

ББК 621.38

С

М.В. Світанько, доцент

Л.Л. Верьовкін, доцент

С.Л. Хрипко, доцент

О.Ю. Небеснюк, доцент

А.О. Ніконова, доцент

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри МЕІС*
доц. С.Л. Хрипко

Світанько М.В.

С Аналогова схемотехніка. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму для студентів ЗДІА за спеціальністю «Мікрота наноелектроніка», денної та заочної форм навчання / Укл.: М.В. Світанько, Л.Л. Верьовкін, С.Л. Хрипко, О.Ю. Небеснюк, А.О. Ніконова – Запоріжжя, 2018. – 118 с.

Методичні вказівки, призначені для студентів за спеціальністю «Мікрота наноелектроніка», для керівництва при виконанні лабораторного практикуму. Вказівки містять теоретичні відомості та перелік контрольних запитань.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1 Дослідження параметрів каскадів попереднього підсилення на дискретних елементах	5
Лабораторна робота № 2 Дослідження амплітудно—частотної характеристики та вплив на неї окремих елементів каскадів попереднього підсилення	17
Лабораторна робота № 3 Дослідження каскадів попереднього підсилення при імпульсному режимі роботи та вплив на його перехідну характеристику окремих елементів каскаду.....	32
Лабораторна робота № 4 Дослідження характеристик та параметрів інвертуючої схеми включення операційного підсилювача	44
Лабораторна робота № 5 Дослідження характеристик та параметрів неінвертуючої схеми включення операційного підсилювача	53
Лабораторна робота №6 Дослідження характеристик та параметрів схем суматорів на операційному підсилювачі.....	58
Лабораторна робота № 7 Дослідження диференціатора на ОП	64
Лабораторна робота № 8 Дослідження інтегратора на ОП.....	72
Лабораторна робота № 9 Дослідження характеристик та параметрів фільтру низьких частот	82
Лабораторна робота № 10 Дослідження характеристик та параметрів фільтру високих частот	88
Лабораторна робота № 11 Дослідження характеристик та параметрів компараторів	93
Лабораторна робота № 12 Дослідження характеристик та параметрів амплітудних випрямлячів	103
Лабораторна робота № 13 Дослідження характеристик та параметрів мультивібраторів	111
Література.....	118

ВСТУП

Згідно до вимог освітньо–професійної програми відповідно до галузі «Електронні науки» і робочої програми „Аналогова схемотехніка” студенти спеціальності «153 Мікро- та наносистемна техніка» після вивчення відміченої дисципліни повинні здобути навички проведення вимірів параметрів електричних сигналів за допомогою стандартних засобів вимірювань, розраховувати параметри підсилювачів та вміти провести аналіз отриманих результатів.

З цією метою студентам пропонуються до самостійного виконання лабораторні роботи поставленні на спеціальних стендах і стандартних вимірювальних приладах в аудиторіях кафедри МЕІС.

Завдання до лабораторного практикуму студенти виконують згідно варіантів які визначаються відповідно до номеру в академічному журналі обліку успішності і відвідування занять студентами групи.

Студент допускається до виконання чергової роботи практикуму після підтвердження (у вигляді комп’ютерного тестування) наявності необхідних знань теоретичного матеріалу і послідовності виконання роботи .

Для заліку виконаної лабораторної роботи студент повинен надати викладачу і захистити індивідуальний звіт з виконаної роботи, обґрунтувавши отриманні результати та побудовані необхідні залежності.

Згідно з модульно–рейтинговою системою організації навчального процесу в робочій учбовій програмі приведено поділення максимальних балів рейтингу по всім видам учбової роботи приведеної дисципліни. Лектор конкретизує (в залежності від запланованої кількості лабораторних робіт, індивідуальних завдань і др.) поділ рейтингових балів поточного семестру про що студентів інформують на початку семестру.

Звіти до лабораторного практикуму виконуються згідно з загальними правилами оформлення науково–технічних звітів і відповідно до вимог Держстандарту і міжнародної системи одиниць СІ. Для написання звітів використовуються аркуші паперу формату А4 , діаграми і графіки розміщують на міліметровому або спеціально розлінованому папері. Зараховані роботи зберігаються на кафедрі протягом навчального року.

Лабораторна робота № 1

Дослідження параметрів каскадів попереднього підсилення на дискретних елементах

1.1 Мета роботи: вивчити принцип дії й принципові схеми й органі керування стенду для вивчення аналогових підсилювальних приладів на дискретних елементах, оволодіння навичками роботи із зазначеними приладами, вивчити основного правила техніки безпеки при проведенні експериментів, а також одержати необхідні знання для виконання наступних лабораторних робіт.

1.2 Зміст роботи: зробити необхідні виміри й визначити:

- коефіцієнт підсилення першого каскаду попереднього підсилення,
- коефіцієнт підсилення другого каскаду попереднього підсилення,
- коефіцієнт підсилення двох каскадів попереднього підсилення,
- положення робочої точки окремих каскадів, за якою схемою побудовані каскади попереднього підсилення та в якому класу підсилення вони працюють.

1.3 Короткі теоретичні відомості. Серед численних варіантів підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах саме широке застосування знаходить каскад із загальним емітером (ОЕ), що має максимальний коефіцієнт передачі по потужності, варіант схеми якого наведено на рисунку 1.1.

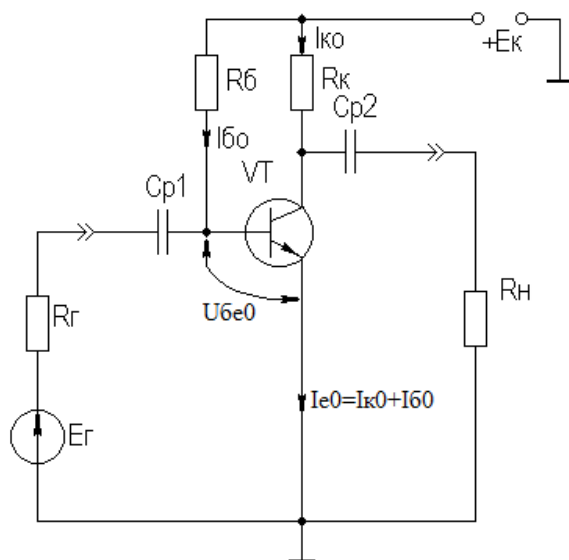


Рисунок 1.1 – Схема електрична принципова каскаду з загальним емітером (ОЕ)

Якщо вхідного сигналу немає, то каскад працює в режимі спокою. За допомогою резистора задається струм спокою бази $I_{\beta 0} = (E_k - U_{\beta e 0}) / R_{\beta}$. Струм спокою колектора $I_{\kappa 0} = H_{21e} I_{\beta 0}$. Напруга колектор–емітер спокою $U_{\kappa 0} = E_k - I_{\kappa 0} R_{\kappa}$. У режимі спокою напруга складає десятки і сотні мВ (зазвичай 0,5 ... 0,8 В). При подачі на вхід позитивної напівхвилі синусоїдального сигналу буде зростати струм бази, а, отже, і струм колектора. В результаті напруга на R_{κ} зросте, а напруга на колекторі зменшиться, тобто відбудеться формування негативної напівхвилі вихідного напруги. Таким чином, каскад з ОЕ здійснює інверсію фази вхідного сигналу на 180^0 .

Графічно проілюструвати роботу каскаду з ОЕ можна, використовуючи вхідні та вихідні статичні характеристики біполярного транзистора, шляхом побудови його динамічних характеристик. Внаслідок слабкої залежності вхідної провідності транзистора g від величини навантаження, вхідні статичні і динамічні характеристики практично збігаються. Вихідні динамічні характеристики – це прямі лінії, які в координатах $I_{\kappa}, U_{\kappa e}$ відповідають рівнянням, що виражає залежність між постійними і змінними значеннями струмів і напруг на навантаженнях каскаду по постійному і змінному струмі.

Процес побудови вихідних динамічних характеристик (навантажувальних прямих по постійному – $R_{=}$, змінному – $R_{\approx}$ струму) показаний на рисунку 1.2.

Слід зазначити, що проста побудова динамічних характеристик можлива тільки при активному навантаженні, тобто в області середніх частот АЧХ. В областях НЧ і ВЧ навантажувальні прямі трансформуються в складні криві.

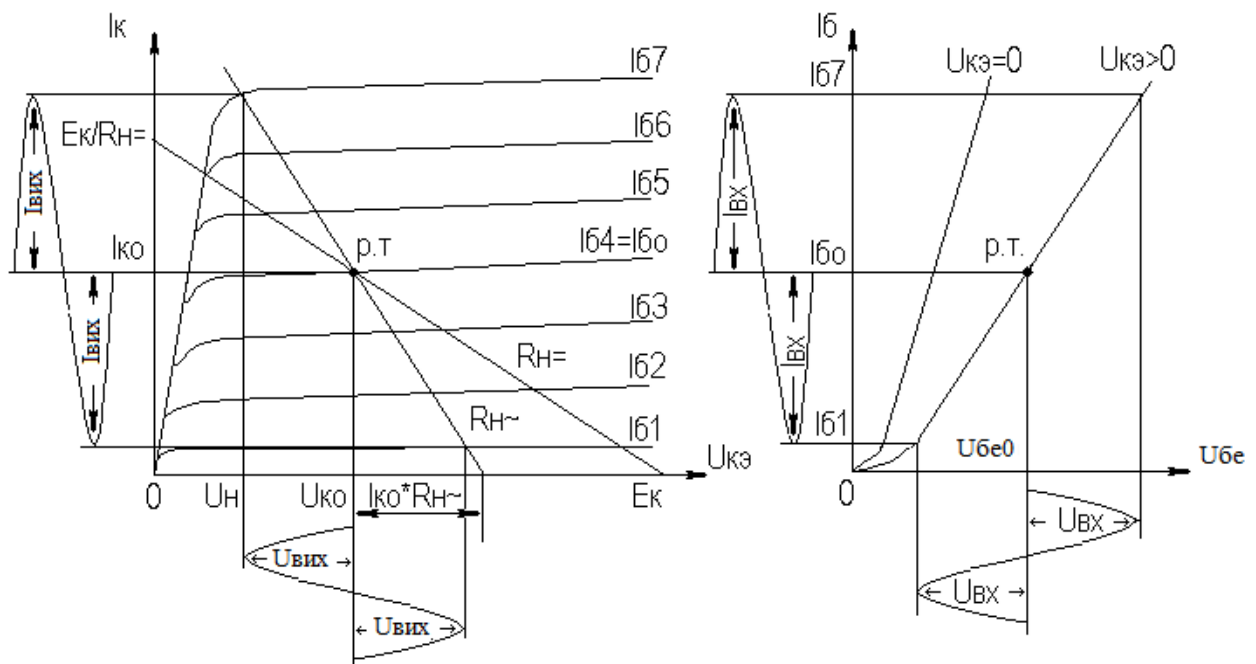


Рисунок 1.2 – Динамічні характеристики каскаду з загальним емітером (ОЕ)

Навантаження розглянутого каскаду по постійному і змінному струму визначаються як:

$$R_{\approx} = R_k;$$

$$R_{\approx} = R_k \parallel R_H.$$

Координати робочої точки $(U_{k0}, I_{k0}, U_{be0}, I_{be0})$ для малосигнальних підсилювальних каскадів вибирають на лінійних ділянках вхідний і вихідний ВАХ біполярного транзистора, використовуючи в малосигнальних підсилювальних каскадах так званий режим (клас) підсилення А.

При відсутності в довідкових даних ВАХ біполярного трагзистора, координати робочої точки можуть бути визначені аналітичним шляхом (см. рисунок 1.2):

$$U_{k0} = U_{vix} + U_H,$$

де U_H – напруга нелінійної ділянки вихідних статичних ВАХ транзистора (напруга насичення), $U_H = 1...2 \text{ В}$;

$$I_{\kappa 0} \geq U_{\text{вых}} / R_{\infty},$$

$$I_{\sigma 0} = I_{\kappa 0} / H_{21\text{э}},$$

$$U_{\sigma e0} = 0,6 \dots 0,8 \text{ В (для кремнієвих транзисторів)},$$

$$U_{\sigma e0} = 0,4 \dots 0,6 \text{ В (для германієвих транзисторів)}.$$

Якщо для малосигнальних каскадів в результаті розрахунку за вищенаведеними формулами значення $U_{\kappa 0}$ і $I_{\kappa 0}$ виявляться, відповідно, менше 2 В і 1 мА, то, якщо не висуваються додаткові вимоги до економічності каскаду, рекомендується брати ті значення координат робочої точки, при яких наводяться довідкові дані і гарантуються оптимальні частотні властивості транзистора.

Повна електрична схема підсилювального каскаду з ОЕ наведена на рис.1.3.

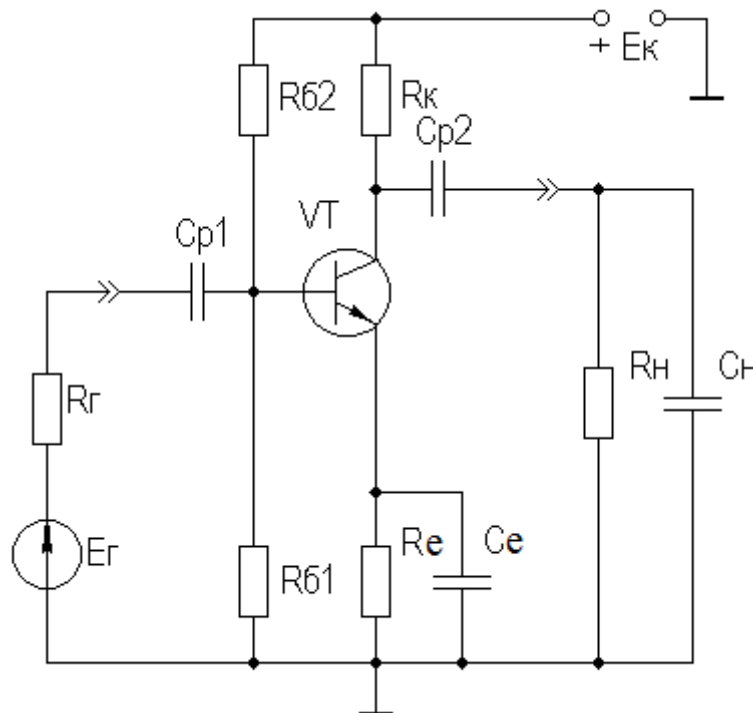


Рисунок 1.3 – Повна електрична схема підсилювального каскаду

На відміну від раніше розглянутого каскаду тут застосована схема емітерної термостабілізації робочої точки ($R_{\sigma 1}, R_{\sigma 2}, R_e$), забезпечує кращу стабільність режиму спокою, принцип її роботи буде розглянуто далі. Конденсатор C_E необхідний для шунтування R_E з метою з'єднання емітера транзистора із загальним проводом на частотах сигналу смуги пропускання підсилювача.

Оскільки параметри біполярного транзистора в значній мірі схильні до впливу зовнішніх факторів (температури, радіації тощо) і той же час, одним з основних параметрів підсилювального каскаду є його стабільність, важливо, щоб в підсилювачі забезпечувався стабільний режим спокою.

Існують три основні чинники, що впливають на зміну $I_{к0}$ під дією температури: при збільшенні температури, по-перше, збільшується напруга $U_{бе0}$, по-друге, збільшується зворотний струм колекторного переходу $I_{кб0}$, і, по-третє, зростає коефіцієнт h_{21E} .

Для зниження впливу дестабілізуючих факторів (наприклад температури) на положення робочої точки каскаду (режиму спокою) застосовують різні схеми її стабілізації.

У більшості випадків, найкращими властивостями серед найпростіших (базових) схем термостабілізації має емітерна схема термостабілізації показана на рисунку 1.3.

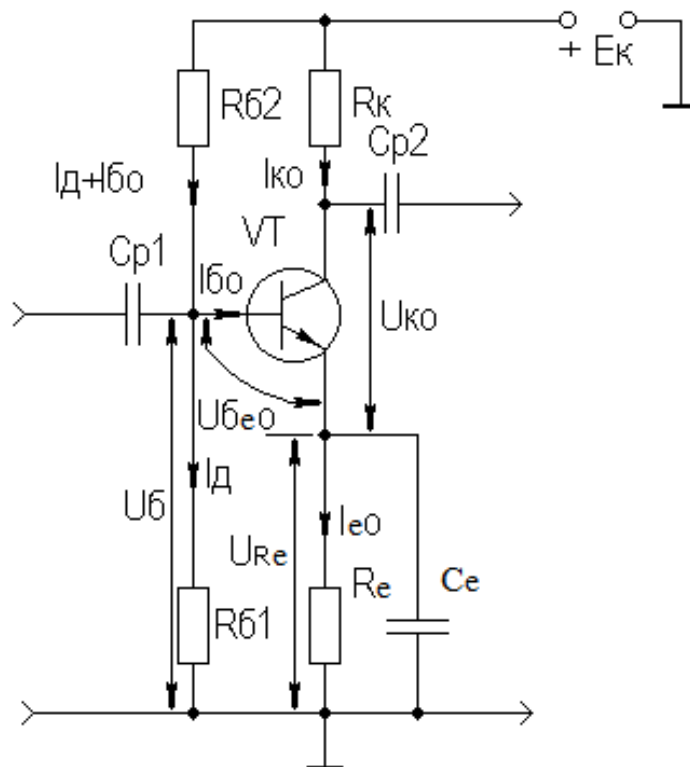


Рисунок 1.3 – Схема електрична принципова підсилювального каскаду з емітерною термостабілізацією робочої точки

Ефект термостабілізації в цій схемі досягається:

- фіксацією потенціалу $U_{\bar{o}}$ вибором струму базового дільника $I_{\bar{o}} \gg I_{\bar{o}0}, U_{\bar{o}} \approx const$.
- введенням по постійному струму негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) шляхом включення резистора R_E . На змінному струмі цей НЗЗ усувається шунтуванням резистора R_E конденсатором C_E .

напруга $U_{\bar{o}e0}$ визначається як:

$$U_{\bar{o}e0} = U_{\bar{o}} - U_{Re}.$$

Механізм дії НЗЗ можна зобразити наступною діаграмою:

$$T^{\uparrow\uparrow} \Rightarrow I_{\kappa 0}^{\uparrow\uparrow} \Rightarrow U_{Re}^{\uparrow\uparrow} \Rightarrow U_{\bar{o}e0}^{\downarrow\downarrow} \Rightarrow I_{\bar{o}0}^{\downarrow\downarrow} \Rightarrow I_{\kappa 0}^{\downarrow\downarrow}$$

де символами $\uparrow\uparrow$ і $\downarrow\downarrow$ показано, відповідно, збільшення та зменшення відповідного параметра.

Технічні параметри підсилювача представляють собою кількісну оцінку його властивостей. До технічних параметрів належать:

- вхідний опір $Z_{вх}$. Найчастіше $Z_{вх}$ носить ємнісний характер;
- вихідний опір $Z_{вих}$. Найчастіше $Z_{вих}$ носить так само ємнісний характер;
- коефіцієнти передачі:

– по напрузі $\dot{K}_U$ або просто $\dot{K}$:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}} = |K| \exp(j\varphi),$$

де φ – фазовий зсув між вхідним і вихідним сигналами.

Значення $|K|$ на середніх частотах робочого діапазону підсилювача, що позначається як K_0 , називають коефіцієнтом підсилення.

В логарифмічних одиницях коефіцієнт посилення визначається за формулою:

$$K_0, dB = 20 \lg K_0.$$

Для багатокаскадних підсилювачів (каскади включені послідовно) коефіцієнт підсилення визначається за формулою:

$$K_{\Sigma} = K_1 * K_2 * \dots * K_n,$$

$$K_{\Sigma}, dB = K_1, dB + K_2, dB + \dots + K_n, dB;$$

– по струму $\dot{K}_I$:

$$\dot{K}_I = \dot{I}_{вих} / \dot{I}_{вх} = |K_I| \exp(j\varphi).$$

Для багатокаскадних підсилювачів $K_{I\Sigma}$ у відносних і логарифмічних одиницях визначаються аналогічно K_{Σ} .

• за потужністю K_P :

$$K_P = P_{вих} / P_{вх}.$$

Для багатокаскадних підсилювачів $K_{P\Sigma}$ у відносних і логарифмічних одиницях визначаються аналогічно K_{Σ} , тільки

$$K_P, dB = 10 \lg K_P.$$

• наскрізні коефіцієнти, наприклад, наскрізний коефіцієнт передачі по напрузі $\dot{K}_E$:

$$\dot{K}_E = \dot{U}_{вих} / \dot{E}_c,$$

де E_c – ЕРС джерела сигналу.

– коефіцієнт корисної дії:

$$КПД = P_{nom} / P_0,$$

де P_{nom} – максимальна вихідна потужність підсилювача; P_0 – потужність, споживана від джерела живлення.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з органами керування стенду для дослідження підсилювачів виконаних на дискретних елементах та цифрового осцилографу і підготувати їх до роботи відповідно за прикладеними до них інструкціям для експлуатації (керівництвом по експлуатації). Схема електрична принципова стенду приведена на рисунку 1.4.

На передній панелі стенду знаходяться наступні органи управління:

- диск плавної установки частоти задаючого генератора,
- перемикач стрибкоподібної зміни частоти «Множник»,
- перемикач для зміни величини розділової міжкаскадної ємності «Ср» в каскаді попереднього підсилення,
- перемикач для зміни величини ємності в ланцюзі емітера «Се» в каскаді попереднього підсилення,
- перемикач для зміни величини ємності в ланцюзі колектора «Ск» в каскаді попереднього підсилення,
- перемикач для зміни величини опору навантаження «Rн» в каскаді попереднього підсилення,
- змінний резистор «регулятор виходу» для зміни вихідного напруги генератора,
- вимикач включення мережі стенду,
- роз'єднувачі підключення зовнішнього генератора і осцилографа для контролю форми і амплітуди сигналів у контрольних точках стенду, а також перемикач який комутує контрольні точки стенду.

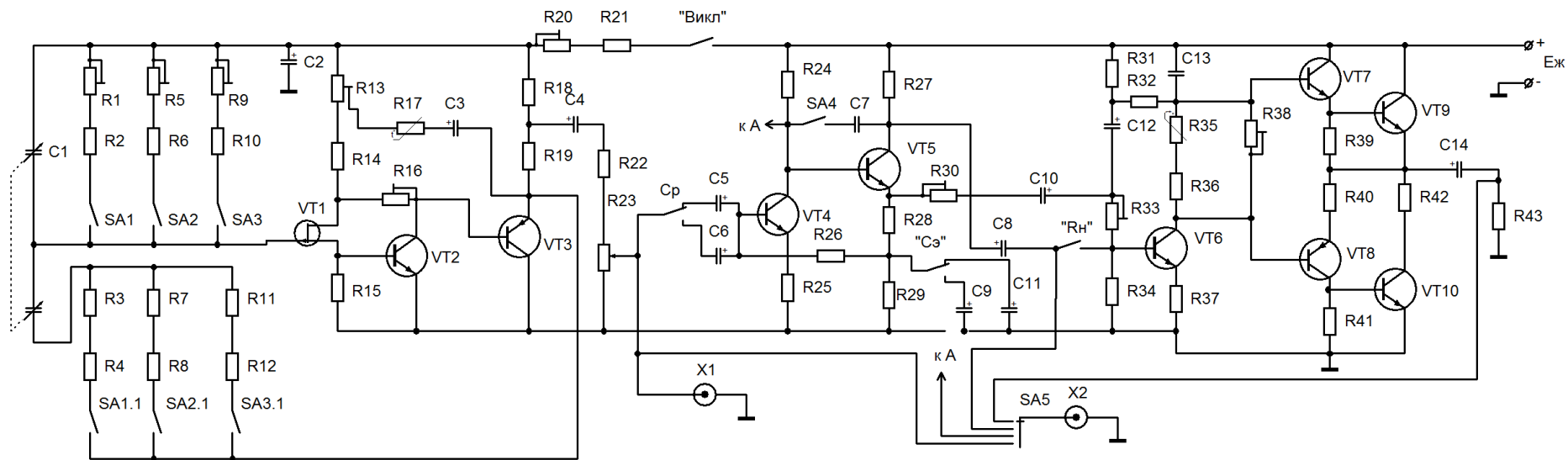


Рисунок 1.4 – Схема електрична принципова стенду

2. Перед початком роботи встановити величину вихідної частоти задаючого генератора рівної 1000Гц, перемикач «Ср» встановити у верхнє положення, перемикач «Се» встановити у верхнє положення, перемикач «Ск» встановити в нижнє положення, перемикач «Rн» встановити в нижнє положення ($R_n = \infty$), змінний резистор «регулятор виходу» в крайнє ліве положення, перемикач комутуючі контрольні точки стенда може знаходитися в будь-якому положенні.

3. Включити стенд шляхом переведення перемикача «Сеть» у верхнє положення при цьому повинна загорітися сигнальна лампа поруч з ним.

4. Приєднати цифровий осцилограф до гнізда «ОСЦ», перемикач комутуючі контрольні точки стенду встановити в положення «3». Збільшуючи величину вихідного задає генератора за допомогою, змінного резистора «регулятор виходу» плавно переводячи його в праве положення і контролюючи вихідний сигнал за допомогою осцилографа встановити величину вихідного сигналу генератора, при якій відсутні видимі обмеження (на екрані осцилографа) вихідного сигналу.

5. Перевести перемикач який комутує контрольні точки стенду в положення «1», і виміряти величину вхідного сигналу на базі транзистора VT4 першого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати вимірів

Величина R_n	Частота вхідного сигналу 1000Гц				Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		Загальний коефіцієнт підсилення	
	амплітуда $U_{вх1}$ В (база VT4)	амплітуда $U_{вих1}$ В (коллектор VT4)	амплітуда $U_{вх2}$ В (база VT5)	амплітуда $U_{вих2}$ В (коллектор VT5)	Раз	дБ	Раз	дБ	Раз	д
∞										
1 кОм										

6. Перевести перемикач який комутує контрольні точки стенду в положення «2», і виміряти величину вихідного сигналу на колекторі транзистора VT4 першого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 1.1.

7. Перевести перемикач який комутує контрольні точки стенду в положення «3», і виміряти величину вихідного сигналу на колекторі транзистора VT5 другого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 1.1.

8. Визначити величину коефіцієнта підсилення каскаду, за напругою виконаного на транзисторі VT4.

9. Визначити величину коефіцієнта підсилення каскаду, за напругою виконаного на транзисторі VT5

10. Переконавшись що загальний коефіцієнт підсилення двох каскадів попереднього підсилювача по напрузі дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення по напрузі кожного з каскадів.

11. Переведите переключатель «R_n» в верхнее положение (R_n=1кОм)

Повторіть вимірювання, виконані в пунктах 4–11, і при написанні висновків до лабораторної роботи обговоріть, яким чином впливає величина опору навантаження на коефіцієнт підсилення.

12. Після закінчення виконання робіт установити регулятор вихідної напруги генератора у крайнє ліве положення. Виключити стенд за допомогою мережних вимикачів.

13. У зв'язку з тим, що в стенді використовуються високі напруги небезпечні для життя людини, **студентам забороняється самостійно робити ремонтні роботи стендів та вимірювальних приладів. У подібних випадках всі питання, пов'язані з несправністю лабораторного устаткування вирішують викладачі, які проводять лабораторний практикум.**

14. Для розрахунку коефіцієнта підсилення першого каскаду за напругою варто використовувати наступну розрахункову формулу

$$K_{n\partial c1} = \frac{U_{BHX1}}{U_{BX1}}$$

де U_{BHX1} – напруга на виході каскаду (на колекторі транзистора VT4),
 U_{BX1} – напруга на вході каскаду (на базі транзистора VT4).

15. Для розрахунку коефіцієнта підсилення другого каскаду за напругою варто використовувати наступну розрахункову формулу

$$K_{\text{відс}2} = \frac{U_{\text{вих}2}}{U_{\text{вх}2}}$$

де $U_{\text{вих}2}$ – напруга на виході каскаду (на колекторі транзистора VT5),
 $U_{\text{вх}2}$ – напруга на вході каскаду (на базі транзистора VT5). Слід звернути увагу що $U_{\text{вх}2} = U_{\text{вих}1}$.

16. Загальний коефіцієнт підсилення двокаскадного попереднього підсилювача за напругою розраховується за наступною формулою

$$K_{\text{відс заг}} = \frac{U_{\text{вих}2}}{U_{\text{вх}1}} = K_{\text{відс}1} \cdot K_{\text{відс}2}.$$

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему й мету роботи;
- принципову схему з'єднань вимірювальних приладів;
- вихідні вольт–амперні характеристики транзистора та розташування на них робочої точки каскаду
- результати вимірів напруги в окремих точках двокаскадного попереднього підсилювача;
- результати розрахунків коефіцієнтів підсилення;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Наведіть поняття «робоча точка» для транзисторного каскаду?
2. В якому класі підсилення працюють досліджувані каскади?
3. Перерахуйте переваги та недоліки каскаду який працює в режимі класу А
4. За якою формулою обчислюється коефіцієнт підсилення однокаскадного підсилювача?
5. За якою формулою обчислюється коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача?
6. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт підсилення?
7. Яким чином впливає опір навантаження на коефіцієнт його підсилення?

Лабораторна робота № 2

Дослідження амплітудно–частотної характеристики та вплив на неї окремих елементів каскадів попереднього підсилення

1.1 Мета роботи: набути навичок та опанувати метод отримання амплітудно–частотної характеристики (АЧХ) каскадів попереднього підсилення.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для отримання необхідних параметрів які дадуть змогу побудувати АЧХ підсилювача.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Характеристики підсилювачів служать для оцінки спотворення сигналу в процесі підсилення. Спотворення – це відхилення форми вихідного сигналу від форми вхідного. Залежно від походження вони поділяються на частотні та фазові:

– спотворення частотні, викликані неоднаковим підсиленням вхідного сигналу на різних частотах. Частотні спотворення створюються LC елементами, тому вони мають лінійний характер.

Внесені підсилювачем частотні спотворення оцінюють по амплітудно–частотній характеристиці (АЧХ) і по фазочастотній характеристиці (ФЧХ).

АЧХ називається залежність модуля коефіцієнта передачі від частоти. Часто використовують нормовану АЧХ, представлену на рис.2.1.

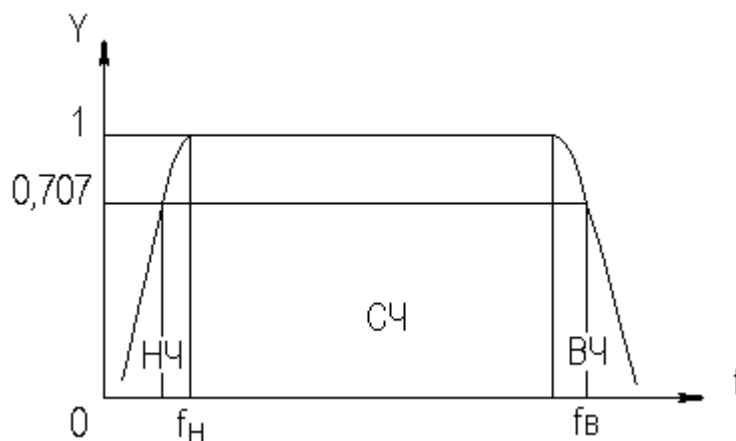


Рисунок 2.1 – Нормована АЧХ підсилювача

На рис. 2.1 – Y – відносний (нормований) коефіцієнт підсилення:

$$Y = |K| / K_0,$$

$$Y, dB = 20 \lg Y.$$

Структура виразів для багатокаскадного підсилювача у відносних і логарифмічних одиницях в точності збігається з виразами для K і виходить з останніх шляхом заміни на.

Кількісно частотні спотворення оцінюються коефіцієнтом частотних спотворень M :

$$M = 1/Y = K_0 / |K|,$$

$$M, dB = 20 \lg M.$$

Структура виразів для багатокаскадного підсилювача у відносних і логарифмічних одиницях також в точності збігається з виразами для K і отримується з останніх шляхом заміни K на M .

За АЧХ і допустимій величині частотних спотворень визначають нижню f_n і верхню f_v граничні частоти, смугу частот, Δf , яка дорівнює:

$$\Delta f = f_v - f_n.$$

– спотворення фазові, викликані різним фазовим зрушенням різних за частотою складових спектра сигналу. Фазові спотворення створюються LC елементами, тому вони мають лінійний характер.

Залежність кута зрушення по фазі між вхідним і вихідним сигналами від частоти оцінюється за ФЧХ, для резистивного каскаду має вигляд, представлений на рис.2.2.

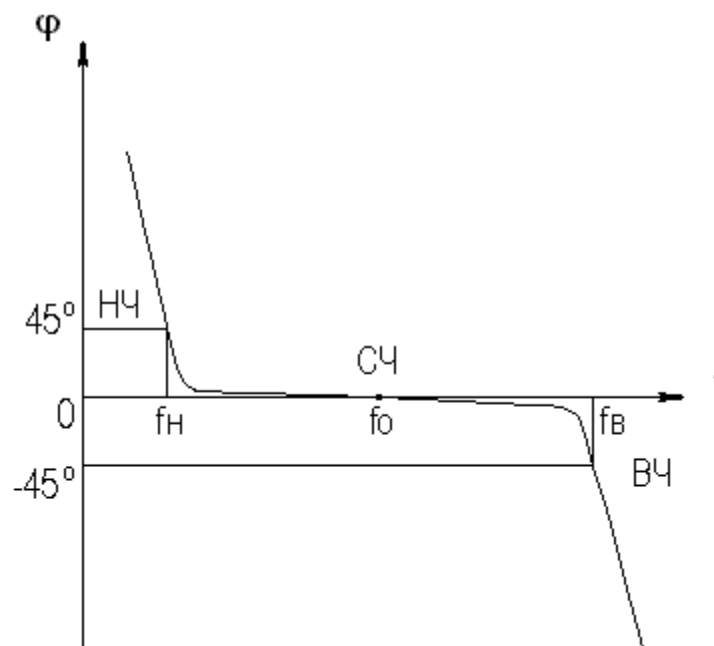


Рисунок 2.2 – Нормована ФЧХ підсилювача

Для аналізу форми АЧХ транзисторного каскаду підсилювача виконаного за схемою ОЕ з емітерною термостабілізацією робочої точки (рис. 1.2) використовуємо еквівалентну схему каскаду (рис. 2.3).

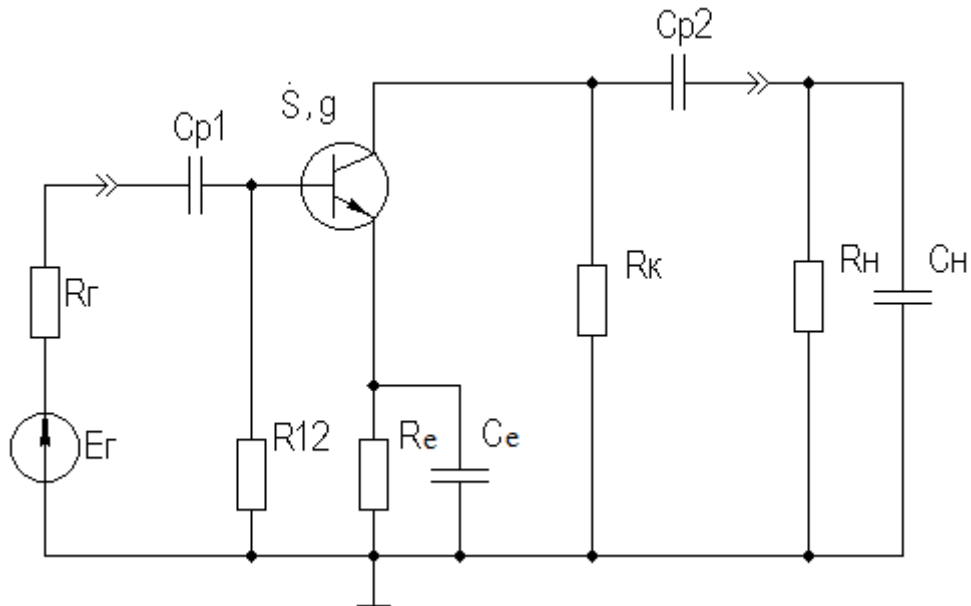


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема каскаду з ОЕ

З метою спрощення аналізу каскаду виділяють на АЧХ області НЧ, СЧ і ВЧ, і проводять аналіз окремо для кожної частотної області.

Еквівалентна схема каскаду в області СЧ наведена на рисунку 2.4.

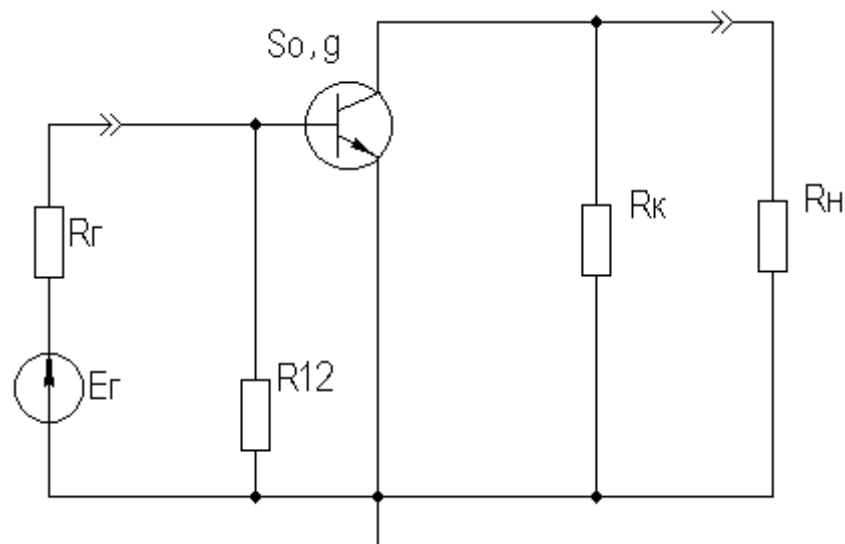


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема каскаду в області СЧ

Як видно, ця схема не містить реактивних елементів, т.к. в області СЧ впливом на АЧХ розділових (\$C_{p1}, C_{p2}\$) і блокувальних (\$C_e\$) ємностей

можна знехтувати, оскільки їх опір змінному струму незначно, а вплив інерційності біполярного транзистора та паразитної ємності дуже малий.

Провівши аналіз схеми, знайдемо, що

$$K_0 = S_0 R_{EKB},$$

де $R_{EKB} \approx R_k \parallel R_n$;

$$g_{ex} \approx g + G_{12},$$

де $G_{12} = 1/R_{12} = 1/(R_{BX1} \parallel R_{BX2})$;

$$g_{vix} \approx g_k = 1/R_k.$$

Ці співвідношення отримані в припущенні, що низькочастотне значення внутрішньої провідності транзистора g_{22e} багато менше g_k і g_n .

Ця умова (якщо не буде обумовлено) діятиме і при подальшому аналізі підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах. Таке припущення справедливо тому, що біполярний транзистор є струмовим приладом і особливо ефективний при роботі на низькоомні навантаження.

Еквівалентна схема каскаду в області ВЧ наведена на рисунку 2.5.

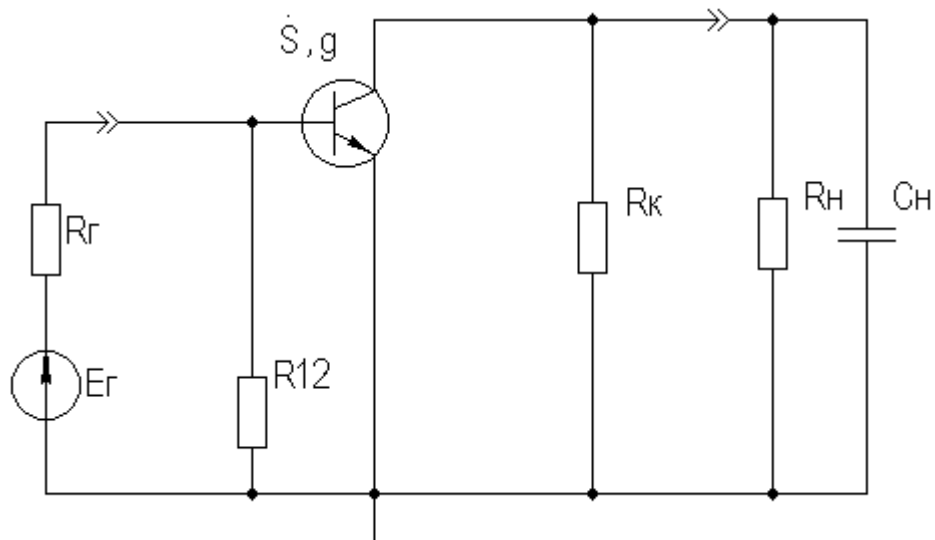


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема каскаду в області ВЧ

Поведінка АЧХ в цій області визначається впливом інерційності транзистора і ємності C_n .

Провівши аналіз, отримаємо вираз для коефіцієнта передачі каскаду в області ВЧ:

$$\dot{K}_e \approx \frac{K_0}{1 + j\omega\tau_e},$$

де τ_e – постійна часу каскаду в області ВЧ.

Постійну часу каскаду для зручності аналізу представимо так:

$$\tau_e = \tau + \tau_1 + \tau_2,$$

де τ – постійна часу транзистора ($S = \frac{S_0}{1 + j\omega\tau}$),

$$\tau = \frac{S_0 r_{\bar{o}}}{2\pi f_T};$$

τ_1 – постійна часу вихідного кола транзистора,

$$\tau_1 = S_0 C_{\kappa} r_{\bar{o}} R_{екв};$$

τ_2 – постійна часу навантаження,

$$\tau_2 = C_n R_{екв}.$$

Вхідна провідність визначається як:

$$\dot{Y}_{вх} \approx G_{12} + g + j\omega C_{вх\ дин},$$

де $C_{вх\ дин}$ – вхідні динамічна ємність каскаду,

$$C_{вх\ дин} \approx C_{e\bar{o}} + (1 + K_0)C_{\kappa} = \tau / r_{\bar{o}} + (1 + K_0)C_{\kappa}.$$

Вихідна провідність визначиться як

$$\dot{Y}_{вих} \approx g_{\kappa} + j\omega C_{вих},$$

де $C_{вих}$ – вихідна ємність каскаду, $C_{вих} = C_{\kappa} S_0 r_{\bar{o}}$.

Вирази для відносного коефіцієнта передачі Y_{ϵ} і коефіцієнта частотних спотворень M_{ϵ} :

$$\dot{Y}_{\epsilon} = \dot{K}_{\epsilon} / K_0 = \frac{1}{1 + j\omega \tau_{\epsilon}},$$

$$\dot{Y}_{\epsilon} = Y_{\epsilon} e^{j\omega \varphi_{\epsilon}},$$

$$Y_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_{\epsilon})^2}},$$

$$\varphi_{\epsilon} = -\arctg \omega \tau_{\epsilon},$$

$$M_{\epsilon} = 1 / Y_{\epsilon}$$

За наведеними виразами будується АЧХ і ФЧХ каскаду в області ВЧ.

Зв'язок коефіцієнта частотних спотворень M_{ϵ} і верхньої граничної частоти смуги пропускання f_{ϵ} :

$$f_{\epsilon} = \frac{\sqrt{M_{\epsilon}^2 - 1}}{2\pi \tau_{\epsilon}}.$$

У багатокаскадному підсилювачі з однаковими каскадами спостерігається ефект звуження смуги робочих частот, який можна компенсувати збільшенням верхньої граничної частоти каскадів $f_{\epsilon i}$ до

$$f_{\epsilon i} = f_{\epsilon} \sqrt{2^{1/n} - 1}.$$

Таким чином, на завал частотної характеристики підсилювального каскаду в області високих частот впливають ємності: транзистора C_{κ} , навантаження C_H , монтажу C_M . Чим вище значення цих ємностей, тим

сильніше завал АЧХ в області високих частот, менше смуга пропускання підсилювача.

Еквівалентна схема каскаду в області НЧ наведена на рисунку 2.6.

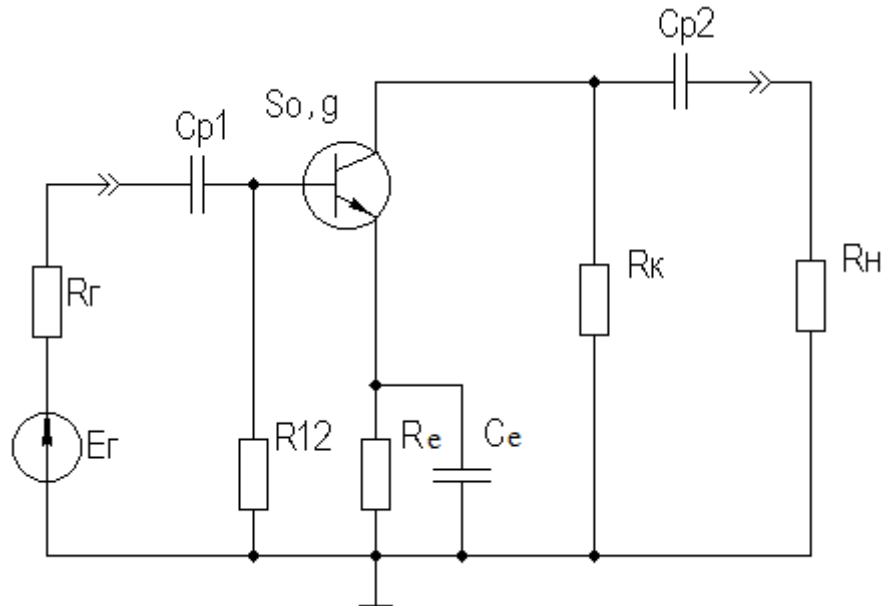


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема каскаду в області НЧ

Поведінка АЧХ в цій області визначається впливом розділових (C_{p1} , C_{p2}) і блокувальних (C_E) конденсаторів.

Вплив цих ємностей на коефіцієнт частотних спотворень в області НЧ M_n каскаду можна визначити окремо, використовуючи принцип суперпозиції. Загальний коефіцієнт частотних спотворень в області НЧ визначиться як

$$M_n, \text{дБ} = \sum_{i=1}^N M_{ni}, \text{дБ},$$

де N – число ланцюгів формують АЧХ в області НЧ.

Визначимо вплив C_{p2} на АЧХ каскаду. Провівши аналіз отримаємо вираз для коефіцієнта передачі в області НЧ:

$$K_n = K_0 / (1 + 1 / j\omega \tau_n),$$

де τ_n – постійна часу розділового ланцюга в області НЧ.

Постійна часу розділових ланцюгів в загальному випадку може бути визначена за формулою $\tau_n = C_p(R_{\text{Л}} + R_{\text{П}})$,

де $R_{\text{Л}}$ – еквівалентний опір, що стоїть ліворуч від C_p (звичайно це вихідний опір попереднього каскаду або внутрішній опір джерела сигналу), $R_{\text{П}}$ – еквівалентний опір, що стоїть праворуч від C_p (звичайно це вхідний опір наступного каскаду або опір навантаження).

Для розглянутого ланцюга постійна часу дорівнює:

$$\tau_{n2} = C_{p2}(R_k + R_n).$$

Вирази для відносного коефіцієнта передачі і коефіцієнта частотних спотворень в області НЧ наступні:

$$\dot{Y}_n = \dot{K}_n / K_0 = \frac{1}{1 + 1/j\omega\tau_n},$$

$$\dot{Y}_n = Y_n e^{j\varphi_n},$$

$$Y_n = 1 / \sqrt{1 + (1/\omega\tau_n)^2},$$

$$\varphi_n = -\arctg 1/\omega\tau_n,$$

$$M_n = 1/Y_n$$

За цим виразами оцінюється вплив конкретного ланцюга на АЧХ і ФЧХ каскаду в області НЧ.

Зв'язок між коефіцієнтом частотних спотворень і нижньої граничною частотою виражається формулою

$$f_n = 1/2\pi\tau_n \sqrt{M_n^2 - 1}.$$

Аналогічним чином враховується вплив інших розділових і блокувальних ланцюгів, тільки для блокувального конденсатора емітерного ланцюга постійна часу приблизно оцінюється величиною $\tau_{ne} \approx C_e/S_0$ оскільки опір біполярного транзистора з боку емітера приблизно дорівнює

$1/S_0$, а впливом R_e в більшості випадків можна знехтувати, тому що зазвичай $1/S_0 \ll R_e$.

Результуючу АЧХ і ФЧХ каскаду в області НЧ можна побудувати, використовуючи вже згадуваний принцип суперпозиції.

У многокаскадному підсилювачі з однаковими каскадами спостерігається ефект звуження смуги робочих частот, який в області НЧ можна компенсувати зменшенням нижньої граничної частоти каскадів до $f_{ni} = f_n / \sqrt{2^{1/n} - 1}$.

Таким чином, на завал частотної характеристики підсилювального каскаду в області низьких частот впливають ємності: розділові (міжкаскадні) C_p , емітерного ланцюга C_e . Чим менше значення цих ємностей, тим сильніше завал АЧХ в області низьких частот, менше смуга пропускання підсилювача.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з органами керування стенду для дослідження підсилювачів виконаних на дискретних елементах та цифрового осцилографу і підготувати їх до роботи відповідно за прикладеними до них інструкціям для експлуатації (керівництвом по експлуатації).
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 2.6. Ознайомитися з органами управління кожного приладу.

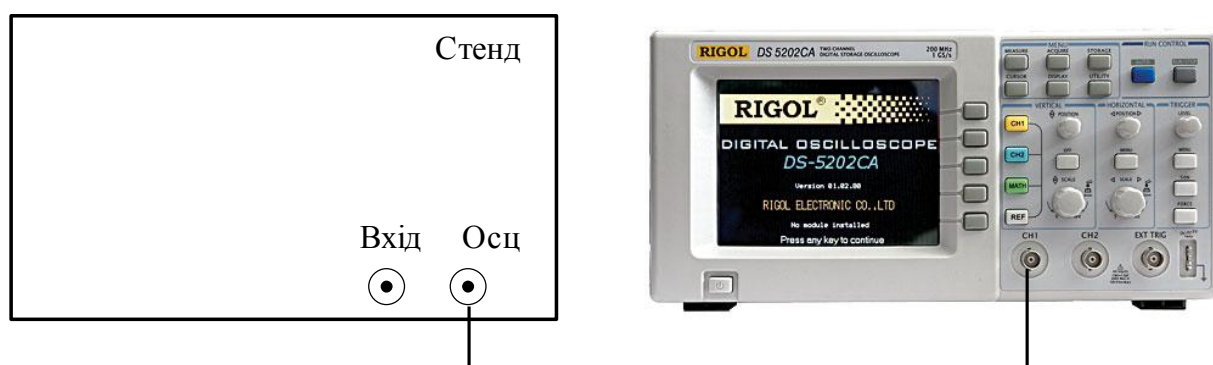


Рисунок 2.7 – Схема для дослідження АЧХ каскадів попереднього підсилення на дискретних елементах

3. Перед початком роботи встановити величину частоти задаючого генератора рівною 20Гц (згідно з таблицею 2.1), перемикач «Ср» встановити у верхнє положення ($C_p = 10\text{мкФ}$), перемикач «Се» встановити у верхнє положення ($C_e = 50\text{мкФ}$), перемикач «Ск» встановити в нижнє положення ($C_k = 5\text{пФ}$), перемикач «Rн» встановити в нижнє положення ($R_n = \infty$), змінний резистор «регулятор виходу» в крайнє лівє положення, перемикач комутуючий контрольні точки стенда може знаходитися в будь-якому положенні.

4. Включити стенд шляхом переведення перемикача «Сеть» у верхнє положення при цьому повинна загорітися сигнальна лампа поруч з ним.

5. Приєднати цифровий осцилограф до гнізда «ОСЦ», перемикач комутуючий контрольні точки стенду встановити в положення «3». Збільшуючи величину вихідної напруги задаючого генератора за допомогою, змінного резистора «регулятор виходу» плавно переводячи його в праве положення і контролюючи вихідний сигнал за допомогою осцилографа встановити величину вихідної напруги генератора, при якій відсутні видимі обмеження (на екрані осцилографа) вихідного сигналу. Виміряти амплітуду вихідного сигналу і зменшуючи вхідний сигнал за допомогою, змінного резистора «регулятор виходу» встановити величину амплітуди вихідного сигналу кратну 1В (1В, 2В, 3В). **Надалі при виконанні роботи положення резистора «регулятор виходу» має бути незмінним.**

6. Перевести перемикач комутуючий контрольні точки стенду в положення «1», і виміряти величину вхідного сигналу на базі транзистора VT4 першого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 2.1.

7. Перевести перемикач комутуючий контрольні точки стенду в положення «2», і виміряти величину вихідного сигналу на колекторі транзистора VT4 першого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 2.1.

8. Перевести перемикач комутуючий контрольні точки стенду в положення «3», і виміряти величину вихідного сигналу на колекторі транзистора VT5 другого каскаду. Результати вимірювання занести в таблицю 2.1..

9. Визначити величину коефіцієнта підсилення каскаду, за напругою виконаного на транзисторі VT4, величину коефіцієнта підсилення каскаду, за напругою виконаного на транзисторі VT5 і загальний Коефіцієнт підсилення

обох каскадів.

10. Змінити частоту згідно з таблицею 2.1 і повторити вимірювання згідно з пунктами 6÷9.

Таблиця 2.1 – Результати вимірів АЧХ

Частота, Гц.	Вимірювані параметри				Розраховані параметри						Примітки
	амплітуда $U_{вх1}$ В (база VT4)	амплітуда $U_{вих1}$ В (коллектор VT4)	амплітуда $U_{вх2}$ В (база VT5)	амплітуда $U_{вих2}$ В (коллектор VT5)	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		Загальний коефіцієнт підсилення		
					Раз	дБ	Раз	дБ	Раз	дБ	
20											Ср=10мкФ, Се=50мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
40											
60											
100											
500											
1000											
2000											
5000											
7000											
10000											
12000											
15000											
20000											

11. Після закінчення вимірювання параметрів на всіх частотах певних таблицею 2.1 встановити величину частоти генератора рівної 20Гц (згідно з таблицею 2.2), перемикач «Ср» встановити в нижнє положення (Ср = 0,1 мкФ), перемикач «Се» встановити у верхнє положення (Се = 50мкФ), перемикач «Ск» встановити в нижнє положення (Ск = 5пФ), перемикач «Rн» встановити в нижнє положення (Rн = ∞), і повторити вимірювання згідно з пунктами 6÷10. При цьому результати вимірів заносити в таблицю 2.2. Провести необхідні розрахунки.

Таблиця 2.2 – Результати вимірів АЧХ

Частота, Гц.	Вимірювані параметри				Розраховані параметри						Примітки
	амплітуда $U_{вх1}$ В (база VT4)	амплітуда $U_{вих1}$ В (коллектор VT4)	амплітуда $U_{вх2}$ В (база VT5)	амплітуда $U_{вих2}$ В (коллектор VT5)	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		Загальний коефіцієнт підсилення		
					Раз	дБ	Раз	дБ	Раз	дБ	
20											Ср=0,1мкФ, Се=50мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
40											
60											
100											
500											
1000											
2000											
5000											
7000											
10000											
12000											
15000											
20000											

12. Після закінчення вимірювання параметрів на всіх визначених таблицею 2.2 частотах встановити величину частоти генератора рівної 20Гц (згідно з таблицею 2.3), перемикач «Ср» встановити у верхнє положення (Ср = 10мкФ), перемикач «Се» встановити в нижнє положення (Се = 5, 0мкФ), перемикач «Ск» встановити в нижнє положення (Ск = 5пФ), перемикач «Rн» встановити в нижнє положення (Rн = ∞), і повторити вимірювання згідно з пунктами 6 ÷ 10. При цьому результати вимірів заносити в таблицю 2.3. Провести необхідні розрахунки.

Таблиця 2.3 – Результати вимірів АЧХ

Частота, Гц.	Вимірювані параметри				Розраховані параметри						Примітки
	амплитуда $U_{вх1}$ В (база VT4)	амплитуда $U_{вих1}$ В (коллектор VT4)	амплитуда $U_{вх2}$ В (база VT5)	амплитуда $U_{вих2}$ В (коллектор VT5)	Коеффициент усиления 1 каскада		Коеффициент усиления 2 каскада		Общий Крэффициент усиления		
					Раз	дБ	Раз	дБ	Раз	дБ	
20											Ср=10мкФ, Се=5,0мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
40											
60											
100											
500											
1000											
2000											
5000											
7000											
10000											
12000											
15000											
20000											

13. Після закінчення вимірювання параметрів на всіх визначених таблицею 2.3 частотах встановити величину частоти генератора рівної 20Гц (згідно з таблицею 2.4), перемикач «Ср» встановити у верхнє положення (Ср = 10мкФ), перемикач «Се» встановити у верхнє положення (Се = 50мкФ), перемикач «Ск» встановити у верхнє положення (Ск = 1500пФ), перемикач «Rн» встановити в нижнє положення (Rн = ∞), і повторити вимірювання згідно з пунктами 6 ÷ 10. При цьому результати вимірів заносити в таблицю 2.4. Провести необхідні розрахунки.

Таблиця 2.4 – Результати вимірів

Частота, Гц.	Вимірювані параметри				Розраховані параметри						Примітки
	амплитуда $U_{вх1}$ В (база VT4)	амплитуда $U_{вих1}$ В (коллектор VT4)	амплитуда $U_{вх2}$ В (база VT5)	амплитуда $U_{вих2}$ В (коллектор VT5)	Коеффициент усиления 1 каскада		Коеффициент усиления 2 каскада		Общий Крэффициент усиления		
					Раз	дБ	Раз	дБ	Раз	дБ	
20											Ср=10мкФ, Се=50мкФ, Ск=1500пФ, Rн=∞
40											
60											
100											
500											
1000											
2000											
5000											
7000											
10000											
12000											
15000											
20000											

14. Після закінчення виконання робіт установити регулятор вихідної напруги генератора у крайнє ліве положення. Виключити стенд та осцилограф за допомогою мережних вимикачів.

15. Побудувати графіки АЧХ для окремих варіантів вимірів. АЧХ будувати для кожної таблиці на одному графіку. Для кожної АЧХ визначте полосу пропускання та зробіть висновки яким чином я в якій області частот на вигляд АЧХ впливають розділові ємності, ємність в колі емітера, ємність колекторного переходу транзистора на якому виконаний каскад підсилення.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- схеми вимірювань;
- результати вимірювання;
- АЧХ підсилювача;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Наведіть поняття апліту дно–частотної підсилювача характеристики.
2. Наведіть поняття полоси пропускання підсилювача.
3. На якому відносному рівні визначається верхня та нижня границя частот полоси пропускання підсилювача.
4. З якою метою між окремими каскадами підсилювача встановлюють розділові (міжкаскадні) ємності?
5. Як впливає на АЧХ підсилювача зростання (зменшення) розділових (міжкаскадних) ємностей? Відповідь обґрунтувати.
6. З якою метою в емітерному колі каскаду встановлюють емітерну (блокуючу) ємність?
7. Як впливає на АЧХ підсилювача зростання (зменшення) емітерних (блокуючих) ємностей? Відповідь обґрунтувати.
8. Як впливає на АЧХ підсилювача зростання (зменшення) колекторних ємностей? Відповідь обґрунтувати.
9. Чому при збільшенні числа каскадів підсилювача зменшується полоса його пропускання? Відповідь обґрунтувати.
10. Навіщо потрібні(блокуючі) ємності в ланцюгах живлення підсилювача?

Лабораторна робота № 3

Дослідження каскадів попереднього підсилення при імпульсному режимі роботи та вплив на його перехідну характеристику окремих елементів каскаду

1.1 Мета роботи: набути навичок вимірювання параметрів прямокутного імпульсу що підсилюється та аналізу впливу на ці параметри окремих елементів схеми підсилювача.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для визначення таких кількісних параметрів періодичних прямокутних сигналів як тривалість фронту зростання імпульсу, тривалість фронту спаду імпульсу, величину спаду пласкої вершини імпульсу. Провести аналіз яким чином на ці параметри впливають ємності (розділові, емітерні, колекторні).

1.3 Короткі теоретичні відомості: В імпульсних підсилювачах форма вихідної напруги залежить від перехідних процесів в ланцюгах, що містять LC елементи. Для оцінки лінійних спотворень, які називаються в імпульсних підсилювачах перехідними, користуються перехідною характеристикою.

Перехідна характеристика підсилювача це залежність миттєвого значення напруги (струму) на виході від часу $U_{вих} = f(t)$ при подачі на вхід одиничного стрибкоподібного зміни напруги (струму) (сигналу типу одиничною функції).

Перехідні спотворення вимірюють при подачі на вхід ідеального прямокутного імпульсу і поділяються на спотворення фронту і спотворення пласкої вершини імпульсу (рис.3.1).

Спотворення фронту характеризуються:

- часом встановлення t_y , тобто часом наростання амплітуди імпульсу від $0,1U_m$ до $0,9U_m$;
- викидом фронту імпульсу δ , визначеним ставленням амплітуди викиду ΔU до амплітуди стабільного режиму U_m ;
- часом запізнювання t_z щодо вхідного сигналу по рівню $0,1U_m$.

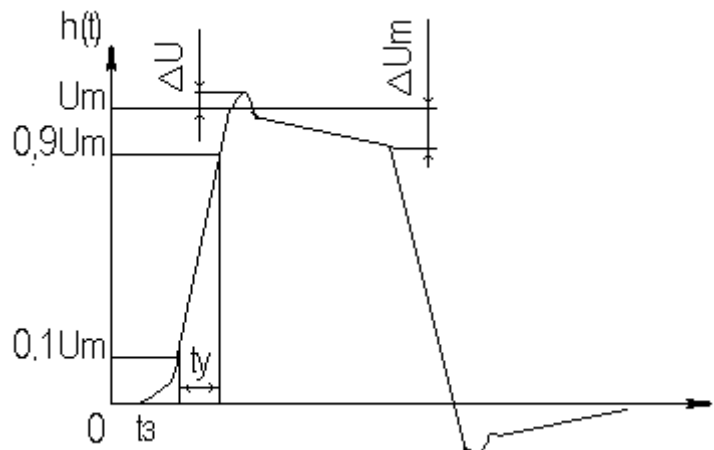


Рисунок 3.1 – Форма перехідної характеристики імпульсного підсилювача

Спотворення плоскої вершини імпульсу Δ характеризується величиною спаду напруги ΔU_m за час тривалості імпульсу:

$$\Delta, \% = \frac{\Delta U_m}{U_m} \cdot 100\%.$$

Для багатокаскадних некоректованих підсилювачів (каскади включені послідовно) результуюче час встановлення фронту і спад плоскої вершини імпульсу можна оцінити таким чином:

$$t_{y\Sigma} = \sqrt{t_{y1}^2 + t_{y2}^2 + \dots + t_{yn}^2},$$

$$\Delta_\Sigma = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n.$$

АЧХ і перехідна характеристика відображають одні і ті ж фізичні процеси в різній формі (частотної і тимчасової). Зв'язок частотних і тимчасових спотворень ілюструється рис.3.2.

Таким чином, на величину спаду плоскої вершини впливають розділові (між каскадами) конденсатори, і конденсатори в ланцюзі емітерної термостабілізації. Чим більше ємність вищевказаних конденсаторів тим менше спад плоскої вершини і підсилювач може підсилювати сигнали прямокутної форми у яких нижча частота проходження імпульсів і великі значення тривалості імпульсу.

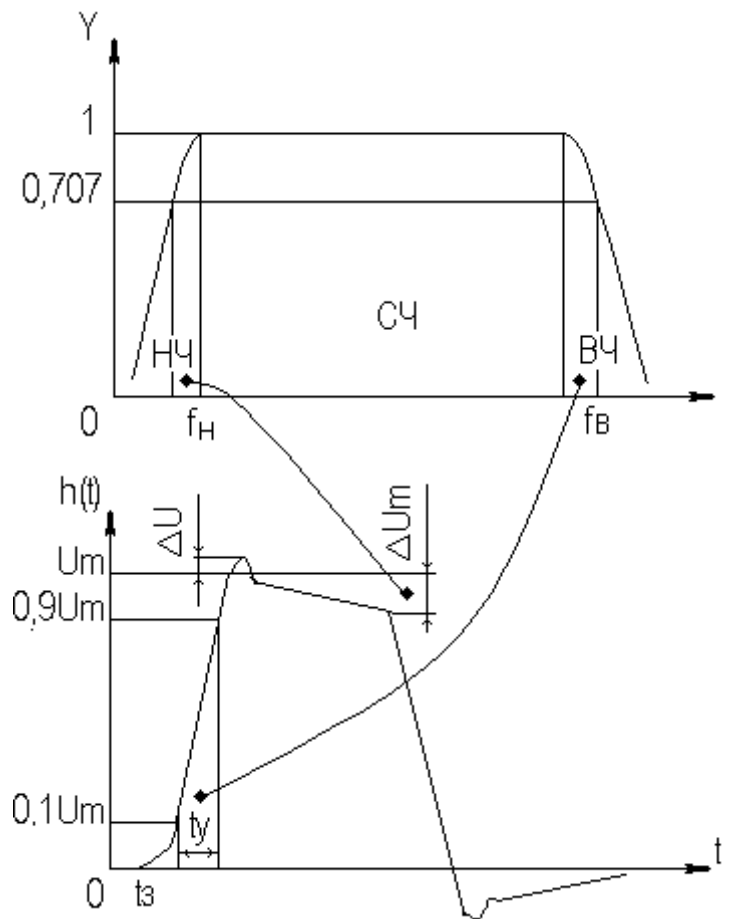


Рисунок 3.2 – Зв'язок АЧХ і перехідної характеристики

Ємності транзистора ($C_{кб}$), ємності навантаження C_n і ємності монтажу впливають на величину часу встановлення перехідної характеристики підсилювача. Чим менше ємність вищевказаних конденсаторів, тим менше величина часу встановлення перехідної характеристики підсилювача і такий підсилювач може підсилювати імпульсні сигнали на більш високій частоті проходження коротких по тривалості імпульсів з малим часом наростання фронтів.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися із структурною схемою, принципом дії, параметрами і органами управління генератора синусоїдальних коливань ГЗ–112 і підготувати його до роботи згідно з інструкціями по експлуатації (керівництва по експлуатації) які додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 3.6.

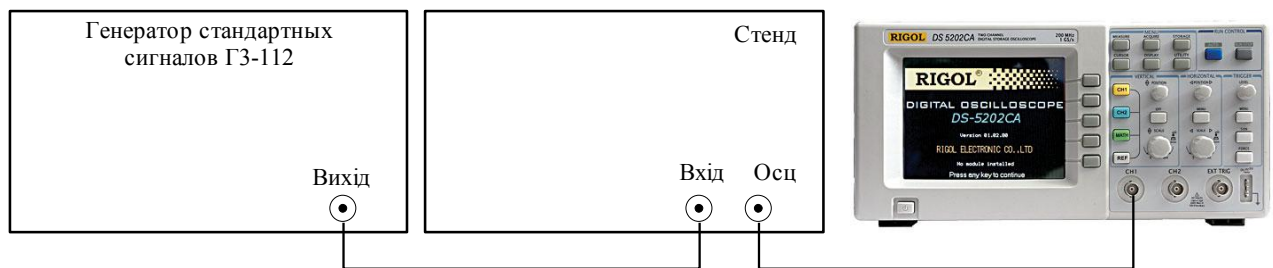


Рисунок 1 – Схема для дослідження перехідних характеристик підсилювача

3. Перед початком роботи встановити множник вихідний частоти генератора в положення «викл», перемикач «Ср» встановити у верхнє положення, перемикач «Се» встановити у верхнє положення, перемикач «Ск» встановити в нижнє положення, перемикач «Rн» встановити в нижнє положення ($R_n = \infty$), змінний резистор «регулятор виходу» в крайнє лівє положення, перемикач комутуючий контрольні точки стенда може знаходитися в будь-якому положенні.
4. На генераторі ГЗ–112 встановити частоту вихідного сигналу рівну 20Гц, форму вихідного сигналу – прямокутний імпульс типу «меандр», вихідний атенюатор в положення «20dB», ручку плавного регулювання вихідного сигналу генератора в крайнє лівє положення.
5. Включити стенд шляхом переведення перемикача «Сеть» у верхнє положення при цьому повинна загорітися сигнальна лампа поруч з ним.
6. Приєднати цифровий осцилограф до гнізда «ОСЦ» стенду, перемикач комутуючий контрольні точки стенду встановити в положення «3». Збільшуючи величину вихідного сигналу генератора ГЗ–112 і контролюючи вихідний сигнал за допомогою осцилографа встановити величину вихідного сигналу генератора ГЗ–112, при якій величина амплітуди вихідного сигналу буде рівною 2В. **Надалі при виконанні роботи положення резистора «регулятор виходу» має бути незмінним.**
7. Перевести перемикач комутуючі контрольні точки стенду в положення 1, замалювати осцилограму вхідного сигналу підсилювача. За допомогою цифрового осцилографа по осцилограмі визначити наступні параметри імпульсного сигналу: тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{зр}}$), тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$), відносну величину спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$). Результати вимірювань та розрахунків занести в таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Результати вимірів перехідної характеристики

Положення перемикача контрольних точок	Вимірювані параметри					Розраховані параметри				Примітки
	амплітуда U, В	тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{зр}}$)	тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$)	відносна величина спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$)	форма імпульсу	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		
						Раз	дБ	Раз	дБ	
1										Cp=10мкФ, Ce=50мкФ, Cк=5пФ, RH=∞
2										
3										

8. Перевести перемикач комутуючий контрольні точки стенду в положення 2, замалювати осцилограму вхідного сигналу підсилювача. За допомогою цифрового осцилографа по осцилограмі визначити наступні параметри імпульсного сигналу: тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{зр}}$), тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$), відносну величину спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$). Результати вимірювань та розрахунків занести в таблицю 3.1

9. Перевести перемикач комутуючі контрольні точки стенду у положення 3, замалювати осцилограму вхідного сигналу підсилювача. За допомогою цифрового осцилографа по осцилограмі визначити наступні параметри імпульсного сигналу: тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{зр}}$), тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$), відносну величину спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$). Результати вимірювань та розрахунків занести в таблицю 3.1

10. Дослідити вплив величини розділових конденсаторів на форму сигналу прямокутної форми що підсилюється. Для цього встановити перемикач «Ср» в нижнє положення ($C_p = 0,1 \text{ мкФ}$) і повторити вимірювання по пунктах 7–9 заносючи результати в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірів перехідної характеристики

Положення перемикача контрольних точок	Вимірювані параметри					Розраховані параметри				Примітки
	амплітуда U, В	тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{пр}}$)	тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$)	відносна величина спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$)	форма імпульсу	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		
						Раз	дБ	Раз	дБ	
1										Ср=0,1мкФ, Се=50мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
2										
3										

11. Дослідити вплив величини конденсаторів в ланцюзі емітера на форму сигналу прямокутної форми що підсилюється. Для цього встановити перемикач «Ср» у верхнє положення (Ср = 10мкФ), перемикач «Се» в нижнє положення (Се = 5,0 мкФ) і повторити вимірювання по пунктах 7–9 заносючи результати в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати вимірів перехідної характеристики

Положення перемикача контрольних точок	Вимірювані параметри					Розраховані параметри				Примітки
	амплітуда U, В	тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{пр}}$)	тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$)	відносна величина спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$)	форма імпульсу	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		
						Раз	дБ	Раз	дБ	
1										Ср=10мкФ, Се=5,0мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
2										
3										

12. Дослідити спільний вплив величини конденсаторів в ланцюзі емітера і розділових конденсаторів на форму сигналу прямокутної форми що підсилюється. Для цього встановити перемикач «Ср» в нижнє положення ($C_p = 0,1 \text{ мкФ}$), перемикач «Се» в нижнє положення ($C_e = 5,0 \text{ мкФ}$) і повторити вимірювання по пунктах 7–9 заносючи результати в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати вимірів перехідної характеристики

Положення перемикача контрольних точок	Вимірювані параметри					Розраховані параметри				Примітки
	амплітуда U, В	тривалість наростання імпульсу (τ_p)	тривалість спаду імпульсу ($\tau_{сп}$)	відносна величина спаду плоскої вершини ($\Delta U_{сп}$)	форма імпульсу	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		
						Раз	дБ	Раз	дБ	
1										Ср=0,1мкФ, Се=5,0мкФ, Ск=5пФ, Rн=∞
2										
3										

13. Дослідити вплив величини конденсаторів в ланцюзі колектора на форму підсилюється сигналу прямокутної форми. Для цього встановити перемикач «Ср» у верхнє положення ($C_p = 10 \text{ мкФ}$), перемикач «Се» у верхнє положення ($C_e = 50 \text{ мкФ}$), перемикач «Ск» у верхнє положення ($C_k = 1500 \text{ пФ}$) і повторити вимірювання по пунктах 7–9 заносючи результати в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати вимірів перехідної характеристики

Положення перемикача контрольних точок	Вимірювані параметри					Розраховані параметри				Примітки
	амплітуда U, В	тривалість наростання імпульсу ($\tau_{\text{пр}}$)	тривалість спаду імпульсу ($\tau_{\text{сп}}$)	відносна величина спаду плоскої вершини ($\Delta U_{\text{сп}}$)	форма імпульсу	Коефіцієнт підсилення 1 каскаду		Коефіцієнт підсилення 2 каскаду		
						Раз	дБ	Раз	дБ	
1										Ср=10мкФ, Се=50мкФ, Ск=1500пФ, Rн=∞
2										
3										

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- схеми вимірювань;
- результати вимірювання;
- осцилограми імпульсів що підсилюються;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Яким чином досліджують перехідну характеристику підсилювального каскаду?
2. Якими параметрами характеризується перехідна характеристика?
3. Обґрунтуйте як і на які параметри перехідної характеристики впливає величина ємності розділових конденсаторів?
4. Обґрунтуйте як і на які параметри перехідної характеристики впливає величина ємності конденсаторів в колі емітера?
5. Обґрунтуйте як і на які параметри перехідної характеристики впливає величина ємності конденсаторів в колі колектора?

Лабораторна робота № 4

Дослідження характеристик та параметрів інвертуючої схеми включення операційного підсилювача

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, дослідження основних параметрів і зняття характеристик операційного підсилювача (ОП), дослідження ОП як масштабного інвертуючого підсилювача.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для визначення таких параметрів ОП як коефіцієнт підсилення, вхідний та вихідний опір. Після побудови амплітудно–частотної характеристики визначити полосу пропускання масштабного інвертуючого підсилювача.

1.3 Коротке ознайомлення зі стендом: Для проведення лабораторних робіт по дослідженню характеристик та параметрів ОП в різноманітних схемах включення необхідно ознайомитись з лабораторним стендом, який дозволяє вирішити широке коло задач, що виникають при дослідженні електронних і мікроелектронних елементів і схем. Такий стенд має широкі функціональні можливості для дослідження схем, достатній мінімум зовнішньої контрольно–вимірювальної апаратури, характеризуватися простотою сполучень досліджуваних схем із зовнішньою вимірювальною апаратурою; стенд виконаний на сучасній елементній базі. У склад стенду входять: окремі функціональні схеми призначені для дослідження із можливістю зміни окремих елементів схеми; внутрішні контрольно–вимірювальні пристрої, призначені для генерації тестових сигналів різної форми та вимірювання частоти та амплітуди сигналів; блок живлення та роз'єкти для підключення зовнішніх пристроїв контрольно–вимірювальної апаратури. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 4.1.

Усі функціональні схеми призначені для досліджень розташовані в центральній області передньої панелі пристрою, і займають більшу її частину.

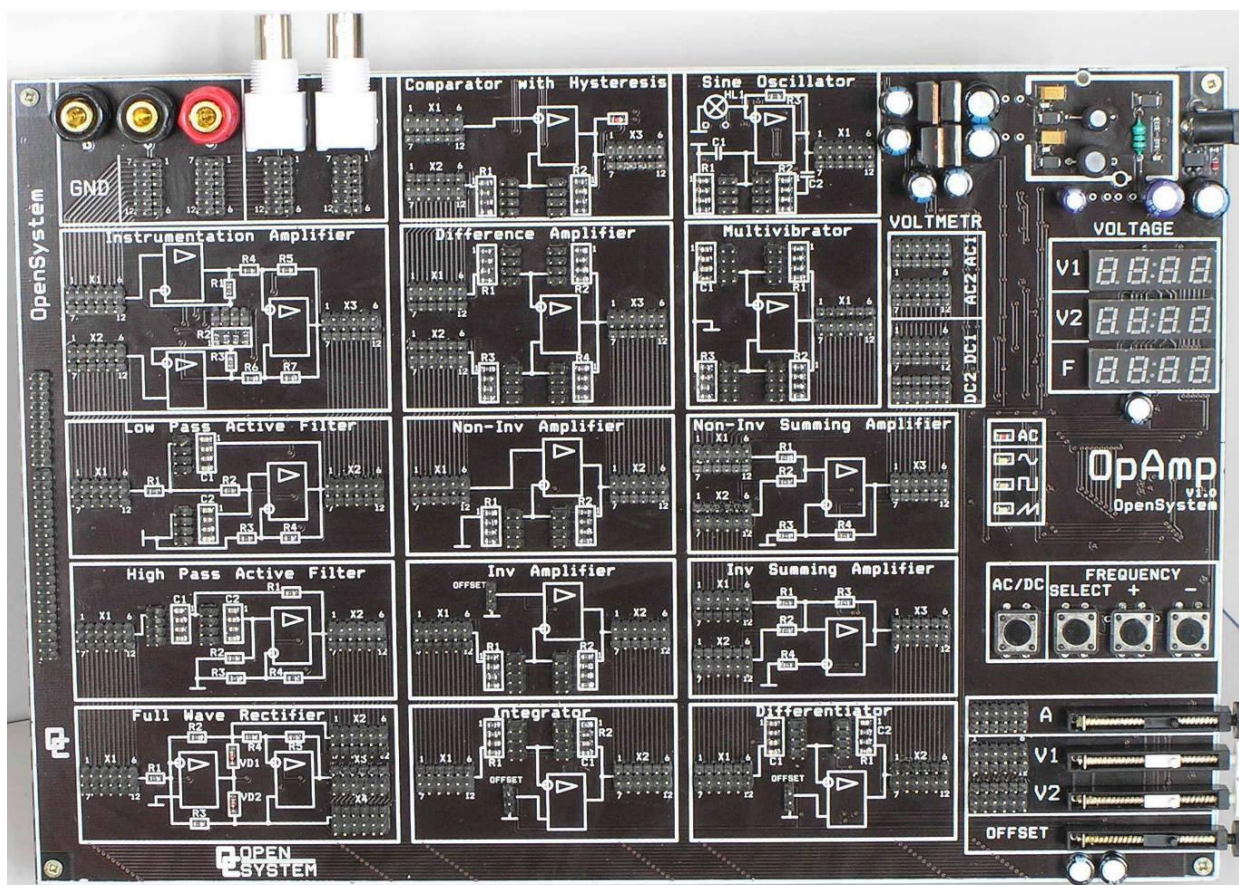


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд лабораторного стенду

Стенд дає можливість дослідити наступні функціональні схеми :

- інверсний підсилювач (Inv Amplifier);
- не інверсний підсилювач (Non-Inv Amplifier);
- інверсний суматор (Inv Summing Amplifier);
- не інверсний суматор (Non-Inv Summing Amplifier);
- диференційний підсилювач (Difference Amplifier);
- інструментальний підсилювач (Instrumentation Amplifier);
- інтегратор (Integrator);
- диференціатор (Differentiator);
- фільтр низьких частот (Low Pass Active Filter);
- фільтр високих частот (High Pass Active Filter);
- мультивібратор (Multivibrator);
- генератор синусоїдальних коливань (SinOscillator);
- випрямляч середніх значень (Full Wave Rectifier);
- компаратор (Comparator).

Кожна функціональна схема, яка призначена для дослідження організована наступним чином. Для кращого зорового сприйняття кожна функціональна схема на передній панелі виділена за допомогою білого прямокутника, а також представлена її принципова схема. В місцях зображення входів та виходів схеми, встановлені відповідні конструктивні елементи призначені для підведення вхідних та виведення вихідних сигналів. Для виконання досліджень схем згідно індивідуальних завдань, передбачена можливість зміни значень окремих елементів схеми: резисторів та конденсаторів. В кожній схемі використано один, два або чотири елементи, значення яких можна змінювати за допомогою перестановки джамперів як це показано на рис 4.2.

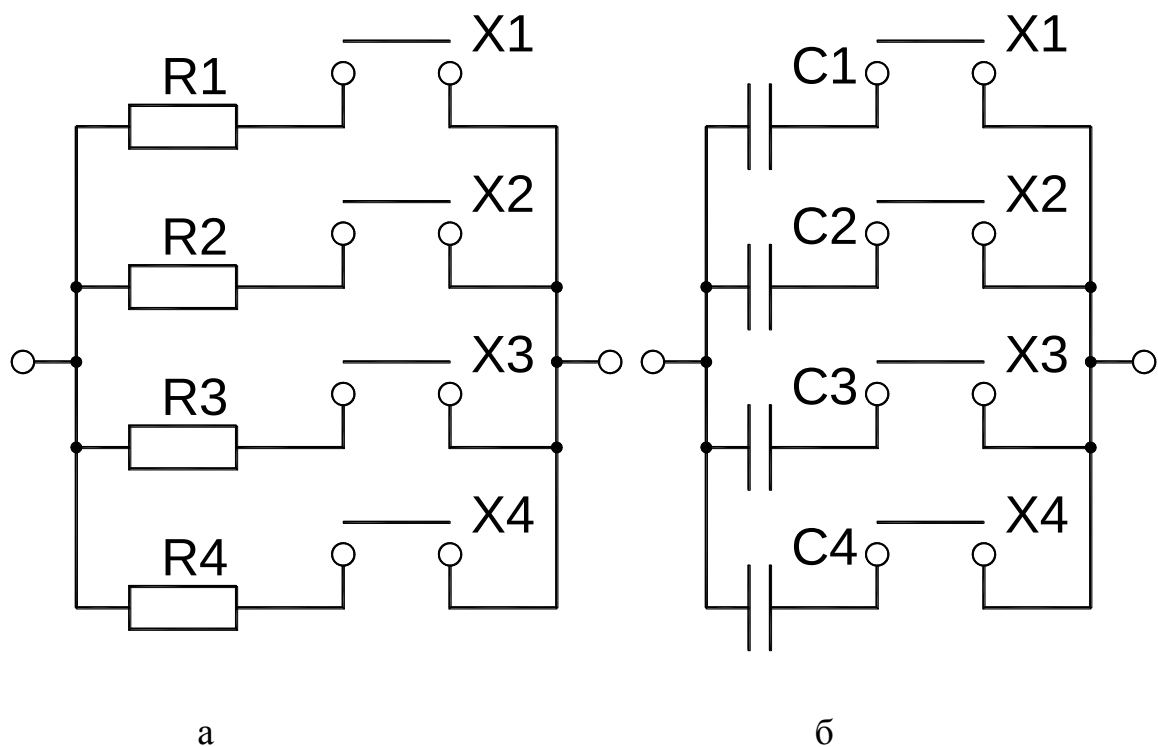


Рисунок 4.2 – Принципові схеми включення резисторів (а) та конденсаторів (б) які можна змінювати в лабораторному стенді

Усі внутрішні контрольно-вимірювальні пристрої розташовано в правій частині лабораторного стенду. До їх складу входять:

- два вольтметра;
- функціональний генератор;
- частотомір сигналів внутрішнього генератора;

- кнопка вибору форми сигналу із відповідною індикацією світлодіодами (синусоїдальної, прямокутної та трикутної);
- два змінних резистори які задають постійні напруги;
- змінний резистор, що задає напругу зміщення для деяких схем які досліджуються.

Блок живлення розташовано в верхній правій частині передньої панелі. Розняття для підключення зовнішньої контрольно–вимірювальної апаратури розміщено у верхній лівій частині пристрою. До групи розняттів включено:

- два розняття для підключення зовнішніх контрольно–вимірювальних приладів (типу BNC);
- три розняття для підключення штирових виводів, один з яких з'єднано із загальною шиною 0 В.

Для організації внутрішніх зв'язків між окремими блоками лабораторного стенду використано 12 внутрішніх ліній зв'язку, конструктивно які виконано дванадцятьма друкованими провідниками. За допомогою перемичок будь–яку із ліній можна з'єднати із входом або виходом будь–якої функціональної схеми, внутрішнім контрольно–вимірювальним пристроєм, розняттям. Конструктивне виконання перемичок наступне. Біля кожного входу або виходу розташовано група штирьових контактів розміщених в три ряди. Центральний ряд контактів з'єднаний між собою та входом або виходом відповідного блоку макету. Контакти розміщені в крайніх рядах з'єднані кожний із своєю лінією зв'язку. Нумерація ліній проводиться від першої до шостої та від сьомої до дванадцятої лінії, біля яких розміщені відповідні цифрові позначки. Для підключення входу або виходу до відповідної лінії потрібно, надягнути на один із центральних штирків та штирок із відповідним номером на крайніх рядах, перемичку. Для розміщення перемичок використовується тридцять подвійних груп штирьових виводів в лівій частині передньої панелі лабораторного макету, які не під'єднані до жодного кола електричної схеми макету.

Внутрішній блок живлення лабораторного макету забезпечує напругу живлення схем на ОП – $\pm 12\text{В}$.

Вольтметри вимірюють напругу в діапазоні від $\pm 12\text{В}$, з похибкою не більше $\pm 2,5\%$.

Внутрішній генератор сигналів забезпечує встановлення вихідної частоти в діапазоні частот від $0,1\text{ кГц}$ до 100 кГц .

1.4 Короткі теоретичні відомості:

Досліджуваний підсилювач називається операційним тому, що він може використовуватися для виконання різних математичних операцій над сигналами: алгебраїчного додавання, віднімання, множення на постійний коефіцієнт, інтегрування, диференціювання, логарифмування і т.і. Операційним часто називають підсилювач напруги з великим коефіцієнтом підсилення, охоплений колом негативного зворотного зв'язку, що визначає основні якісні показники і характер виконуваних підсилювачем операцій. Сучасний ОП виконується на базі інтегральної мікросхеми операційного підсилювача (ІМС ОП), до виводів якої, крім кола негативного зворотного зв'язку, підключаються джерела живлення, ланцюги вхідних сигналів, опіру навантаження, кола корекції частотних характеристик ОП та інші кола.

ОП – це підсилювач постійного струму (ППС), його амплітудно–частотна характеристика не має завалу в області низьких частот, оскільки ОП не містить розділових конденсаторів. Для того щоб під час відсутності вхідних сигналів потенціал виходу можна було привести до нуля (до потенціалу загального проводу – «землі»), живлення ОП роблять двополярним і, зазвичай, симетричним (в стенді $\pm 12\text{ В}$).

На рис. 4.3 показано умовне зображення ОП з одним виходом і двома входами: прямим і інверсним. Інверсний вхід 2 позначають знаком інверсії (кружком) або позначають знаком «–». Прямий вхід 1 не має знака інверсії або його позначають знаком «+».

У загальному випадку на вхідні виводи ОП 1 і 2 надходять напруги $U_{\text{вх1}}$ і $U_{\text{вх2}}$, що називають напругами загального виду.

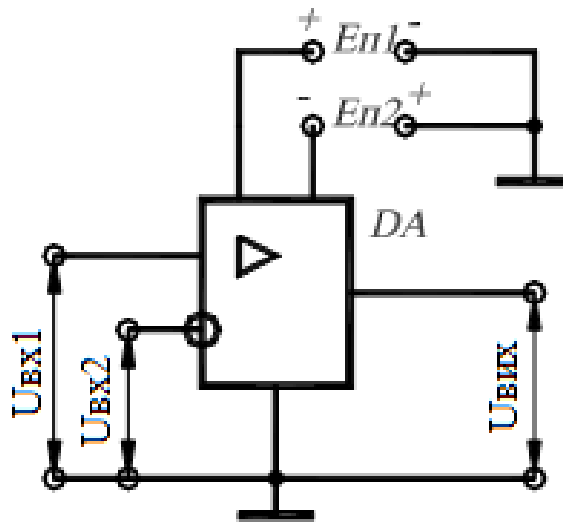


Рисунок 4.3 – Умовне зображення ОП

З них виділяють синфазний $U_{cf} = \frac{U_{вх1} + U_{вх2}}{2}$ і диференціальний $U_{диф} = U_{вх1} - U_{вх2}$ сигнали. Відносно U_{cf} потенціал на входному виводі 1 вище, та на входному виводі 2 — нижче на значення ΔU , а диференціальний (різницевий) сигнал $U_{диф} = 2\Delta U$. Операційний підсилювач призначений для підсилення невеликого різницевого (диференціального) сигналу.

Синфазний сигнал для схеми ОП має бути максимально ослаблений. Вихідна напруга $U_{вих}$ знаходиться у фазі (синфазна) з напругою на вході 1 $U_{вх1}$ і протифазна напрузі на вході 2 $U_{вх2}$.

Два правила, справедливі для ідеального ОУ. Правило 1. Якщо ОП знаходиться в лінійному режимі (вихідна напруга $U_{вих} \neq +U_{нас} \neq -U_{нас}$), різниця напруги між його входами дорівнює нулю ($U_{вх(+)} = U_{вх(-)}$).

ОП є хорошим підсилювачем напруги з великим входним опором. Для ідеального ОУ опори обох входів можна вважати рівними нескінченності. Звідси випливає друга важлива правило.

Правило 2. Входи ОУ струму не споживають.

На рисунку 4.4 приведені амплітудні характеристики ОП для випадків: 1 — входний сигнал подається на інвертуючий вхід, а неінвертуючий вхід 1 заземлений в результаті чого вихідна напруга $U_{вих}$ протифазна входній напрузі $U_{вх2}$; 2 — входний сигнал подається на неінвертуючий вхід, а

інвертуючий вхід заземлений в результаті чого вихідна напруга $U_{вих}$ синфазна $U_{вх1}$.

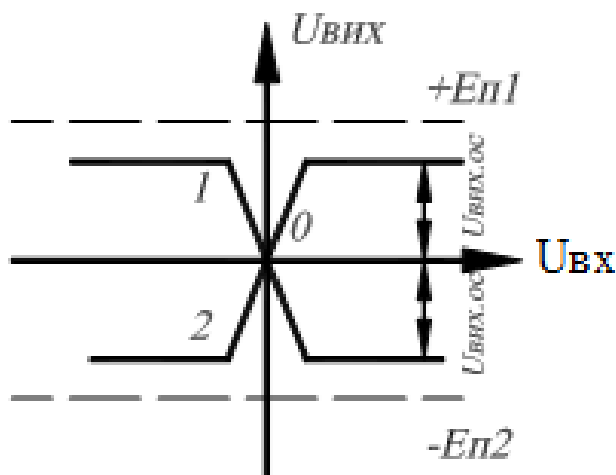


Рисунок 4.4 – Амплітудні характеристики ОП

Якщо $U_{вх} = 0$, то і $U_{вих} = 0$, що відображує умову балансу ОП. За відсутності зовнішнього кола зворотного зв'язку нахили амплітудних характеристик 1, 2 визначаються коефіцієнтом підсилення напруги ОП

$$K_{ОП} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{диф}}.$$

Характерною для амплітудних характеристик ОП є наявність двох областей насичення: $+U_{вих.нас}$ і $-U_{вих.нас}$, при досягненні яких вихідна напруга залишається постійною і не залежить від змін вхідної напруги.

В залежності від того, на які входи ОП подаються вхідні сигнали, розрізняють дві схеми включення ОП в інтегральному виконанні: інвертуюча, неінвертуюча.

Ці схеми мають ряд загальних особливостей: 1 – наявність елементів негативного зворотного зв'язку (НЗЗ); 2 – при виведенні аналітичних виразів

для оцінки основних параметрів ОП приймають значення $U_{диф} = \frac{U_{вих}}{K_{ОП}} \approx 0$, тому що ІМС ОП має дуже високий коефіцієнт підсилення напруги ($K_{ОП} \rightarrow \infty$); 3 – вхідний струм вважають рівним нулеві, тому що ІМС ОП має високий вхідний опір ($R_{вх ОП} \rightarrow \infty$).

Схема включення операційного підсилювача в інвертуючому режимі представлена на рис. 4.5. У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід ІМС ОП, а його неінвертуючий вхід заземлений.

Підсилювач називається інвертуючим, тому що вихідна напруга $U_{ВНХ}$ інвертована (протифазна) стосовно вхідної напруги $U_{ВХ}$. Негативний зворотний зв'язок створюється за допомогою резисторів $R_2 > R_1$ (рівнобіжна НЗЗ по напрузі).

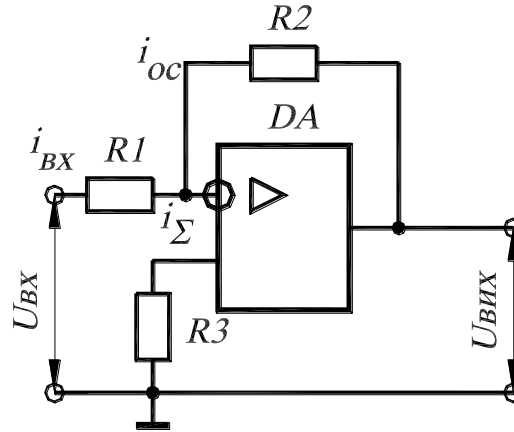


Рисунок 4.5 – Схема включення операційного підсилювача в інвертуючому режимі

Тому що вхідний струм ІМС ОП $i_{ВХОП} = i_{\Sigma} \approx 0$, то справедливе співвідношення

$$i_{ВХ} \approx i_{33}$$

Оскільки диференційна вхідна напруга ІМС ОП $U_{диф} \approx 0$ $K_{УОП} \rightarrow \infty$, а $R_{вирх\ ОП} \rightarrow \infty$, то:

$$\begin{aligned} i_{вх} &= U_{вх} / R_1, \\ i_{OC} &= -U_{вих} / R_2. \end{aligned}$$

Вихідна напруга в останньому виразі входить зі знаком мінус, тому що вона протифазна вхідній напрузі. На підставі цього співвідношення одержимо вираз для визначення коефіцієнта підсилення напруги схемою інверсного підсилювача:

$$K_{УОП} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Якщо ввести позначення глибини НЗЗ:

$$\beta_{оос} = \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

яка при виконанні умови $R_2 > R1$ дорівнює:

$$\beta_{оос} \approx \frac{R_1}{R_2},$$

то:

$$K_{уоп} \approx -\frac{1}{\beta_{оос}}.$$

Якщо $R1=R2$, то $K_{уоп} = -1$ і ОП стає інвертуючим повторювачем напруги, у якого:

$$U_{вих} = -U_{вх}.$$

Вхідний опір інвертуючого ОП дорівнює:

$$R_{вхОП} = R_1,$$

а його вихідний опір дорівнює:

$$R_{вихОП} = \frac{R_{вихОП}}{1 + \beta_{оос} K_{оп}}.$$

Неінвертуючий вхід ІМС ОП через резистор $R3$ з'єднаний із землею, тому його потенціал дорівнює нулеві а, отже, дорівнює нулеві і потенціал інвертуючого входу тому що $U_{диф} \approx 0$. Тому на входах даної ІМС ОП синфазний сигнал відсутній. У зв'язку з тим що $R_{вх}$ реальної мікросхеми ОП не дорівнює нескінченності, то через її входи протікають незначні вхідні

струми, що при $U_{ex} = 0$ можуть викликати випадкові зміни вихідного сигналу. Для їхньої компенсації потрібно забезпечити рівність опорів входів

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

ІМС ОП. Тому в схему введений резистор

1.5 Порядок виконання роботи:

1. Ознайомитися з органами управління цифрового осцилографа DS5000, стенда, підготувати їх до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Схема для дослідження операційного підсилювача в інвертуючому режимі

3. На лабораторному стенді в полі Inv Amplifier зібрати схему підсилювача, використавши значення елементів за вар. №1 з таблиці 4.1. З'єднати за допомогою джамперів неінвертуючий вхід з загальним проводом «землею» (встановити джампер на роз'єднувач «offset»). Інвертуючий вхід схеми з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді і включити його в режим вимірювання постійного струму для чого встановити джампер в полі «voltmeter», секції «DC», позиція 1. Для переведення вольтметрів V1 та V2 в режим вимірювання постійного струму натиснути кнопку «AC/DC». При цьому повинен згаснути світлодіод «AC». А також до шини №1 підключити джерело V1 вхідного сигналу і включити його в режим постійної напруги. З'єднати вихід ОП з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 який розташований в стенді, включити його в режим вимірювання постійного струму. Включити стенд за

допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця. 4.1 – Номінали елементів схеми дослідження інвертуючого підсилювача

№ вар.	1	2	3
R1, кОм	1	2	5
R2, кОм	10	15	20

4. Зняти амплітудну характеристику підсилювача. Для цього встановити вхідну напругу згідно таблиці 4.2 контролюючи її за допомогою вольтметра V1. Провести вимірювання вихідної напруги підсилювача за допомогою вольтметра V2. Результати занести до таблиці 4.2. За результатами вимірів побудувати амплітудну характеристику інвертуючого ОП.

Таблиця 4.2 – Результати вимірів амплітудної характеристики інвертуючого ОП

№вар	Виміряні параметри																	Розрах– овані
	Uвх		R1=1к, R2=10к	R1=2к, R1=15к	R1=5к, R1=20к													$K_{УОП}$
	-2																	
	-1,5																	
	-1																	
	-0,8																	
	-0,6																	
	-0,3																	
	-0,1																	
	0																	
	0,1																	
	0,3																	
	0,6																	
	0,8																	
	1																	
	1,5																	
	2																	
	2,5																	

5.Змінити величини резисторів R1 та R2 згідно номеру варіанта за таблицею 4.2. і повторити дії вказані в п.4. За результатами вимірів побудувати на одному графіку амплітудні характеристики інвертуючого ОП.

6. Відключити від шини №1 джерело постійної напруги. Підключити до шини №1 генератор сигналів, для чого в полі «А» встановити джампер в позицію 1. Встановити синусоїдальну форму його вихідного сигналу. При

цьому повинен горіти світлодіод «~». Для переходу з однієї форми вихідного сигналу на іншу треба натиснути кнопку «SELECT» в полі «FREQUENCY». Перевести вольтметри в режим вимірювання змінної напруги для чого встановити джампери у відповідні позиції в полі «voltmeter», секції «АС». Для переводу вольтметрів V1 та V2 в режим вимірювання постійного струму натиснути кнопку «АС/DC». При цьому повинен горіти світлодіод «АС».

7. Встановити частоту вихідного сигналу генератора 1000Гц. Для зміни частоти потрібно натиснути кнопку «+» в полі «FREQUENCY» (якщо потрібно збільшити частоту), або кнопку «-» (якщо потрібно зменшити частоту). Частота генератора індицирується в полі «F». За допомогою цифрового осцилографа візуалізувати форму вихідного сигналу ОП. Якщо вихідний сигнал має нелінійні спотворення (обмеження) зменшити рівень вхідного сигналу за допомогою регулятора вихідної напруги генератора доки спотворення вихідного сигналу будуть відсутні.

8. Встановити частоту вихідного сигналу генератора, та величини резисторів за допомогою джамперів згідно таблиці 4.3. Виконати вимірювання вихідної напруги ОП. Результати занести в таблицю 4.3. Повторити виміри змінюючи частоту генератора. Побудувати амплітудно–частотну характеристику (АЧХ) ОП в напівлогарифмічному масштабі.

Таблиця 4.3 – Результати вимірів АЧХ інвертуючого ОП

№вар	Виміряні параметри														Розраховані параметри	
	фвх. Гц	20	60	100	200	500	1000	5000	10000	15000	20000	25000	50000	100000	$K_{УОП}$	Δf , кГц
R1=1к, R2=10к	Uвх															
R1=2к, R1=15к	Uвх															
R1=5к, R1=20к	Uвх															

9. Змінити величини резисторів R_1 та R_2 згідно номеру варіанта за таблицею 5.3. і повторити дії вказані в п.8. За результатами вимірів побудувати на одному графіку АЧХ інвертуючих ОП.

10. Розрахувати величину полоси пропускання інвертуючого ОП для різних варіантів встановлених резисторів.

11. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

1.6 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання окремих точок амплітудних характеристик та АЧХ ОП;
- результати розрахунків полоси пропускання ОП при різних коефіцієнтах підсилення;
- висновки по роботі.

1.7 Контрольні питання

1. Охарактеризуйте призначення, параметри, характеристики й особливості застосування ОП.

2. Наведіть інвертуючі схеми включення ОП, визначте їхні основні параметри та характеристики.

3. Охарактеризуйте інвертуючі повторювачі напруги і приведіть їхню схемну реалізацію.

4. Накресліть амплітудно–частотну характеристику ІМС ОП й операційного підсилювача, виконаного на ІМС ОП, що вміщує елементи негативного зворотного зв'язку. Порівняйте ці характеристики і зробіть висновки.

5. Як здійснюється і для чого призначена корекція частотних характеристик ІМС ОП?

Лабораторна робота № 5

Дослідження характеристик та параметрів неінвертуючої схеми включення операційного підсилювача

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, дослідження основних параметрів і зняття характеристик операційного підсилювача (ОП), дослідження ОП як масштабного неінвертуючого підсилювача.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для визначення таких параметрів ОП як коефіцієнт підсилення, вхідний та вихідний опір. Після побудови амплітудно–частотної характеристики визначити полосу пропускання масштабного неінвертуючого підсилювача..

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Схема включення операційного підсилювача в неінвертуючому режимі представлена на рис. 5.1.

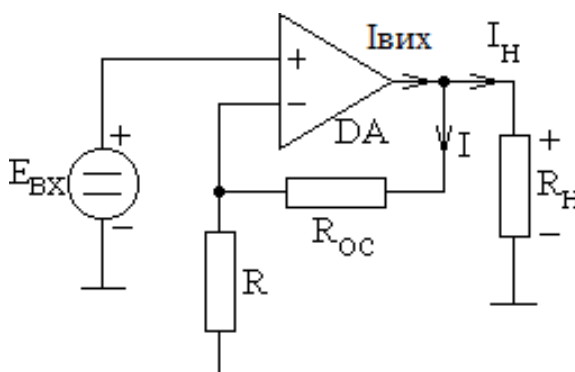


Рисунок 5.1 – Схема включення операційного підсилювача в неінвертуючому режимі

На відміну від інвертуючого, неінвертуючий підсилювач володіє великим вхідним опором. Згідно правилам 1 і 2 струм в ланцюзі зворотного зв'язку $I = E_{BX}/R$ і створює падіння напруги на резисторі R_{OC} яке дорівнює $E_{BX} R_{OC}/R$.

Враховуючи, що вихідна напруга складається з падінь напруг на резисторі R_{OC} і R можна записати:

$$U_{BIX} = E_{BX} + E_{BX} \cdot \frac{R_{OC}}{R} = E_{BX} \cdot \left(1 + \frac{R_{OC}}{R}\right) = E_{BX} \cdot K_{OC},$$

де $K_{OC}=(1+R_{OC}/R)$ – коефіцієнт передачі напруги неінвертуючий підсилювачем.

Порівнюючи формули коефіцієнта підсилення для інвертуючої схеми включення і неінвертуючої схеми включення неважко помітити, що коефіцієнт підсилення по напрузі неінвертуючого підсилювача дорівнює абсолютній величині коефіцієнта посилення інвертуючого підсилювача плюс одиниця.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 5.2.

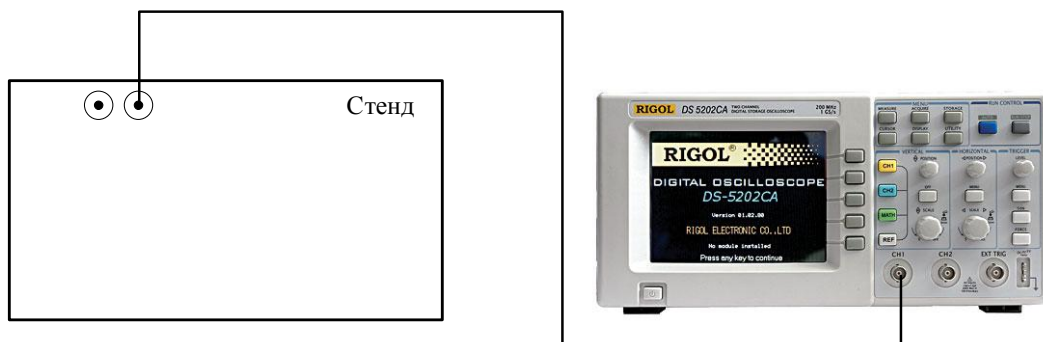


Рисунок 5.2 – Схема для дослідження операційного підсилювача в неінвертуючому режимі

3. На лабораторному стенді в полі Non – Inv Amplifier зібрати схему підсилювача, використавши значення елементів за вар. №1 з таблиці 5.1. З'єднати за допомогою джамперів неінвертуючий вхід з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу V1 і включити його в режим постійної напруги. З'єднати вихід ОП з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму. Включити стенд за допомогою

вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця. 5.1 – Номінали елементів схеми дослідження неінвертуючого підсилювача

№	1	2	3
R1, кОм	0,75	1	1,5
R2, кОм	1	3	18

4. Зняти амплітудну характеристику підсилювача. Для цього встановити вхідну напругу згідно таблиці 5.2 контролюючи її за допомогою вольтметра №1. Провести вимірювання вихідної напруги підсилювача за допомогою вольтметра №2. Результати занести до таблиці 5.2. За результатами вимірів побудувати амплітудну характеристику неінвертуючого ОП.

Таблиця 5.2 – Результати вимірів амплітудної характеристики неінвертуючого ОП

№вар	Виміряні параметри																Розрах– овані
	U _{вх}																K_{UOP}
	-2																
	-1,5																
	-1																
	-0,8																
	-0,6																
	-0,3																
	-0,1																
	0																
	0,1																
	0,3																
	0,6																
	0,8																
	1																
	1,5																
	2																
	2,5																

5.Змінити величини резисторів R1 та R2 згідно номеру варіанта за таблицею 6.2. і повторити дії вказані в п.4. За результатами вимірів побудувати на одному графіку амплітудні характеристики неінвертуючих ОП.

6. Відключити від шини №1 джерело постійної напруги. Підключити до шини №1 генератор сигналів. Встановити синусоїдальну форму його

вихідного сигналу. Перевести вольтметри в режим вимірювання змінної напруги.

7. Встановити частоту вихідного сигналу генератора 1000 Гц. За допомогою цифрового осцилографа візуалізувати форму вихідного сигналу ОП. Якщо вихідний сигнал має нелінійні спотворення (ограничення) зменшити рівень вхідного сигналу за допомогою регулятора вихідної напруги генератора доки спотворення вихідного сигналу будуть відсутні.

8. Встановити частоту вихідного сигналу генератора, та величини резисторів за допомогою джамперів згідно таблиці 5.3. Виконати вимірювання вихідної напруги ОП. Результати занести в таблицю 5.3. Повторити виміри змінюючи частоту генератора. Побудувати амплітудно–частотну характеристику (АЧХ) ОП в напівлогарифмічному масштабі.

Таблиця 5.3 – Результати вимірів АЧХ неінвертуючого ОП

№вар	Виміряні параметри														Розраховані параметри	
	fvх, Гц	20	60	100	200	500	1000	5000	10000	15000	20000	25000	50000	100000	$K_{УОП}$	Δf , кГц
R1=0,75к, R2=1к	Uвих															
R1=1к, R1=3к	Uвих															
R1=1,5к, R1=18к	Uвих															

9. Змінити величини резисторів R1 та R2 згідно номеру варіанта за таблицею 6.3. і повторити дії вказані в п.8. За результатами вимірів побудувати на одному графіку АЧХ неінвертуючих ОП.

10. Розрахувати величину полоси пропускання неінвертуючого ОП для різних варіантів встановлених резисторів.

11. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання окремих точок амплітудних характеристик та АЧХ ОП;
- результати розрахунків полоси пропускання ОП при різних коефіцієнтах підсилення;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Охарактеризуйте призначення, параметри, характеристики й особливості застосування неінвертуючого ОП.
2. Наведіть неінвертуючи схеми включення ОП, визначте їхні основні параметри та характеристики.
3. Охарактеризуйте неінвертуючи повторювачі напруги і приведіть їхню схемну реалізацію.
4. Накресліть амплітудно–частотну характеристику ІМС ОП й операційного підсилювача, виконаного на ІМС ОП, що вміщує елементи негативного зворотного зв'язку. Порівняйте ці характеристики і зробіть висновки.
5. Як здійснюється і для чого призначена корекція частотних характеристик ІМС ОП?

Лабораторна робота №6

Дослідження характеристик та параметрів схем суматорів на операційному підсилювачі

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, дослідження основних параметрів суматорів на основі ОП.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для визначення параметрів інвертуючого та неінвертуючого суматора.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Схема суматора з трьома входами представлена на рис. 6.1.

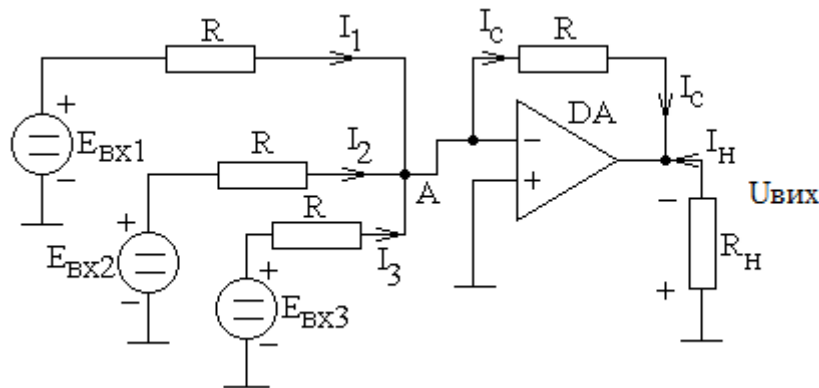


Рисунок 6.1 – Схема інвертуючого суматора з трьома входами

Потенціал підсумовує точки (точка А) дорівнює потенціалу землі. Тому:

$$I_1 = \frac{E_{BX1}}{R} \quad I_2 = \frac{E_{BX2}}{R} \quad I_3 = \frac{E_{BX3}}{R}.$$

Всі ці струми проходять через R_{OC} ($I_C = I_1 + I_2 + I_3$). Це означає, що I_1 , I_2 , I_3 не впливають один на одного, тому що потенціал точки А дорівнює потенціалу землі. Отже, входні напруги E_{BX1} , E_{BX2} , E_{BX3} не взаємодіють один з одним.

За аналогією з інвертує підсилювачем:

$$U_{вих} = -I_C \cdot R_{OC} = -(I_1 + I_2 + I_3) \cdot R_{OC}.$$

Або враховуючи, що $R_{OC} = R$

$$U_{вих} = -\left(\frac{E_{BX1}}{R} + \frac{E_{BX2}}{R} + \frac{E_{BX3}}{R}\right) \cdot R = -(E_{BX1} + E_{BX2} + E_{BX3}).$$

Якщо в схемі рис. 6.1 потрібно підсумувати тільки два вхідних сигналу (E_{BX1} , E_{BX2}), третій вхід можна просто з'єднати з загальним дротом «землею».

У разі необхідності підсумовування вхідних сигналів з різними ваговими коефіцієнтами доцільно використовувати схему рис. 6.2.

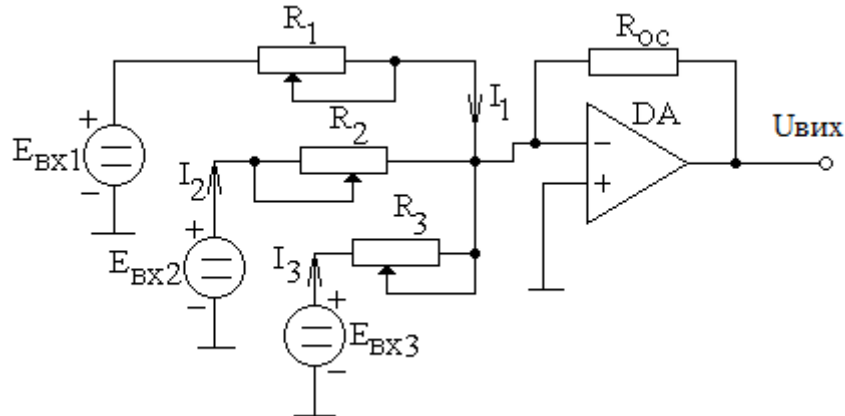


Рисунок 6.2 – Схема інвертуючого суматора з різними ваговими коефіцієнтами

Вихідна напруга суматора визначається аналогічно:

$$U_{вих} = -(I_1 + I_2 + I_3) R_{OC} = -\left(E_{BX1} \cdot \frac{R_{OC}}{R_1} + E_{BX2} \cdot \frac{R_{OC}}{R_2} + E_{BX3} \cdot \frac{R_{OC}}{R_3} \right).$$

Схема неінвертуючого суматора з двома входами представлена на рис.6.3.

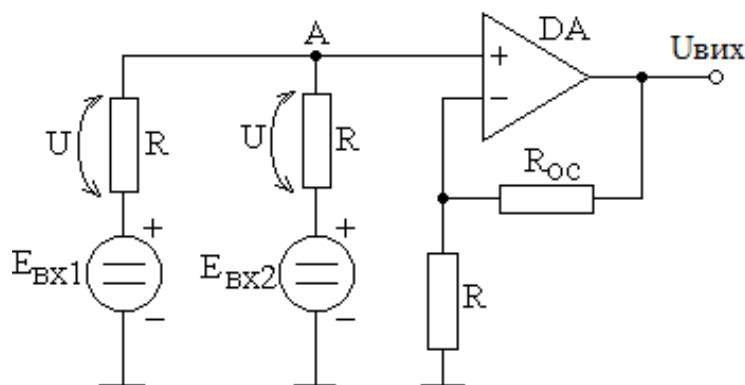


Рисунок 6.3 – Схема неінвертуючого суматора

У вхідному ланцюзі суматора різницю напруг $E_{BX1} - E_{BX2}$ розподіляється порівну між резисторами R так, що $U = (E_{BX1} - E_{BX2})/2$. Отже потенціал точки A

може бути визначений як сума падіння напруги на резисторі R і ЕРС джерела вхідного сигналу E_{BX2} :

$$U_A = U + E_{BX2} = \frac{E_{BX1} - E_{BX2}}{2} + E_{BX2} = \frac{E_{BX1} + E_{BX2}}{2}. \quad (6.1)$$

Якщо $R_{OC}=R$, коефіцієнт підсилення неінвертуючий підсилювача дорівнює 2. З урахуванням (6.1) вихідна напруга схеми виявляється рівним сумі вхідних напруг: $U_{ВИХ}=E_{BX1}+ E_{BX2}$.

У разі необхідності підсумовування більше двох вхідних напруг, величину опору зворотного зв'язку слід вибирати із співвідношення:

$$R_{OC} = R(n - 1),$$

де n – число входів суматора.

Тоді $U_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{BXi}$, $K_{OC}=n$ і вихідна напруга являє собою суму вхідних напруг:

$$U_{ВИХ} = \sum_{i=1}^n E_{BXi}.$$

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. На лабораторному стенді в полі Inv Summing Amplifie зібрати схему суматора. З'єднати за допомогою джамперів перший вхід інвертуючого суматора (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 (роз'єднувач DC1) який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу V1 і включити його в режим постійної напруги. З'єднати вихід ОП (роз'єднувач X3) з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 (роз'єднувач DC2) який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму. З'єднати за допомогою джамперів другий вхід інвертуючого

суматора (роз'єднувач X2) з'єднати з шиною №3. Також до шини №3 підключити джерело вхідного сигналу V2 і включити його в режим постійної напруги. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

3. З'ясувати величини опору резисторів які встановлені у вхідних колах та колі НЗС суматора та результати занести в таблицю 6.1.

4. Встановити на першому вході суматора напругу згідно таблиці 6.1 контролюючи її за допомогою вольтметра V1.

5. З'єднати за допомогою джамперів вольтметр V1 з шиною №3 і встановити на другому вході суматора напругу згідно таблиці 6.1 контролюючи її за допомогою вольтметра V1.

6. За допомогою вольтметра V2 виміряти величину напруги на виході суматора і її значення занести до таблиці 6.1. Розрахувати величину вихідної напруги суматора та занести результат до таблиці 6.1. Порівняти розраховану та отриману величину вихідної напруги.

Таблиця 6.1 – Результати дослідження інвертуючого суматора

№п/п	Виміряні параметри			Розраховані параметри	Параметри ланцюгів суматора
	U _{ВХ1} ,В	U _{ВХ2} ,В	U _{ВИХ} ,В	U _{ВИХ} ,В	
1	+0.5	-0.5			; R2= ; R4= ; R1= ; R3=
2	+0.5	+0.5			
3	+1	+1,5			
4	-1	-1,5			
5	+2	-3			

7. Змінити вхідні напруги суматора згідно таблиці 6.1. і повторити дії п4. – п6.

8. Виключити стенд за допомогою мережевого вимикача. При цьому повинен згаснути світлодіод індикації на стенді. Зняти всі джампери які з'єднують схему інвертуючого суматора з шинами внутрішнього зв'язку. На лабораторному стенді в полі Non-Inv Summing Amplifie з'єднати за допомогою джамперів перший вхід неінвертуючого суматора (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 (роз'єднувач DC1) який розташований в стенді включити його в режим

вимірювання постійного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу V1 і включити його в режим постійної напруги. З'єднати вихід ОП (роз'єднувач X3) з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 (роз'єднувач DC2) який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму. З'єднати за допомогою джамперів другий вхід неінвертуючого суматора (роз'єднувач X2) з'єднати з шиною №3. Також до шини №3 підключити джерело вхідного сигналу V2 і включити його в режим постійної напруги. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

3. З'ясувати величини опору резисторів які встановлені у вхідних колах та колі НЗЗ суматора та результати занести в таблицю 6.2.

4. Встановити на першому вході суматора напругу згідно таблиці 6.2 контролюючи її за допомогою вольтметра V1.

5. З'єднати за допомогою джамперів вольтметр V1 з шиною №3 і встановити на другому вході суматора напругу згідно таблиці 6.2 контролюючи її за допомогою вольтметра V1.

6. За допомогою вольтметра V2 виміряти величину напруги на виході суматора і її значення занести до таблиці 6.2. Розрахувати величину вихідної напруги суматора та занести результат до таблиці 6.2. Порівняти розраховану та отриману величину вихідної напруги.

Таблиця 6.2 – Результати дослідження неінвертуючого суматора

№п/п	Виміряні параметри			Розраховані параметри	Параметри ланцюгів суматора
	U_{BX1}, B	U_{BX2}, B	$U_{ВИХ}, B$	$U_{ВИХ}, B$	
1	+0.5	-0.5			$R1 =$; $R2 =$; $R3 =$; $R4 =$;
2	+0.5	+0.5			
3	+1	+1,5			
4	-1	-1,5			
5	+2	-3			

7. Змінити вхідні напруги суматора згідно таблиці 6.1. і повторити дії п4. – п6.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання напруги (вхідної та вихідної) інвертуючого та неінвертуючого суматорів;
- результати розрахунків вихідної напруги інвертуючого та неінвертуючого суматорів;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Наведіть схему електричну принципову інвертуючого та неінвертуючого суматорів.
2. Поясніть принцип дії суматора на ОП.
3. Наведіть формулу для розрахунку вихідної напруги інвертуючого суматора.
4. Наведіть формулу для розрахунку вихідної напруги неінвертуючого суматора.
5. Наведіть схему електричну принципову суматора з різними коефіцієнтами сумування.
6. Від яких елементів схеми суматора залежить коефіцієнт передачі суматора?
7. Яке співвідношення повинно виконуватися для того щоб коефіцієнт передачі окремого сигналу на вихід дорівнював одиниці?

Лабораторна робота № 7
Дослідження диференціатора на ОП

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик диференціюючого підсилювача побудованих на ОП, практичне дослідження схеми.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні осцилографування входних та вихідних сигналів диференціатора на ОП, вимірювання часових параметрів вихідного сигналу та визначення тривалості перехідних процесів на виході диференціатора.

1.3 Короткі теоретичні відомості: для визначення моменту комутації (точки комутації) в електричних колах особливо широке застосування знаходять у вимірювальній техніці диференційні ланцюги (рис 7.1).

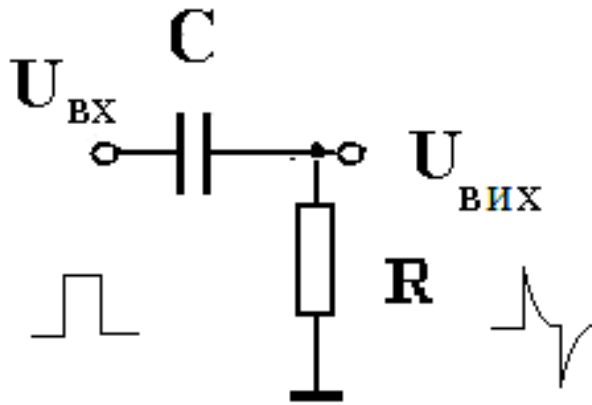


Рисунок 7.1 – Принципова схема диференційного ланцюга

У цей час диференційні ланцюги це фільтр верхніх частот (ФВЧ). Диференціювання дана схема здійснює відповідно до формули:

$$u_{\text{вих}}(t) \approx -RC \frac{du_{\text{вх}}}{dt}$$

Даній схемі властиві наступні недоліки: коефіцієнт передачі такої схеми дуже сильно залежить від параметрів елементів схеми, постійна часу диференціювання залежить від вхідного опору і вхідної місткості наступного каскаду. Таким чином, для поліпшення якості диференціювання необхідно зменшити постійну часу ланцюга, але при цьому знижуватиметься її коефіцієнт передачі, тобто зменшаться величина вихідного сигналу. Схема

диференціатора, побудована на основі ОУ (рис 7.2) вільна від даних недоліків.

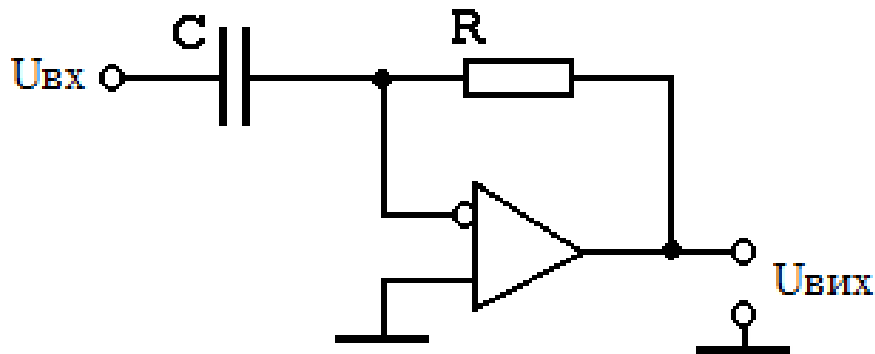


Рисунок 7.2 – Принципова схема диференціатора на ОУ

Диференціатор створює на виході напругу, пропорційну швидкості зміни вхідного

$$U_{\text{вих}} = -RC \frac{dU_1}{dt}$$

При диференціюванні підсилювач повинен пропускати тільки змінну складову вхідної напруги і коефіцієнт підсилення диференціюючої схеми повинен зростати при збільшенні швидкості зміни вхідного сигналу.

Струм через конденсатор має вигляд

$$I_c = C \frac{dU_c}{dt}$$

Напруга на конденсаторі рівна вхідній напрузі U_1 .

Якщо вважати, що ОУ ідеальний, то струм через опір ОС можна вважати рівним струму через конденсатор, тобто $I_r = I_c$

$$\text{Але } U_{\text{вих}} = R I_r = -R I_c, \text{ тому } U_{\text{вих}} = -RC \frac{dU_1}{dt}$$

Зменшення реактивного опору X_c із збільшенням частоти призводить до того, що схема диференціатора має високий коефіцієнт підсилення по відношенню до високочастотних складових на вході, навіть якщо їх частота лежить вище за смугу частот корисного сигналу.

Схема має тенденції до втрати стійкості в тій області частот, де частотна характеристика диференціатора (що має підйом 6 дБ/окт) перетинається з 6дБ/окт характеристикою скоректованого підсилювача, що має спад.

Частотна характеристика розімкненого контура ОС має в деякій частині свого частотного діапазону спад 12 дБ/окт, за цих умов можливо самозбудження.

Для усунення недоліків при побудові схеми диференціаторів застосовують динамічну стабілізацію (рис 7.3).

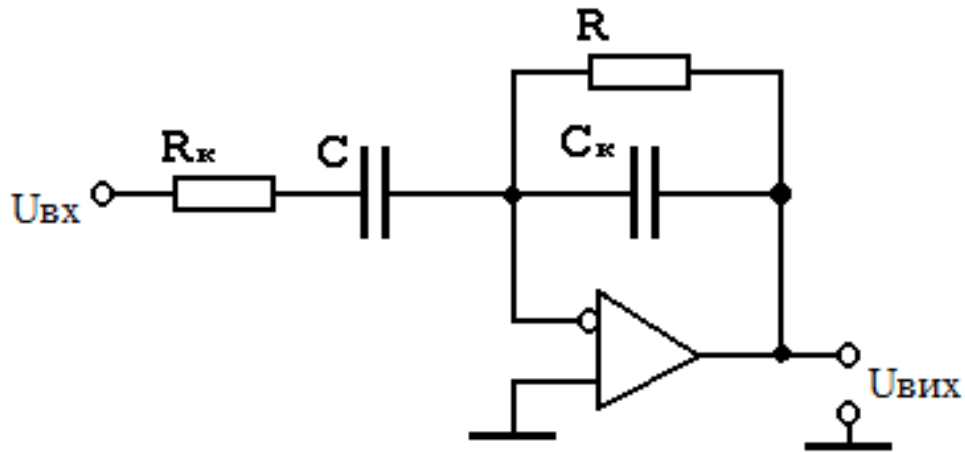


Рисунок 7.3 – Принципова схема диференціатора з елементами динамічної стабілізації

Конденсатор C_k вибирається так, щоб ділянка АЧХ із спадом 6 дБ/окт починався на частоті вищій, ніж максимальна частота корисного диференційованого сигналу. Таким чином зменшується частка ВЧ шумів у вихідному сигналі.

Ця ділянка починається на частоті $F_2 = \frac{1}{2\pi \cdot R C_k}$

Резистор R_k обмежує коефіцієнт підсилення на ВЧ, забезпечує динамічну стійкість. Частотна характеристика скоректованого диференціатора приведена рис. 7.4

Додавання R_k приводить до появи на АЧХ горизонтальної ділянки і припиненні диференціювання на частотах, що перевищують частоту:

$$F_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_k \cdot C}$$

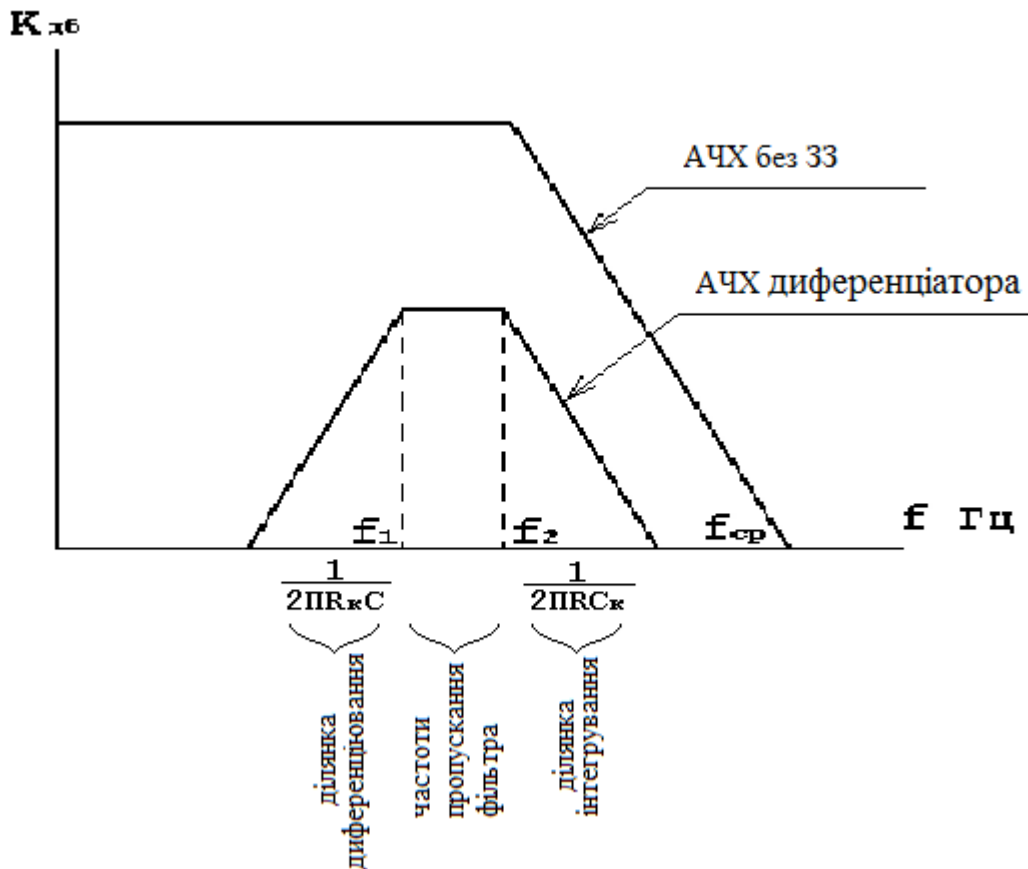


Рисунок 7.4 – Частотна характеристика скоректованого диференціатора

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 7.5.



Рисунок 7.5 – Схема для дослідження диференціатора

3. Для подальших розрахунків параметрів диференціатора враховувати що в макеті застосовано опори та ємності величини яких наведені табл.7.1

Таблиця 7.1. – Номінали резисторів та конденсаторів диференціатора

№	1	2	3	4
C, нФ	3,90	6,80	10	15
R, кОм	10	20	50	100

4. На лабораторному стенді в полі Differentiator зібрати схему диференціатора. З'єднати за допомогою джамперів вхід диференціатора (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вхід цифрового осцилографа (канал1), а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу А і включити його в режим генерації прямокутних імпульсів. З'єднати вихід ОП (роз'єднувач X3) з шиною №10. Також до шини №10 підключити другий вхід цифрового осцилографа (канал2). З'єднати за допомогою джампера неінвертуючий вхід ОП з загальним проводом. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

5. За допомогою джамперів встановити номінали елементів схеми диференціатора згідно таблиці 7.2.

6. Встановити частоту вихідного сигналу генератора прямокутних імпульсів 1000Гц та амплітуду 1В. За допомогою цифрового осцилографа (канал 1) отримати форму вихідного сигналу генератора який в свою чергу є вхідним сигналом диференціатора. Якщо амплітуда сигналу не дорівнює 1В тоді за допомогою регулятора А стенда провести її корегування.

7. За допомогою цифрового осцилографа (канал 2) отримати форму вихідного сигналу диференціатора. Провести вимірювання його амплітуди та тривалості і результати вимірювань занести до таблиці 7.2.

8. Змінити параметри диференціатора згідно таблиці 7.2 і повторити дії п.7.

Таблиця 7.2 – Результати вимірювання параметрів диференціатора

№	Встановлені параметри диференціатора		Виміряні параметри диференціатора		
	R	C	Форма $U_{вих}$	Амплітуда $U_{вих}$, В	Тривалість вихідного сигналу, мкс
1	10кОм	3,9 нФ			
2	10кОм	6,8 нФ			
3	10кОм	10 нФ			
4	10кОм	15 нФ			
5	20кОм	3,9 нФ			
6	20кОм	6,8 нФ			
7	20кОм	10 нФ			
8	20кОм	15 нФ			
9	50кОм	3,9 нФ			
10	50кОм	6,8 нФ			
11	50кОм	10 нФ			
12	50кОм	15 нФ			
13	100кОм	3,9 нФ			
14	100кОм	6,8 нФ			
15	100кОм	10 нФ			
16	100кОм	15 нФ			

9. Встановити номінали елементів схеми диференціатора згідно таблиці 8.2 (вар 13). Встановити частоту вихідного сигналу генератора прямокутних імпульсів 100Гц та амплітуду 1В. За допомогою цифрового осцилографа (канал 2) отримати форму вихідного сигналу диференціатора. Провести вимірювання його амплітуди та тривалості і результати вимірювань занести до таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Результати вимірювання параметрів диференціатора

Частота вх. сигн. $f_{вх}$, Гц	Встановлені параметри диференціатора		Виміряні параметри диференціатора		
	R	C	Форма $U_{вих}$	Амплітуда $U_{вих}$, В	Тривалість вихідного сигналу, мкс
100	100кОм	3,9 нФ			
100000	100кОм	3,9 нФ			

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- схему електричну принципову диференціатора;
- результати вимірювання параметрів вихідного сигналу диференціатора та його осцилограми;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Сформулюйте поняття комутації в електричних колах.
2. Поясніть поняття точки комутації.
3. Якому закону комутації підкоряються диференціюючи RC – кола?
4. Перерахуйте недоліки RC – кіл при диференціюванні прямокутних вхідних імпульсів?
5. За рахунок чого диференціатор виконаний з використанням ОП позбувається недоліків RC – кіл?
6. Наведіть схему електричну принципову диференціатора виконаного з використанням ОП
7. Від яких елементів схеми залежить тривалість вихідних імпульсів диференціатора?
8. Від яких елементів схеми залежить гранична частота роботи диференціатора?
9. Від чого залежить стабільність роботи диференціатора?
10. З яких міркувань вибирають величини ємності конденсаторів та резисторів диференціатора виконаного з використанням ОП.
11. До яких наслідків приводить збільшення номіналу резистора в колі ННЗ диференціатора?
12. До яких наслідків приводить зменшення номіналу конденсатора в колі ННЗ диференціатора?

Лабораторна робота № 8
Дослідження інтегратора на ОП

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик інтегруючого підсилювача побудованих на ОП, практичне дослідження схеми.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні осцилографування входних та вихідних сигналів інтегратора на ОП, вимірювання часових параметрів вихідного сигналу та визначення тривалості перехідних процесів на виході інтегратора.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Інтегруючим називається електричний ланцюг, в якому вихідна величина пропорційна інтегралу від входної величини (рис. 8.1). Широке застосування на практиці одержав інтегруючий RC -ланцюг.

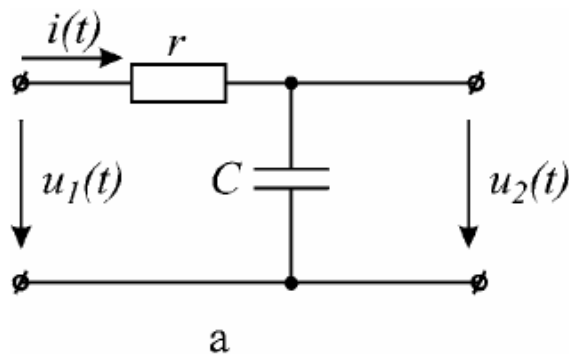


Рисунок 8.1 – Принципова схема інтегруючого ланцюга

Напруга на виході ланцюга

$$u_2 = \frac{1}{C} \int i dt .$$

Якщо напруга на конденсаторі складає малу частину від напруги на опорі, то струм $i(t)$ в ланцюзі буде пропорційний входній напрузі:

$$i(t) \approx \frac{u_1(t)}{r} ,$$

отже,

$$u_2(t) = u_c \approx \frac{1}{rC} \int u_1 dt.$$

Отже, при виконанні умови

$$u_c \ll u_r \text{ або } u_1 \approx u_r$$

ланцюг rC є інтегруючим.

При не синусоїдальному сигналі умова повинна виконуватися для гармонійної складової найменшої частоти ω_n , тобто частоти повторення вхідного сигналу. На практиці не обходжений виконати умову

$$C \geq \frac{10}{\omega r}.$$

Вихідна напруга інтегруючого rC -ланцюга при дії на його вході прямокутного імпульсу приведена на рисунку 8.2.

Вихідна напруга на конденсаторі в інтервалі часу від t_1 до t_2 змінюється згідно із законом

$$u_2(t) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Максимальна напруга на виході

$$U_{m \text{ вих}} = U \left(1 - e^{-\frac{t_H}{\tau}} \right).$$

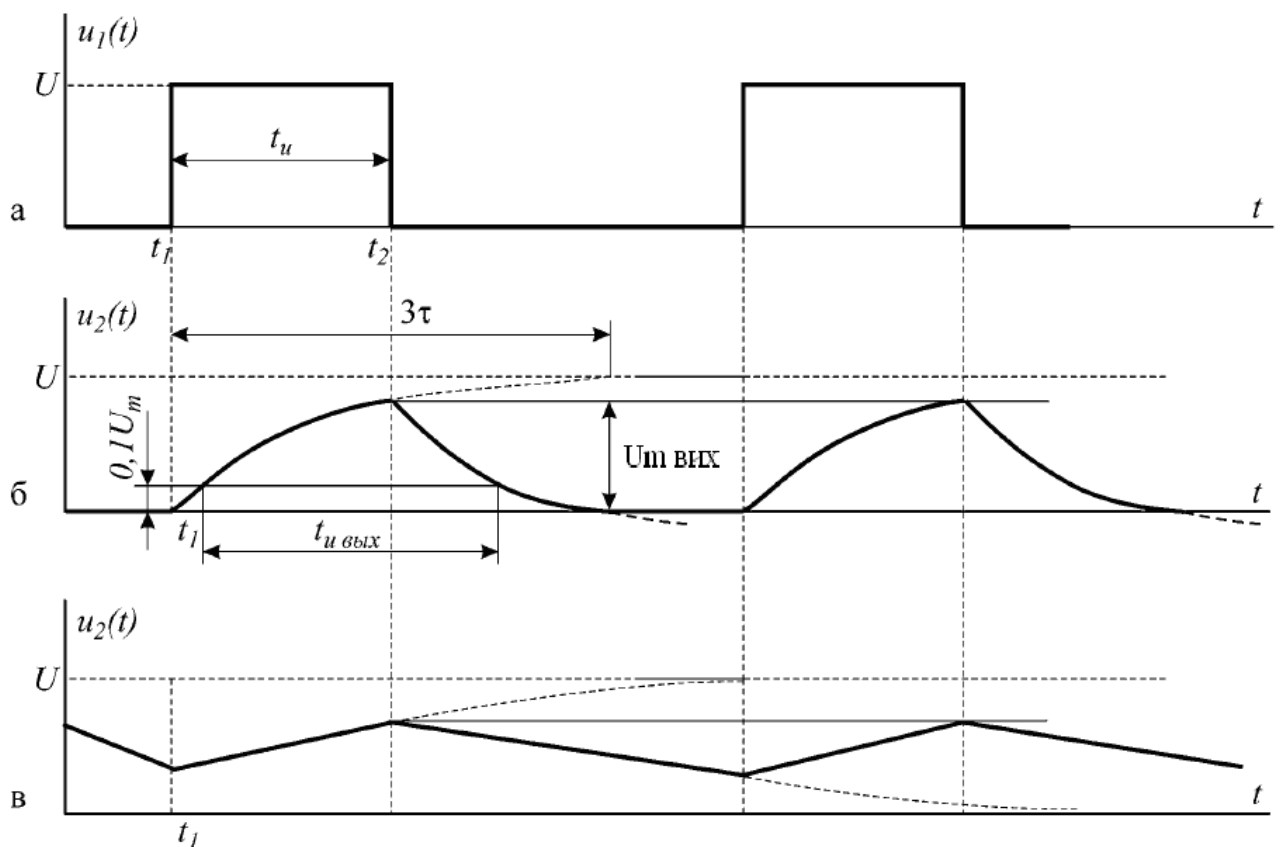


Рисунок 8.2 – Графік напруги реального інтегруючого ланцюга

За умови, що постійна часу τ ланцюги більше тривалості вхідного імпульсу, вихідна напруга на ділянці t_1 t_2 змінюється майже по лінійному закону, тобто вихідна напруга є інтегралом вхідної напруги прямокутної форми.

Слід зазначити, що чим більше τ , тим точніше виконується операція інтеграції (закон лінійності), але вихідна напруга по величині значно менше за вхідну що є недоліком простого інтегруючого RC-ланцюга. Також для нормального функціонування інтегруючого RC-ланцюга необхідно щоб вхідний опір послідууючого за ланцюгом каскаду було максимально великим.

Для усунення недоліків простого інтегруючого RC-ланцюга інтегруючі пристрої виконують з використанням ОП. Інтегратори проводять усереднювання сигналу, крім того, вони грають роль фільтру нижніх частот, що не дає сигналу імпульсної перешкоди можливості проникати на вхід пристроїв на вхід яких потрапляє вихідний сигнал інтегратора.

На основі операційного підсилювача можна побудувати практично ідеальні інтегратори. На рисунку 8.3 показана проста схема, що виконує цю функцію.

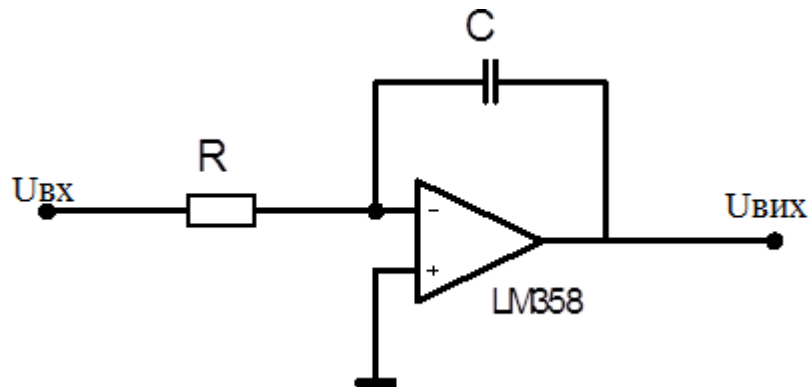


Рисунок 8.3 – Схема електрична принципова ідеального інтегратора на ОП

Її вихідна напруга ($U_{вих}$) пов'язана з вхідною напругою ($U_{вх}$) наступними співвідношеннями:

$$\frac{U_{вих}}{R} = -C \frac{dU_{вих}}{dt}$$

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} \cdot dt + const$$

де: R – опір резистора інтегратора; C – ємність конденсатора інтегратора

Недоліком цієї схеми є дрейф вихідної напруги, обумовлений напругою зсуву і вхідними струмами ОП. Це небажане явище можна ослабити, якщо до конденсатора C підключити резистор R_2 з великим опором, який забезпечує стабілізацію робочої точки за рахунок зворотного зв'язку по постійному струму як показано на рисунку 8.4.

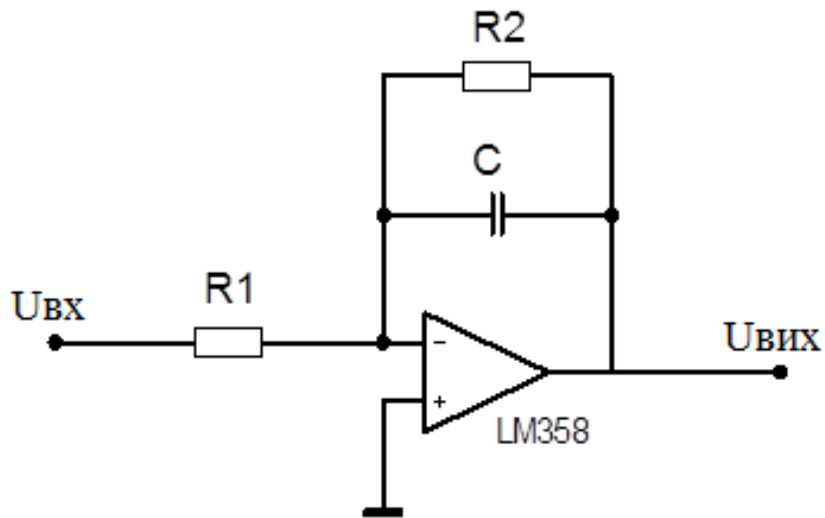


Рисунок 8.4 – Схема електрична принципова реального інтегратора на ОП

Резистор зворотного зв'язку R2 запобігає також насиченню ОП після заряду конденсатора, коли струм через конденсатор стане рівним нулю. Вихідна напруга цієї схеми при подачі на неї стрибка входної напруги амплітудою $U_{вх}$ змінюється відповідно до виразу:

$$U_{вих} = -U_{вх} \frac{R2}{R1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R2 \cdot C}\right) \right]$$

На початковому інтервалі перехідного процесу при $t \ll R1 \cdot C$, зміна вихідної напруги $U_{вих}$ буде достатньо близька до лінійного і швидкість його зміни може бути обчислена з виразу:

$$\frac{U_{вих}}{\Delta t} = \frac{-U_{вх}}{R1 \cdot C}$$

Застосування ІМС ОП зменшує похибку інтегрування в K_U раз ОП у порівнянні з пасивним інтегруючим колом.

Перехідна характеристика реального інтегратора, на відміну від ідеального, не є абсолютно лінійною, хоча і наближається до неї на більшій частині перехідного процесу. Відхилення реальної перехідної характеристики від ідеальної проявляється особливо помітно в початковий момент інтегрування (через кінцеву швидкодію ОП) і в області великих значень часу через кінцеве значення коефіцієнта підсилення K_u . Найбільша точність

інтегрування досягається, коли час інтегрування $t_i < KuRC$, а амплітуда сигналу на виході інтегратора $U_{вих} < U_{вх}Ku$.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 8.5.

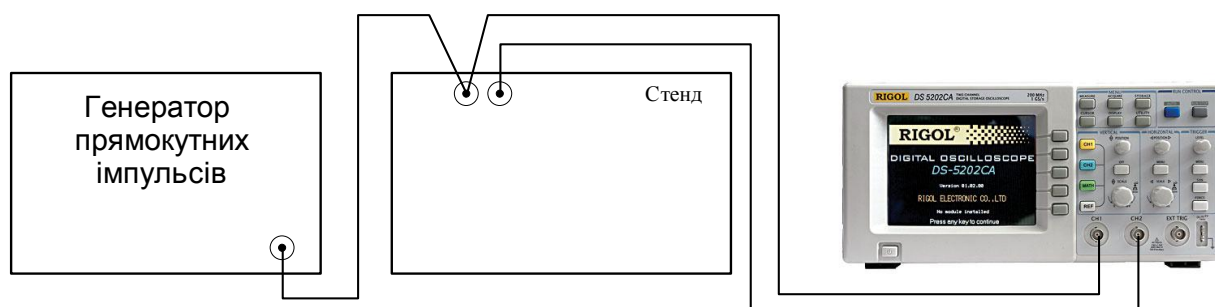


Рисунок 8.5 – Схема для дослідження інтегратора

10. Для подальших розрахунків параметрів інтегратора враховувати що в макеті застосовано опори та ємності величини яких наведені табл.8.1

Таблиця 8.1. – Номінали резисторів та конденсаторів інтегратора

№	1	2	3	4
C, нФ	22	47	100	470
R, кОм	10	20	50	100

11. На лабораторному стенді в полі Integrator зібрати схему інтегратора. З'єднати за допомогою джамперів вхід інтегратора (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вхід цифрового осцилографа (канал1), а також до шини №1 підключити джерело зовнішнього вхідного сигналу і включити його в режим генерації позитивних прямокутних імпульсів. З'єднати вихід ОП (роз'єднувач X3) з шиною №10. Також до шини №10 підключити другий вхід цифрового осцилографа (канал2). З'єднати за допомогою джампера неінвертуючий вхід ОП з загальним проводом.

Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

12. За допомогою джамперів встановити номінали елементів схеми інтегратора згідно таблиці 8.2.

13. Встановити частоту вихідного сигналу генератора прямокутних імпульсів 1000Гц та амплітуду 1В. За допомогою цифрового осцилографа (канал 1) отримати форму вихідного сигналу генератора який в свою чергу є вхідним сигналом інтегратора. Якщо амплітуда сигналу не дорівнює 1В тоді за допомогою регулятора виходу генератора імпульсів провести її корегування.

14. За допомогою цифрового осцилографа (канал 2) отримати форму вихідного сигналу інтегратора. Провести вимірювання його амплітуди та тривалості і результати вимірювань занести до таблиці 8.2.

15. Змінити параметри інтегратора згідно таблиці 8.2 і повторити дії п. 14.

Таблиця 8.2 – Результати вимірювання параметрів інтегратора

№	Встановлені параметри інтегратора		Виміряні параметри інтегратора		
	R	C	Форма $U_{вих}$	Амплітуда $U_{вих}$, В	Тривалість вихідного сигналу, мкс
1	10кОм	100 нФ			
2	20кОм	100 нФ			
3	50кОм	100 нФ			
4	100кОм	100 нФ			

16. Встановити номінали елементів схеми інтегратора згідно таблиці 8.3. Встановити частоту вихідного сигналу генератора прямокутних імпульсів 100Гц та амплітуду 1В. До шини №10 підключити вольтметр V1 (роз'єднувач

DC1). За допомогою цифрового осцилографа (канал 2) отримати форму вихідного сигналу інтегратора. Провести вимірювання його амплітуди, середнього значення та тривалості вихідного імпульсу і результати вимірювань занести до таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Результати вимірювання параметрів інтегратора

Частота вх. сигн. $F_{вх}$, Гц	Встановлені параметри інтегратора		Виміряні параметри інтегратора		
	R	C	Середнє значення $U_{вих}$, В	Амплітуда $U_{вих}$, В	Тривалість вихідного сигналу, мкс
100	20кОм	100 нФ			
500	20кОм	100 нФ			
1000	20кОм	100 нФ			
2000	20кОм	100 нФ			
5000	20кОм	100 нФ			

17. Змінити частоту вхідного сигналу інтегратора згідно таблиці 8.2 і повторити виміри п. 16.

18. Встановити номінали елементів схеми інтегратора згідно таблиці 8.3. Встановити частоту вихідного сигналу генератора прямокутних імпульсів 100Гц та амплітуду 1В. До шини №10 підключити вольтметр V1 (роз'єднувач DC1). За допомогою цифрового осцилографа (канал 2) отримати форму вихідного сигналу інтегратора. Провести вимірювання його амплітуди, середнього значення та тривалості вихідного імпульсу і результати вимірювань занести до таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Результати вимірювання параметрів інтегратора

Тривалість імпульсу, $t_{\text{имп}}, \text{мС}$	Встановлені параметри інтегратора		Виміряні параметри інтегратора		
	R	C	Середнє значення $U_{\text{вих}}, \text{В}$	Амплітуда $U_{\text{вих}}, \text{В}$	Тривалість вихідного сигналу, мС
1	20кОм	100 нФ			
2	20кОм	100 нФ			
4	20кОм	100 нФ			
6	20кОм	100 нФ			
8	20кОм	100 нФ			
10	20кОм	100 нФ			

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- схему електричну принципову інтегратора;
- результати вимірювання параметрів вихідного сигналу інтегратора та його осцилограми;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Сформулюйте поняття комутації в електричних колах.
2. Поясніть поняття точки комутації.
3. Якому закону комутації підкоряються інтегруючи RC – кола?
4. Перерахуйте недоліки RC – кіл при інтегруванні прямокутних вхідних імпульсів?
5. За рахунок чого інтегратора виконаний з використанням ОП позбувається недоліків RC – кіл?
6. Наведіть схему електричну принципову інтегратора виконаного з використанням ОП
7. Від яких елементів схеми залежить тривалість та амплітуда вихідних імпульсів інтегратора?
8. Від яких параметрів ОП залежить лінійність роботи інтегратора?
9. Від чого залежить стабільність роботи інтегратора?
10. З яких міркувань вибирають величини ємності конденсаторів та резисторів інтегратора виконаного з використанням ОП.
11. До яких наслідків приводить збільшення номіналу резистора в колі ННЗ інтегратора?
12. До яких наслідків приводить зменшення номіналу конденсатора в колі ННЗ інтегратора?

Лабораторна робота № 9

Дослідження характеристик та параметрів фільтру низьких частот

1.1 Мета роботи: Мета роботи – вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик активних фільтрів низької частоти.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання та розрахунки для визначення таких параметрів активного фільтру низької частоти як коефіцієнт передачі, частоти зрізу, ширини смуги пропускання фільтру.

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Використовуючи як елемент схеми фільтру ОП, можна синтезувати характеристику будь-якого RLC-фільтру без застосування котушок індуктивності. Такі безіндукційні фільтри відомі під назвою «активні фільтри» завдяки включенню в їх схему активного елементу (підсилювача). Активні фільтри можна використовувати як фільтри низьких частот, фільтрів високих частот, смугових і смугоподавляючих фільтрів, вибираючи тип фільтру залежно від найбільш важливих властивостей характеристики, таких, як рівномірність посилення в смузі пропускання, крутизна спаду або незалежність часового запізнювання від частоти.

При аналізі фільтрів і при розрахунках їх параметрів завжди використовуються деякі стандартні терміни.

Найбільш очевидною характеристикою фільтру є залежність коефіцієнта передачі фільтра від частоти: типовий випадок – амплітудно-частотна характеристика фільтру низьких частот, показана на рисунку 9.1.

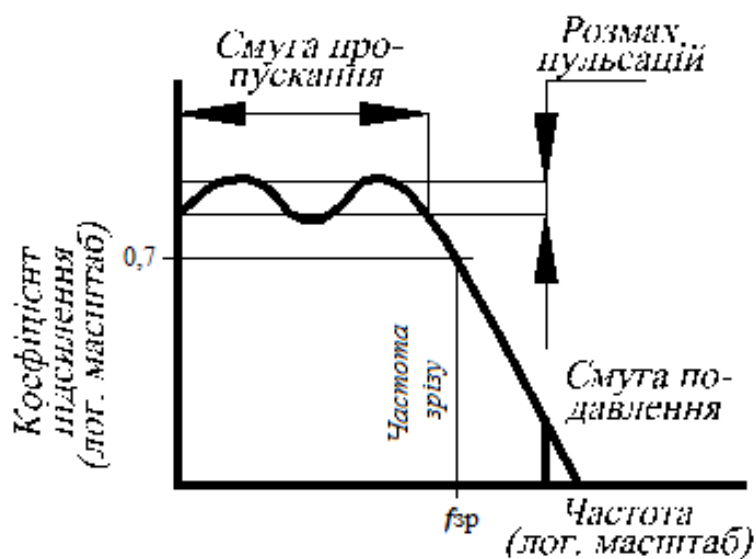


Рисунок 9.1 – Амплітудно-частотна характеристика фільтру низьких частот

Смуга пропускання фільтру – це область частот, які порівняно мало ослабляються фільтром. Найчастіше вважається, що смуга пропускання тягнеться до крапки, відповідної значенню – 3 дБ. Усередині смуги пропускання характеристика може бути нерівномірною, або пульсуючою, з певною смугою пульсації або нерівномірністю характеристики, як це показано на малюнку. Частота зрізу f_z є кінець смуги пропускання. Далі характеристика фільтру проходить через перехідну область, відому також як «схил» характеристики фільтру до смуги придушення – області значного ослаблення. Смуга придушення визначається деяким мінімальним ослабленням, тобто 40 дБ.

Разом з характеристикою коефіцієнта посилення в частотній області важливий і інший параметр – **зсув фази** вихідного сигналу по відношенню до вхідного. Фаза важлива постільки, оскільки сигнал, що цілком уміщається по частоті в смузі пропускання, буде спотворений, якщо тимчасове запізнювання при проходженні через фільтр не буде постійним для різних частот. Постійний час затримки (для всіх частот) відповідає лінійному зростанню зрушення фази залежно від частоти, тому термін фільтр з лінійною фазою застосовується в цьому відношенні до ідеального фільтру.

Часова (перехідна) характеристика. Властивості фільтрів, як і будь-яких схем змінного струму, можуть бути описані завданням параметрів в тимчасовій області: часом наростання, викидом, пульсаціями (автоколиваннями) і часом встановлення. Ці властивості важливі, зокрема, там, де можуть використовуватися імпульсні перехідні процеси. На рисунку 9.2. показана типова перехідна характеристика фільтру низької частоти.

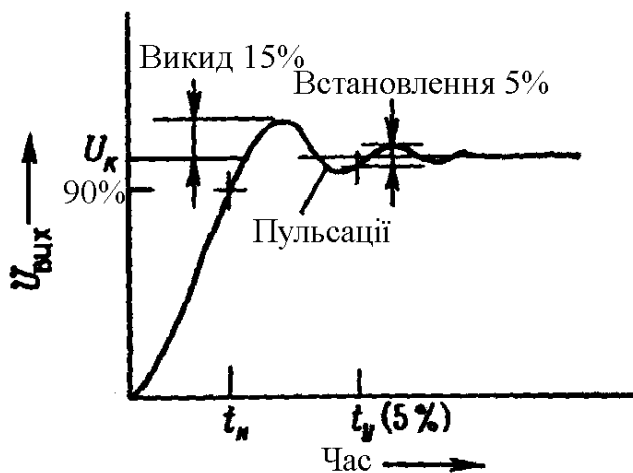


Рисунок 9.2 – Типова перехідна характеристика фільтру низької частоти.

Час наростання – це час, необхідне для досягнення 90% кінцевого значення напруги на виході фільтру.

Схема електрична принципова фільтру низької частоти Саллена і Кея приведена на рисунку 9.3.

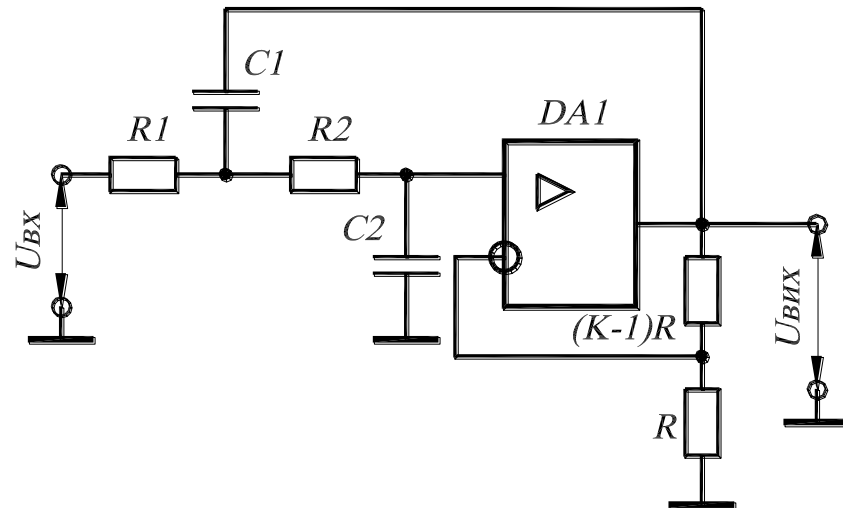


Рисунок 9.3 – Схема електрична принципова фільтру низької частоти

У цьому варіанті повторювач з одиничним коефіцієнтом посилення замінений неінвертуючим підсилювачем з коефіцієнтом посилення, більшим одиницю. За допомогою резисторів, приєднаних до виходу ОУ, утворений неінвертуючий підсилювач напруги з коефіцієнтом посилення K , а решта R і C як і раніше формують частотну характеристику фільтру.

У загальному випадку частота зрізу фільтра задається наступним рівнянням:

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

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 9.4.

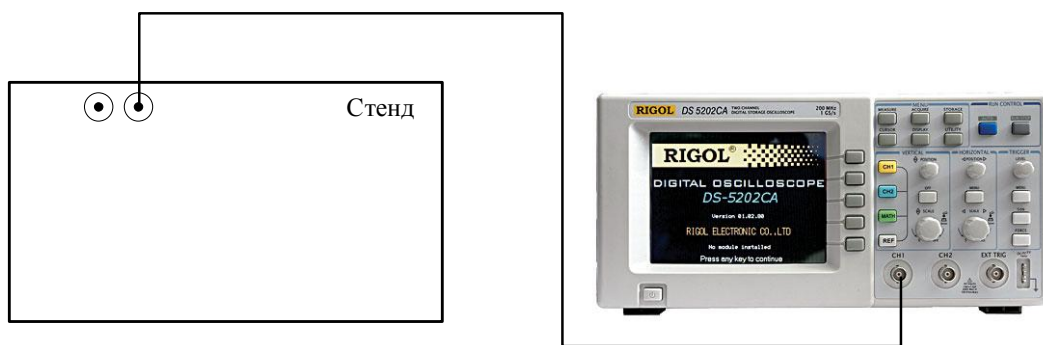


Рисунок 9.4 – Схема для дослідження фільтру низьких частот

3. На лабораторному стенді в полі Low Pass Active Filter зібрати схему фільтру низьких частот, використавши значення елементів за варіантами з таблиці 9.1. З'єднати за допомогою джамперів неінвертуючий вхід з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання змінного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу A і включити його в режим змінної синусоїдальної напруги. З'єднати вихід ОП з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання змінного струму. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця 9.1 – Номінали елементів схеми дослідження фільтру низьких частот

№	1	2	3	4
C, нФ	1	1,5	3,9	10
R, кОм	10	10	10	10

4. Встановити частоту вихідного сигналу генератора 1000 Гц і величину напруги 1В. За допомогою цифрового осцилографа візуалізувати форму вихідного сигналу ОП. Якщо вихідний сигнал має нелінійні спотворення (обмеження) зменшити рівень вхідного сигналу за допомогою регулятора вихідної напруги генератора доки спотворення вихідного сигналу будуть відсутні.

5. Встановити частоту вихідного сигналу генератора згідно таблиці 9.2. Виконати вимірювання вихідної напруги фільтру. Результати занести в

таблицю 9.2. Повторити виміри змінюючи частоту генератора. Побудувати амплітудно–частотну характеристику (АЧХ) фільтру в напівлогарифмічному масштабі та визначити смугу пропускання і частоту зрізу фільтра.

Таблиця 9.2 – Результати вимірювання АЧХ фільтру низьких частот

№вар. (C= , R=10к)	Виміряні параметри		Розраховані параметри	
Частота вхідного сигналу $F_{вх}$, Гц	Напруга на вході фільтру $U_{вх}$, В	Напруга на виході фільтру $U_{вих}$	Коефіцієнт передачі K_U	Смуга пропускання Δf , кГц
20				
40				
60				
100				
200				
1000				
5000				
10000				
15000				
20000				
25000				
30000				
50000				
100000				

6. Розрахувати величину смугу пропускання фільтру.

7. Змінити синусоїдальну форму вхідного сигналу фільтру на прямокутну. Встановити частоту генератора 1000Гц і за допомогою цифрового осцилографа візуалізувати та зберегти на папері форму перехідної характеристики фільтра.

8. За допомогою цифрового осцилографа виміряти час зростання перехідної характеристики фільтру та величину її викиду.

9. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

10. Розрахувати частоту зрізу фільтра та порівняти її з даними які отримані при побудові АЧХ фільтра.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання окремих точок АЧХ фільтра та його перехідної характеристики;
- результати розрахунків частоти зрізу та смуги пропускання фільтра;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Охарактеризуйте призначення, параметри, характеристики й особливості різних типових класів фільтрів.
2. Приведіть схеми фільтра низьких частот.
3. Намалюйте амплітудно–частотну характеристику фільтра низьких частот (ідеальну та реальну).
4. Накресліть перехідну характеристику фільтра низьких частот.

Лабораторна робота № 10

Дослідження характеристик та параметрів фільтру високих частот

1.1 Мета роботи: Мета роботи – вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик активних фільтрів високої частоти.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання та розрахунки для визначення таких параметрів активного фільтру високої частоти як коефіцієнт передачі, частоти зрізу, ширини смуги пропускання фільтру.

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Активні фільтри високої частоти працюють аналогічно фільтрам низької частоти але мають інший вид АЧХ. Якщо фільтр низьких частот в області частот від нуля до частоти зрізу ($f_{зр}$) мають коефіцієнт передачі практично рівний одиниці, то фільтр високих частот має аналогічний коефіцієнт передачі в області частот від частоти зрізу ($f_{зр}$) до ∞ і не пропускає на вихід частоти від нуля до частоти зрізу ($f_{зр}$).

Амплітудно–частотна характеристика фільтру високих частот, показана на рисунку. 10.1.

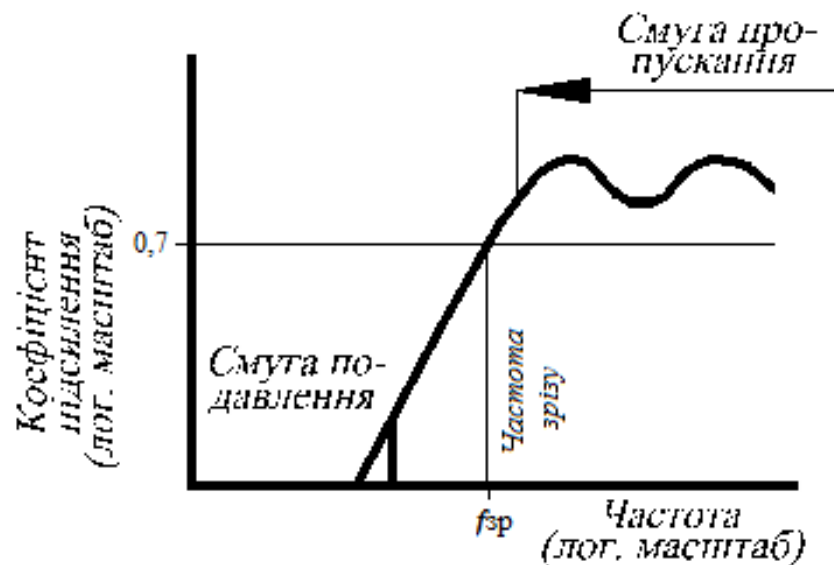


Рисунок 10.1 – Амплітудно–частотна характеристика фільтру низьких частот

Схема електрична принципова фільтру високої частоти Саллена і Кея приведена на рисунку 10.2.

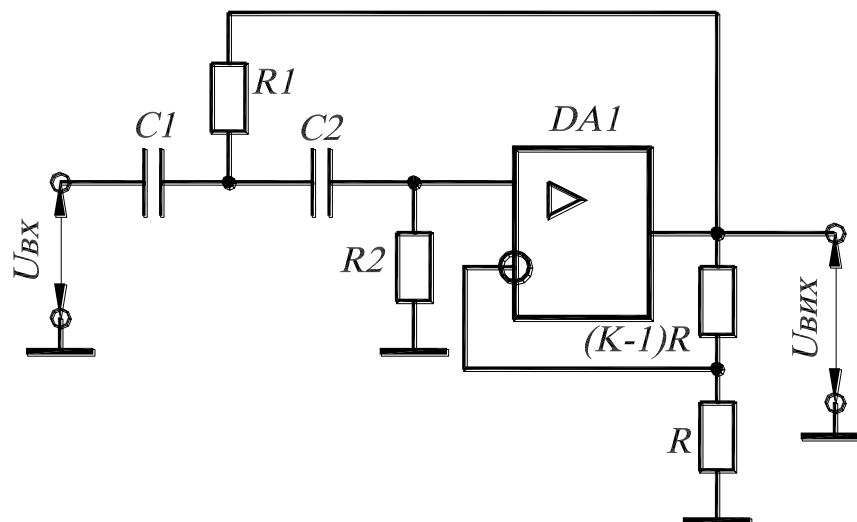


Рисунок 10.2 – Схема електрична принципова фільтру низької частоти

При порівнянні схеми електричної принципової фільтру низьких частот зі схемою фільтру високих частот можна бачити що конденсатори та резистори які впливають на величину частоти зрізу ($f_{зр}$) змінюються місями. Коло негативного зворотного зв'язку остається не змінним.

У загальному випадку частота зрізу фільтра задається аналогісним рівнянням:

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

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 10.3.

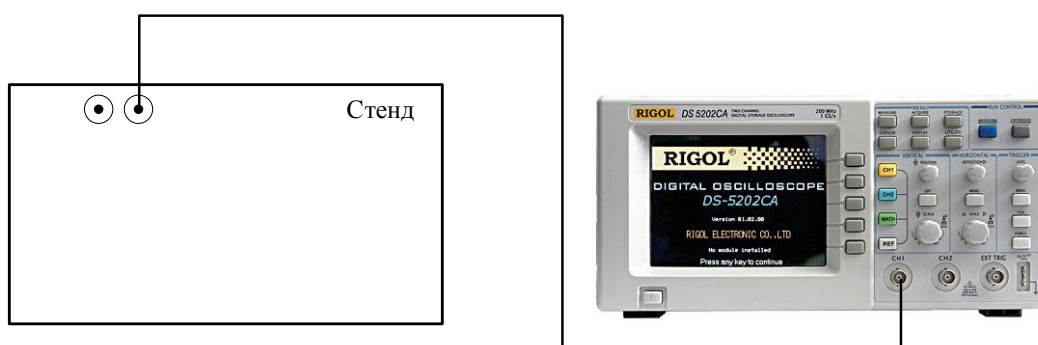


Рисунок 10.3 – Схема для дослідження фільтру низьких частот

3. На лабораторному стенді в полі High Pass Active Filter зібрати схему фільтру високих частот, використавши значення елементів за варіантами з таблиці 10.1. З'єднати за допомогою джамперів неінвертуючий вхід з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання змінного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу А і включити його в режим змінної синусоїдальної напруги. З'єднати вихід ОП з шиною №10. Також до шини №10 підключити вольтметр V2 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання змінного струму. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця. 10.1 – Номінали елементів схеми дослідження фільтру високих частот

№	1	2	3	4
C, нФ	1	1,5	3,9	10
R, кОм	10	10	10	10

4. Встановити частоту вихідного сигналу генератора 1000Гц і величину напруги 1В. За допомогою цифрового осцилографа візуалізувати форму вихідного сигналу ОП. Якщо вихідний сигнал має нелінійні спотворення (обмеження) зменшити рівень вхідного сигналу за допомогою регулятора вихідної напруги генератора доки спотворення вихідного сигналу будуть відсутні.

5. Встановити частоту вихідного сигналу генератора згідно таблиці 10.2. Виконати вимірювання вихідної напруги фільтру. Результати занести в таблицю 10.2. Повторити виміри змінюючи частоту генератора. Побудувати амплітудно–частотну характеристику (АЧХ) фільтру в напівлогарифмічному масштабі та визначити смугу пропускання і частоту зрізу фільтру.

Таблиця 10.2 – Результати вимірювання АЧХ фільтру високих частот

№вар. (C= , R=10к)	Виміряні параметри		Розраховані параметри	
Частота вхідного сигналу $F_{вх}$, Гц	Напруга на вході фільтру $U_{вх}$, В	Напруга на виході фільтру $U_{вих}$	Коефіцієнт передачі K_U	Смуга пропускання Δf , кГц
20				
40				
60				
100				
200				
1000				
5000				
10000				
15000				
20000				
25000				
30000				
50000				
100000				

6. Розрахувати величину полюсу пропускання фільтру.

7. Змінити синусоїдальну форму вхідного сигналу фільтру на прямокутну. Встановити частоту генератора 100 Гц і за допомогою цифрового осцилографа візуалізувати та зберегти на папері форму перехідної характеристики фільтру.

8. За допомогою цифрового осцилографа виміряти час зростання перехідної характеристики фільтру та величину її викиду.

9. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

10. Розрахувати частоту зрізу фільтра та порівняти її з даними які отримані при побудові АЧХ фільтру.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання окремих точок АЧХ фільтру та його перехідної характеристики;
- результати розрахунків частоти зрізу та полоси пропускання фільтру;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Охарактеризуйте призначення, параметри, характеристики й особливості різних типових класів фільтрів.
2. Приведіть схеми фільтра високих частот.
3. Намалюйте амплітудно–частотну характеристику фільтру високих частот (ідеальну та реальну).
4. Накресліть перехідну характеристику фільтра високих частот.

Лабораторна робота № 11

Дослідження характеристик та параметрів компараторів

1.1 Мета роботи: Мета роботи – вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик компаратору.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання та розрахунки для визначення таких параметрів компаратору як напруга гістерезису, та величина швидкодії.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Компаратори займають проміжне положення між аналоговими й цифровими інтегральними схемами і є найпростішими аналого–цифровими перетворювачами. Напруга на їхньому виході встановлюється рівним напрузі логічної „0” або логічної „1” залежно від того, перевищує чи ні вхідна напруга опорну.

Схеми найпростіших компараторів (пристроїв, які порівнюють два вхідних сигналу) з використанням ОП і тимчасові діаграми, що пояснюють їх роботу, представлені на рисунку. 11.1,а и 11.1,б.

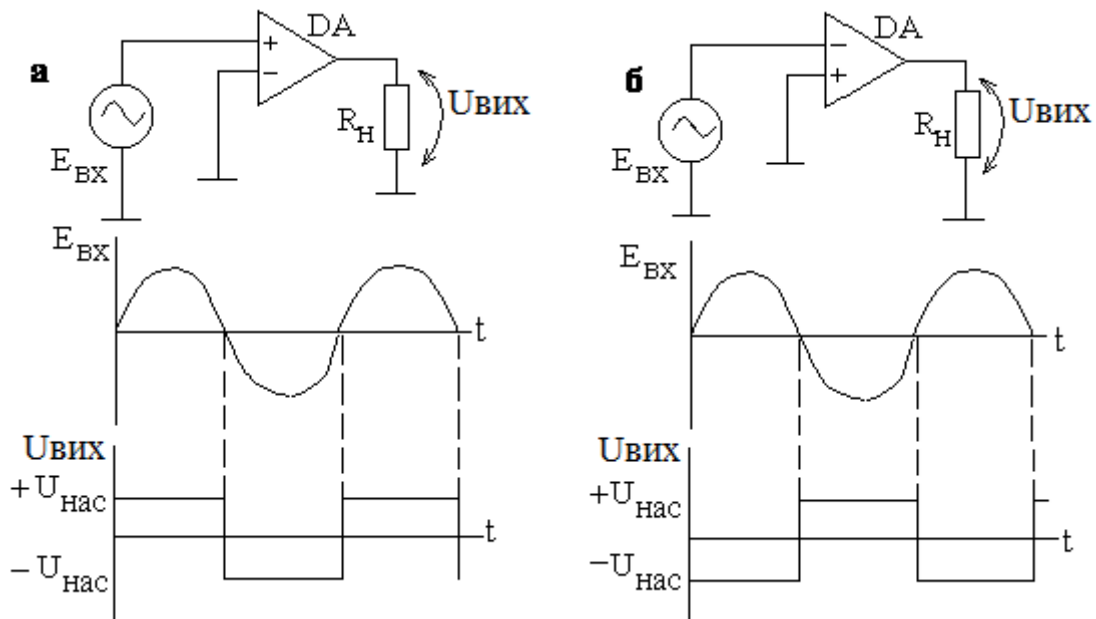


Рисунок 11.1 – Найпростіші компаратори і тимчасові діаграми їх роботи

На схемі рис. 11.1,а на вхід (–) подано опорна напруга землі (0 В). До входу (+) прикладена напруга, що порівнюється з опорним. Вихідна напруга $U_{ВХ}$ змінює знак при зміні полярності $E_{ВХ}$ ($E_{Д}=E_{ВХ}-0$). При позитивній напівхвилі вхідної напруги $U_{ВХ}=+U_{НАС}$, при негативній – $U_{ВХ}= -U_{НАС}$. При заземленні (+) входу, рис. 11.1, б, спостерігається протилежна картина ($E_{Д} = 0 - E_{ВХ}$).

Обидві схеми рис. 11.1 дозволяють отримати таку інформацію про вхідний сигнал: полярність $E_{ВХ}$, момент рівності $E_{ВХ}$ нулю і напрям зміни $E_{ВХ}$ при $E_{ВХ} = 0$. Дані компаратори називають також детекторами нульового рівня.

В якості опорної напруги можна використовувати спеціальне джерело, рис. 11.2.

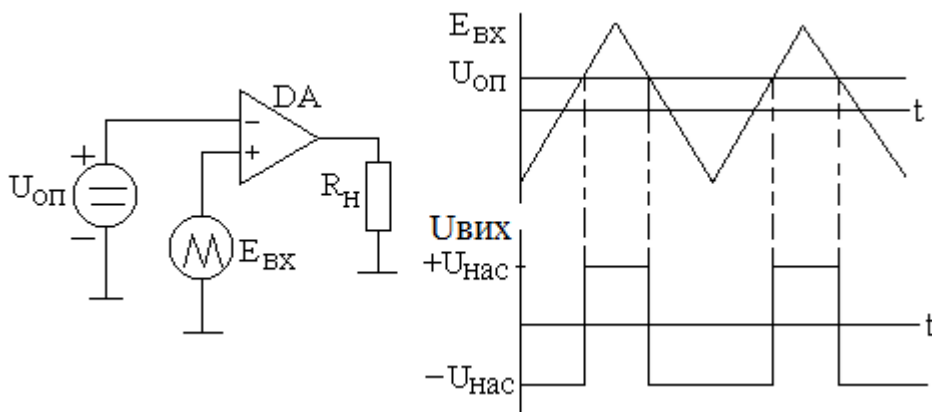
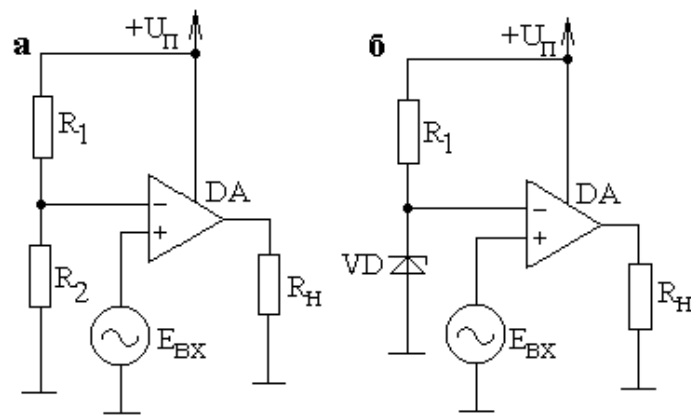


Рисунок 11.2 – Детектор ненульового рівня і його часова діаграма

Вхідна напруга порівнюється з $U_{оп} > 0$. Для отримання опорної напруги можуть використовуватися резистивні подільники та параметричні стабілізатори.

Для схеми рис. 11.3,а $U_{оп} = \frac{+U_{п} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}$. Змінюючи опір одного з резисторів можна регулювати $U_{оп}$. Використання стабілітрона VD у схемі, рис. 11.3, б, дозволяє одержати більш стабільне значення $U_{оп}$ в разі зміни напруги джерела живлення.



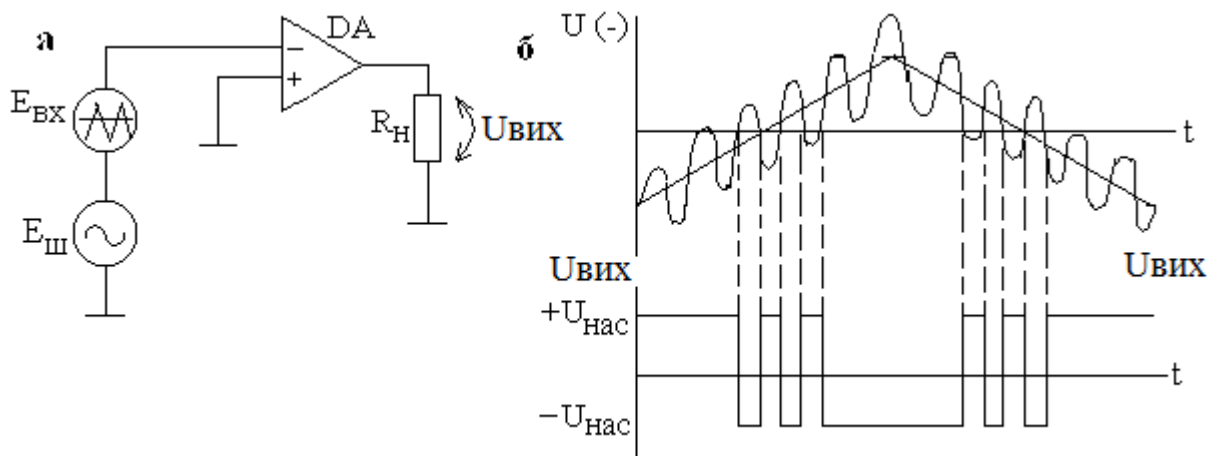
а – схема з дільником напруги, б – схема зі стабілітроном

Рисунок 11.3. – Схеми отримання опорного напруги від джерела живлення

Як навантаження компаратора можуть використовуватися різні індикатори (стрілочні, світлодіодні тощо) або електронні схеми. При цьому виникає завдання: узгодження компаратора з конкретною навантаженням.

Розглянуті вище пристрої є простими компараторами і знаходять обмежене застосування. Більше поширення отримали компаратори з позитивним зворотним зв'язком (ПЗЗ), що підвищує надійність спрацювання.

Компаратори (рис. 11.1, 11.2, 11.3) дуже чутливі до зміни вхідного сигналу поблизу опорного рівня. При цьому виникають помилкові спрацювання (рис. 11.4). Ситуація погіршується, якщо $E_{ВХ}$ змінюється дуже повільно і (або) у з'єднувальних проводах наводяться паразитні ЕРС.



а. – підключення джерела вхідного сигналу і генератора шуму до ОП

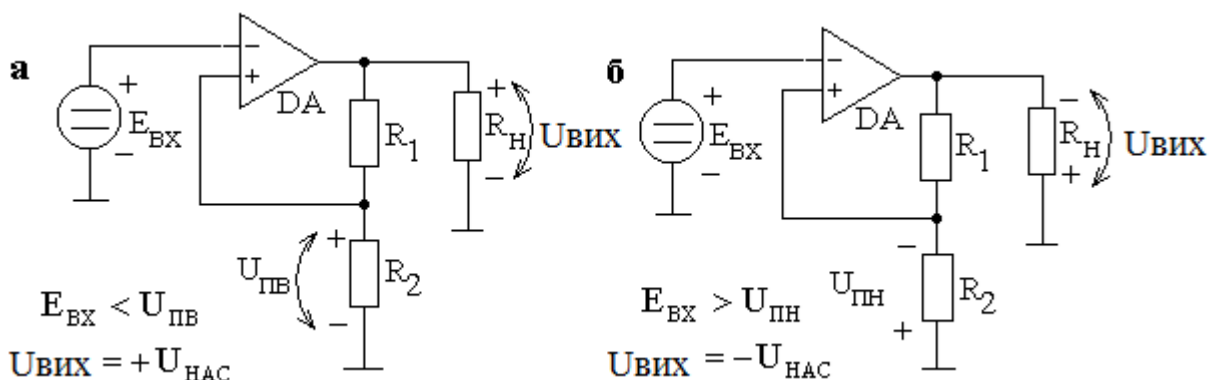
б. – часова діаграма, яка пояснює виникнення помилкових спрацювань

Рисунок 11.4. – Поява помилкових спрацювань компаратора за рахунок наведення паразитної ЕРС ($E_{Ш}$) в з'єднувальних проводах

Більш стійкими до дій перешкод є компаратори з позитивним зворотним зв'язком, звані також тригерами Шмітта.

Вихідна напруга ОП охопленого ПЗЗ одно або $+U_{\text{НАС}}$, або $-U_{\text{НАС}}$. Нехай після включення живлення вихідна напруга ОП через наявність внутрішнього розбалансу ($U_{\text{ВХ.СДВ}} > 0$) дорівнює $+U_{\text{НАС}}$, рис.11.5,а. Тоді опорне напруга, прикладена до входу (+):

$$U_{\text{ОП}} = U_{\text{ПВ}} = +U_{\text{НАС}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



а. – вихідна напруга дорівнює $+U_{\text{НАС}}$, б. – вихідна напруга дорівнює $-U_{\text{НАС}}$

Рисунок 11.5 – Компаратор з позитивним зворотним зв'язком

Тому вхідна напруга $E_{\text{ВХ}}$ порівнюється з $U_{\text{ПВ}}$. Якщо $E_{\text{ВХ}} < U_{\text{ПВ}}$, різниця напруг між входами ОП позитивна, $E_{\text{Д}} > 0$ і $U_{\text{ВИХ}}$ продовжує залишатися рівною $+U_{\text{НАС}}$. У разі якщо $E_{\text{ВХ}}$ перевищить $U_{\text{ПВ}}$, полярність $E_{\text{Д}}$ зміниться і $U_{\text{ВИХ}}$ почне змінюватися від $+U_{\text{НАС}}$ к $-U_{\text{НАС}}$. При цьому $U_{\text{ПВ}}$ зменшується, абсолютне значення $E_{\text{Д}}$ збільшується і вихідна напруга змінюється зі зростаючою швидкістю.

Після досягнення вихідним напругою величини $-U_{\text{НАС}}$ схема переходить в новий стійкий стан, рис. 11.5,б. $U_{\text{ПН}}$ має негативну полярність відносно землі. Це означає, що $U_{\text{ВИХ}}$ буде залишатися рівним $-U_{\text{НАС}}$ до тих пір, поки $E_{\text{ВХ}} > U_{\text{ПН}}$. Переключення компаратора в $+U_{\text{НАС}}$ відбудеться, якщо $E_{\text{ВХ}}$ стане нижче $U_{\text{ПН}}$.

Після досягнення вихідною напругою величини $-U_{\text{нас}}$ схема переходить в новий стійкий стан, рис. 11.5, б. Напруга $U_{\text{пн}}$ має негативну полярність відносно землі. Це означає, що $U_{\text{вих}}$ буде залишатися рівним $-U_{\text{нас}}$ до тих пір, поки $E_{\text{вх}} > U_{\text{пн}}$. Переключення компаратора в $+U_{\text{нас}}$ відбудеться, якщо $E_{\text{вх}}$ стане нижче $U_{\text{пн}}$.

Вибираючи необхідні значення порогових напруг $U_{\text{пн}}$ і $U_{\text{пв}}$ можна змінювати «зону нечутливості» компаратора в залежності від рівня перешкод, рис. 11.6.

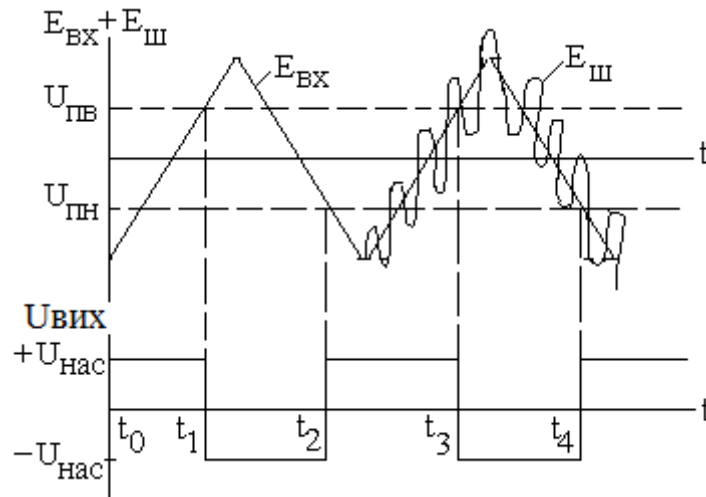


Рисунок 11.6. – Часові діаграми роботи компаратора з ПЗЗ

Нехай в початковий момент часу (t_0) $U_{\text{вих}} = +U_{\text{нас}}$. Коли $E_{\text{вх}}$ становиться більше $U_{\text{пв}}$ (t_1 і t_3) $U_{\text{вих}}$ швидко перемикається в стан $-U_{\text{нас}}$. При зменшенні вхідної напруги нижче $U_{\text{пн}}$ (t_2 і t_4) $U_{\text{вих}}$ становиться рівним $+U_{\text{нас}}$.

Існує стандартний спосіб зображення характеристик компаратора (рис. 11.7).

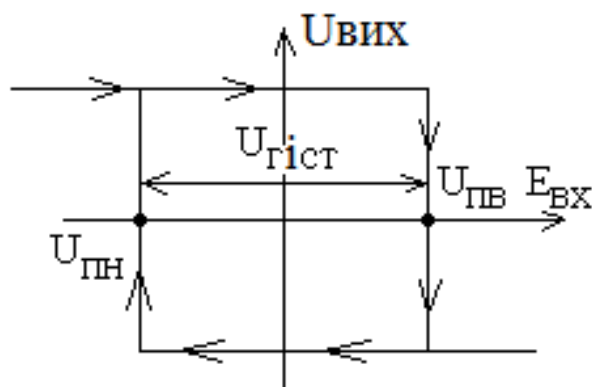


Рисунок 11.7 – Взаємозв'язок вхідної і вихідної напруги компаратора

Величина гістерезису (зони нечутливості) визначається пороговими напругами ($U_{\text{гист}} = U_{\text{пв}} - U_{\text{пн}}$). Компаратор з ПЗЗ може використовуватися в якості формувача прямокутних імпульсів з напруги довільної форми.

Недоліками компараторів, побудованих на основі типових ОП, є:

1. Мала швидкодія при перемиканні від одного рівня насичення до іншого.
2. Труднощі узгодження з конкретною навантаженням.

Типове значення напруги насичення ОУ складає приблизно 10 ... 13 В, тому підключення компаратора до схеми, зібраною, наприклад, на ТТЛ-мікросхемах (працюють з сигналами 0 ... 5 В), потребує додаткових схемних рішень (узгоджувачів рівня).

Для усунення зазначених недоліків:

1. Використовують швидкодіючі ОП з великою швидкістю зміни вихідної напруги (інтегральні компаратори).
2. Вводять обмеження меж зміни вихідного напруги для конкретного навантаження або застосовують ОП спеціально призначені для використання як компараторів з можливістю зміни вихідного напруги.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 11.8.



Рисунок 11.8 – Схема для дослідження фільтру низьких частот

3. На лабораторному стенді в полі Comparator with Hysteresis зібрати схему компаратора, використавши значення елементів за варіантами з таблиці 11.1.

З'єднати за допомогою джамперів інвертуючий вхід компаратора (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму, а також до шини №1 підключити джерело вхідного сигналу V1 і включити його в режим постійної напруги. З'єднати вихід ОП з шиною №10 (роз'єднувач X3). Також до шини №10 підключити осцилограф. З'єднати за допомогою джамперів резистор R1 (роз'єднувач X2) з'єднати з шиною №3, також до шини №3 підключити вольтметр V2 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання постійного струму, а також до шини №3 підключити джерело вхідного сигналу V2 і включити його в режим постійної напруги. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця. 11.1 – Номінали елементів схеми дослідження компаратора

№	1	2	3	4
R1, кОм	2,0	5,0	10,0	20,0
R2, кОм	50,0	100,0	200,0	510,0

4. Від'єднати резистор R2 (знявши джампер) і таким чином отримати схему компаратора без гістерезису.

5. Встановити величину напруги джерела V2 рівним 100мВ.

6. Встановити величину напруги джерела V1 згідно таблиці 11.2 і виміряти величину напруги на виході компаратора. Результати вимірювань занести до таблиці 11.2 (стовпчик напруга джерела V2, В (при збільшенні)).

7. Збільшуючи величину напруги джерела V1 згідно таблиці 11.2 повторити виміри та результати занести в таблицю 11.2.

Таблиця 11.2 – Результати дослідження компаратора без гістерезису

№ вар. (R1= кОм, R2= кОм)	Виміряні параметри			Розраховані параметри
Напруга джерела V2, мВ	Напруга джерела V1, мВ (при збільшенні)	Напруга джерела V1, мВ (при зменшенні)	Напруга на виході компаратора Uвих	Величина гістерезису компаратора ΔU , В
100	90	90		
	92	92		
	94	94		
	96	96		
	98	98		
	99	99		
	100	100		
	101	101		
	102	102		
	103	103		
	105	105		
	108	108		
	110	110		

8. По досягненні кінця таблиці провести аналогічні вимірювання знижуючи напругу джерела V1 згідно таблиці 11.2.

9. З'єднати резистор R2 (встановивши джампер) і таким чином отримати схему компаратора з гістерезисом.

10. Провести вимірювання за п.5 – п.8 і результати занести до таблиці 11.3.

Таблиця 11.3 – Результати дослідження компаратора з гістерезисом

№ вар. (R1= кОм, R2= кОм)	Виміряні параметри			Розраховані параметри
Напруга джерела V2, мВ	Напруга джерела V1, мВ (при збільшенні)	Напруга джерела V1, мВ (при зменшенні)	Напруга на виході компаратора Uвих	Величина гістерезису компаратора ΔU , В
100	90	90		
	92	92		
	94	94		
	96	96		
	98	98		
	99	99		
	100	100		
	101	101		
	102	102		
	103	103		
	105	105		
	108	108		
	110	110		

Розрахувати величину верхнього та нижнього порогу спрацьовування та величину гістерезису. Побудувати амплітудну характеристику компаратора.

11. Від'єднати джерело V1 від шини №1 і замість цього шину №1 з'єднати з джерелом змінного струму А та встановити синусоїдальну форму вихідного сигналу. Амплітуду сигналу встановити 200мВ, частота сигналу 1000Гц. Канал осцилографа CH2 з'єднати з шиною №1 за допомогою якого контролюють амплітуду.

12. Переконатись в правильності функціонування схеми. Зарисувати часові діаграми роботи компаратора за допомогою осцилографа.

13. Визначити час переключення наступним чином. Змінити синусоїдальну форму сигналу джерела А на прямокутну. Встановити частоту генератора 1000Гц. Поступово збільшуючи частоту вхідного сигналу визначити частоту при якій переключення вихідного сигналу компаратора не відбувається. Половина періоду цього сигналу буде часом переключення компаратора.

14. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання окремих точок АЧХ фільтру та його перехідної характеристики;
- результати розрахунків частоти зрізу та полоси пропускання фільтру;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Назвіть основні особливості побудови компараторів на ОП.
2. Чому в компараторах, як правило, не використовують негативні зворотні зв'язки?
3. Як можна підвистити завадостійкість компараторів?
4. Як відбувається в компараторах формування потрібних значень $U_{вих}^1$ і $U_{вих}^0$?
5. Накресліть схему двопорогового компаратора і часові діаграми його роботи?

Лабораторна робота № 12

Дослідження характеристик та параметрів амплітудних випрямлячів

1.1 Мета роботи: Мета роботи – вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик випрямлячів середнього значення та амплітудних випрямлячів.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання та розрахунки для визначення таких параметрів амплітудних випрямлячів як форма випрямленої напруги, та її амплітуда.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Випрямлячі середніх значень дають на виході напругу, постійна складова якої пропорційна середньому значенню випрямленої вхідної напруги. Робота подібних випрямлячів, як правило, ґрунтується на тому, що при одній полярності вхідна напруга з деяким масштабним коефіцієнтом подається на вихід, а при іншій – вихідна напруга підтримується рівною нулю (однапівперіодний випрямляч) або інвертованій вхідній напрузі (дванапівперіодний випрямляч). В останньому випадку, якщо забезпечено рівність масштабних коефіцієнтів для прямого і інверсного вхідних сигналів, то пристрій може застосовуватись також як формувач модуля вхідного сигналу: напруга на виході буде пропорційна абсолютному значенню вхідної напруги. Використання ОП в точних випрямлячах переслідує ціль зменшення похибки перетворення, обумовлену неідеальними вольт–амперними характеристиками діодів. На рис. 12.26 показані схеми простих випрямлячів середніх значень напруг.

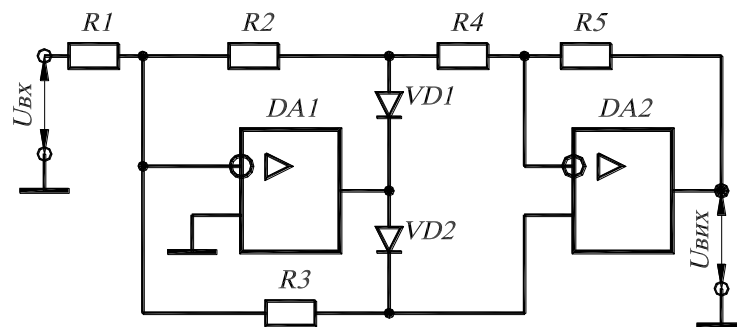


Рисунок 12.1 – Схема електрична принципова амплітудного випрямляча з використанням ОП

Випрямляч побудований на основі ОП включеного за схемою інверсного підсилювача, що вміщує діоди в колі зворотного зв'язку. При позитивній полярності вхідного сигналу відкривається діод VD1 і зворотній зв'язок замикається через резистор R2. При негативній полярності $U_{вх}$ струм зворотного зв'язку протікає через діод VD2 і резистор R3. Таким чином, при синусоїдальному вхідному сигналі на в точці 1 будуть присутні позитивні півхвилі напруги, а в точці 2 – негативні, що відповідають однонапівперіодному випрямлячу вхідного сигналу. Оскільки відкритий діод входить в пряме коло замкненого контуру, то падіння напруги на ньому практично не відбивається на вихідній нарузі. Тому при $U_{вх} > 0$ отримуємо $U_{вих1} = 0$, $U_{вих2} = -U_{вх} R_2 / R_1$, а при $U_{вх} < 0$ отримуємо $U_{вих1} = U_{вх} R_3 / R_1$ і $U_{вих2} = 0$.

Операційний підсилювач DA2 дає можливість отримати двонапівперіодне випрямлення і постійний, близький до нуля, вихідний опір схеми. Якщо відкритий діод VD1 ($U_{вх} > 0$), то справедлива рівність

$$U_{вих} = -U_{вих2} R_5 / R_4 = U_{вх} R_2 R_5 / (R_1 R_4).$$

Якщо ж відкритий діод VD1 ($U_{вх} < 0$), то

$$U_{вих} = -U_{вх} (R_3 / R_1) (R_2 + R_4 + R_5) / (R_2 + R_3 + R_4).$$

Прийнявши $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$, отримаємо:

$$U_{вих} = |U_{вх}| R / R_1.$$

Випрямляч, схема якого показана на рис. 12.2 проводить двонапівперіодне випрямлення, але його навантаження не заземлене. В зворотній зв'язок ОП тут включений міст з діодів VD1–VD4 і опору навантаження R_n . При будь-якій полярності $U_{вх}$ струм I_n через навантаження проходить в одному напрямку і рівний $I_n = |U_{вх}| / R_1$. Таким чином, струм I_n не залежить від опору навантаження R_n . Така схема може добре працювати зі стрілочним індикатором магнітоелектричної системи в якості навантаження.

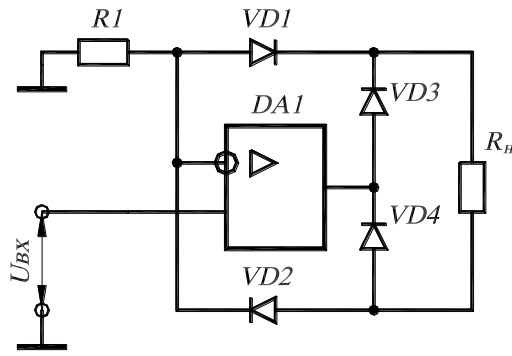


Рисунок 12.2 – Схема електрична принципова амплітудного двонапівперіодного випрямляча з використанням ОП

Схеми рис. 12.3а і 12.3б ілюструють побудову двонапівперіодних випрямлячів з заземленим навантаженням на одному ОП.

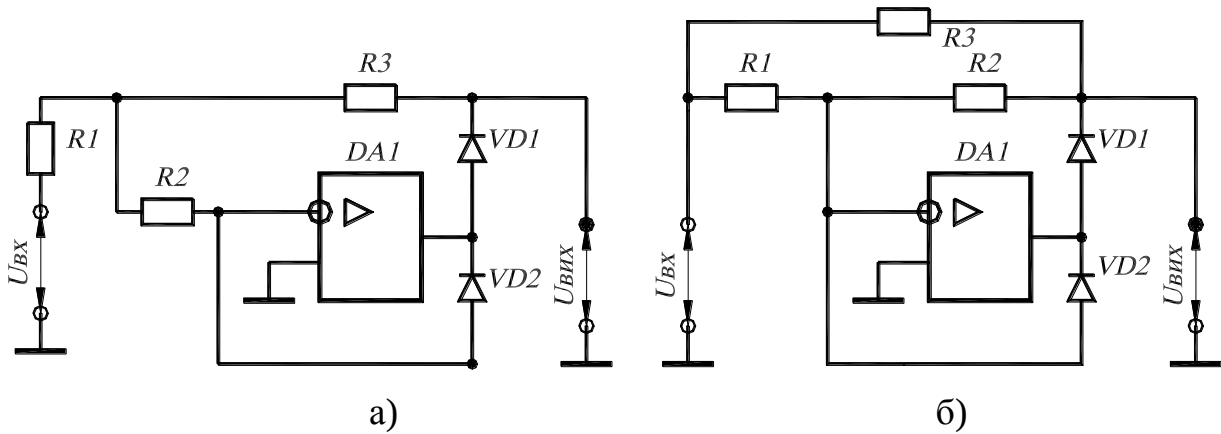


Рисунок 12.3 – Схема електрична принципова амплітудного двонапівперіодного випрямляча з заземленим навантаженням на одному ОП

Для схеми рис. 12.3а при $U_{BX} < 0$ справедливе співвідношення $U_{ВИХ} = -U_{BX} R_3 / R_1$, вихідний опір приблизно рівний нулю. Якщо $U_{BX} > 0$ справедливе співвідношення $U_{ВИХ} = U_{BX} R_2 / (R_1 + R_2)$, $R_{ВИХ} = R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$. Для схеми рис. 12.3б при $U_{BX} < 0$ справедливе співвідношення $U_{ВИХ} = -U_{BX} R_2 / R_1$, вихідний опір приблизно рівний нулю, а при $U_{BX} > 0$ $U_{ВИХ} = U_{BX} R_2 / (R_2 + R_3)$, $R_{ВИХ} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$. Якщо прийняти для схеми рис. 12.3а $R_1 = R_2 = 2R_3$, а для схеми рис. 12.3б $2R_1 = R_2 = R_3$, то в обох випадках отримаємо $U_{ВИХ} = 0,5|U_{BX}|$. Але слід мати на увазі, що вихідний опір цих випрямлячів змінюється в залежності від полярності вхідного сигналу.

Амплітудні випрямлячі призначені для формування постійної вихідної напруги, пропорційної амплітуді вхідної змінної або імпульсної напруги. В багатьох випадках амплітудні випрямлячі можна побудувати шляхом

включення конденсатора як навантаження випрямляча середнього значення. На рис. 12.4а представлена схема найпростішого активного амплітудного випрямляча.

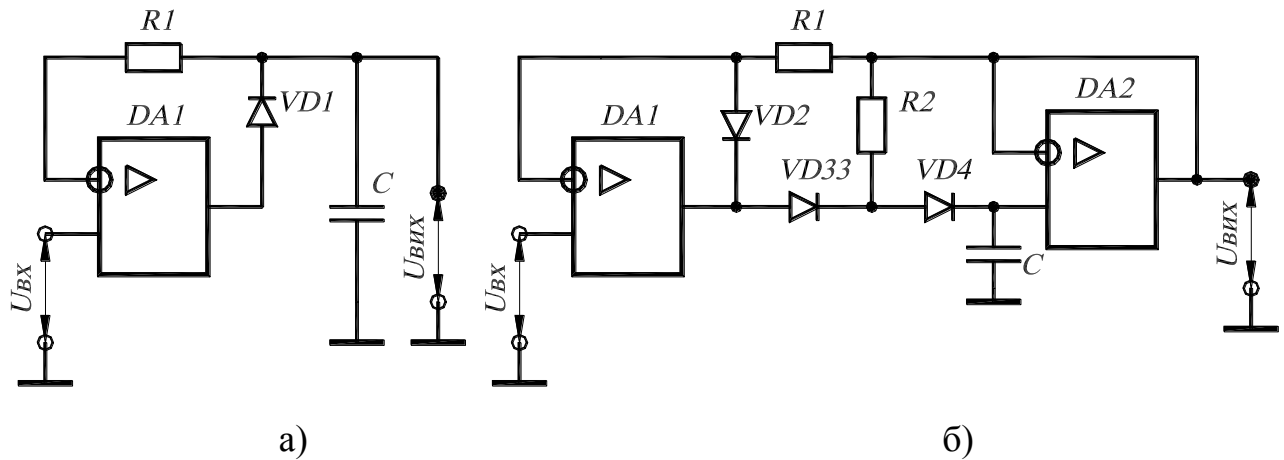


Рисунок 12.4 – Схеми електрична принципова активних амплітудних випрямлячів

При $U_{вх} > 0$ конденсатор заряджається до амплітуди вхідного сигналу вихідним струмом ОП, що проходить через відкритий діод. При цьому падіння напруги на відкритому діоді не буде приводити до похибки, тому що діод включений в пряме коло замкненого контуру. Коли напруга $U_{вх}$ прийме значення, менше, ніж амплітудне, то за рахунок того, що на неінверсному вході ОП напруга стане менше, ніж на інверсному вході, напруга на виході ОП стане негативною і діод закриється. В подальшому діод буде закритий, поки вхідна напруга не перевищить напруги, що запам'яталась на конденсаторі C .

Резистори R_1 і R_2 в даному випрямлячі не обов'язкові. Резистор R_1 обмежує струм розряду конденсатора C через вхідне коло ОП при виключеній напрузі живлення. Резистор R_2 обмежує вихідний струм ОП при заряді конденсатора і сприяє підвищенню стійкості кола.

Наступні кола, що приєднані до вихідних зажимів амплітудного випрямляча за схемою рис. 12.4, а, повинні мати достатньо великий вхідний опір, щоб конденсатор C не встигав помітно розрядитися на протязі періоду вхідного сигналу. Якщо позначити символом R_n опір навантаження випрямляча, то коефіцієнт пульсацій на виході випрямляча, що викликаний розрядженням, буде приблизно рівний $1/(\pi f C R_n)$, де f – частота вхідного сигналу.

Амплітудний випрямляч, схема якого показана на рис. 12.4б, має низький вихідний опір завдяки повторювачу, що виконано на ОП DA2. Окрім того, в цей випрямляч введені кола VD_2 і R_1 , що виключають перевантаження підсилювача по виходу при негативному входному сигналі, і коло VD_3 і R_2 , яке не дозволяє розрядженню конденсатора C зворотнім струмом діода VD_1 при негативному входному сигналі.

В амплітудних випрямлячах необхідно передбачати кола, які проводили б періодичне розрядження запам'ятовуючого конденсатора, щоб потім оновлювати інформацію про амплітуду входної напруги.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 12.5.



Рисунок 12.5 – Схема для дослідження амплітудних випрямлячів

3. На лабораторному стенді в полі Full Wave Rectifier зібрати схему амплітудного випрямляча. З'єднати за допомогою джамперів вхід амплітудного випрямляча (роз'єднувач X1) з'єднати з шиною №1. Також до шини №1 підключити вольтметр V1 який розташований в стенді включити його в режим вимірювання змінного струму, а також до шини №1 підключити джерело входного сигналу A і включити його в режим змінної синусоїдальної напруги з частотою 50кГц і амплітудою 1В. З'єднати вихід ОП з шиною №10 (роз'єднувач X2). Також до шини №10 підключити осцилограф. З'єднати з шиною №10 вольтметр V2 який розташований в

стенді включити його в режим вимірювання постійного струму Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

4. Визначити форму вихідного сигналу. Зарисувати осцилограми вхідного та вихідного сигналів. Провести вимірювання середнього значення напруги вхідного та вихідного сигналу. Результати вимірювання занести в таблицю 12.1. Розрахувати величину вихідної напруги і переконатися, що вихідна напруга випрямляча дорівнює випрямленому значенню від вхідної напруги.

5. Від'єднати вихід ОП від шини №10 (роз'єднувач X2). З'єднати вихід ОП з шиною №10 (роз'єднувач X4). Повторити дії п.4.

6. Від'єднати вихід ОП від шини №10 (роз'єднувач X4). З'єднати вихід ОП з шиною №10 (роз'єднувач X3). Повторити дії п.4.

7. Змінити форму сигналу джерела А на прямокутну і повторити дії п. 4 – п.6.

8. Змінити форму сигналу джерела А на трикутну і повторити дії п. 4 – п.6.

9. Встановити частоту джерела А рівною 10 кГц і повторити дії п.3. – п.8.

10. Встановити частоту джерела А рівною 100 кГц і повторити дії п.3. – п.8.

11. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

Таблиця 12.1 – Результати дослідження амплітудних випрямлячів

Частота вхідного сигналу, кГц	Виміряні параметри							Розраховані параметри		
	Осцилограма вхідного сигналу	Осцилограма вихідного сигналу (X2)	Осцилограма вихідного сигналу (X3)	Осцилограма вихідного сигналу (X4)	Напруга на виході (X2) U _{вих}	Напруга на виході (X3) U _{вих}	Напруга на виході (X4) U _{вих}	Напруга на виході (X2) U _{вих}	Напруга на виході (X3) U _{вих}	Напруга на виході (X4) U _{вих}
10										
50										
100										

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання та осцилографування в окремих точках схеми амплітудного випрямляча;
- результати розрахунків вихідної напруги амплітудного випрямляча;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Вкажіть особливості застосування випрямлячів середніх значень.
2. Вкажіть принципи побудови випрямлячів середніх значень.
3. Наведіть відмінності побудови схем однонапівперіодного випрямляча середніх значень та двонапівперіодного випрямляча.
4. Вкажіть особливості застосування амплітудних випрямлячів.
5. Вкажіть принципи побудови амплітудних випрямлячів.

Лабораторна робота № 13

Дослідження характеристик та параметрів мультівібраторів

1.1 Мета роботи: вивчення принципу роботи, основних параметрів і характеристик релаксаційних генераторів прямокутних сигналів (мультівібраторів).

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання та розрахунки для визначення таких параметрів мультівібратора як частота, тривалість перехідних процесів.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Схеми релаксаційних генераторів або мультівібраторів на основі ОП можуть бути різні. Найбільш прості з них будуються шляхом охоплення ОП колами позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ) і негативного зворотного зв'язку (НЗЗ), причому ПЗЗ по своїй дії у часі повинен бути випереджаючим по відношенню до НЗЗ. Тоді коло ПЗЗ забезпечує лавиноподібний перехід мультівібратора з одного стану в інший, а коло НЗЗ (разом із колом ПЗЗ) обмежує час перебування пристрою в кожному із станів.

На рис. 13.1а і 13.1б показані схеми найпростіших мультівібраторів побудованих на основі ОП.

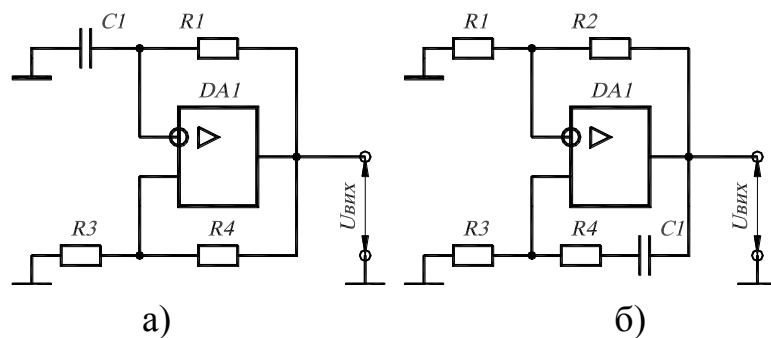


Рисунок 13.1 – Схеми мультівібраторів побудованих на основі ОП

В мультівібраторі рис. 13.1а коло ПЗЗ виконане на основі резистивного подільника R_3, R_4 , а коло НЗЗ містить пасивний інтегратор R_1, C_1 . Якщо рівні обмеження вихідної напруги ($U_{обм}$) ОП однакові за модулем і дорівнюють $+U_{обм}$ і $-U_{обм}$, а $\beta_n = R_3 / (R_3 + R_4)$ – коефіцієнт ПЗЗ, то можна визначити напівперіод коливань $T/2$ як час перезарядки конденсатора C_1 під дією напруги $U_{обм}$ через резистор R_1 від рівня $-\beta_n U_{обм}$ до рівня $+\beta_n U_{обм}$:

$$-\beta_n U_{обм} e^{-T/\tau} + U_{обм} (-e^{-T/\tau}) = \beta_n U_{обм}$$

де $\tau = R_1 C_1$. Звідси отримаємо:

$$T = 2\tau \ln \frac{1+\beta_n}{1-\beta_n} = 2R_1 C_1 \ln \left(1 + 2 \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Часові діаграми напруг на інверсному (e_-), неінверсному (e_+) входах і виході ($U_{вих}$) ОП для даного мультивібратора наведено на рис. 13.2.

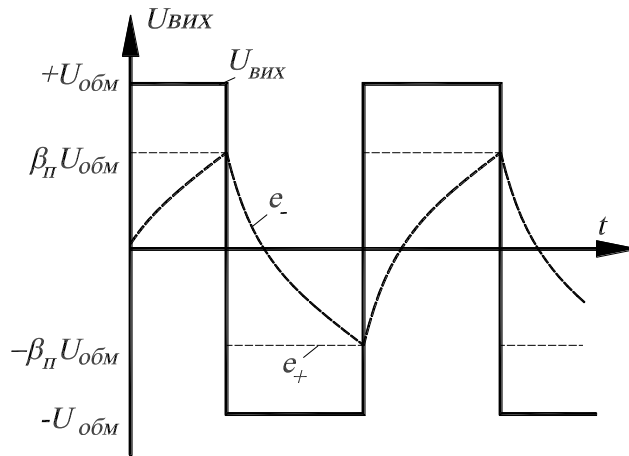


Рисунок 13.2 – Часові діаграми напруг мультивібратора

В мультивібраторі по схемі рис. 13.1б коло ПЗЗ виконано ланкою, що диференціює (C_1, R_4, R_3), а коло НЗЗ утворено резистивним подільником R_2, R_1 . позначимо $\beta_n = R_3 / (R_3 + R_4)$, $\beta_0 = R_1 / (R_1 + R_2)$. Після переходу вихідної напруги мультивібратора, наприклад з рівня $-U_{обм}$ на рівень $+U_{обм}$, стрибок напруги $2\beta_n U_{обм}$, який виникає на неінверсному вході потім зменшується за законом експоненти. Напівперіод коливань $T/2$ визнається часом, на протязі якого напруга на неінверсному вході зменшується до рівня напруги на інверсному вході:

$$\beta_0 U_{обм} + 2\beta_n U_{обм} e^{-T/\tau} = \beta_0 U_{обм},$$

де $\tau = C_1 (R_3 + R_4)$. Виходячи із цієї рівності, знаходимо період коливань:

$$T = 2\tau \ln \left(2 \frac{\beta_n}{\beta_0} - 1 \right) = 2C_1 (R_3 + R_4) \ln \left(1 + 2 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_1 (R_3 + R_4)} \right).$$

Мультивібратор за схемою рис. 13.1 б працюватиме лише за умови $\beta_n > \beta_0$, інакше кажучи, при $R_3 / R_4 > R_1 / R_2$. Часові діаграми напруг на інверсному (e_-), неінверсному (e_+) входах і виході ($U_{\text{вих}}$) ОП для даного мультивібратора наведено на рис. 13.3.

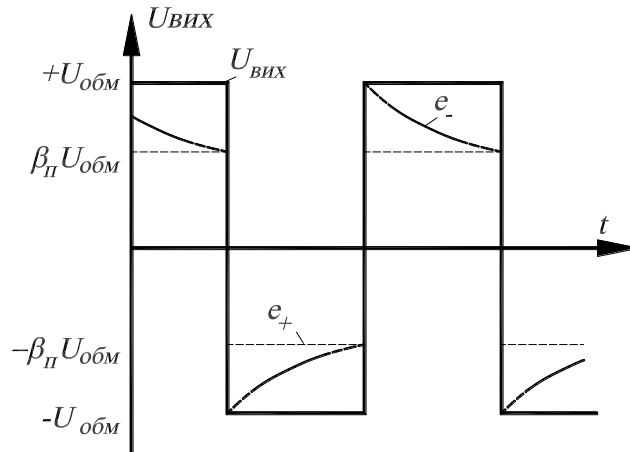


Рисунок 13.3 – Часові діаграми напруг мультивібратора

Для керування автоколиваннями за допомогою вхідної напруги використовуються керовані мультивібратори. На рис. 13.4 показані два різновиду таких мультивібраторів.

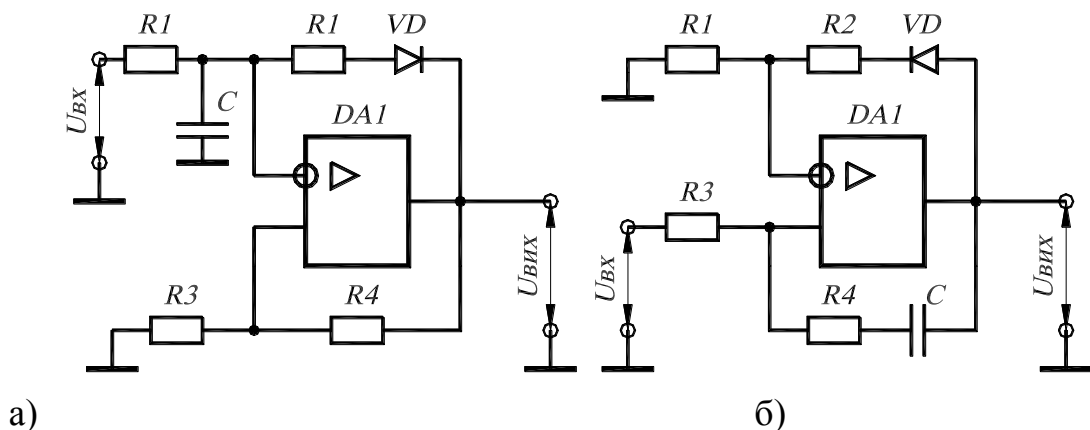


Рисунок 13.4 – Схеми мультивібраторів керованих вхідною напругою

У пристрої по схемі рис. 13.4а за допомогою вхідної напруги включається або виключається режим генерації імпульсів. Якщо $U_{\text{вх}} < 0$, то операційний підсилювач знаходиться в стані від'ємного обмеження, діод VD при цьому закритий. Коли вхідна напруга $U_{\text{вх}}$ позитивна, вихідна напруга

ОП також стає позитивною і діод відкривається. Коли діод відкритий, включається НЗЗ, внаслідок чого пристрій починає працювати в режимі мультивібратора. Умовою виникнення автоколивань в даному випадку є перевищення глибини ПЗЗ над глибиною НЗЗ, що досягається при $R_3 / R_4 > R_1 / R_2$.

Якщо в цьому пристрої змінити напрямок включення діода, то він буде генерувати імпульси при негативній керуючій напрузі на вході.

Якщо в подібній схемі не включати діод в коло НЗЗ, то пристрій набуває властивості дворівневого компаратора. В такому пристрої імпульси на виході існує, поки вихідна напруга $U_{вих} = U_{вх} \left[1 + R_2 / R_1 \right]$ знаходиться в межах лінійної ділянки амплітудної характеристики. В іншому випадку на виході ОП встановлюється напруга, що відповідає позитивному (при $U_{ВХ} > 0$) або негативному (при $U_{ВХ} < 0$) рівням обмеження.

В мультивібраторі по схемі рис. 13.4б за допомогою вхідної напруги відбувається керування частотою автоколивань. В цій схемі заряд конденсатора С проводиться від вхідного сигналу $U_{вх}$, ОП при цьому знаходиться в стані позитивного обмеження, діод VD закритий. Коли під дією сигналу $U_{вх}$ напруга на інверсному вході ОП досягає рівня, що задається на неінверсному вході колом ПЗЗ (R_3, R_4), відбувається лавиноподібний перехід ОП в стан негативного обмеження. Діод VD відкривається, і відбувається розряд конденсатора С через резистор R_2 . Потім пристрій лавиноподібно повертається в попередній стан і так далі. Таким чином, час заряду конденсатора С визначається сигналом $U_{вх}$. Для цього потрібно, щоб було виконана умова $U_{вх} / R_1 \ll U_{обм} / R_2$. Автоколивання в розглядаємом пристрої існують при виконання умов:

$$U_{вх} > U_{обм} R_3 / (R_3 + R_4) \text{ і } U_{вх} < U_{обм} R_1 / R_2.$$

Мультивібратор по схемі рис. 13.4б – це найпростіший перетворювач напруги в частоту (ПНЧ).

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Підготувати цифровий осцилограф DS5000 та стенд до роботи згідно інструкціям з експлуатації (керівництва по експлуатації) що додаються до них.
2. Зібрати схему для дослідження, яка показана на рисунку 13.5.

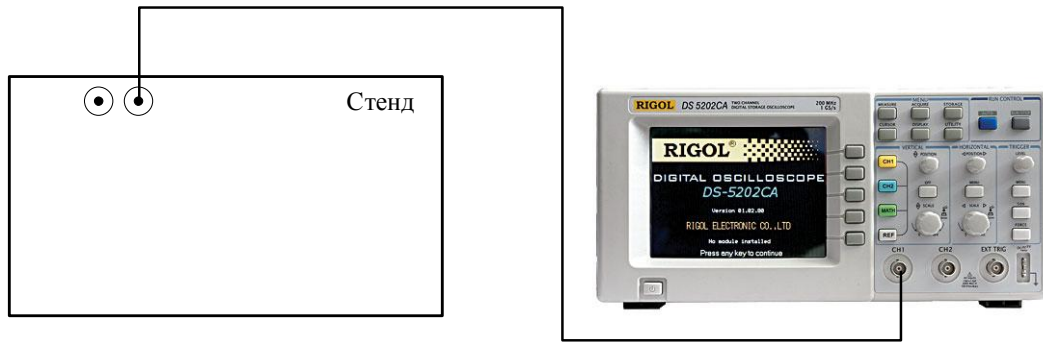


Рисунок 13.5 – Схема для дослідження мультивібратора

3. На лабораторному стенді в полі Multivibrator зібрати схему мультивібратора, використавши значення елементів за варіантами з таблиці 13.1. З'єднати вихід ОП з шиною №10 (роз'єднувач X3). Також до шини №10 підключити осцилограф. Включити стенд за допомогою вимикача живлення. При цьому повинен включитись світлодіод індикації на стенді.

Таблиця. 13.1 – Номінали елементів схеми дослідження мультивібратора

№	1	2	3	4
C, нФ	3,9	10	15	22
R, кОм	10	20	50	100

4. Встановити за допомогою джамперів елементи схеми мультивібратора згідно таблиці 13.2.
5. За допомогою входу CH1 цифрового осцилографа візуалізувати форму напруги на виході мультивібратора та провести вимірювання його періоду. Результати вимірювання занести до таблиці 13.2. Зарисувати осцилограми роботи схеми на виході ОП. Розрахувати період (частоту) повторення імпульсів.

Таблиця 13.2 – Результати дослідження мультівібратора

Величини елементів схеми мультівібратора	Виміряні параметри				Розраховані параметри	
	Осцилограма сигналу на виході(X1)	Осцилограма сигналу на інверсному вході	Осцилограма сигналу на неінверсному вході	Період вихідного сигналу, мС	Частота вихідного сигналу, кГц (експериментальна)	Частота вихідного сигналу, кГц (розрахована)
C1= 3,9нФ, R1=10кОм, R2= кОм, R3= кОм,						
C1= 10нФ, R1=10кОм, R2= кОм, R3= кОм,						
C1= 15нФ, R1=10кОм, R2= кОм, R3= кОм,						

6. З'єднати вхід CH2 цифрового осцилографа з інверсним входом ОП мультівібратора, отримати осцилограму та занести результати до таблиці 13.2.
7. З'єднати вхід CH2 цифрового осцилографа з неінверсним входом ОП мультівібратора, отримати осцилограму та занести результати до таблиці 13.2.
8. Змінити елементи схеми мультівібратора згідно таблиці 13.2 і повторити дії п. 5 – п. 7.
9. По закінченні виконання вимірів вимкнути стенд та цифровий осцилограф з мережі живлення за допомогою вимикачів.

1.5 Зміст звіту

у звіт вносять:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання в окремих точках схеми мультівібратора;
- результати розрахунків вихідної частоти мультівібратора;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Наведіть схеми мультівібраторів і поясніть принцип їх роботи.
2. Проаналізуйте відмінність роботи мультівібраторів із інтегруючою ланкою і диференціюючою ланкою.
3. Від чого залежить частота автоколивань мультівібраторів?
4. Поясніть призначення мультівібраторів які керуються напругою.
5. Приведіть приклади використання генеруючого компаратора.
6. Поясніть принцип роботи перетворювача напруги в частоту.

Література

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 512 с.
2. Ленк Дж. Справочник по современным твердотельным усилителям: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 500 с.
3. Сигорский В.П. Анализ электронных схем. Киев: Гос. изд. техн. лит., 1963. 200 с.
4. Цыкин Г.С. Усилительные устройства. М.: Связь, 1971. 368 с.
5. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Б.П. Кудряшов и др. М.: Радио и связь, 1981. 160 с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
7. Бойко В.І., Гуржій А.М., Жуйков В.Я. та ін. Схемотехніка електронних систем: У 3 Кн. Кн.1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої/Підручник. К.: Вища шк., 2004. – 366 с.: іл.