

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**4442 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни «Аналогова схемотехніка»  
для студентів спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
денної форми навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2018

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Аналогова схемотехніка» / укладач: В. В. Гриненко. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 54 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

## ЗМІСТ

С.

|                       |   |    |
|-----------------------|---|----|
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. | Дослідження напівпровідникових діодів і діодних обмежувачів   | 4  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. | Підсилювальні каскади на біполярних транзисторах  | 14 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. | Дослідження двокаскадних підсилювачів змінного струму   | 23 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. | Дослідження характеристик операційного підсилювача. Дослідження неінвертувального та інвертувального підсилювачів | 32 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. | Додавання і віднімання напруг у схемах на ОП  | 41 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. | Проектування активних фільтрів на операційних підсилювачах  | 46 |

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1.

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ І ДІОДНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ

### 1.1. Мета роботи

Метою роботи є визначення характеристик напівпровідникових діодів та дослідження роботи діодних обмежувачів із використанням автоматизованих засобів моделювання на ПК – Multisim.

### 1.2. Порядок проведення експериментів

#### 1.2.1. Вимірювання параметрів діодів і стабілітронів.

Вимірювання напруги та обчислення струму через діод.

Відкрийте файл Lab1\_1 (рис. 1.1). Оберіть тип діода відповідно до табл. 1.1. Увімкніть схему. Мультиметр покаже напругу на діоді  $U_{np}$  при прямому зміщенні. Переверніть діод і знову запустіть схему.

Таблиця 1.1 – Типи діодів

| Номер варіанта | Тип діода | Тип стабілітрона |
|----------------|-----------|------------------|
| 1              | 1N4152    | 1N4731A          |
| 2              | 1N3595    | 1N4737A          |
| 3              | 1N3881    | 1N4741A          |
| 4              | 1N4305    | 1N4735A          |
| 5              | 1N3660    | 1N4738A          |
| 6              | 1N4001    | 1N4732A          |
| 7              | 1N3064    | 1N4733A          |
| 8              | 1N3208    | 1N4730A          |

Мультиметр покаже напругу на діоді  $U_{3\phi}$  при зворотному зміщенні. Обчисліть струм діода при прямому  $U_{np}$  і зворотному  $I_{3\phi}$  зміщеннях відповідно до формул

$$I_{np} = \frac{E - U_{np}}{R} \quad \text{і} \quad I_{3\phi} = \frac{E - U_{3\phi}}{R} .$$

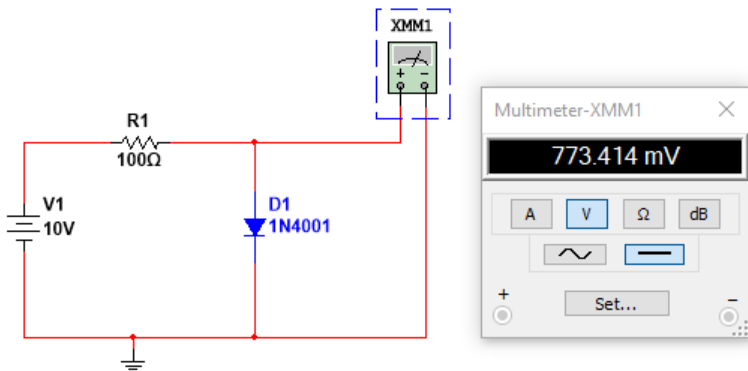


Рисунок 1.1 – Схема для вимірювання напруги на діоді

Вимірювання струму.

Відкрийте файл Lab1\_2 (рис. 1.2), встановіть тип приладу відповідно до варіанту, увімкніть схему. Мультиметр покаже струм діода  $I_{np}$  при прямому зміщенні. Переверніть діод і знову запустіть схему. Тепер мультиметр покаже струм  $I_{зб}$  діода при зворотному зміщенні.

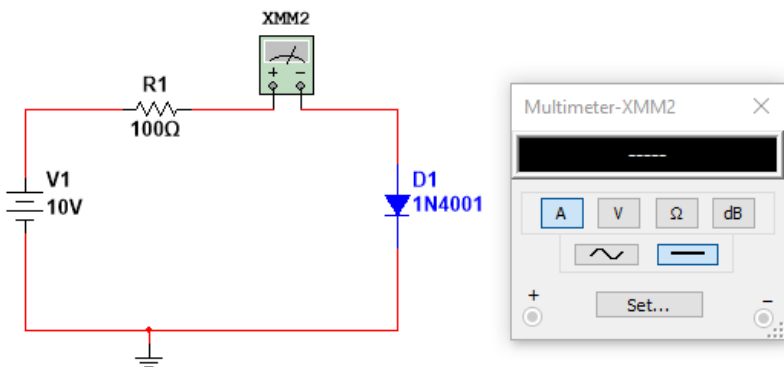


Рисунок 1.2 – Схема для вимірювання струму через діод

Вимірювання статичного опору діода.

Виміряйте опір діода в прямому і зворотному підключенні, використовуючи мультиметр в режимі омметра.

Малі значення опору відповідають прямому підключенню. Показання прямого опору різні для різних шкал омметра. Чому?

Зняття вольтамперної характеристики (ВАХ) діода.

а). Пряма гілка ВАХ. Відкрийте файл Lab1\_3 (рис. 1.3). Увімкніть схему. Послідовно встановлюючи значення ЕРС джерела (V1) рівними 5 В, 4 В, 3 В, 2 В, 1 В, 0.5 В, 0 В запишіть значення напруги  $U_{np}$  і струму  $I_{np}$  діода в таблицю.

б). Зворотна гілка ВАХ. Переверніть діод. Послідовно встановлюючи значення ЕРС джерела (V1) рівними 0 В, 5 В, 10 В, 15 В запишіть значення струму  $I_{зв}$  і напруги  $U_{зв}$  в таблицю.

в). За отриманими даними побудуйте графіки  $I_{np}(U_{np})$  і  $I_{зв}(U_{зв})$ .

г). Побудуйте дотичну до графіка прямої гілки ВАХ при  $I_{np} = 4 \text{ mA}$  і оцініть диференціальний опір діода по нахилу дотичної. Виконайте ту ж процедуру для  $I_{np} = 0,4 \text{ mA}$  і  $I_{np} = 0,2 \text{ mA}$ .

е). Обчисліть опір діода на постійному струмі  $I_{np} = 4 \text{ mA}$  за формулою  $R_{CT} = U_{np} / I_{np}$ .

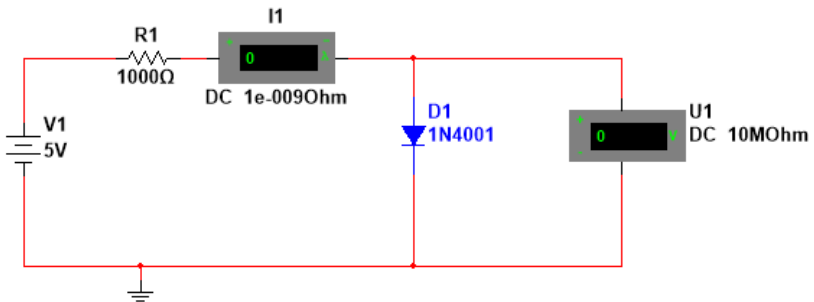


Рисунок 1.3 – Схема для зняття вольтамперної характеристики діода

Вимірювання напруги і обчислення струму через стабілітрон.

а). Відкрийте файл Lab1\_4 (рис. 1.4). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Виміряйте значення напруги  $U_{CT}$  на стабілітроні при значеннях ЕРС джерела 0В, 4В, 6В, 10В, 15В, 20В 25В, 30В, 35В.

б). Обчисліть струм  $I_{CT}$  стабілітрона для кожного значення напруги  $U_{CT}$ . Результати обчислень занесіть в таблицю.

в). За даними таблиці побудуйте вольтамперну характеристику стабілітрона.

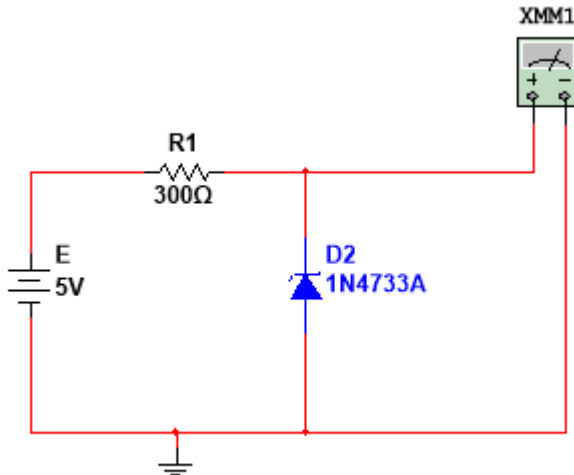


Рисунок 1.4 – Схема для вимірювання напруги і обчислення струму через стабілітрон

г). Оцініть за вольтамперною характеристикою стабілітрона напругу стабілізації.

д). Обчисліть потужність  $P_{ст}$  розсіювання на стабілітроні при напрузі  $E = 20$  В.

## 1.2.2. Дослідження діодних обмежувачів

Вимірювання рівня обмеження послідовного обмежувача.

Відкрийте файл Lab1\_5 (рис. 1.5). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Запишіть максимум вхідної напруги, рівень обмеження напруги.

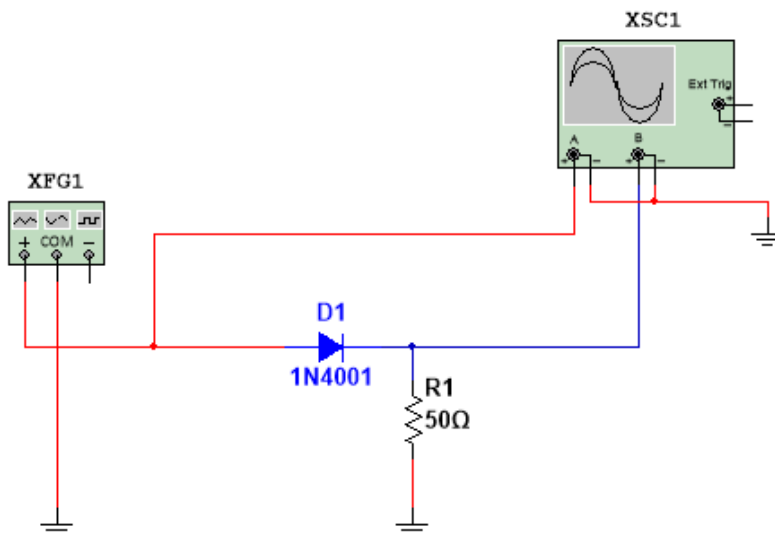


Рисунок 1.5 – Схема для вимірювання рівня обмеження послідовного обмежувача

Вимірювання рівня обмеження напруги в послідовному обмежувачі зі зміщенням.

а). Вимірювання рівня напруги при позитивному зміщенні. Відкрийте файл Lab1\_6 (рис. 1.6). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Запишіть мінімуми вхідної та вихідної напруги і рівень обмеження напруги.



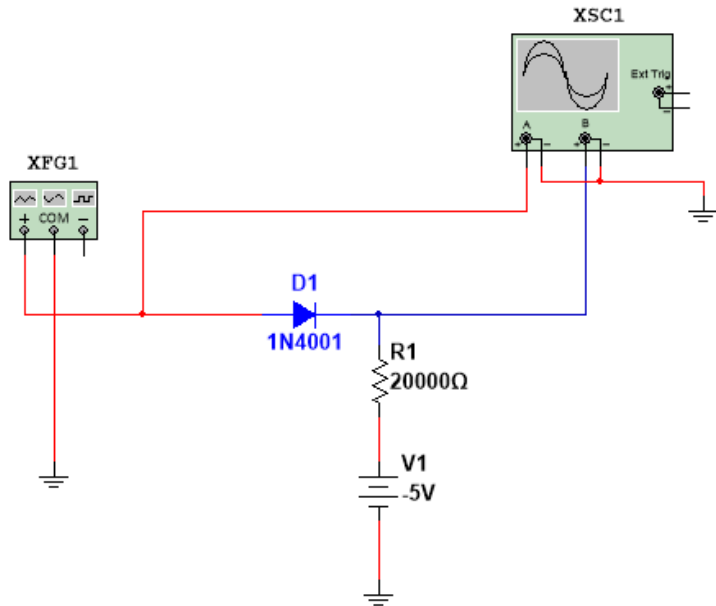


Рисунок 1.6 – Схема для вимірювання рівня обмеження напруги в послідовному обмежувачі зі зміщенням

б). Вимірювання рівня напруги при негативному зміщенні. Змініть полярність ввімкнення джерела живлення. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми входної і вихідної напруги. Запишіть мінімуми входної та вихідної напруги і рівень обмеження напруги.

Вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі.

Відкрийте файл Lab1\_7 (рис. 1.7). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми входної і вихідної напруги. Запишіть максимум входної напруги, мінімум вихідної і рівень обмеження напруги.

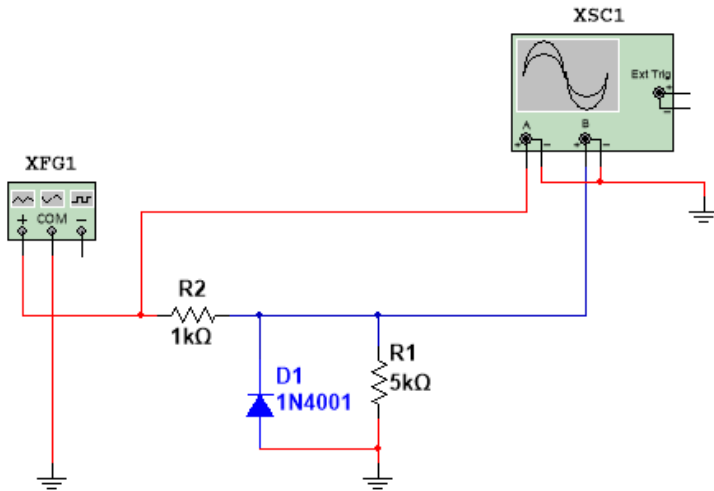


Рисунок 1.7 – Схема для вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі

Вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі зі зміщенням.

а). Вимірювання рівня напруги при позитивному зміщенні. Відкрийте файл Lab1\_8 (рис. 1.8). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Запишіть мінімуми вхідної та вихідної напруги і рівень обмеження напруги.

б). Вимірювання рівня напруги при негативному зміщенні. Змініть полярність ввімкнення джерела живлення. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Запишіть мінімуми вхідної та вихідної напруги і рівень обмеження напруги.

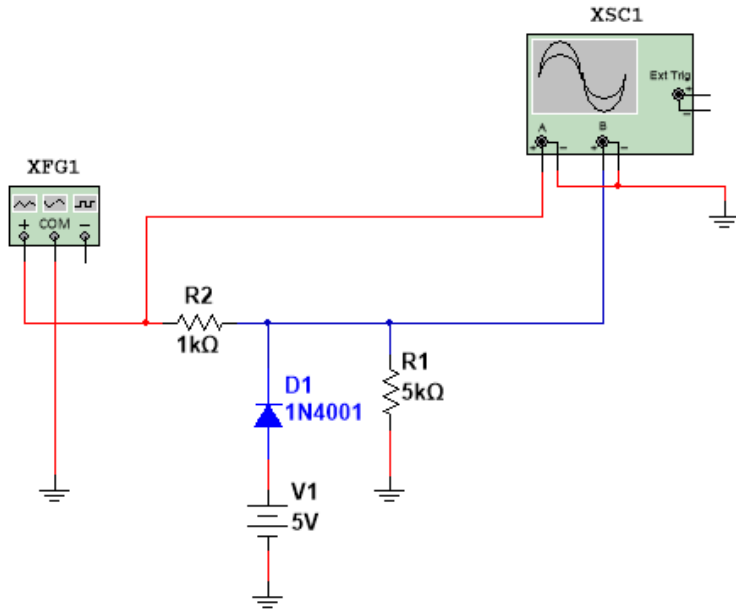


Рисунок 1.8 – Схема для вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі зі зміщенням

Вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі на стабілітроні.

Відкрийте файл Lab1\_9 (рис. 1.9). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Запишіть максимум вхідної напруги, позитивний і негативний рівні обмеження напруги.

Вимірювання рівня обмеження напруги в симетричному шунтуючому обмежувачі на стабілітронах.

Відкрийте файл Lab1\_10 (рис. 1.10). Встановіть тип приладу відповідно до варіанту. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги.

Запишіть максимум вхідної напруги, позитивний і негативний рівні обмеження напруги.

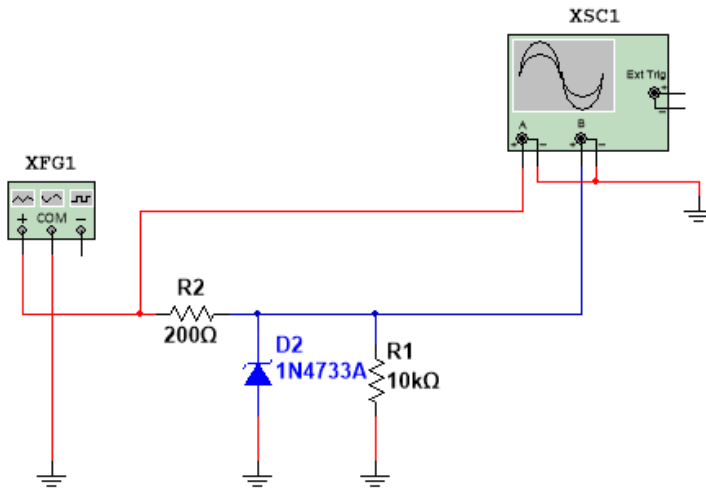


Рисунок 1.9 – Схема для вимірювання рівня обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі на стабілітроні

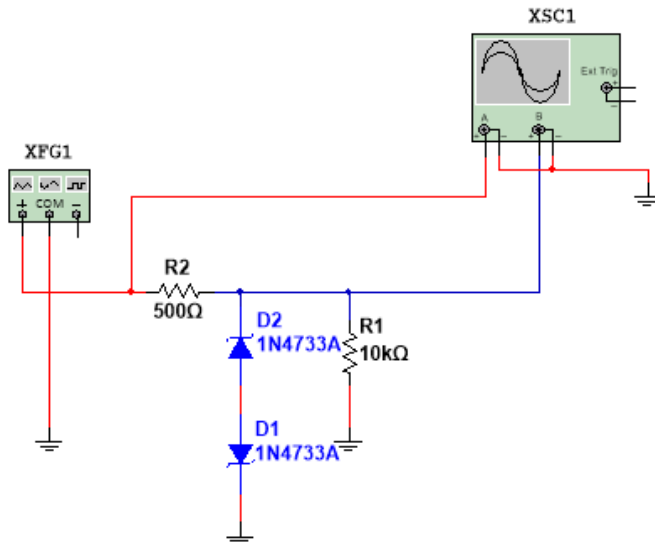


Рисунок 1.10 – Схема для вимірювання рівня обмеження напруги в симетричному шунтуючому обмежувачі на стабілітронах

### 1.3. Зміст звіту

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

### 1.4. Контрольні запитання

1. Порівняйте напруги на діоді при прямому і зворотному зміщенні за порядком величин. Чому вони різні?

2. Чи можна порівняти виміряні значення струму при прямому та зворотному зміщенні з обчисленими значеннями?

3. Порівняйте струми через діод при прямому і зворотному зміщенні за порядком величин. Чому вони різні?

4. Чи набагато відрізняються прямий і зворотний опір діода при вимірюванні їх мультиметром в режимі омметра? Чи можна за цими вимірами судити про справність діода?

5. Чи існує відмінність між величинами опору діода на змінному і постійному струмі?

6. У чому відмінність між рівнями обмеження напруги в послідовних обмежувачах без зміщення і зі зміщенням?

7. Чому в послідовному обмежувачі розрізняються мінімуми вхідної та вихідної напруги?

8. У чому відмінність між вихідними напругами в послідовному і шунтуючому обмежувачах?

9. Чим визначається рівень обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі зі зміщенням?

10. Чим визначаються позитивний і негативний рівні обмеження напруги в шунтуючому обмежувачі на стабілітроні?

11. У чому відмінність між шунтувальним обмежувачем на стабілітроні і симетричним шунтувальним обмежувачем на стабілітронах?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ПІДСИЛЮВАЛЬНІ КАСКАДИ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

### 2.1. Мета роботи

Дослідження підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах.

### 2.2. Короткі теоретичні відомості

Підсилювач електричних сигналів – це пристрій, призначений для підсилення потужності вхідного сигналу за рахунок споживання енергії джерела живлення.

Основні технічні показники підсилювача: коефіцієнт підсилення, вхідний і вихідний опори, вихідна потужність, коефіцієнт корисної дії, амплітудна, амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики.

*Коефіцієнти підсилення.* Розрізняють коефіцієнти підсилення за напругою, за струмом та за потужністю. Коефіцієнт підсилення за напругою в загальному випадку є комплексним через наявність у схемі підсилювача реактивних елементів:

$$\dot{K}_U = \frac{U_{\text{вих}} e^{j\varphi_{\text{вих}}}}{U_{\text{вх}} e^{j\varphi_{\text{вх}}}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} e^{j(\varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}})} = K_U \cdot e^{j\varphi}$$

де  $K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$  – модуль коефіцієнта підсилення за напругою;  $\varphi = \varphi_{\text{вих}} - \varphi_{\text{вх}}$  – фазовий зсув між вхідною і вихідною напругами.

При описанні підсилювального пристрою використовують лише модуль коефіцієнта підсилення  $K_U$ .

*Коефіцієнт підсилення за струмом:*

$$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}}.$$

*Коефіцієнт підсилення за потужністю:*

$$K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}},$$

де  $P_{вих}$  – вихідна потужність, тобто потужність, що віддається підсилювачем у навантаження;  $P_{вх}$  – вхідна потужність, тобто потужність, що віддається джерелом вхідного сигналу.

*Вхідний опір* – опір між вхідними клемми підсилювача для змінного струму  $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$ .

*Вихідний опір* підсилювача визначається співвідношенням:

$$R_{вих} = \frac{U_{вих}}{I_{к.з}} = \frac{U_{хх}}{I_{к.з}},$$

де  $I_{к.з}$  – струм короткого замикання ( $R_H = 0$ );

$U_{хх}$  – напруга холостого ходу ( $R_H = \infty$ ).

*Амплітудно-частотна (АЧХ) і фазово-частотна (ФЧХ) характеристики.*

Залежність модуля коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти є амплітудно-частотною характеристикою (рис. 2.1).

Фазово-частотна характеристика – це залежність кута зсуву фаз між вхідним та вихідним сигналами від частоти.

Для осі абсцис зазвичай використовують логарифмічний масштаб (логарифмічна амплітудно-частотна (ЛАЧХ) і фазово-частотна (ЛФЧХ) характеристики). Це викликано тим, що частотний діапазон сучасних підсилювачів може бути дуже великим, і якщо частоту відкласти в лінійному масштабі, то така характеристика буде незручною для використання, оскільки всі нижні частоти стиснуться біля початку координат, а область верхніх частот

виявиться дуже розтягнутою. Для осі ординат зазвичай використовують лінійний масштаб, при цьому коефіцієнт підсилення може бути відкладений як у відносних одиницях, так і в децибелах.

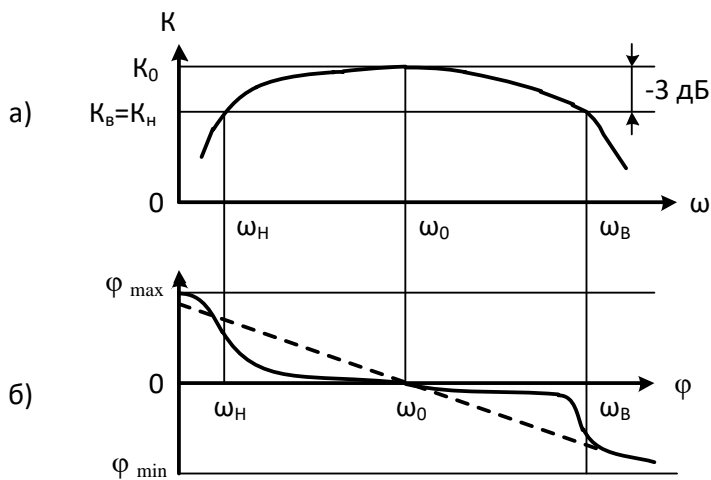


Рисунок 2.1 – Амплітудно-частотна (а) і фазо-частотна (б) характеристики підсилювача

Як бачимо з рис. 2.1 а, при зміні частоти вхідного сигналу від нуля до нескінченності модуль коефіцієнта підсилення спочатку зростає, досягаючи поступово на деякій частоті максимальної величини  $K_0$ , а потім знову зменшується; основна причина цього – наявність у схемі реактивних елементів. Частоти  $\omega_n$  і  $\omega_v$  називаються нижньою і верхньою граничними частотами. Це частоти, на яких модуль коефіцієнта підсилення підсилювача зменшується до допустимої (заданою) величини відносно  $K_0$ . Смуга частот у межах від  $\omega_n$  до  $\omega_v$  називається робочою смугою частот, або смугою пропускання підсилювача.



Смуга пропускання підсилювача – діапазон робочих частот  $\Delta\omega$ , у межах якого коефіцієнт підсилення не знижується нижче значення  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  від свого максимального значення  $K_0$ . Якщо відновити перпендикуляр із точки на вісь абсцис, що відповідає значенню  $K_0/\sqrt{2}$ , до перетину з АЧХ, то проекція на вісь абсцис першої точки перетину відповідає нижній ( $\omega_n$ ), а другий – верхній ( $\omega_g$ ) частотам пропускання підсилювача, й, отже, смуга пропускання  $\Delta\omega = \omega_g - \omega_n$ . Якщо коефіцієнт підсилення вимірюється в децибелах, то значенням граничних частот підсилення  $\omega_n$  і  $\omega_g$  відповідає зменшення коефіцієнта підсилення на 3 дБ.

Амплітудна характеристика (АХ) відображає залежність сталого значення вихідного сигналу від вхідного синусоїдального сигналу  $U_{вих} = f(U_{вх})$  на деякій частоті (рис. 2.2).

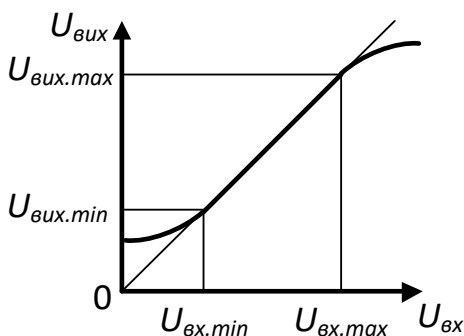


Рисунок 2.2 – Амплітудна характеристика підсилювача

У робочому діапазоні амплітуд вхідного сигналу амплітудна характеристика має бути лінійною (у межах між  $U_{вх.min}$  і  $U_{вх.max}$ ), а кут її нахилу визначається величиною

коефіцієнта підсилення на цій частоті. Мінімальний вхідний сигнал  $U_{ex.min}$  визначається рівнем власних шумів підсилювача  $U_{ш}$ , максимальний вхідний сигнал  $U_{ex.max}$  – переходом на нелінійну область характеристики, що зумовлює нелінійні спотворення, за рахунок зменшення коефіцієнта підсилення підсилювача.

### 2.3. Порядок проведення експериментів

2.3.1. Дослідження підсилювача за схемою із спільний емітером (СЕ).

1. Відкрийте файл Lab2\_1 зі схемою (рис. 2.3).

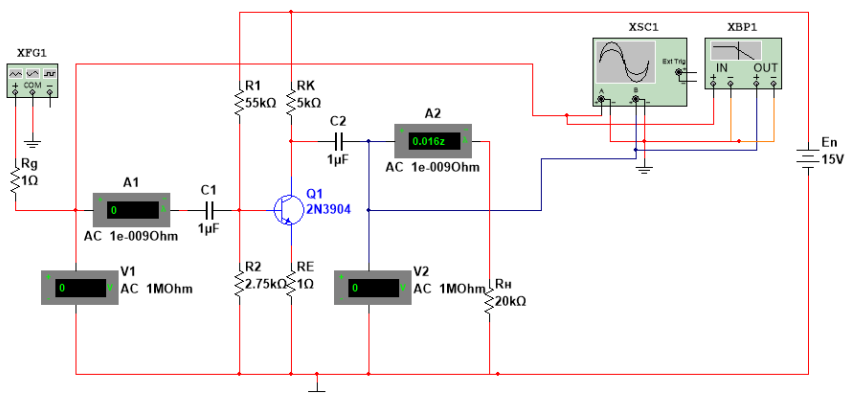


Рисунок 2.3 – Підсилювач за схемою із СЕ

2. Встановіть на генераторі частоту 1000 Гц і амплітудне значення напруги генератора  $U_g = 10\text{ мВ}$ .

3. Увімкніть схему та проконтролюйте за допомогою осцилографа наявність напруги на вході та на виході схеми (якщо сигнал спотворений, варто зменшити напругу вхідного сигналу).

4. Розрахуйте вхідний опір каскаду  $R_{ex}$ .

5. Встановіть опір генератора  $R_g = 0$ . Виміряйте напругу на вході схеми за допомогою вольтметра V1.

Збільшуйте опір  $R_g$  до зменшення вхідної напруги вдвічі. Порівняйте значення  $R_g$  з вхідним опором, визначеним в пункті 4.

6. Розрахуйте вихідний опір каскаду  $R_{вих}$ .

7. Відключіть опір навантаження ( $R_n = \infty$ ). Виміряйте напругу на виході схеми за допомогою вольтметра V2. Підключіть навантаження та шляхом підбору опору  $R_n$  зменшить значення вихідної напруги вдвічі. Порівняйте значення  $R_n$  з вихідним опором, визначеним в пункті 6.

8. За допомогою показів вольтметрів V1 та V2 визначить коефіцієнт підсилення за напругою, а амперметрів A1 та A2 коефіцієнт підсилення за струмом. Результати вимірювань та розрахунків занести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати за експериментом 2.3.1

| $U_g$ | V1 | V2 | A1 | A2 | $K_U$ | $K_I$ | $R_{вх}$ | $R_{вих}$ |
|-------|----|----|----|----|-------|-------|----------|-----------|
|       |    |    |    |    |       |       |          |           |

9. Зніміть та побудуйте АХ підсилювача при частоті вхідного сигналу 1000 Гц. Результати занести в табл. 2.2.

10. За допомогою Bode Plotter дослідить АЧХ підсилювача ( $K_U = \psi(f)$ ) визначить частоти  $f_n$  і  $f_g$ .

Таблиця 2.2 – Результати досліджень для побудови АХ підсилювального каскаду СЕ

| $U_g$ | V1 | V2 | $K_U$ |
|-------|----|----|-------|
| 1 mV  |    |    |       |
| 2 mV  |    |    |       |
| 5 mV  |    |    |       |
| 10 mV |    |    |       |
| 20 mV |    |    |       |
| 40 mV |    |    |       |

2.3.2. Дослідження підсилювача за схемою із спільним емітером зі зворотнім зв'язком (СЕ із ЗЗ).

1. Відкрийте файл Lab2\_1 зі схемою (рис. 2.3). Встановіть значення  $RE = 100 \text{ Ом}$ . Виконайте пп. 2-10 як в експерименті 1.

2.3.3. Дослідження підсилювача за схемою із спільним колектором (СК).

1. Відкрийте файл Lab2\_2 зі схемою (рис. 2.4). Виконайте пп. 2-9 як експерименті 1.

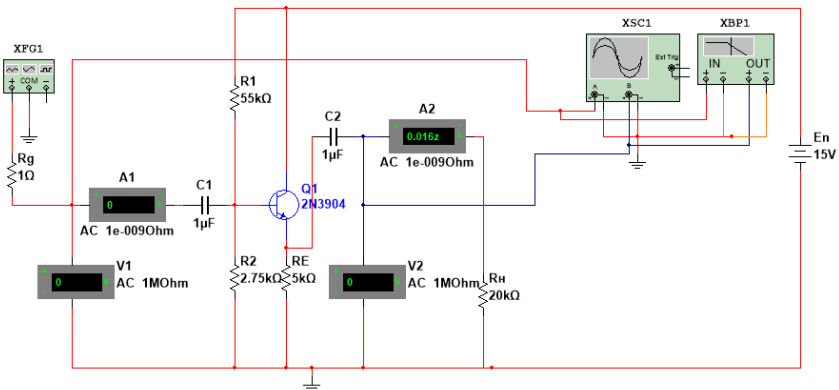


Рисунок 2.4 – Підсилювач за схемою із СК

2.3.4. Дослідження підсилювача за схемою із спільною базою (СБ).

1. Відкрийте файл Lab2\_3 зі схемою (рис. 2.5). Виконайте пп. 2-10 як експерименті 1.

За результатами проведених експериментів розрахуйте коефіцієнти  $K_I$  та  $K_P$  для кожної схеми та занесіть результати обчислень в табл. 2.3.

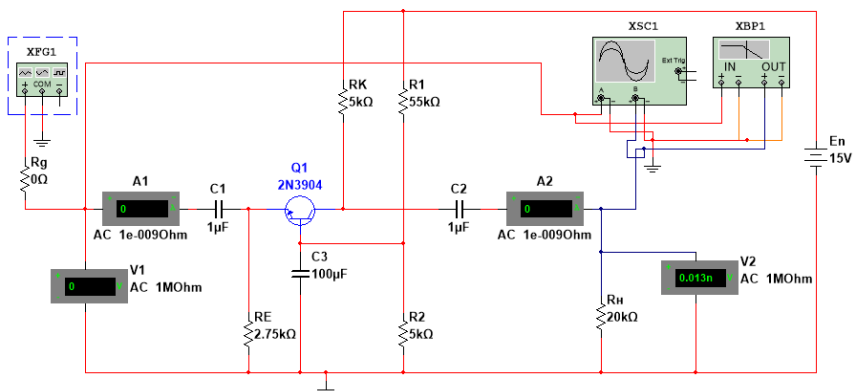


Рисунок 2.5 – Підсилювач за схемою із СБ

Таблиця 2.3 – Параметри підсилювальних каскадів

|           | Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі |          |    |    |
|-----------|--|----------|----|----|
|           | СЕ   | СЕ із ЗЗ | СК | СБ |
| $R_{вх}$  |  |          |    |    |
| $R_{вих}$ |  |          |    |    |
| $K_U$     |  |          |    |    |
| $K_I$     |  |          |    |    |
| $K_P$     |  |          |    |    |

## 2.4. Зміст звіту

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

## 2.5. Контрольні запитання

1. Накресліть електричну принципіальну схему підсилювальних каскадів СЕ, СК. Поясніть призначення елементів.

2. Порівняйте каскади за їх основними параметрами і характеристиками.

3. Назвіть і накресліть реалізації основних способів задання режиму біполярних транзисторів за постійним струмом.

4. Поясніть вплив температури на роботу підсилювального каскаду.

5. Поясніть принципи роботи схем емітерної та колекторної температурної стабілізації.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАСКАДНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

## 3.1. Мета роботи

Вивчити пристрій двокаскадного напівпровідникового підсилювача низької частоти. Отримати практичні навички віртуальних досліджень підсилювачів змінного струму в оболонці програми Multisim. Експериментально підтвердити теоретичні знання, отримані на лекціях по напівпровідникових підсилювачів низької частоти.

## 3.2. Короткі теоретичні відомості

Схема транзисторного двокаскадного підсилювача наведена на рис. 3.1.

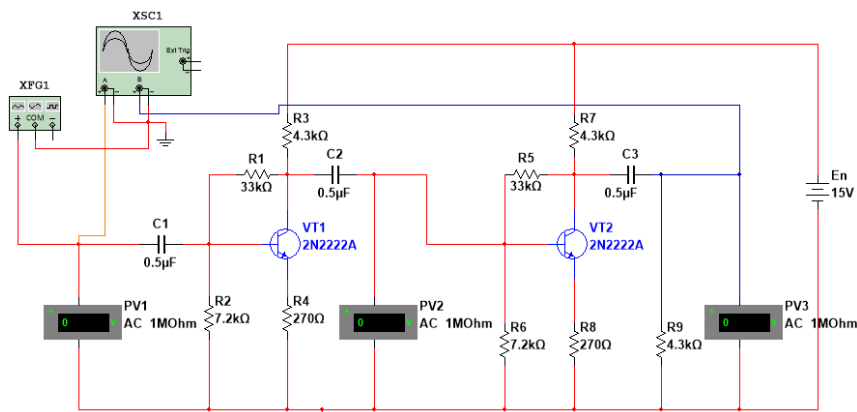


Рисунок 3.1. – Схема двокаскадного транзисторного підсилювача

Обидва каскади підсилювача виконані по ідентичним схемами з загальним емітером і працюють в режимі класу А, тобто без відсічки колекторного струму.

Режими роботи транзисторів VT1 і VT 2 по постійному струму задаються за допомогою базових подільників R1, R2 і

R5, R6, емітерних резисторів R4 і R8 і колекторних резисторів R3 і R7. Завдяки дії негативного зворотного зв'язку по напрузі (через резистор R1 в першому каскаді і резистор R5 у другому) і негативного зворотного зв'язку по струму (за рахунок включення в ланцюзі емітерів резисторів R4 і R8) досягається висока стабільність струмів і напруги спокою колекторів транзисторів в каскадах.

Для виключення впливу джерела вхідного сигналу на струм і напругу спокою транзистора VT1 застосований розділовий конденсатор C1. Розділовий конденсатор C2 забезпечує розв'язку першого і другого каскадів підсилювача по постійному струму. Для виключення впливу навантаження на струм і напругу спокою транзистора VT2 застосований розділовий конденсатор C3.

Робота підсилювача полягає в наступному. Слабкий синусоїдальний сигнал подається на вхід підсилювача і через розділовий конденсатор C1 надходить на базу транзистора VT1. Виникає синусоїдальний струм бази, який у першому наближенні пропорційний вхідній напрузі. Пропорційне змінам струму бази відбуваються зміни струму колектора, причому ці зміни в десятки разів більше змін струму бази (транзистор здійснює посилення струму бази). Між емітером і колектором транзистора VT1 виникає змінна складова напруги, яка через розділовий конденсатор C2 надходить на базу транзистора VT2 другого каскаду.

Сигнал на виході першого каскаду суттєво більше вхідного і зрушений щодо нього по фазі на  $180^\circ$ . Каскад з СЕ підсилює і інвертує вхідний сигнал.

Другий каскад підсилювача працює аналогічно першому. З його виходу (колектор VT2) сигнал в навантаження (опір R9) надходить через розділовий конденсатор C3. Цей каскад так само, як і перший, підсилює і інвертує свій вхідний сигнал. У підсумку виходить, що даний двокаскадний підсилювач є неінвертуючим.



### 3.3. Порядок проведення експериментів

#### 3.3.1. Віртуальна установка.


Віртуальна установка (рис. 3.1) для досліджуваного двокаскадного підсилювача змінного струму містить:

- джерело підсилюваного сигналу у вигляді генератора сигналів низької частоти *XFG1 (Function Generaor)*;
- три мілівольтметра *PV1, PV2, PV3*, налаштовані на режим вимірювання змінного струму (режим *AC*);
- двоканальний осцилограф *PG2*;
- транзистори *VT1, VT2* типу *2N2222A* з бібліотеки *2n*;
- резистори *R1 ... R9* і конденсатори *C1, C2 i C3*, номінали яких вказані на схемі.

3.3.2. Провести дослідження амплітудної характеристики двокаскадного підсилювача змінного струму.

Відкрийте файл *LabW\_3\_1* з віртуальною установкою (див. рис. 3.1) для дослідження двокаскадного підсилювача змінного струму.

Перевірте параметри вольтметрів. Відкривши діалогове вікно *Voltmeter Properties*, відкрити вкладку *Value* і в віконці *Mode* задати тип вольтметра - *AC* (вольтметр змінного струму). У віконці *Resistance (R)* встановіть внутрішній опір вольтметра 1 МОм.

Налаштуйте функціональний генератор *Function Generator (PG1)* на режим синусоїдальних коливань для чого натиснути кнопку . Встановіть початкову частоту (*Frequency*)  $f = 5$  кГц, тривалість робочого циклу (*Duty cycle*) 50%, амплітудне значення вихідного сигналу (*Amplitude*)  $U_{вих.Дж.} = 0$  мВ, постійну складову вихідного сигналу генератора *Offset*  $U_ = 0$  В.

Включіть віртуальну установку і зняти амплітудну характеристику підсилювача на частоті  $f = 5$  кГц, змінюючи амплітудне значення синусоїдального сигналу на вході підсилювача відповідно до даних табл. 3.1. Діючі значення вхідних і вихідних напруги каскадів вимірювати за допомогою мілівольтметрів *PV1, PV2, PV3*.

Обчисліть коефіцієнти підсилення каскадів і підсилювача по напрузі. Результати занесіть в табл. 3.1:

$$K_{U1} = \frac{U_{вих1}}{U_{вх1}}; K_{U2} = \frac{U_{вих2}}{U_{вх2}}; K_U = \frac{U_{вих2}}{U_{вх}}$$

Переконатися, що  $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2}$ .

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань за пунктом 3.3.2.3

|                   |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
|-------------------|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $U_{вх.Джс.}, мВ$ | 0 | 10 | 20 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| $U_{вх}, мВ$      |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $U_{вих1}, мВ$    |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $U_{вих2}, мВ$    |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $K_{U1}$          |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $K_{U2}$          |   |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $K_U$             |   |    |    |    |     |     |     |     |     |

3.3.3. Дослідження форм сигналів вихідних напруги  $U_{вих1}$  і  $U_{вих2}$ .

Дослідження форми вихідної напруги  $U_{вих1}$  і  $U_{вих2}$  осцилографом і відзначення, при якій вхідній напрузі  $U_{вх}$  відбувається спотворення форми синусоїди. Для цього:

– Подвійним клацанням лівої кнопки миші по піктограмі осцилографа відкрити осцилограф.

– Встановіть тривалість розгортки осцилографа (*Timebase*) 0,2 mS/Div.

– Встановіть чутливість відхилення каналу осцилографа А 500 mV/Div, а каналу В - 5 V/Div.

– Встановіть режим DC роботи каналів А і В.

– Змістіть промінь каналу А по вертикалі вниз на два ділення вниз ( $Y_{poson} = -2$ ).

– Включіть лабораторну установку і при  $U_{вих.Джс.} = 50 мВ$  замалювати форму вихідної напруги

підсилювача.

–Збільшуючи амплітуду вхідного сигналу зафіксувати на екрані осцилографа появу спотворень вихідного сигналу підсилювача. Запишіть значення вхідного сигналу при якому наступають спотворення і замалюйте форму вихідної напруги підсилювача.

3.3.4. Побудова амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) підсилювача.


Зніміть амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) підсилювача двома способами:

–використовуючи генератор синусоїдальних коливань і вольтметри;

–використовуючи вимірювач амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) - *Bode`Plotter*.

Вимірювання АЧХ двокаскадного підсилювача за допомогою генератора синусоїдальних коливань і вольтметрів.

Відкрийте файл LabW\_3\_1 з віртуальною установкою (див. рис. 3.1).

Налаштуйте функціональний генератор *Function Generator (XFG1)* на режим синусоїдальних коливань, натиснувши кнопку . Встановіть тривалість робочого циклу (*Duty cycle*) 50%, амплітудне значення вихідного сигналу  $U_{вих.Дж.} = 70,7 мВ$  постійну складову вихідного сигналу генератора *Offset*  $U_ = 0 В$ .

Включіть установку і зніміть АЧХ підсилювача, підтримуючи незмінною величину вхідної напруги  $U_{вх.}$  підсилювача. Частоту сигналу, що подається на вхід підсилювача змінювати відповідно до даних табл. 3.2. Діючі значення вхідних  $U_{вх.}$  і  $U_{вх.2}$  та вихідної  $U_{вих.2}$  напруги каскадів вимірювати за допомогою вольтметрів *PV1*, *PV2*, *PV3*, які всі повинні працювати в режимі *АС*.

Обчисліть коефіцієнт підсилення для різних частот

$$K_U = \frac{U_{вих2}}{U_{вх}}$$

і в децибелах

$$K_{U_{дБ}} = 20 \lg \frac{U_{вих2}}{U_{вх}}$$

і занесіть результати в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань за пунктом 3.3.4.1



| $f, кГц$       | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,5 | 1 | 10 | 2000 | 5000 | 10000 | 25000 |
|----------------|------|-----|------|-----|-----|---|----|------|------|-------|-------|
| $U_{вих2}, мВ$ |      |     |      |     |     |   |    |      |      |       |       |
| $K_U, раз$     |      |     |      |     |     |   |    |      |      |       |       |
| $K_U, дБ$      |      |     |      |     |     |   |    |      |      |       |       |

Вимірювання АЧХ двокаскадного підсилювача за допомогою *Bode`Plotter*.

*Bode`Plotter* є вимірювальний прилад, призначений для побудови АЧХ або фазочастотної характеристики (ФЧХ) електронних пристроїв. Він об'єднує в собі генератор синусоїдальних коливань і екранний відеореєстратор. За час наростання частоти від початкового значення  $f_{\min}$  до кінцевого -  $f_{\max}$  промінь на екрані відеореєстратора проходить шлях від лівої межі екрану до правого. Закон зміни частоти в часі може бути заданий лінійним або логарифмічним. Відхилення променю по вертикалі відбувається в залежності від коефіцієнта посилення по напрузі досліджуваного пристрою. Величина відхилення променю може бути пропорційною коефіцієнту підсилення каскаду на даній частоті, а може змінюватися за логарифмічною залежності.

Лицьова панель модельованого в програмі Multisim *Bode`Plotter* показана на рис. 3.2. По горизонталі екрана відображається вісь частот в лінійному або в логарифмічному

масштабі. Тип осі задають кнопками *Horizontal Log* або *Lin*. Тип вертикальної осі може бути встановлений лінійним (натиснута кнопка *Vertical Lin*) або логарифмічним (натиснута кнопка *Vertical Log*). В останньому випадку коефіцієнт посилення виходить в децибелах.

На екрані є переміщуваний стрілками  і  по осі частот бігунок. Значення поточного значення частоти і коефіцієнта посилення в місці установки бігунка відображаються в віконцях лицьовій панелі.

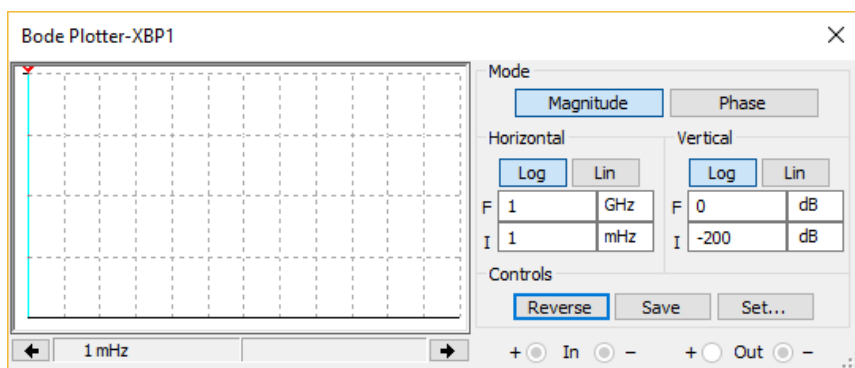


Рисунок 3.2 – Лицьова панель Bode`Plotter

Відкрийте файл LabW\_3\_2 з віртуальною установкою (див. рис. 3.3).

Встановіть логарифмічний масштаб по осі частот (по горизонталі) і по осі коефіцієнта посилення (по вертикалі). Межі вимірювання коефіцієнта підсилення (по вертикалі) задати від  $I = 0$  дБ до  $F = 40$  дБ. Діапазон частот задати від  $I = 100$  мГц до  $F = 100$  МГц.

Включіть віртуальну установку і отримайте на екрані АЧХ двокаскадного підсилювача. Переміщаючи бігунки визначить:

– коефіцієнт підсилення в області середніх частот  $K_{U_0}$  (на частоті 5 кГц);

– нижню  $f_n$  і верхню  $f_6$  частоти підсилювача, коли коефіцієнт підсилення по напрузі стає на 3 дБ менше, ніж  $K_{U_0}$  [дБ].

Результати вимірювань занести в табл. 3.3.

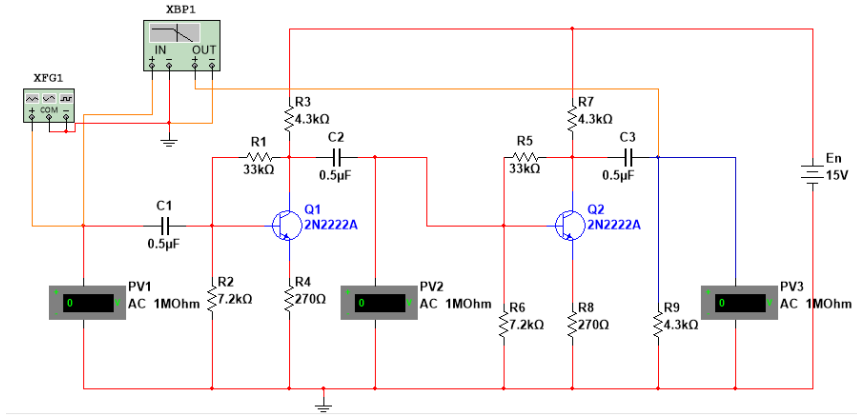


Рисунок 3.3. – Віртуальна установка для дослідження АЧХ двокаскадного підсилювача за допомогою Bode`Plotter

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань за пунктом 3.3.4.2

|   |  |
|---|--|
| Коефіцієнт підсилення в області середніх частот $K_{U_0}$ , дБ  |  |
| Коефіцієнт підсилення в області середніх частот $K_{U_0}$ , раз |  |
| Нижня гранична частота $f_n$ , Гц                               |  |
| Верхня гранична частота $f_6$ , МГц .                           |  |

### 3.4. Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електричні схеми експериментальних установок.
3. Таблиці і графіки амплітудної і амплітудно-частотної характеристик підсилювача.
4. Осцилограми неспотвореного і спотвореного вихідного сигналу підсилювача.
5. Висновки.

### 3.5. Контрольні запитання

1. У чому полягає робота ланцюга температурної стабілізації в підсилювачі?
2. Як задається в досліджуваному підсилювачі режим спокою транзисторів?
3. Яку функцію виконують конденсатори в підсилювачі?
4. Які нелінійні спотворення спостерігаються на екрані осцилографа?
5. Які причини появи нелінійних спотворень?
6. Як визначається смуга пропускання підсилювача?
7. Як відбувається посилення сигналу в підсилювачі?
8. Чому найбільшого поширення в схемах підсилювачів отримав каскад із загальним емітером?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІНВЕРТУВАЛЬНОГО ТА ІНВЕРТУВАЛЬНОГО ПІДСИЛЮВАЧІВ.

#### 4.1. Мета роботи

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

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

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

#### 4.2. Короткі теоретичні відомості

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

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



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

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

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

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

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

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

У довідниках вказують модуль цієї величини.

Схема для вимірювання вхідних струмів представлена на рис. 4.1.

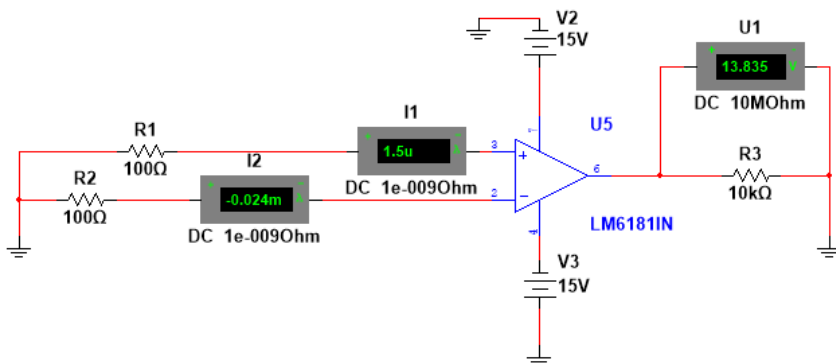


Рисунок 4.1 – Схема для вимірювання вхідних струмів

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

прагнути до нескінченності.

Коефіцієнт підсилення напруги схеми підсилювача на ОП (рис. 4.2) обчислюється за формулою:

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

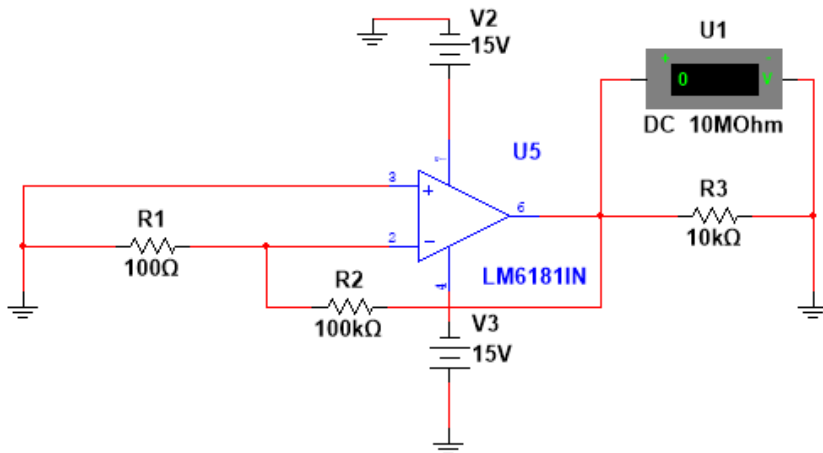


Рисунок 4.2 – Підсилювач на ОП

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

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

$$U_{3M} = \frac{U_{ВИХ}}{K_U}.$$

Вхідний опір  $R_{ВХ}$ . Розрізняють дві складові вхідного опору: диференціальний вхідний опір і вхідний опір по синфазному сигналу. Вхідний опір по синфазному сигналу визначається як відношення приросту вхідної синфазної напруги  $\Delta U_{ВХ.СФ}$  до збільшення середнього вхідного

струму  $\Delta I_{BX.CP}$ :

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

Диференціальний вхідний опір може бути визначений за формулою:

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

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

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

Схема для вимірювання диференціального вхідного опору ОП і вихідного опору наведена на рис. 4.3.

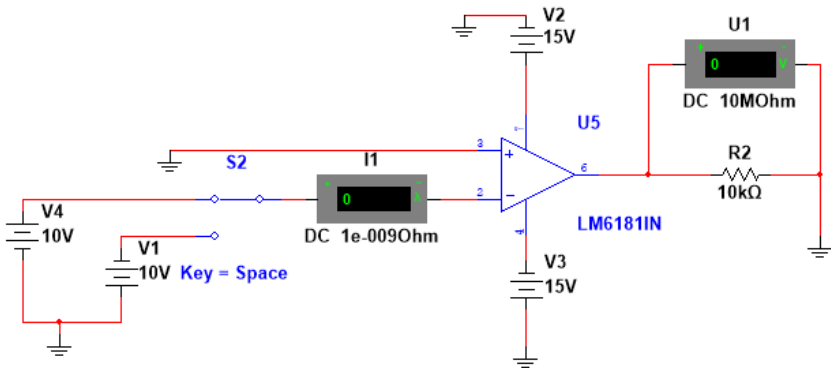


Рисунок 4.3 – Схема для вимірювання диференціального вхідного опору ОП і вихідного опору.

#### 4.2.1. Неінвертувальний підсилювач

Коефіцієнт підсилення схеми неінвертувального підсилювача на ОП (рис. 4.4) обчислюється за формулою:

$$K_U = 1 + \frac{R_I}{R_2}.$$

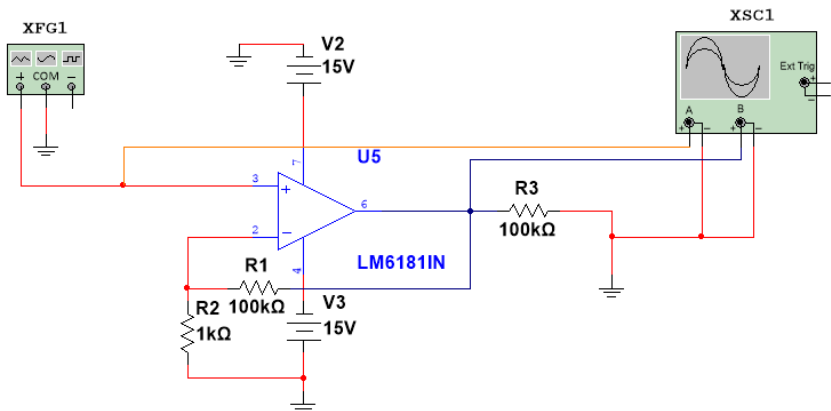


Рисунок 4.4 – Неінвертувальний підсилювач

Постійна складова вихідної напруги підсилювача  $U_{0ВИХ}$  визначається співвідношенням напруги зсуву  $U_{ЗМ}$  на коефіцієнт підсилення схеми  $K_U$ :

$$U_{0ВИХ} = U_{ЗМ} \cdot K_U.$$

#### 4.2.2. Інвертувальний підсилювач

Коефіцієнт підсилення інвертувального підсилювача на ОП зі зворотним зв'язком (рис. 4.5) обчислюється за формулою:

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

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

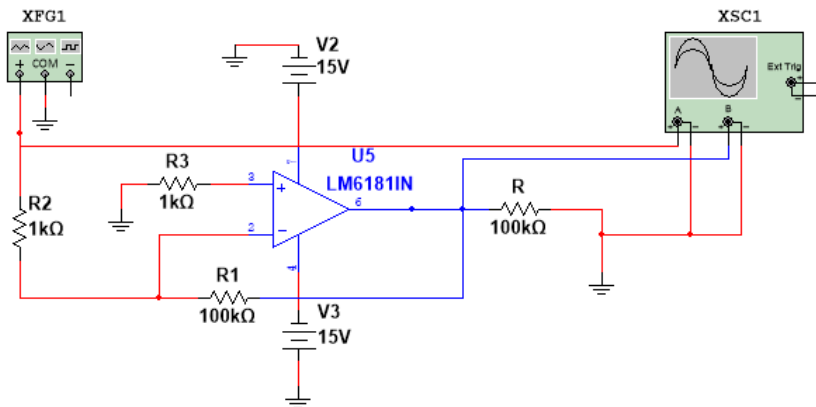


Рисунок 4.5 – Інвертувальний підсилювач

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

$$U_{0ВИХ} = U_{ЗМ} \cdot K_U.$$

#### 4.3. Порядок проведення експериментів

Виберіть тип операційного підсилювача за номером варіанту (табл 4.1).

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

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

#### 4.3.1. Вимірювання вхідних струмів.

Відкрийте файл Lab4\_1 (рис. 4.1). Увімкніть схему. Виміряйте вхідні струми ОП. За результатами вимірювань обчисліть середній вхідний струм  $I_{BX}$  і різницю  $\Delta I_{BX}$  вхідних струмів ОП.

#### 4.3.2. Вимірювання напруги зсуву

Відкрийте файл Lab4\_2 (рис. 4.2). Увімкніть схему. Запишіть показання вольтметра. За результатами вимірювання, обчисліть напругу зміщення  $U_{ЗМ}$ , використовуючи коефіцієнт підсилення схеми на ОП.

#### 4.3.3. Вимірювання вхідного і вихідного опорів

1. Відкрийте файл Lab4\_3 (рис. 4.3). Увімкніть схему. Виміряйте вхідний струм  $I_{BX}$  і вихідну напругу  $U_{ВИХ}$ , запишіть показання. Переведіть ключ клавішею [Space]. Виміряйте вхідний струм після перемикання ключа. Розрахуйте зміни вхідних напруги і струму. За отриманими результатами обчисліть диференціальне вхідний опір ОП.

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

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

4.3.4. Робота неінвертувального підсилювача в режимі підсилення синусоїдальної напруги.

Відкрийте файл Lab4\_4 (рис. 4.4). Розрахуйте коефіцієнт підсилення напруги  $K_U$  підсилювача по заданим значенням параметрів компонентів схеми. Увімкніть схему. Виміряйте амплітуди вхідного  $U_{BX}$  і вихідного  $U_{ВИХ}$  синусоїдальних напруги. Також виміряйте постійну складову вихідної напруги  $U_{ОВИХ}$  і різниця фаз між вхідним і вихідним напругами. За результатами вимірювань обчисліть коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  підсилювача.

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

4.3.5. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

У схемі (рис. 4.4) зменшить значення опору  $R_I$  з 100кОм до 10кОм, амплітуду синусоїдальної напруги генератора збільште до 100 мВ. Встановіть масштаб напруги на вході А осцилографа 100 mV / div, а на каналі В - 500 mV / div. Увімкніть схему. Повторіть всі операції експерименту 4.3.5. при нових параметрах компонентів.

4.3.6. Робота підсилювача в режимі підсилення синусоїдальної напруги.

Відкрийте файл Lab4\_5 (рис. 4.5). Розрахуйте коефіцієнт підсилення напруги  $K_U$  підсилювача за значеннями параметрів компонентів схеми. Увімкніть схему. Виміряйте амплітуду вхідного  $U_{ВХ}$  і вхідного  $U_{ВИХ}$  синусоїдальної напруги, постійну складову вихідної напруги  $U_{ОВИХ}$  і різниця фаз між вхідним і вихідним напругою. За результатами вимірювань обчисліть коефіцієнт підсилення по напрузі  $K_U$  підсилювача.

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

4.3.7. Дослідження впливу параметрів схеми на режим її роботи.

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

схеми повторіть всі виміри та обчислення експерименту 4.3.6.

#### 4.4. Зміст звіту

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

#### 4.5. Контрольні запитання

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



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. ДОДАВАННЯ І ВІДНІМАННЯ НАПРУГ У СХЕМАХ НА ОП.

### 5.1. Мета роботи

Аналіз роботи схеми суматора на ОП. Дослідження схеми додавання і віднімання напруги.

### 5.2. Короткі теоретичні відомості

#### 5.2.1. Інвертувальний суматор.

В інвертувальному суматорі (рис. 5.1), нехтуючи вхідними струмами і напругою зсуву, виконуються наступні співвідношення:

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

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

З отриманих співвідношень можна отримати вираз для вихідної напруги:

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

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

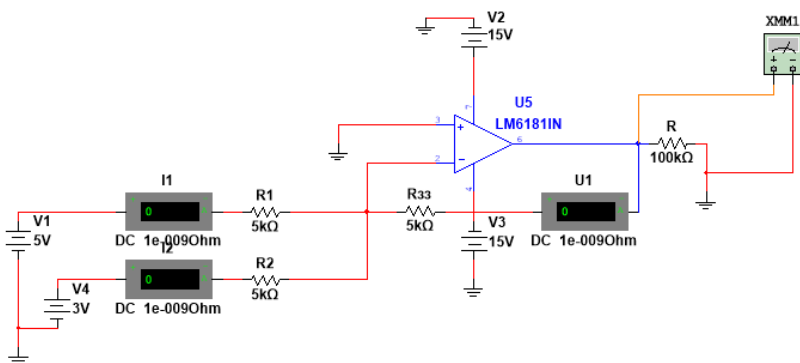


Рисунок 5.1 – Інвертувальний суматор

### 5.3. Порядок проведення експериментів

#### 5.3.1. Дослідження схеми додавання постійних напруги

Відкрийте файл Lab5\_1 зі схемою, наведеною на рис. 5.1. Увімкніть схему. Запишіть показання приладів. За заданими номіналами елементів схеми розрахуйте значення струмів  $I_1$ ,  $I_2, I_{33}$  і використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$  обчисліть вихідну напругу  $U_{ВИХ}$ .

5.3.2. Дослідження схеми додавання постійної та змінної напруги.

а). Відкрийте файл Lab5\_2 зі схемою, наведеною на рис. 5.2. Увімкніть схему. Замалюйте осцилографами вхідної і вихідної напруги. Виміряйте постійну складову і амплітуду вихідної напруги  $U_{ВИХ}$ . Обчисліть постійну складову і амплітуду вихідної напруги  $U_{ВИХ}$  використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$ .

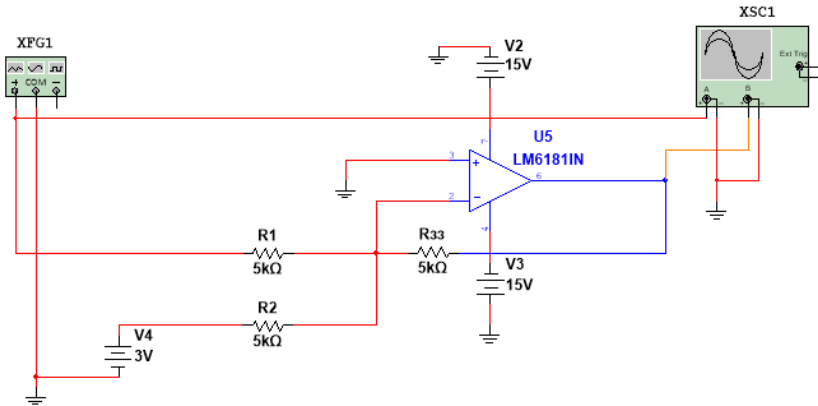


Рисунок 5.2 – Інвертувальний суматор постійної і змінної напруги

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

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

### 5.3.3. Дослідження схеми додавання змінних напруг.

Відкрийте файл Lab5\_3 зі схемою, наведеною на рис. 5.3. Увімкніть схему. Замалюйте осцилограми вхідної і вихідної напруги. Виміряйте амплітуди вхідної і вихідної напруги.

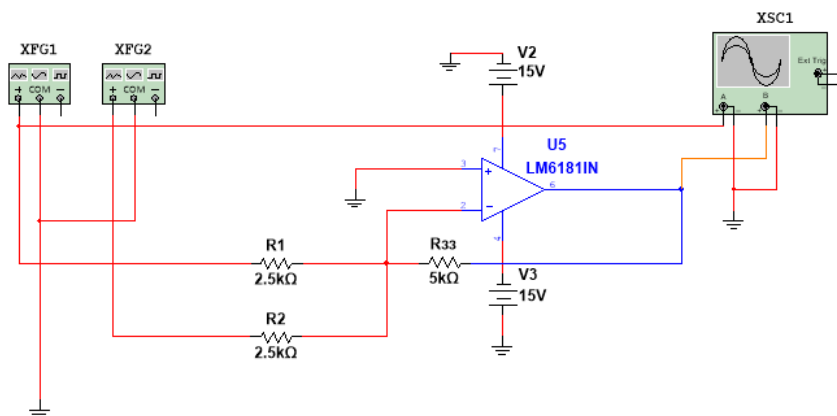


Рисунок 5.3 – Інвертувальний суматор змінних напруг

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

### 5.3.4. Дослідження схеми віднімання постійних напруг

Відкрийте файл Lab5\_4 зі схемою, наведеною на рис. 5.4. Встановіть параметри елементів відповідно до значень зазначених в табл. 5.1. Увімкніть схему. Запишіть показання приладів. За заданими номіналами елементів схеми розрахуйте значення струмів  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_{33}$  і використовуючи значення напруг  $U_1$  і  $U_2$ , обчисліть вихідну напругу  $U_{BHX}$ .

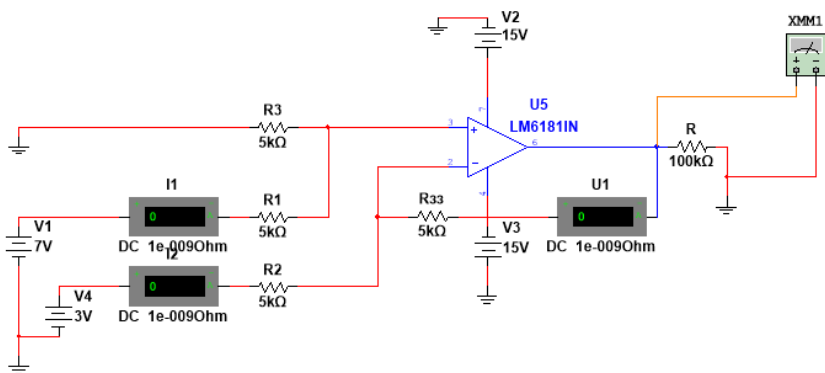


Рисунок 5.4 – Підсилювач з відніманням вхідних напруг

Таблиця 5.1 – Номінали елементів схеми

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

#### 5.4. Зміст звіту

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

## 5.5. Контрольні запитання

1. З яких умов виводиться співвідношення між вхідною вихідною напругою в схемі суматора на основі ОП?

2. Як можна реалізувати схеми для підсумування трьох або більше вхідних напруг?

3. Як зміняться основні співвідношення для схеми на рис. 5.1, якщо на неінвертувальний вхід ОП подати постійну напругу?

4. Перерахуйте можливі способи зміни коефіцієнтів підсумовування сигналів в схемі рис. 5.1.

5. За яких умов виводиться співвідношення між вхідною і вихідною напругою в схемі підсилювача з відніманням вхідних напруг на основі ОП?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6.

### ПРОЕКТУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

#### 6.1. Мета роботи

Метою роботи є розрахунок параметрів та дослідження амплітудно-частотних характеристик активних фільтрів.

#### 6.2. Короткі теоретичні відомості

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

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

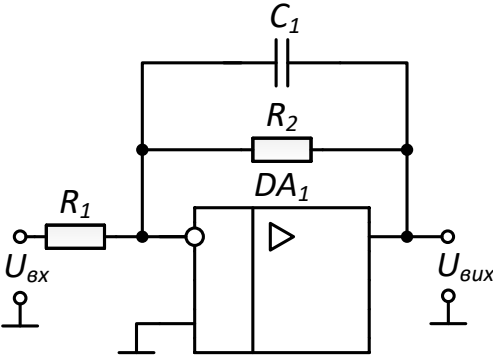
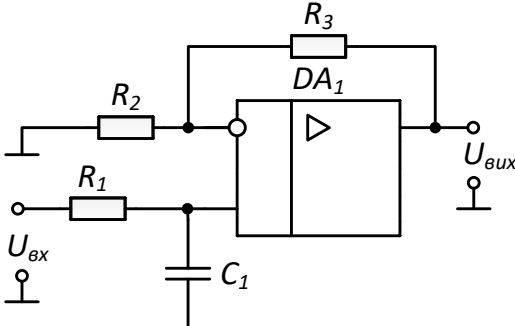
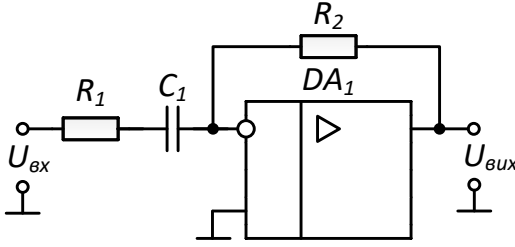
Основною характеристикою фільтра є його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ). По вигляду АЧХ пристрої зазвичай поділяються на групи. Наприклад, фільтр низької частоти (ФНЧ) пропускає низькочастотні сигнали і послаблює високочастотні, фільтр високої частоти (ФВЧ) пропускає сигнали високочастотні і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

Активні фільтри першого порядку на операційному підсилювачі та їх параметри наведені в табл. 6.1.

#### 6.3. Порядок проведення експериментів

6.3.1. Спроекувати активний фільтр ФНЧ по вихідним даним, наведеним в табл. 6.2. Відповідно до заданих параметрів і типу фільтру розрахувати його передавальну функцію. Скласти принципову електричну схему.

Таблиця 6.1 – Активні фільтри першого порядку

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

Продовження таблиці 6.1.

|   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | 2  | 3 |
| 4 | <p>ФВЧ першого порядку на основі неінвертувального підсилювача.<br/>Параметри<br/><math>K_0 = 1 + R_3 / R_1</math><br/><math>\omega_0 = 1 / R_2 C_1</math></p> |   |

Таблиця 6.2 – Варіанти завдань

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

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

6.3.3. Використовуючи пристрій для побудови частотних характеристик (Bode Plotter), побудувати в Multisim АЧХ і ФЧХ фільтра в логарифмічному масштабі.



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

#### 6.4. Методика проведення експериментів

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

##### 6.4.1. Розрахунок параметрів

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

##### 6.4.2. Вибір компонентів

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

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

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

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

Використовувати в схемі резистори з опором менш 1 кОм небажано, тому що це неминуче призведе до

збільшення енергоспоживання схеми і ускладнить вибір операційного підсилювача.

Визначаємо циклічну частоту:

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

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

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

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

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

Будуємо схему.

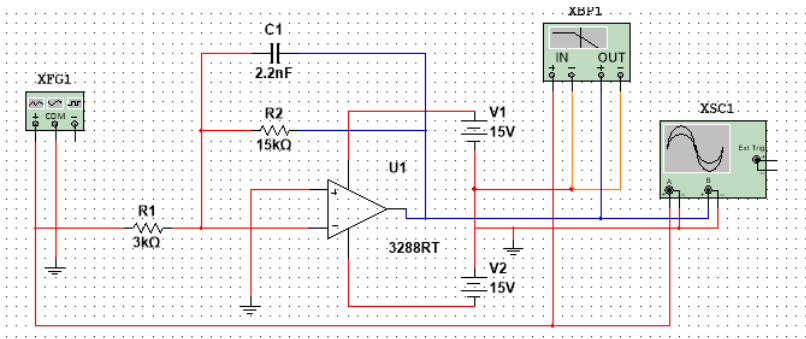


Рисунок 6.1 – Схема ФНЧ

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

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

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

Максимальний коефіцієнт підсилення  $13,97 \text{ дБ}$  відповідає розрахунковому  $20 \lg 5 = 13,97$ . Послаблення на частоті зрізу  $13,97-10,86=3,1$  (теоретично 3), нахил АЧХ складає  $20 \text{ дБ/дек}$ . Фазовий зсув в смугі пропускання змінюється від  $180$  до  $134$  градусів.

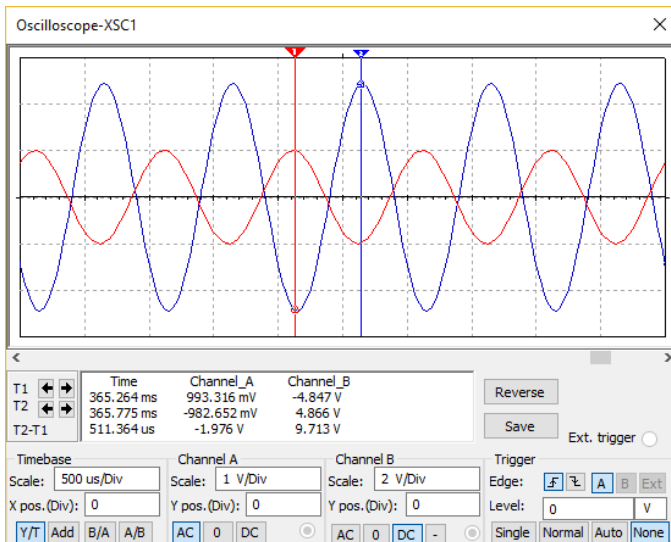


Рисунок 6.2 – Осцилограма при частоті 1 кГц

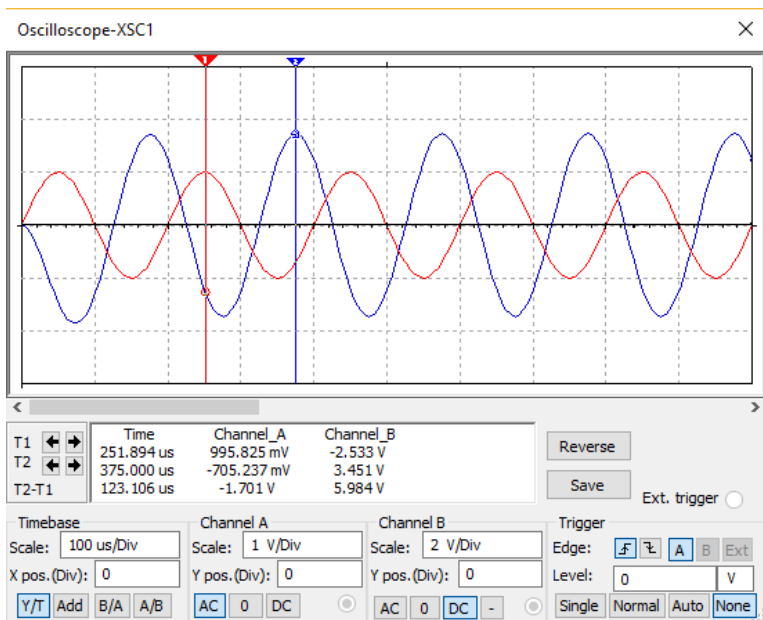


Рисунок 6.3 – Осцилограма при частоті 5 кГц

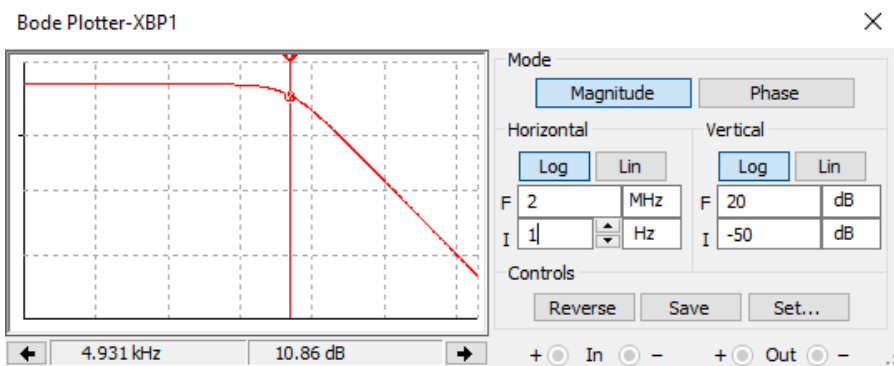
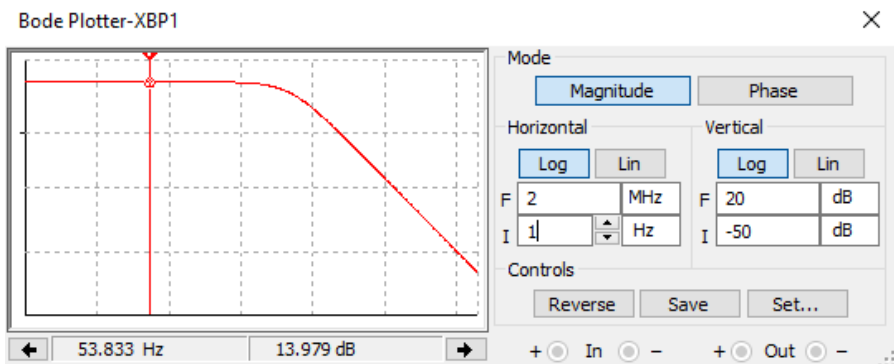


Рисунок 6.4 – АЧХ фільтра

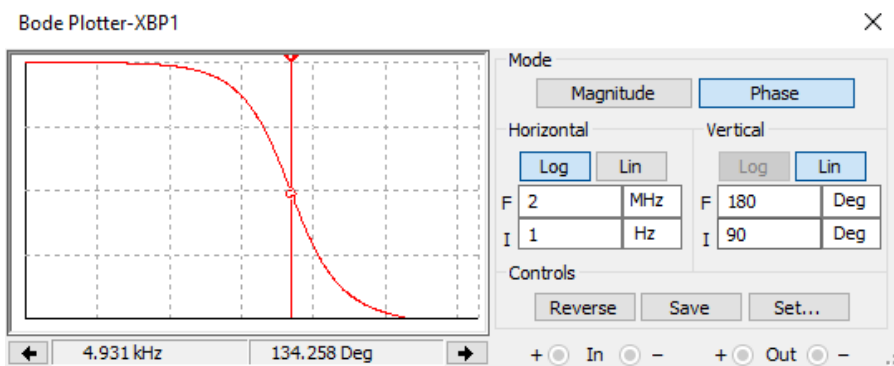


Рисунок 6.5 – ФЧХ фільтра

## 6.5. Зміст звіту

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

## 6.6. Контрольні запитання

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

Навчальне видання

**4442 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни «Аналогова схемотехніка»  
для студентів спеціальності  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
денної форми навчання

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

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

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