивної полярності. Тоді напруга на неінвертувальному вході, буде також позитивною і рівною верхній пороговій напрузі компаратора.

$$U_{вх.неінв.}^+ = \frac{U_{вих.мах}}{R_1 + R_2} R_1 = KU_{вих.мах} = U_{пор.верх.}$$

$$\text{де } K = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ - коефіцієнт передачі ланцюга ПЗЗ.}$$

З часу  $t_1$  (рис 10.2) встановлюється один з двох можливих квазістійких станів мультивібратора і починається заряд конденсатора від джерела живлення через резистор  $R_{зз}$ . У міру зарядження конденсатора  $C$  напруга на ньому і інвертувальному вході, зростає і, якби цей процес не було перервано сягнула б рівня  $U_{вих.мах}$ .

Однак напруга на інвертувальному вході  $U_{вх.інв.}$  зростає лише до значення  $U_{пор.верх.}$ . Коли напруга на інвертувальному

вході досягне і дещо перевершить це значення (момент часу  $t_2$ ) відбувається стрибкоподібна зміна режиму ОП і напруга на його виході стане негативною і рівною  $-U_{вих.max}$ . Одночасно з цим напруга на неінвертувальному вході, встановлюється на рівні нижнього порогового рівня  $U_{вх.неінв.} = U_{пор.нижн.} = -KU_{вих.max}$ .

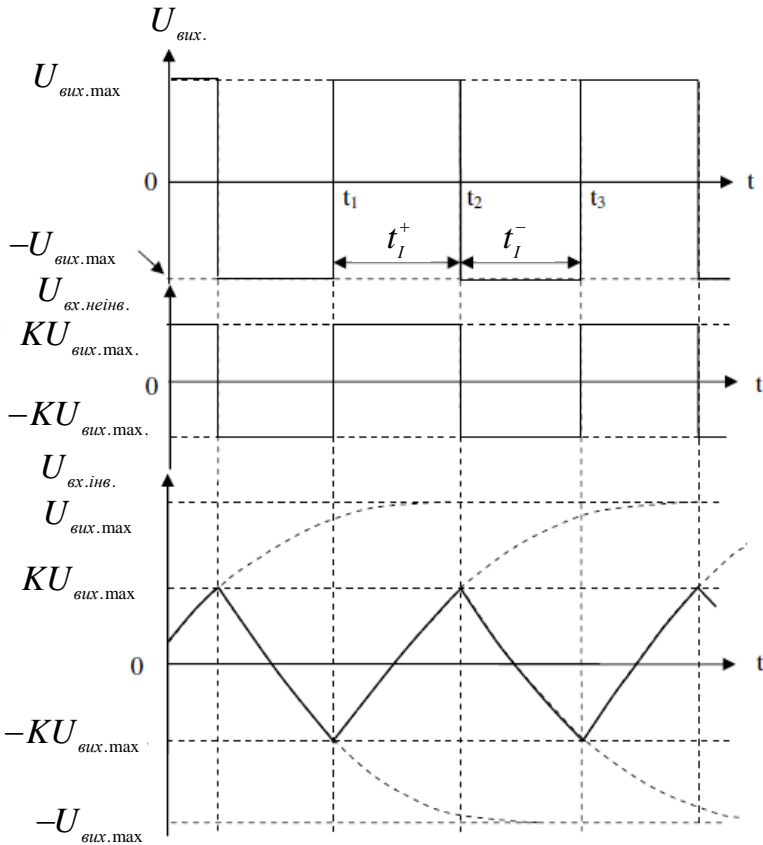


Рисунок 10.2 – Часові діаграми напруги у схемі мультивібратора



Конденсатор  $C$  починає розряджатися і перезаряджається під дією негативної вихідної напруги  $-U_{вих.маx}$ .

Цей процес закінчиться, коли напруга на інвертувальному вході досягне нижнього порогового значення (момент  $t_3$ ), вихідна напруга стрибкоподібно встановиться на рівні  $U_{вих.маx}$ , а напруга на неінвертувальному вході - верхньому пороговому  $U_{пор.верх.} = KU_{вих.маx.}$ . Далі ці процеси будуть повторюватися.

В результаті тривалість вихідного імпульсу позитивної полярності

$$t_I^+ = \tau \ln \left( \frac{1+K}{1-K} \right) = R_{33}C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right),$$

а тривалість вихідного імпульсу негативної полярності

$$t_I^- = \tau \ln \left( \frac{1+K}{1-K} \right) = R_{33}C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right).$$

В результаті тривалості вихідних імпульсів  $t_I^+$  і  $t_I^-$  однакові та його період повторення дорівнює

$$T_{повт.} = \frac{1}{F_{повт.}} = 2\tau \ln \left( \frac{1+K}{1-K} \right) = 2R_{33}C \ln \left( 1 + \frac{2R_1}{R_2} \right),$$

а шпаруватість імпульсного процесу

$$q = \frac{T_{повт.}}{t_I^{+,-}} = 2,$$

І такий мультивібратор називається симетричним.

### 10.1.2. Несиметричний мультиібратор на основі ОП

У несиметричних мультивібраторів тривалості вихідних імпульсів різні і шпаруватість імпульсного процесу не дорівнює 2. Це досягається шляхом введення в схему часозадаючих ланцюгів з різними сталими часу.

Одним із варіантів схеми несиметричного мультивібратора представлений на рис. 10.3.

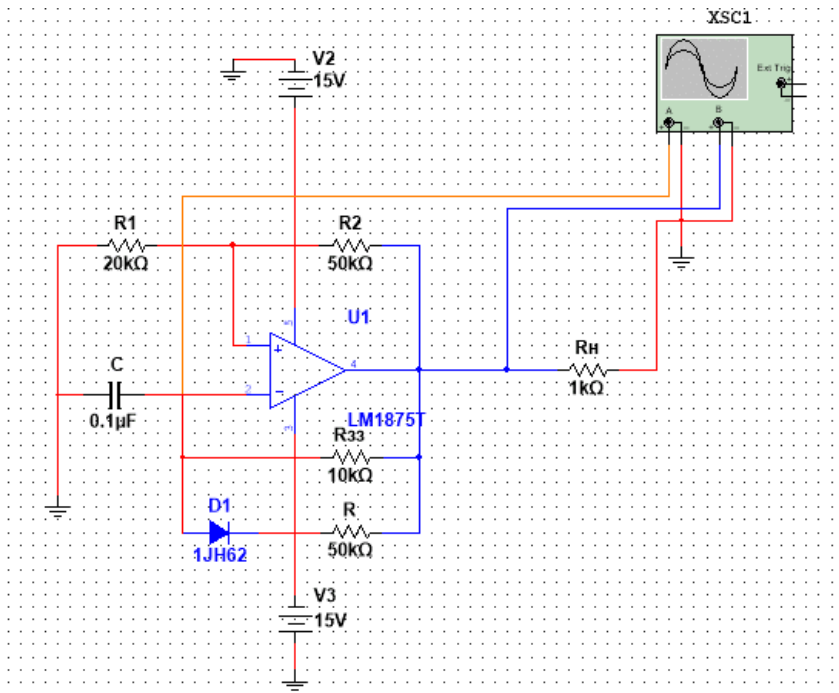


Рисунок 10.3 – Несиметричний мультивібратор

У цій схемі для формування вихідного імпульсу негативної полярності стала часу  $\tau^- = R \parallel R_{33} C = \frac{RR_{33}}{R + R_{33}} C$ . Враховуючи те, що діод D1 зміщений у прямому напрямку і має мале значення опору.

При формуванні імпульсу позитивної полярності діод D1 зміщений у зворотному напрямку, має дуже великий опір. Як результат  $\tau^+ = R_{33}C > \tau^-$ .

Для цієї схеми тривалість імпульсу позитивної полярності  $t_I^+ = \tau^+ \ln\left(\frac{1+K}{1-K}\right)$  та негативної полярності  $t_I^- = \tau^- \ln\left(\frac{1+K}{1-K}\right)$ , а

шпаруватість імпульсного процесу

$$q = \frac{T_{ном.}}{t_I^+} = \frac{t_I^+ + t_I^-}{t_I^+} < 2$$

Окрім автоколивального режиму мультівібратора широко використовується також їх робота в режимі очікування.

У режимі очікування мультівібратор має тільки один квазістійкий стан, а інший локально стійкий. У локально стійкому стані мультівібратор знаходиться необмежено довго, і виводиться з нього тільки зовнішнім впливом - короткочасним запускаючим імпульсом.

При цьому нестійкому стані мультівібратор формує імпульс напруги прямокутної форми, з параметрами, що визначаються величинами елементів схеми. Мультівібратор в режимі очікування також називають одновібратором.

### 10.1.3. Генератор трикутних імпульсів на основі ОП

Принципова схема генератора трикутних імпульсів наведена на рис. 10.4.

На операційному підсилювачі DA1 зібраний неінвертувальний компаратор з петлеподібною характеристикою. Компаратор має симетричну напругу перемикання

$$U_{ПЕР} = \frac{R_1}{R_2} U_{НАС} ,$$

де  $U_{НАС}$  – напруга насичення ОП.

На операційному підсилювачі DA2 зібраний інвертувальний інтегратор зі сталою інтеграції  $\tau = R_3C$ .

Часові діаграми напруг генератора наведені на рис. 10.5.

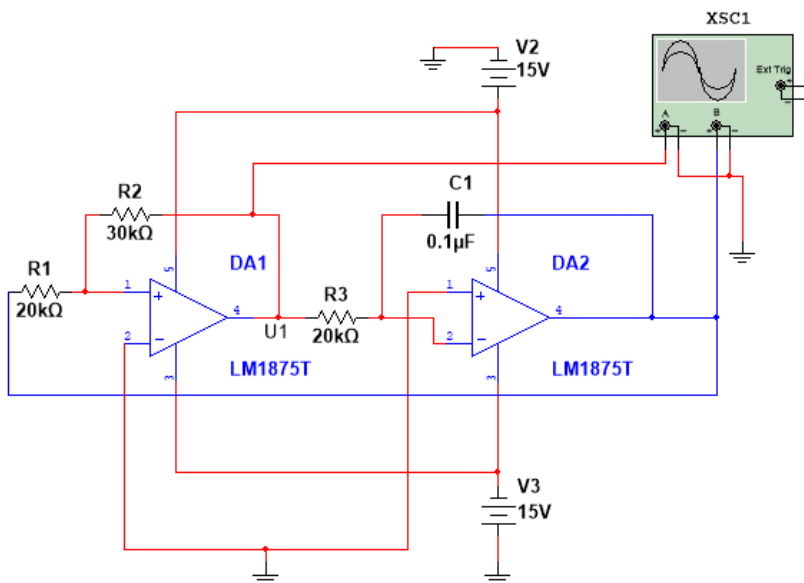


Рисунок 10.4 – Генератор трикутних імпульсів

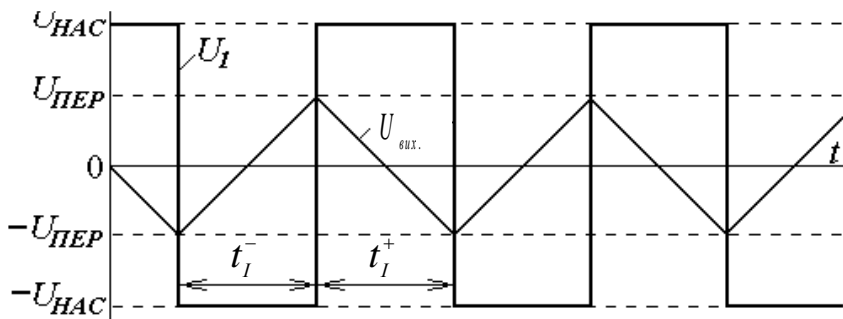


Рисунок 10.5 – Часові діаграми напруги генератора трикутних імпульсів

Якщо у момент подачі напруги живлення на виході компаратора напруга дорівнює  $U_1 = U_{НАС}$ . Інвертуювальний інтегратор інтегрує позитивну напругу зі зворотним знаком. Коли напруга на його виході досягне негативного порога

перемикання, компаратор перемикнеться, його вихідна напруга та напрямок інтегрування змінять знак. Тепер перемикання компаратора відбудеться при позитивній напрузі перемикання, і процес знову піде у зворотному напрямку.

Тривалість імпульсу  $t_I^-$  напруги на виході інтегратора

$$t_I^- = \frac{2R_1R_3C_1}{R_2}.$$

Якщо схема симетрична  $t_I^- = t_I^+$ , то і частота автоколивань дорівнює

$$f = \frac{R_2}{4R_1R_3C_1}.$$

## 10.2. Порядок проведення експериментів

10.2.1. Вимірювання вхідних струмів.

1). Відкрити файл lab10\_1 зі схемою мультівібратора, що працює в автоколивальному режимі при шпаруватості імпульсного процесу  $q=2$  показаної на рис. 10.1.

2). При  $R1=20$  кОм і  $R2=50$  кОм зробити дослідження тривалості вихідних імпульсів  $t_i^{+,-}$ , періоду їх повторення  $T_{повт.}$  і амплітуди  $U_{вих.мах}$  від величини ємності конденсатора  $C$ . Необхідно зняти залежності  $t_i^{+,-}$ ,  $T_{повт.}$ ,  $U_{вих.мах} = f(C)$  для двох значень опору ланцюга зворотного зв'язку  $R_{зз} = 10$  кОм і  $100$  кОм. Результати вимірювань занести до таблиці 10.1.

3). Побудувати графіки знятих залежностей. Замалювати часові залежності вихідної напруги  $U_{вих}$  і напруги на конденсаторі  $C$  (на інвертувальному вході ОП)  $U_{вх.інв.}$  для одного опору ланцюга зворотного зв'язку  $R_{зз}$  і двох (крайніх) значень величини ємності  $C$ .

Таблиця 10.1 – Результати вимірювань залежностей параметрів мультівібратора від опору  $R_{33}$

$R_{33}$	$C, \text{ мкФ}$	0,01	0,05	0,06	0,1	0,11	0,15
10	$t_i^{+,-}$						
	$T_{повт.}$						
	$U_{вих.мах}$						
100	$t_i^{+,-}$						
	$T_{повт.}$						
	$U_{вих.мах}$						

Для всіх випадків за допомогою осцилографа виміряти та вказати на малюнках часові параметри: тривалість вихідного імпульсу  $t_i$ , період повторення  $T_{повт.}$ , а також амплітуду імпульсів і величини нижньої і верхньої порогових напруг  $U_{пор.верх.}$  та  $U_{пор.ниж.}$

Розрахувати граничну напругу на входах ОП та зіставити з відповідними величинами, виміряними за допомогою осцилографа.

4). Дослідити вплив коефіцієнта позитивного зворотного зв'язку  $K_{33}$  мультівібратора на амплітуду та період повторення вихідних імпульсів.

Зняти залежність  $U_{вих.мах}$ ,  $T_{повт.} = f(K)$  при  $R_{33} = 100 \text{ кОм}$  і  $C = 0,05 \text{ мкф}$ .

Коефіцієнт позитивної зворотний зв'язок  $R_{33} = R_1 / (R_1 + R_2)$  задавати величинами резисторів ланцюга позитивного зворотного зв'язку, зазначеними у таблиці 10.2.

Таблиця 10.2 – Результати дослідження впливу коефіцієнта позитивного зворотного зв'язку  $K_{зз}$  мультівібратора

R1, кОм	R2, кОм	Kзз	$U_{вих.max}$	$T_{повт.}$
50	40			
40	40			
20	40			
10	40			

10.2.2. Дослідження несиметричного мультівібратора.

1). Відкрити файл lab10\_2 зі схемою несиметричного мультівібратора, що працює в режимі автоколивань при шпаруватості  $q = \frac{T_{повт.}}{t_i^{+,-}} \neq 2$  показаної на рис.10.2.

2). Дослідити вплив ємності конденсатора на тривалість вихідних імпульсів позитивної полярності  $t_i^+$ , , період їх повторення  $T_{повт.}$  і амплітуду вихідних імпульсів  $U_{вих.max}$  при:  $R=50$  кОм,  $R1= 20$  кОм,  $R2= 50$  кОм і двох значеннях  $R_{зз}=10$  кОм і  $100$  кОм.

Результати вимірювань занести до таблиці 10.3.

Таблиця 10.3 – Результати вимірювань залежностей параметрів несиметричного мультівібратора від опору  $R_{зз}$

Rзз	C, мкФ	0,01	0,05	0,06	0,1	0,11	0,15
10	$t_i^{+,-}$						
	$T_{повт.}$						
	$U_{вих.max}$						
100	$t_i^{+,-}$						
	$T_{повт.}$						
	$U_{вих.max}$						

3). Побудувати графіки знятих залежностей. Для одного із заданих значень ємності  $C$  розрахувати: тривалість вихідного імпульсу  $t_i^+$ , період повторення  $T_{повт.}$ , їх амплітуду  $U_{вих.мах}$  та порогові напруги схеми.

10.2.3. Дослідження генератора пилкоподібної напруги на інтеграторі.

1). Відкрийте файл lab10\_3 зі схемою генератора трикутних імпульсів (рис 10.4).

2). Розрахувати параметри елементів схеми згідно варіанту завдань наведеному в таблиці 10.4. по формулах наведених в розділі 10.1.3. В розрахунках прийняти  $U_{НАС} = 13,8 В$ .

Таблиця 10.4 – Варіанти завдань для розрахунку генератора трикутних імпульсів.

Номер варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота генерації, кГц	15	20	25	30	35	12	17	22	27	32
Напруга вихідного сигналу, В	10	11	12	9	8	7	6	5	8	7

3). Увімкніть схему та виміряйте частоту генерації схеми. Порівняйте розрахункові значення частоти генерації з отриманими у схемі.

### 10.3. Зміст звіту

5. Тема роботи.

6. Мета роботи.

7. Результати досліджень: електричні схеми досліджуваних пристроїв, експериментальні та розрахункові дані, зведені в таблиці, короткі висновки за основними принципами побудови досліджених пристроїв, їх схемами та результатами виконаних досліджень.

8. Висновки по роботі.



#### **10.4. Контрольні запитання**

1. Що таке порогові пристрої?
2. Яка принципова відмінність при побудові компаратора та тригера Шмітта на ОП?
3. Поясніть, що таке гістерезис у електронних ланцюгах?
4. Поясніть принцип роботи мультівібратора на ОП.
5. Як регулюється шпаруватість імпульсів у несиметричному мультівібраторі?
6. Чому одновібратор називають мультівібратором в режимі очікування?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Комп'ютерна електроніка: підручник для студ. спец. 126 "Інформаційні системи та технології", спеціалізації "Інтегровані інформаційні системи" / А.О. Новацький; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 468 с.

2. Пристрої аналогової електроніки : конспект лекцій / укладач В. В. Гриненко. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 272 с.

Основи схемотехніки: Лабораторні роботи 1 — 14 / Уклад.: Є.В. Мельніков, Німченко Т.В., Ю.В. Пепа, В.А. Швець. - К.: НАУ, 2012.- 80 с.

**\*\*\*\* МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни  
«Схемотехніка телекомунікаційних систем»  
Частина 2  
для студентів спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
денної форми навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк  
Редактор А. С. Опанасюк  
Комп'ютерне верстання В. В. Гриненка

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 3,26 Обл.-вид. арк. 3,14

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від  
17.12.2007.