

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Комп'ютерна електроніка. Аналогова схемотехніка"
з застосуванням програмного комплексу *Electronics Workbench*
для студентів напряму підготовки
6.050102 «Комп'ютерна інженерія»
усіх форм навчання

2013 р.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Комп'ютерна електроніка. Аналогова схемотехніка" з застосуванням програмного комплексу *Electronics Workbench* для студентів напряму підготовки 6.050102 "Комп'ютерна інженерія" всіх форм навчання / Укл.; В.П. Дмитренко, В.Г. Козодавов, – Запоріжжя, ЗНТУ, 2013. – 74с, 46 іл.

Наведено методичні рекомендації та вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Комп'ютерна електроніка. Аналогова схемотехніка" з застосуванням програмного комплексу *Electronics Workbench*.

Бібліогр. 5

Укладачі: В.П. Дмитренко, к.т.н., доц.,
В.Г. Козодавов, ст.викл.

Рецензент: В.С. Кабак, к.т.н., доц.

Відповідальний за випуск: В.Г. Козодавов

Затверджено:
на засіданні кафедри РТТ
Протокол № 6
від 16 січня 2013

ЗМІСТ

1	Інтерфейс програмного комплексу Electronics Workbench та загальні вимоги до звіту	5
1.1	Короткі відомості про Electronics Workbench	5
1.2	Порядок проведення розробки та аналізу принципової електричної схеми	17
1.3	Загальні вимоги до звіту з виконаної роботи	18
1.4	Перелік рекомендованої літератури	19
2	Дослідження основних типів RC – кіл	20
2.1	Короткі теоретичні відомості	20
2.2	Підготовка до виконання роботи	31
2.3	Виконання роботи	34
2.4	Контрольні запитання	40
3	Дослідження двокаскадного підсилювача	42
3.1	Короткі теоретичні відомості	42
3.2	Підготовка до виконання роботи	45
3.3	Виконання роботи	46
3.4	Контрольні запитання	49
4	Дослідження аналогового компаратора	51
4.1	Короткі теоретичні відомості	51
4.2	Підготовка до виконання роботи	55
4.3	Виконання роботи	56
4.4	Контрольні запитання	57
5	Дослідження генератора аналогових сигналів	58
5.1	Короткі теоретичні відомості	58
5.2	Підготовка до виконання роботи	62

5.3 Виконання роботи	63
5.4 Контрольні запитання	64
6 Дослідження компенсаційного стабілізатора напруги	66
6.1 Короткі теоретичні відомості	66
6.2 Підготовка до виконання роботи	70
6.3 Виконання роботи	71
6.4 Контрольні запитання	73

1 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ELECTRONICS WORKBENCH ТА ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

1.1 Короткі відомості про Electronics Workbench

Програмний комплекс Electronics Workbench (EWB) являє собою програмний засіб розробки і імітації електронних схем та електричних кіл.

Інтерфейс користувача складається з смуги меню, панелі інструментів та робочої області.

Пункти горизонтального меню

Призначення пунктів горизонтального меню наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Пункт меню	Функція та пояснення	Клавіша
1	2	3
Меню File		
New	Відкривається безіменне вікно для створення схеми.	CTRL+N
Open	Відкривається вже існуючий файл схеми (тільки файли з розширеннями .sa, .Ca3, .Cd3, .Ca4 і .Ewb.).	CTRL+O
Save	Зберігається поточний файл схеми. Розширення .ewb додаються до імені файлу автоматично.	CTRL+S
Save as	Зберігається поточна схема з новим ім'ям файлу.	
Export	Зберігається файл схеми з одним з наступних розширень: .net, .scr, .cmp, .cir, .plc.	

продовження табл. 1.1

1	2	3
Print	Повний або частковий друк схеми та/або приладів (вибрати елементи в тому порядку, як їх необхідно надрукувати).	CTRL +P
Print Setup (Windows)	Налаштування принтера. Якщо схема занадто велика, то друкування буде автоматично виконуватися на декількох сторінках.	
Exit	Завершення роботи з пакетом EWB.	ALT+F4
Install (Windows)	Встановлення додаткових компонентів Electronics Workbench. Для її виконання буде запрошено диск, що містить ці компоненти.	
Revert to Saved (Revert)	Відновлення схеми в тому вигляді, який вона мала в момент останнього збереження.	
Import	Перетворення нестандартних файлів схем (розширення *.net або *.cir) до стандартного вигляду Electronics Workbench.	
Меню Edit		
Cut	Вилучення позначених компонентів, схем або тексту в буфер обміну, звідки його можна вставити в потрібне місце. Команда не спрацює, якщо вибір включає в себе інструментальні піктограми.	CTRL +X
Copy	Копіювання позначених компонентів, схеми або тексту в буфер обміну, звідки його можна вставити в потрібне місце. Операція не виконається, якщо вибір включає інструментальні піктограми.	CTRL +C
Paste	Розміщення змісту буферу обміну у активне вікно. Буфер повинен містити компоненти Electronics Workbench або текст. Зміст буферу обміну може вставлятися тільки у вікна, здатні містити подібну інформацію.	CTRL +V

продовження табл. 1.1

1	2	3
Delete	Повне знищення позначених компонентів або тексту.	DEL
Select All	Вибір всіх елементів в активному вікні (вікно схеми, вікно підсхеми або вікно опису). Для вибору всіх елементів, окрім декількох, використати команду Select All, і після цього зняти виділення з зайвих елементів, натискаючи CTRL одночасно з лівою кнопкою миші.	
Copy as Bitmap	Копіювання растрового зображення елементів в буфер обміну. Для цього необхідно: а) вибрати Edit/Copy as Bitmap (курсор зміниться на crosshair), б) натиснути і утримувати кнопку миші, рухаючи курсор, щоб сформувати прямокутник, у якому є необхідні для копіювання елементи, в) відпустити кнопку миші.	
Show Clipboard	Відображення змісту буферу обміну. Щоб закрити буфер обміну, двічі натисніть меню Ctrl (Windows).	
Меню Circuit		
Rotate	Обертання обраних компонент на 90^0 проти годинникової стрілки. Текст, зв'язаний з компонентами, не обертається. Лінії електричних з'єднань, додані до компоненту, переміщуються автоматично.	CTRL +R
Flip Vertical	Дзеркальне відображення позначеної схеми по вертикалі в вікні схеми. Лінії електричних з'єднань, додані до компоненту, переміщуються автоматично. Текст, зв'язаний з компонентом, не віддзеркалюється	

продовження табл. 1.1

1	2	3
Flip Horizontal	Дзеркальне відображення позначеної схеми по горизонталі в вікні схеми. Лінії електричних з'єднань, додані до компоненту, переміщуються автоматично. Текст, зв'язаний з компонентою, не відображається дзеркально.	
Component Properties	Зміна властивостей обраної компоненти. Виводиться при подвійному натисканні лівою кнопкою миші на компоненті або натисканням правої кнопки миші. При виконанні команди відкривається діалогове вікно Circuit/Component Properties, закладки якого залежать від типу обраного компоненту. Можливі наступні типи закладок: Label, Value, Models, Schematic Options, Fault, Node, Display, Analysis Setup.	
- Label	Встановлення або заміна позначки компоненти (позиційного позначення у схемі). Можна зсунути позначку праворуч, додаючи декілька пробілів перед позначкою. Ідентифікатори (Reference ID) призначаються системою, унікально ідентифікуючи компонент (компоненти типу з'єднувачі, заземлення, вимірювальні прилади не мають ідентифікаторів).	CTRL +L
- Value Tab	Поля на цій закладці розрізняються в залежності від компоненту.	CTRL +U
- Models	Вибір моделі, що використовується для компоненту і для редагування, додавання або вилучення моделей або бібліотек.	CTRL +M

продовження табл. 1.1

1	2	3
- Schematic Options	Закладка використовується для встановлення кольору проводу.	
- Fault	Імітація пошкодження для обраного компоненту (схема не змінюється).	CTRL +F
- - Leakage	Встановлення опору паралельно обраному компоненту.	
- - Short	Коротке замикання між двома точками схеми (замикання обраного компоненту).	
- - Open	Розірвання кола між означеними точками схеми (вилучення зі схеми компоненту).	
- Node	Зміна властивостей вузла.	
- - Node ID	Призначене системою ім'я вузла	
- - Use as Test-point	Визначає, чи повинен вузол розглядатися як тестова точка.	
- - Set Node Color	Скасовує набір кольорів для окремих проводів.	
- Display	Відображення/ховання тих, або інших елементів EWB. Use Schematic Options - використовуються параметри дисплею з закладки Show/Hide діалогового вікна Circuit/Schematic Options. Show labels, Show models, Show reference ID. Інакше - використовуються параметри дисплею за визначенням.	
- Analysis Setup	Настройка робочої температури. Use global temperature – вибирається діапазон температур, встановлений в Analysis/Analysis Options. Інакше - діапазон температур за замовчанням. Set initial conditions - встановлення початкових значень температури.	

продовження табл.1.1

1	2	3
Create Subcircuit	Об'єднання позначених елементів схеми у підсхему. Щоб створити підсхему необхідно: а)вибрати елементи, які потрібно використати для підсхеми; б)вибрати Circuit/Create Subcircuit, і завершити діалог.	CTRL +B
- Copy from Circuit	Розташовує копію вибраних компонентів у підсхемі. Первинні компоненти залишаються у вікні схеми.	
- Move from Circuit	Вилучає вибрані компоненти зі схеми (вибрані компоненти існують тільки в підсхемі).	
- Replace in Circuit	Розташовує вибрані компоненти у підсхемі і замінює вибрані компоненти в схемі прямокутником, позначеним ім'ям підсхеми. Вибрані компоненти з'являються в новому вікні, вікні підсхеми. Ім'я нової підсхеми додається до списку доступних підсхем, що відображається, коли піктограма підсхеми переміщується з інструментальної панелі Favorites. Підсхема доступна тільки для поточної схеми.	
Zoom	Збільшення або зменшення розміру дисплею вікна схеми.	
Schematic Options	Управління дисплеєм схеми. Зміни відносяться тільки до поточної схеми. У вікні Команди виводиться наступний набір закладок: Grid, Show/Hide, Display, Value.	

продовження табл. 1.1

1	2	3
- Grid	Вмикання/вимкнення сітки для спрощення вирівнювання елементів в схемі.	
- Hide	Управління дисплеєм інформації в вікні схеми. Її параметри корисно використовувати коли потрібно переховати об'єкт.	
- Display	Управління шрифтом позначок і посилань на ідентифікатори.	
- Value	Управління шрифтом значень і моделей	
Меню Analysis Виконання аналізу схеми. Перед виконанням необхідно заповнити список параметрів аналізу. Аналіз буде виконано тільки в тому випадку, коли це можливо для даної схеми.		
Activate	Включення перемикача живлення. Перемикач живлення залишається включеним, доки користувач не вимкне його або не зупинить моделювання - Pause.	CTRL +G
Pause and Resume	Тимчасове переривання або продовження моделювання (управління кнопкою Pause/Resume).	F9
Stop	Ручна зупинка моделювання (ефект натискання перемикача живлення). Вимкнення живлення знищує дані та інструментальні сліди і скидає всі значення до початкових.	CTRL +T
Analysis Options	Аналіз або зміна будь-яких параметрів моделювання.	CTRL +Y
DC Operating Point	Аналіз режиму за сталим струмом в робочій точці. Виводиться таблиця напруг у вузлах схеми.	
AC Frequency	Аналіз режиму за змінним струмом з одночасним відображенням АЧХ і ФЧХ схеми.	
Transient	Аналіз перехідних процесів.	

продовження табл. 1.1

1	2	3
Parameter Sweep	Аналіз роботи схеми при зміні параметрів одного з елементів схеми. Після вибору команди в вікні задати межі та крок зміни вибраного параметру.	
Temperature Sweep	Аналіз роботи схеми в діапазоні температур. Після вибору команди в вікні задати межі та крок зміни температури.	
Display Graph	Відображення результатів графічного аналізу.	
Window Menu		
Arrange	Розстановка відкритих вікон.	CTRL +W
Circuit	Вікно схеми на передній план.	
Description	Вікно опису. Якщо вікно опису вже відкрите, переносить його на передній план. Ви можете надрукувати коментарі або вказівки в вікні опису, а також вставити текст з іншої прикладної програми або описи схеми.	CTRL +D
Меню Help Отримання довідки		F1

Опис елементів

1.1.1 Операційний підсилювач

Negative voltage swing (VSW):	Амплітуда від'ємної напруги на виході.
Common mode rejection ratio (CMRR):	Коефіцієнт подавлення синфазної завади.
Output short circuit current (ISC):	Струм короткого замикання на виході.
Slew rate (SR):	Швидкість зростання вихідної напруги.
Unity-gain bandwidth (FU):	Смуга частот одиничного підсилення.
Phase margin (δM):	Запас стійкості з фази.

Рисунок 1.1 – Меню параметрів операційного підсилювача

1.1.2 Інші елементи

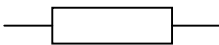
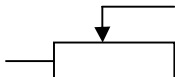
	Резистор. Параметри: Resistance – опір (Ом, кОм, МОм)
	Конденсатор. Параметри: Capacitance – ємність (пФ, мкФ)
	Змінний резистор. Параметри: опір, % ввімкнення опору.

Рисунок 1.2 – Інші елементи

Панелі інструментів програми

Для прискорення виконання окремих команд і полегшення доступу до панелей компонент існують панелі інструментів.



Відкриття безіменного вікна для створення нової схеми.



Відкриття вже існуючого файлу схеми.



Збереження поточного файлу схеми.



Друкування схеми.

Рисунок 1.3 – Кнопки стандартної панелі

Кнопки панелі інструментів дублюють команди горизонтального меню.

Опис вимірювальних приладів

1.1.3 Мультиметр – дозволяє вимірювати струм, напругу, опір і втрати між двома точками схеми. В режимі виміру змінного струму довільної форми мультиметр відображає середньоквадратичне значення.

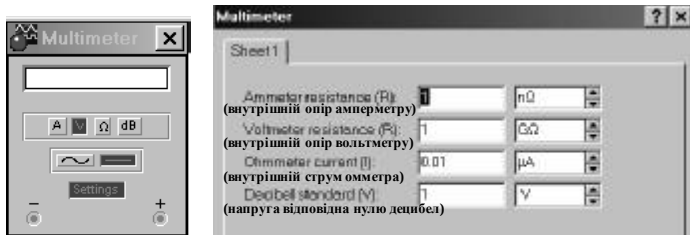
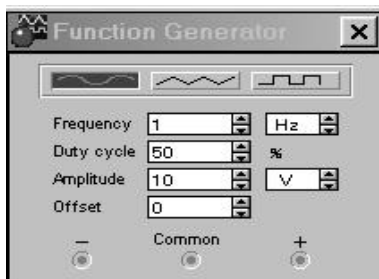


Рисунок 1.4 – Мультиметр та визначення його параметрів

1.1.4 Функціональний генератор – джерело напруги синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми.



Frequency – встановлення частоти сигналу.

Duty cycle – коефіцієнт заповнення, не впливає на форму синусоїди.

Amplitude – встановлення амплітуди вихідної напруги. Якщо сигнал знімається з виводів Com і + або -, то амплітуда дорівнює встановленому значенню. Якщо сигнал знімається між виводами + і -, то амплітуда у двічі більша.

Offset – встановлення постійної напруги зміщення.

Рисунок 1.5 – Функціональний генератор

1.1.5 **Осцилограф** відображає форму, амплітуду та частоту сигналу по двом каналам. Осцилограф обов'язково повинен бути заземлений.

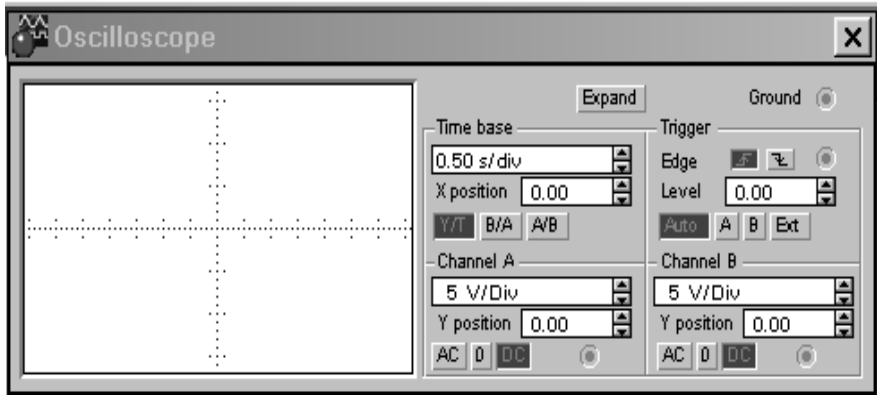


Рисунок 1.6 – Осцилограф та визначення його параметрів

Канали А та В (Channel A, B)

AC - режим відображення тільки змінної складової сигналу (закритий вхід);

0 - з'єднання входу каналу із заземленням;

DC - режим відображення сигналу разом з постійною складовою (відкритий вхід);

V/Div - масштаб по вертикалі (вольт/поділку шкали);

Ypos - зсув зображення по вертикалі (поділок шкали).

Time base (Розгортка)

Y/T - внутрішня розгортка (на екрані промені каналів А і В);

B/A - на екрані промінь В, розгортка каналом А;

A/B - на екрані промінь А, розгортка каналом В;

S/Div - швидкість розгортки (секунд/поділку шкали).

Trigger - режим синхронізації та вхід зовнішньої синхронізації

Level - рівень синхронізації;

Edge - запуск розгортки фронтом чи спадом імпульсного сигналу.

Expand - розширення розмірів відображення осцилографа та ввімкнення на екрані двох вертикальних маркерних ліній. Положення маркерів у часі та величина напруги у цей момент відображаються у цифровому вигляді на додаткових панелях.

Ground – під'єднання заземлення осцилографа.

1.1.6 Бode-Плоттер (вимірювач АЧХ та ФЧХ)

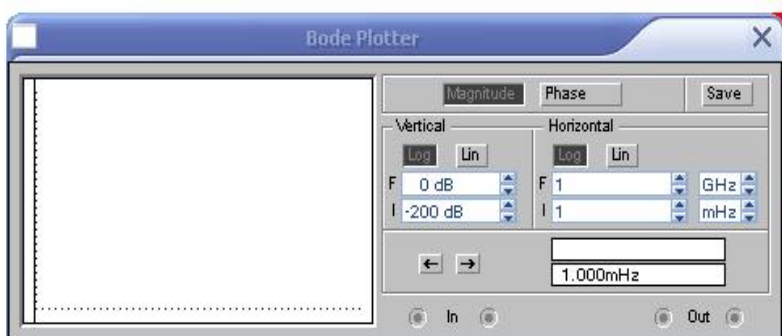


Рисунок 1.7 –Бode-Плоттер

Режими роботи:

- **Magnitude**, вимірювання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ);
- **Phase**, вимірювання фазо-частотної характеристики (ФЧХ).

Параметри по вертикальній та горизонтальній осях для режиму

АЧХ:

- Vertical: масштаб (логарифмічний / лінійний); максимальне та мінімальне значення коефіцієнту підсилення (дБ);
- Horizontal: масштаб (логарифмічний / лінійний); максимальне та мінімальне значення частоти (Гц);
- панель керування маркером на екрані: стрілки напрямку руху та вікна цифрового показника положення маркера по осях;

У режимі вимірювання **ФЧХ** по вертикальній осі відображається фазовий зсув (град.).

1.2 Порядок проведення розробки та аналізу принципової електричної схеми

1.2.1 Запустіть *Electronics Workbench*. При цьому буде автоматично створений новий безіменний файл для проведення роботи.

1.2.2 Зберіть схему наступним чином.

1.2.2.1 Перетягніть елементи схеми, вмикаючи вимірювальні прилади і джерела сигналу, на робочу область Electronics Workbench з відповідних панелей інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments).

1.2.2.2 З'єднуйте контакти елементів, клацнувши по одному з контактів лівою кнопкою миші і, не відпускаючи клавішу, доведіть курсор до другого контакту після чого відпустіть кнопку. У випадку необхідності можна встановити додаткові вузли (розгалуження – панель Basic).

1.2.2.3 Встановіть необхідні номінали і властивості кожному елементу, включаючи вимірювальні прилади і джерела сигналу, двічі натиснувши на елементі.

1.2.2.4 Включіть живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (замикання елемента живлення, відсутність нульового потенціалу в схемі і т.і.) буде видано попередження. Виведення терміналів вимірювальних приладів (зображення їх екранів чи шкал) здійснюється подвійним натисканням лівої кнопки миші на моделі приладу.

1.2.2.5 Зробіть необхідний аналіз схеми, вибравши його з розділу меню Analysis - результати аналізу виводяться в вікні Grahf.

1.2.2.6 Відредагуйте результати аналізу у вікні Grahf (масштаб по осях координат, сітка і її параметри, підписи, маркери, ін.).

1.3 Загальні вимоги до звіту з виконаної роботи

Звіт виконується машинним способом на аркушах паперу формату А4 і повинен включати в себе:

- титульний аркуш із зазначенням:

- 1) Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України;
- 2) Запорізький національний технічний університет;
- 3) Кафедра ххх;
- 4) Дисципліна: КЕ;
- 5) Звіт
з лабораторної роботи № х «тема роботи»;
- 6) Виконав: студент групи ІОТ-ххх П.І.Б ;
- 7) Викладач: П.І.Б ;
- 8) Запоріжжя ;
- 9) 2012р.

- мету виконання роботи;

- схему, що досліджується;

- результати досліджень у вигляді:

1) короткого тексту, щодо досліджуваних властивостей схеми та при необхідності засобів, які для цього використані;

2) таблиць чи/та графіків, що отримані за допомогою EWB, чи в результаті розрахунків та вимірювань;

3) при необхідності, додаткових результатів досліджень, які не могли бути отримані безпосередньо у EWB;

4) висновків щодо отриманих результатів.

При необхідності звіт може містити результати роботи інших комп'ютерних програм. Наприклад: результати розрахункового завдання, виконані у програмі Mathcad.

1.4 Перелік рекомендованої літератури

1 В.И.Карлащук Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench - изд. 2^е доп. и перераб. – Москва: СОЛОН-Р, 2001. – 726с.

2 Забродин Ю.С. Промышленная электроника — М.: Высшая школа, 1982. – 386с.

3 Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Ч. I, II: Пер. с. англ. /Под. ред. М.В. Гальперина — М.: Мир., 1983. – 585с.

4 Основы промышленной электроники / Под ред. В.Г. Герасимова — М.: Высшая школа, 1986. – 425с.

5 Щербаков В.И., Гредов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. — Киев: Техника, 1983. – 356с.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ТИПІВ RC-КІЛ

Лабораторна робота №1

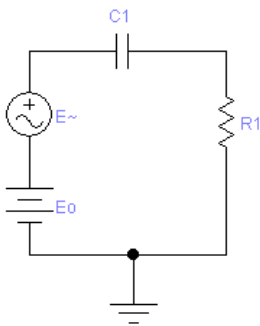
Мета роботи: дослідження основних параметрів і характеристик RC-кіл та практичні навички роботи у EWB.

2.1 Короткі теоретичні відомості

Розділення, блокування

Використання конденсаторів у схемотехніці зокрема пов'язане із забезпеченням розділення ланцюгів проходження сталої та змінної складових струмів. Для цього використовують переважно два способи включення конденсаторів у схему:

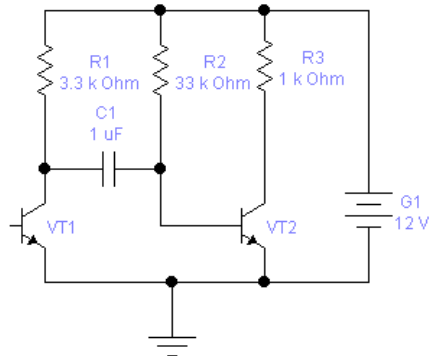
- як розділової ємності (рис.2.1);
- як блокувальної ємності (рис.2.2).



E_0 – стала у часі ЕРС

$E_{\sim}$ - змінна у часі ЕРС

а)



б)

Рисунок 2.1 – Увімкнення розділової ємності

На рис. 2.1 а) зображено узагальнену схему увімкнення розділової ємності (конденсатора $C1$). Як відомо з фізики, для сталої

складової струму ємність являє собою розрив кола. Таким чином, за допомогою послідовного з'єднання конденсатора $C1$ та резистора $R1$ вирішується завдання пропустити в коло опору $R1$ тільки змінну складову струму. Нехай циклічна частота змінної складової струму в колі буде $f[\text{Гц}]$. Це частота корисного сигналу. Тоді реактивний опір $X_C [\text{Ом}]$ розділової ємності $C1[\text{Ф}]$ на цій частоті буде

$$(2.1) \quad X_C = 1 / (2\pi \cdot f \cdot C).$$

Згідно закону Ома, при протіканні змінного струму $I [\text{А}]$ через опори $X_C [\text{Ом}]$ та $R1 [\text{Ом}]$ на них будуть падати напруги $U_C [\text{В}]$ та $U_R [\text{В}]$, величини яких будуть становити:

$$(2.2) \quad U_C = I \cdot X_C ; \quad U_R = I \cdot R1.$$

За другим законом Кірхгофа величини E , U_C , U_R зв'язані співвідношенням:

$$(2.3) \quad E = U_C + U_R = I \cdot (X_C + R1),$$

але напруга U_R існує на опорі навантаження $R1$ і в ідеальному випадку потрібно, щоб $U_R \rightarrow E$, а для цього необхідно забезпечити, щоб $U_C \ll U_R$ або, як виходить з (2.3) $X_C \ll R1$. Найчастіше для розділової ємності вимагають, щоб $X_C / R1 \leq 0,1$. Будемо також мати на увазі, що внаслідок реактивності опору X_C , напруга U_C відстає за фазою від струму I на кут 90° .

На рис.2.1 б) показано приклад конкретного використання. З колектору транзистора $VT1$ схеми підсилювача корисний сигнал у вигляді змінної напруги має потрапити на базу транзистора $VT2$ наступного каскаду підсилення. Стала ж складова U_{K1} напруги на колекторі $VT1$ має відносно високе значення ($U_{K1} \approx 5 \dots 15 \text{В}$) і вона не повинна впливати на режим наступного каскаду – стала складова U_{b2} напруги на базі $VT2$ істотно менша, ніж U_{K1} ($U_{b2} \approx 0,65 \text{В}$). Цю задачу і вирішує розділовий конденсатор $C1$.

На рис.2.2а) наведено узагальнену схему включення блокувального конденсатора з ємністю $C1$. Очевидно, що через опір $R1$ протікає як стала складова струму I_0 , обумовлена сталою у часі ЕРС E_0 , так і змінна складова струму I , обумовлена змінною у часі ЕРС E . Через опір $R2$ протікає як стала складова струму так і частково – змінна складова. Можна забезпечити протікання через конденсатор $C1$ змінної складової струму майже повністю при

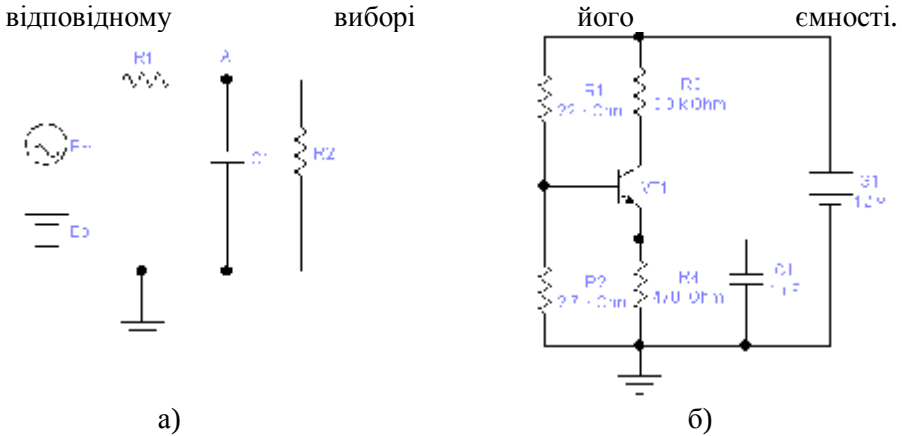


Рисунок 2.2 – Увімкнення блокувальної ємності

Зважаючи на функціональне призначення ємності $C1$, доцільно провести аналіз лише для джерела ЕРС $E\sim$. Між точкою А і «землею» включено паралельне з'єднання резистору $R2$ і конденсатора $C1$. Комплексний опір $\dot{Z}_A$ паралельного з'єднання елементів $C1$, $R2$:

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{X}_C \cdot R2}{\dot{X}_C + R2}, \quad \dot{X}_C = \frac{-j}{2\pi \cdot f \cdot C1} \quad (2.4)$$

Комплексний опір ($\dot{Z}$), що слугує навантаженням джерела $E\sim$:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_A + R1 \quad (2.5)$$

Для того, щоб забезпечити в точці А схеми значення напруги $U_A \ll E\sim$ необхідно мати $|\dot{Z}_A| \ll R1$, що можливо за умови $X_C \ll R1$. В той же час забезпечити протікання через ємність $C1$ майже всієї змінної складової струму можливо за умови $X_C \ll R2$. В більшості випадків буває достатнім забезпечити опір блокувальної ємності на робочій частоті на порядок меншим за опір меншого з резисторів $R1$, $R2$.

Відмітимо, що значення ємнісного опору X_C на частоті корисного сигналу f може виявитися неприпустимо малим (близьким до короткого замикання), щоб бути безпосередньо підключеним до джерела ЕРС $E\sim$. Таким чином, резистор $R1$ обмежує величину змінної складової струму $I\sim$, або іншими словами захищає джерело $E\sim$ від створення режиму короткого замикання.

У тих випадках, коли до точки А підключене джерело струму, а не джерело напруги, як на рис.2.2, буде достатнім забезпечити умову $X_C \ll R_2$.

На рис.2.2 б) показано приклад використання блокувальної ємності у підсилювачі на біполярному транзисторі, виконаному по схемі із спільним емітером. Тут резистори R1, R2 забезпечують робочу точку режиму базового (вхідного) кола, а R3 є опором навантаження. Як відомо [2,4], цей режим є нестабільним при зміні температури навколишнього середовища, а отже і температури транзистору. Для покращення стабільності у емітерне коло вводять резистор R4. Через резистор R4 проходить стала складова струму емітера, чим забезпечується наявність від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) за сталим струмом, що стабілізує режим. Але через цей резистор проходить і змінна складова струму емітера, що викликає ВЗЗ за змінним струмом і як наслідок різко зменшує коефіцієнт підсилення каскаду, що є неприпустимим. Для усунення ВЗЗ за змінною складовою струму вмикають блокувальний конденсатор з ємністю C1, в результаті чого змінна складова струму емітера майже повністю протікає через ємність C1, а не через резистор R4 .

Інтегрувальне коло

Подано на вхід ідеального інтегратору, який виконує математичну операцію

$$U_{\text{АЕО}}(t) = k \cdot \int_0^t U_{\text{ВХ}}(t) dt \quad (2.6)$$

ідеальний прямокутний імпульс – вираз (2.7):

$$U_{\text{АО}}(t) = \begin{cases} A & \text{іде} \quad 0 < t < T \\ 0 & \text{іде} \quad t > T \end{cases} \quad (2.7)$$

Тут T – тривалість імпульсу.

Тоді отримаємо:

$$U_{\text{АЕО}}(t) = \begin{cases} k \cdot A \cdot t & \text{іде} \quad 0 < t < T \\ a \cdot E & \text{іде} \quad t > T \end{cases} \quad (2.8)$$

де $a = k \cdot T$.

Часові діаграми цього перетворення зображено на рис.2.3.

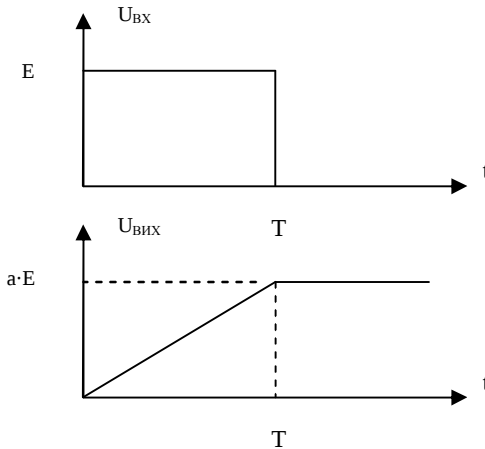


Рисунок 2.3 – Часова діаграма ідеального інтегратора

Таким чином, ідеальний інтегратор перетворює ідеальний прямокутний імпульс в лінійно-змінну напругу (ЛЗН), тобто є ідеальним генератором ЛЗН.

Для наближеного виконання цієї функції застосовують інтегрувальне коло, схему якого наведено на рис.2.4.

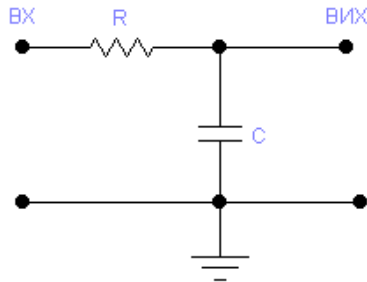


Рисунок 2.4 – Схема інтегрувального RC - кола

Основним кількісним параметром інтегрувального кола є постійна часу: $\tau = R \cdot C$. Основними характеристиками є перехідна характеристика (ПХ), амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) та

фазо-частотна характеристика (ФЧХ). ПХ це реакція чотириполосника (в данному випадку інтегрувального кола рис.2.4) на вхідний сигнал у вигляді стрибка напруги. Тобто ПХ – це залежність напруги на виході кола від вхідної напруги і перехідний процес здійснюється у часі. Відома (аналітично) ПХ дає можливість визначити реакцію схеми на вхідні сигнали іншої форми, зокрема гармонічний. АЧХ і ФЧХ описують реакцію схеми при дії на вході гармонічного сигналу при повільній зміні частоти. АЧХ і ФЧХ RC-кіл цілком певним чином пов'язані з перехідною характеристикою цих кіл. Використовується також така характеристика, як комплексний коефіцієнт передачі ($K(j\omega)$), що фактично об'єднує АЧХ і ФЧХ в одному аналітичному виразі. Аналітичні вирази для АЧХ і ФЧХ мають вигляд:

$$|K(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 t^2}} \quad ; \quad f(j\omega) = -\arctg(\omega t) . \quad (2.9)$$

Використовуються два основні параметри, пов'язані з АЧХ: коефіцієнт передачі ($K=|K(j\omega)|$) і смуга пропускання. Коефіцієнт передачі визначається як відношення вихідної напруги до вхідної і у випадку інтегруючого кола він буде залежним від частоти. Смугою пропускання називають смугу частот в межах якої коефіцієнт передачі зменшується не більш, ніж на визначену величину від свого максимального значення. У стандартному визначенні межею смуги пропускання вважається зниження K у $\sqrt{2}$ разів. Часто буває доцільним розглядати такі АЧХ, де як коефіцієнт передачі, так і частота вимірюються у логарифмічному масштабі (ЛАЧХ). З формули (2.9) для АЧХ видно, що за межами смуги пропускання величина коефіцієнту передачі змінюється обернено пропорційно частоті. Якщо використати логарифмічний масштаб, то графік АЧХ буде лінійно знижуватись з нахилом 6дБ/октаву (тобто зменшуватись удвічі при збільшенні частоти удвічі). Тоді межею смуги пропускання буде така частота f_c , де спостерігається зменшення K на 3 дБ.

Для порівняння АЧХ і ЛАЧХ схем з різним значенням K використовують характеристики з нормованим значенням K . Тобто замість абсолютного значення K на довільній частоті ($K(f)$) використовують відношення $K(f)/K_0$, де K_0 – максимальне значення K в діапазоні частот, який визначає АЧХ.

Перехідна характеристика інтегрувального кола приведена на рис. 2.5. Після моменту часу $t = 0$ у який здійснюється стрибок напруги на величину E , конденсатор C починає заряджатися від джерела напруги через резистор R . В початковий момент часу величина струму досягає максимального значення: $I_M = E / R$. Далі величина струму зменшується за законом:

$$i(t) = I_M \cdot \exp(-t / \tau).$$

Напруга на конденсаторі збільшується за законом:

$$u(t) = U_{BX} \cdot (1 - \exp(-t / \tau)).$$

Значення постійної часу $\tau = RC$ і амплітуди діючої на вході напруги E у випадку кола, ПХ якого приведена на рис.2.5, визначаються з умов: $R=1\text{кОм}$, $C=1\text{мкФ}$, $E=1\text{В}$.

Через характерний проміжок часу $\Delta t = \tau$ від моменту стрибка вхідної напруги (див. лівий маркер на рис.2.5 і його координати x_1 , y_1 у додатковому вікні справа) вихідна напруга зростає до значення $U_{BX} \cdot (e-1) / e$. Теоретично заряд буде тривати нескінченно довго, але вже при $t > (3...5) \cdot \tau$ практично можливо вважати, що перехідний процес закінчився.

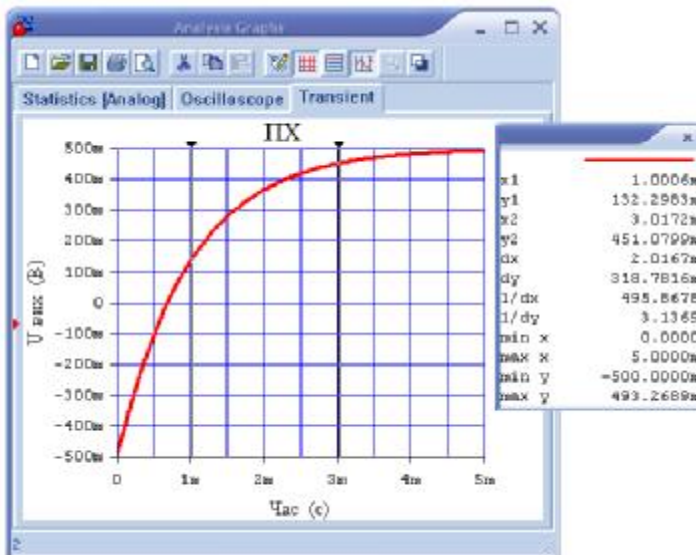


Рисунок 2.5 – Перехідна характеристика інтегрувального кола

Правий маркер відповідає часу 3τ , тобто 451мВ , тобто $90,2\%$ від максимально можливого значення.

Через проміжок часу 5τ від початку перехідного процесу вихідна напруга досягає 493мВ , тобто $98,6\%$ від максимально можливого значення.

АЧХ та ФЧХ інтегрувального кола, схема якого зображена на рис.2.4 (при $R=1\text{кОм}$, $C=1\text{мкФ}$), наведена на рис.2.6.

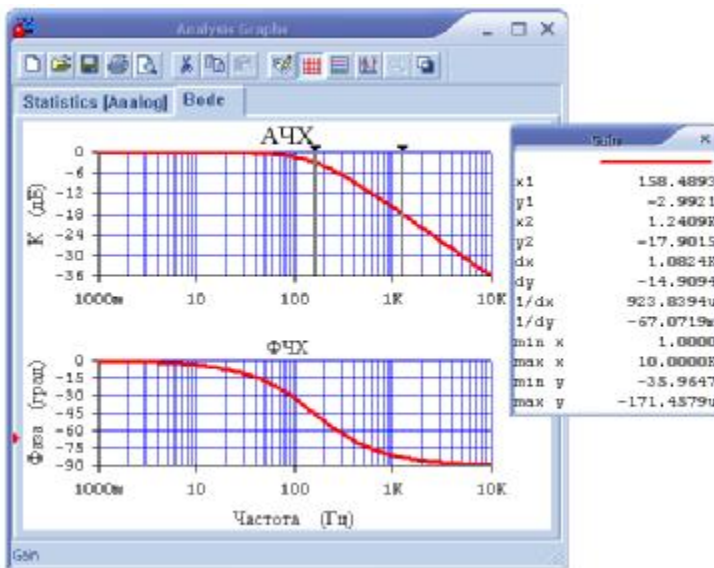


Рисунок 2.6 – АЧХ та ФЧХ інтегрувального кола

На рис.2.6 лівий маркер вказує на межу смуги пропускання, а у вікні «Gain» віддруковані для лівого маркера (x_1 , y_1) значення граничної частоти (f_c) 158 Гц та рівня -3 дБ . З графіка АЧХ видно, що на частоті 600 Гц $K=-12\text{ дБ}$. Правий маркер встановлено на частоту, для якої $K=-18\text{ дБ}$. У вікні «Gain» видно, що правому маркеру (x_2, y_2) відповідає частота $1,2\text{ кГц}$. Тобто дійсно нахил ЛАЧХ у смузі затримання становить мінус 6 дБ/окт. Для інтегрувального RC-кола

смуга пропускання лежить в межах від 0 до f_c і пов'язана з постійною часу співвідношенням: $f_c = 1 / (2\pi\tau)$. Характерно, що на частоті f_c значення фазового зсуву ФЧХ досягає половини свого максимального значення у -90° .

Різного типу електричні схеми, які містять реактивні елементи у випадку, коли їх АЧХ має сильну залежність від частоти, утворюють велику групу функціональних вузлів, що називаються фільтрами. Виходячи з виду АЧХ розрізняють 4 основних типи фільтрів: нижніх частот (ФНЧ), верхніх частот (ФВЧ), смугові пропускані (СПФ) та смугові затримуючі (СЗФ). Якісний вигляд ідеалізованих ЛАЧХ перелічених типів фільтрів при нормованому значенні K наведено на рис.2.7.

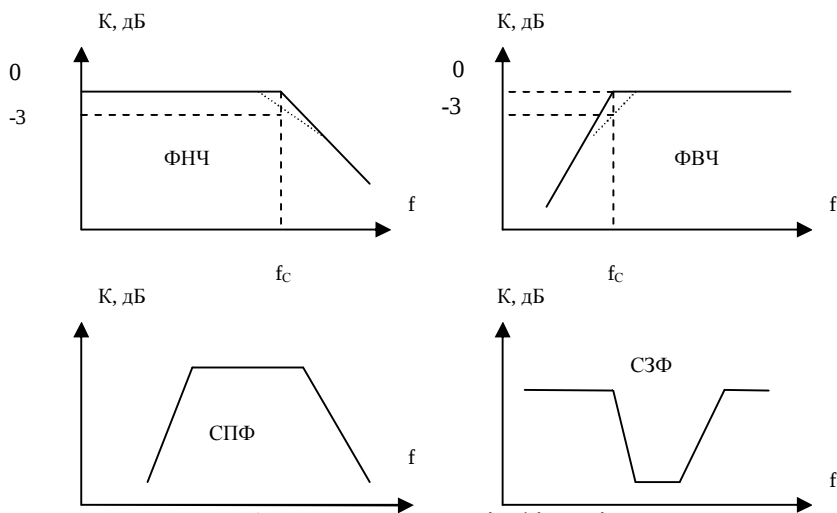


Рисунок 2.7 – ЛАЧХ основних типів фільтрів

Основна відмінність реальної ЛАЧХ від ідеалізованої полягає у плавному переході від смуги пропускання до смуги затримання. Максимальна похибка у 3дБ спостерігається на граничній частоті f_c . Крутизна нахилу ЛАЧХ за межами смуги пропускання становить 6дБ/октаву для фільтру першого порядку і збільшується на 6дБ/октаву при збільшенні порядку фільтру на кожну одиницю. Смугові фільтри мають два значення граничної частоти – верхнє і нижнє.

Таким чином, розглянуте інтегрувальне коло відповідає ФНЧ

першого порядку (з нахилом ЛАЧХ -6дБ/окт).

При послідовному з'єднанні кількох кіл їх коефіцієнти передачі перемножуються, а фазові зсуви додаються.

Диференціувальне коло

Аналогічно з інтегрувальним колом диференціувальне коло пов'язане з ідеалізованим пристроєм, що виконує функцію диференціювання. Якщо входними і вихідними змінними такого пристрою будуть напруги, то вони повинні бути зв'язані залежністю:

$$U_{\text{вих}}(t) = k \cdot dU_{\text{вх}}(t)/dt$$

Часові діаграми такого перетворення, застосованого до імпульсу прямокутної форми та імпульсу з лінійно змінюваними фронтами скінченної тривалості, приведено на рис.2.8.

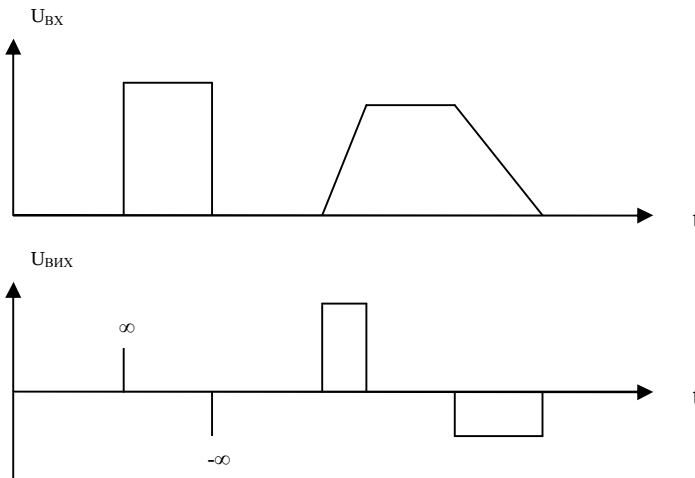


Рисунок 2.8 – Часові діаграми ідеального диференціатора

Для наближеного виконання функції диференціювання застосовують схему, показану на рис.2.9.

Перехідна характеристика диференційного кола, схема якого приведена на рис.2.9 (при $R=1\text{кОм}$, $C=1\text{мкФ}$), показана на рис.2.10.

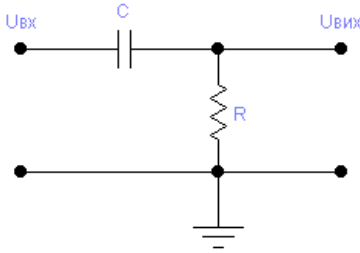


Рисунок 2.9 – Схема диференціювального кола

Зі схеми диференціювального кола (рис.2.9) очевидно, що вихідна напруга пропорційна струму, який протікає через резистор кола: $U_R(t) = I_M \cdot R \cdot \exp(-t / \tau)$. Постійна часу: $\tau = R \cdot C$.

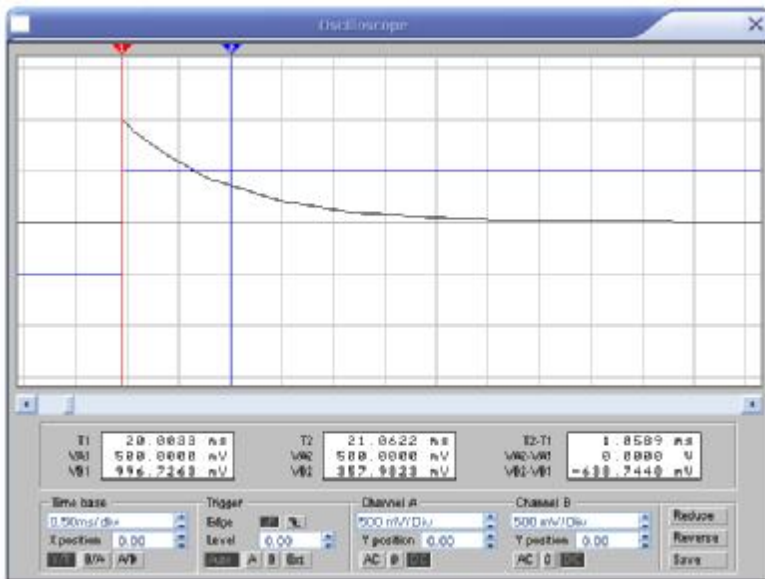


Рисунок 2.10 – ПХ диференціювального кола

З рис.2.10 видно, що амплітуда перепаду вихідної напруги дорівнює повному перепаду вхідної напруги, незважаючи на те, що від'ємне значення вхідної напруги на вихід не передається. Позиція правого маркера відповідає часові $t = \tau$ від початку перехідного процесу.

АЧХ і ФЧХ цього кола зображені на рис.2.11.

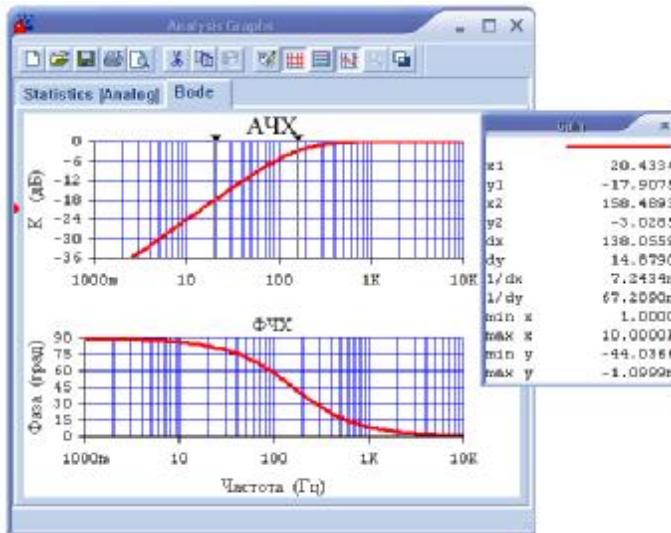


Рисунок 2.11 – АЧХ та ФЧХ диференціального кола

Правий маркер встановлено на межу смуги пропускання. Координати (x2, y2) відповідно становлять: $x_2 (f_c) = 158\text{Гц}$, $y_2 (K) = -3\text{дБ}$. Нахил ЛАЧХ у смузі затримання становить плюс 6дБ/окт., що відповідає ФВЧ першого порядку. Смуга пропускання лежить в межах від $f = f_c$ до $f \rightarrow \infty$. Зв'язок між f_c та τ аналогічний інтегральному RC-колу.

2.2 Підготовка до виконання роботи

2.2.1 При виконанні роботи необхідно встановити значення елементів досліджуваних схем у відповідності до табл. 2.1. Номер варіанту відповідає молодшому розряду номера ПК на якому Ви працюєте.

2.2.2 Для дослідження властивостей розділової та блокувальної ємностей розрахуйте їх величину, що забезпечує виконання наступних умов. Для розділової ємності: напруга на опорі навантаження повинна

бути не менше 80% від напруги джерела. Для блокувальної ємності: струм через опір навантаження повинен бути не більше 10% від струму джерела. Розрахуйте значення постійної та змінної складових напруги на блокувальній ємності, що будуть при виконанні п.2.3.4.

Таблиця 2.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Розділова та блокувальна ємність										
R, кОм	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	0,22	0,33	0,5	0,8
f, кГц	1	10	100	2	20	200	3	30	300	5
Інтегрувальне RC- коло										
R, кОм	1	2	3	2	1	4	5	6	5	4
C, мкФ	1	1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,03	0,01	0,1	0,2
Диференціювальне RC- коло										
R, кОм	1	0,5	2	3	5	0,7	1	4	2	3
C, мкФ	0,1	0,5	0,2	1	0,3	2	0,5	0,1	0,3	0,1

При проведенні розрахунків необхідно врахувати наступне. Фазовий зсув між змінною складовою струму через ємність і напругою, яка викликає цей струм, становить 90°. Тому при відображенні напруг, струмів, опорів та провідностей у вигляді векторів необхідно відображати фазові зсуви у вигляді відповідних кутів між векторами. Для схеми з розділовою ємністю через ємність і опір резистора протікає один і той же струм, а напруга на ємності відстає від струму на кут 90°. Отже вектори напруг джерела сигналу,

на ємності та на опорі при їх геометричному відображенні утворюють прямокутний трикутник. Векторне відображення опорів ємності і резистора утворює подібний трикутник, оскільки величина струму, що протікає через ці елементи однакова. Таким чином, за умови, що величина падіння напруги на резисторі становить 80% від величини напруги джерела сигналу матимемо прямокутний трикутник з довжиною гіпотенузи 1 і довжиною одного з катетів 0,8. Звідки за теоремою Піфагора довжина іншого катета (відображає величину напруги на ємності) становить 0,6. Оскільки величина опорів і напруг на елементах схеми пропорційна, то з відповідної арифметичної пропорції знайдемо необхідне значення реактивного опору ємності:

$$X_C = R \cdot (0,6/0,8).$$

Далі, використавши формулу (2.1), необхідно знайти значення ємності конденсатора.

Для схеми блокувальної ємності при паралельному з'єднанні конденсатора і резистора величина падіння напруги на цих елементах однакова. Тому геометричне відображення будується не для опорів, а для провідностей. Далі аналогічним чином знаходиться необхідне значення реактивної провідності ємності b_C . Після чого визначається величина опору ємності і величина самої ємності. Враховуючи поставлену умову щодо струмів маємо необхідне значення провідності ємності: $b_C = \sqrt{(1-0,1^2)} = 0,995$. Тобто можна вважати, що провідність ємності повинна бути у 10 разів більшою, ніж провідність резистора. Значить опір ємності повинен бути у 10 разів менший, ніж опір резистора.

2.2.3 Для дослідження інтегровального кола розрахуйте постійну часу, протяжність у часі перехідного процесу (до досягнення 90% від максимального значення вихідної напруги), смугу пропускання АЧХ, коефіцієнт передачі на частотах $4f_c$ та $0,25f_c$.

2.2.4 Для дослідження диференціовального кола розрахуйте постійну часу, протяжність у часі перехідного процесу (до досягнення 10% від максимального значення вихідної напруги), частоту f_c .

2.2.5 Результати розрахунків за пп.2.2.2 – 2.2.4 та розрахункові формули приведіть у звіті. Розрахунки, здійснені при виконанні роботи, також необхідно привести у звіті.

2.3 Виконання роботи

2.3.1 Завантажте програму EWB.

2.3.2 Складіть схему дослідження розділової ємності відповідно до рис.2.12 із розрахованими у п.2.2.2 значенням ємності конденсатора та величиною опору резистора згідно табл. 2.1. Встановіть рівень постійної складової напруги генератора 1В і амплітуду синусоїдального сигналу 0,5В та частоту згідно табл.2.1.

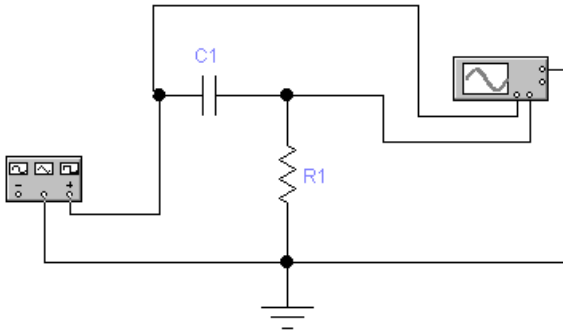


Рисунок 2.12 – Схема дослідження розділової ємності та диференціювального кола

2.3.3 Визначіть величину змінної та сталої складових вихідної напруги, використовуючи для цифрового відліку амплітуд маркери осцилографа. У разі істотної невідповідності розрахунковим значенням з'ясуйте причину невідповідності і в разі помилки в розрахунках скорегуйте значення ємності і повторіть виміри. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

Приклад виконання дослідження згідно пп.2.3.2, 2.3.3 приведений на рис. 2.13.

З рисунка видно, що величина напруги на опорі навантаження становить 416мВ і це не менше 80% від напруги джерела (500мВ). Видно також, що постійна складова напруги джерела (1В) не передається у опір навантаження R1.

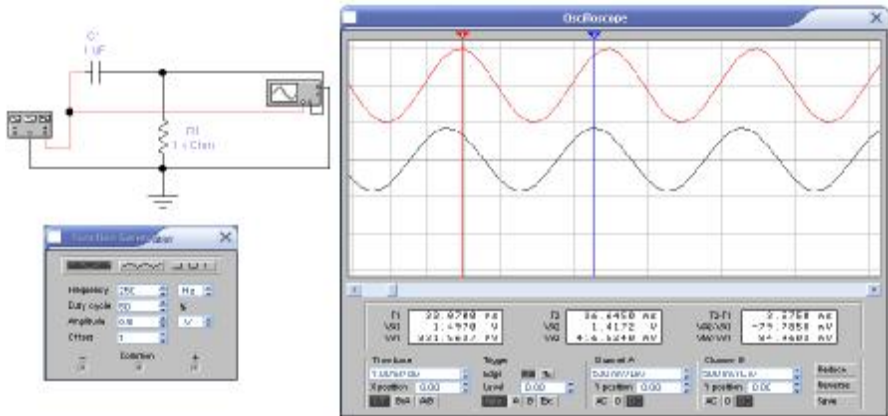


Рисунок 2.13 – Результати дослідження розділової ємності

2.3.4 Складіть схему дослідження блокувальної ємності відповідно до рис.2.14 із розрахованим у п.2.2.2 значенням ємності конденсатора та величиною опору резистора згідно табл. 2.1. Встановіть значення опору резистора, що імітує внутрішній опір генератора рівним 20% від опору резистора навантаження. Встановіть рівень постійної складової напруги генератора 1В і амплітуду синусоїдального сигналу 1В та частоту згідно табл.2.1.

2.3.5 Визначіть величину змінної та сталої складових вихідної напруги, використовуючи для цифрового відліку амплітуд маркери осцилографа. У разі істотної невідповідності розрахунковим значенням з'ясуйте причину невідповідності і в разі помилки в розрахунках скорегуйте значення ємності і повторіть виміри. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

На рис.2.15 наведено приклад виконання дослідження блокувальної ємності. Координати маркерів показують, що постійна складова напруги передається у навантаження майже повністю (830mV) і у відповідності до співвідношення опорів R1 і R2. Змінна ж складова напруги у навантаженні на порядок менша, ніж подається з генератора і становить 95mV.

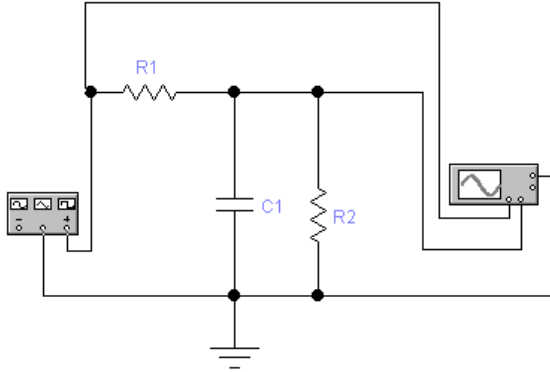


Рисунок 2.14 – Схема дослідження блокувальної ємності

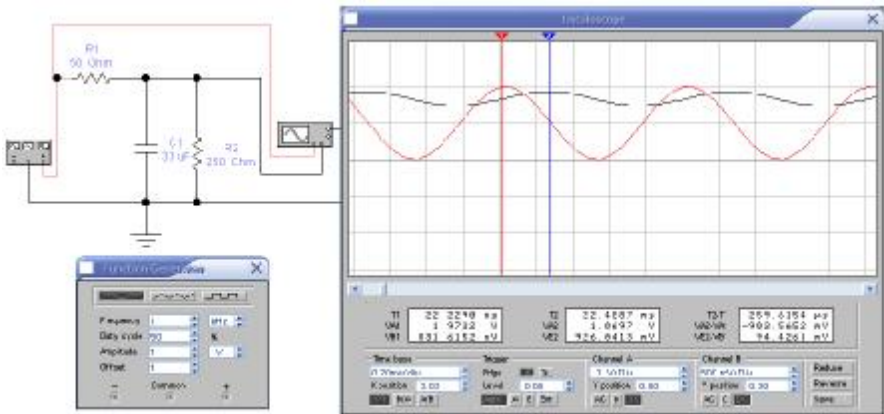


Рисунок 2.15 – Результати дослідження блокувальної ємності

2.3.6 Для дослідження інтегрувального кола складіть схему, приведену на рис.2.16 і встановіть необхідні значення опору резистору та ємності конденсатора. На генераторі встановіть режим послідовності прямокутних імпульсів із шпаруватістю (використовується також термін «скважність») $q = 2$ і тривалістю імпульсу рівною постійній часу τ .

Отримайте осцилограми перехідного процесу та виміряйте діапазон зміни вихідної напруги. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

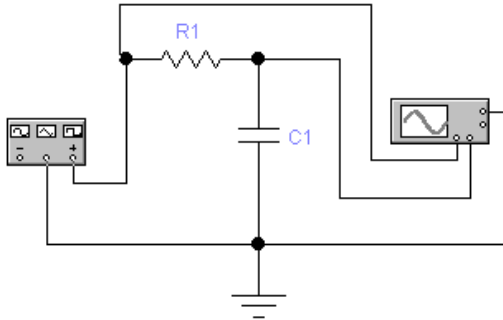


Рисунок 2.16 – Схема дослідження інтегрувального кола

Приклад виконання приведеної вище частини п.2.3.6 показано на рис.2.17.

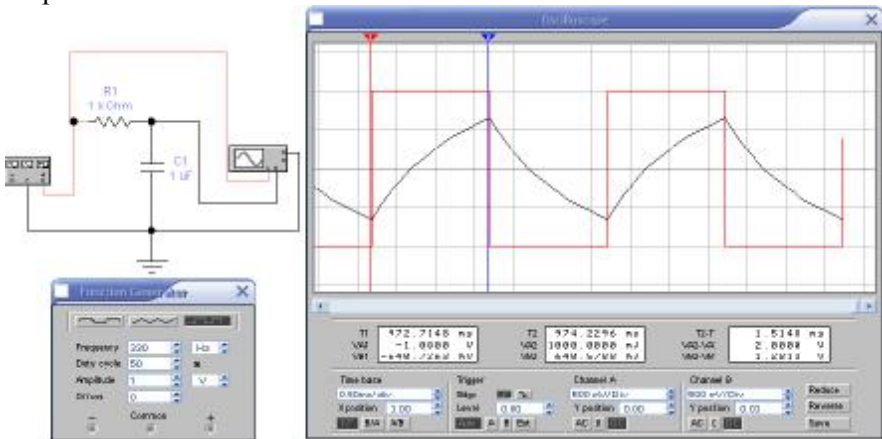


Рисунок 2.17 – Перехідний процес при тривалості імпульсів рівній постійній часу τ

Збільшіть тривалість імпульсів генератора до значення 5τ , та виміряйте тривалість перехідного процесу і величину τ за осцилограмою. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

Встановіть на генераторі режим синусоїдального сигналу і частоту $f = 0,01f_c$. Виміряйте коефіцієнт передачі схеми (значення близьке до максимального значення K). Виміряйте коефіцієнт передачі схеми на частоті f_c . Переконайтесь у відповідності виміряного і

розрахункового значення. Виміряйте коефіцієнт передачі схеми на частотах $4 f_c$ та $0,25 f_c$ і порівняйте з розрахунковим значенням. Результати розрахунків і вимірювань внесіть до табл.2.2.

Таблиця 2.2

	$\tau, \text{с}$	$f_c, \text{кГц}$	$K(4 f_c)$	$K(0,25 f_c)$
розраховано				
виміряно				

2.3.7 Підключіть замість осцилографа Бодє-плоттер. Функціональний генератор можна залишити, а можна замінити генератором синусоїдального сигналу (як на рис.2.18). Встановіть межі частотного аналізу приблизно від $f_{\min}=1\text{Гц}$ до $f_{\max}=10\text{кГц}$. Встановіть межі відображення коефіцієнту передачі приблизно від 0дБ до мінус 40дБ. Встановіть межі зміни частоти для режиму ФЧХ такі ж, як і для режиму АЧХ. Встановіть межі зміни фазового зсуву від 0 до мінус 90° .

Включіть на декілька секунд клавішу живлення і оцініть якість отриманих АЧХ та ФЧХ.

Виберіть меню Analysis, а в ньому опцію Display Graphs. У вікні Analysis Graphs, що відкриється, відредагуйте більш якісні відображення АЧХ та ФЧХ за допомогою клавіш-піктограм вікна Analysis Graphs та додаткових вікон керування, які будуть відкриватися. При необхідності скорегуйте частотні та амплітудні межі відображення АЧХ та ФЧХ. Потім встановіть сітку по обох осях координат. Встановіть необхідні написи по осях координат та до графіків. Нарешті встановіть оптимальний крок сітки по осі ординат для АЧХ та ФЧХ, колір і товщину ліній сітки та ліній графіків. Встановіть маркери на АЧХ, які б документально підтвердили значення граничної частоти смуги пропускання та дозволили визначити крутизну спаду АЧХ. Координати маркерів будуть виведені у додатковому вікні «Gain».

Збережіть отриманий результат для звіту. Приклад підключення Бодє-плоттера до схеми і результати визначення АЧХ та ФЧХ показані на рис.2.18.

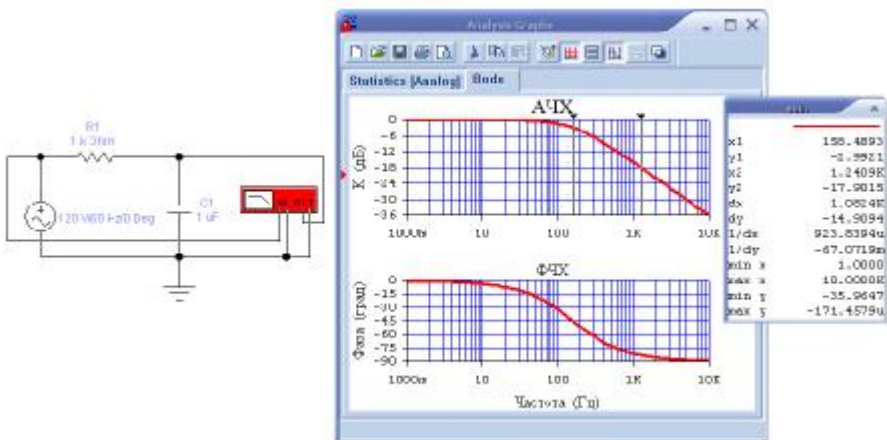


Рисунок 2.18 – Приклад виконання вимірювань АЧХ та ФЧХ

2.3.8 Для дослідження диференціального кола складіть схему, приведену на рис.2.12, і встановіть необхідні значення опору резистору та ємності конденсатора. На генераторі встановіть режим послідовності прямокутних імпульсів із шпаруватістю $q=2$ і тривалістю τ .

Отримайте осцилограми перехідного процесу та виміряйте діапазон зміни вихідної напруги. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

Збільшіть тривалість імпульсів генератора до значення 5τ , та виміряйте тривалість перехідного процесу і величину τ за осцилограмою. Зафіксуйте осцилограми для звіту.

На рис.2.19 приведений приклад отриманої осцилограми перехідних процесів у диференціальному колі.

Встановіть на генераторі режим синусоїдального сигналу і частоту $f = 100f_c$. Виміряйте коефіцієнт передачі схеми (значення близьке до максимального значення K). Виміряйте коефіцієнт передачі схеми на частоті f_c . Переконайтесь у відповідності виміряного і розрахункового значення. Виміряйте коефіцієнт передачі схеми на частотах $4 f_c$ та $0,25 f_c$ і порівняйте з розрахунковим значенням. Результати розрахунків і вимірювань внесіть до табл.2.3.

Таблиця 2.3

	τ , с	f_c , кГц	$K(4 f_c)$	$K(0,25 f_c)$
розраховано				
виміряно				

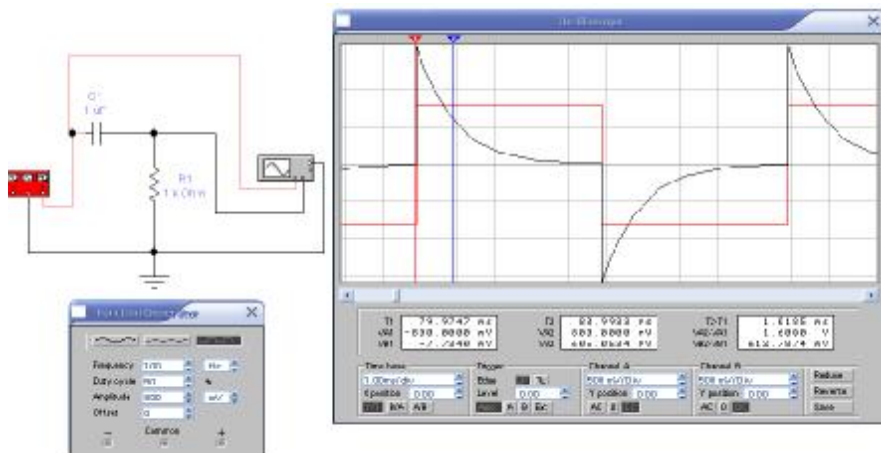


Рисунок 2.19 – Перехідні процеси у диференціальному колі

2.3.9 Проведіть вимірювання АЧХ та ФЧХ диференціального кола аналогічно вимірюванням п.2.3.7.

2.4 Контрольні запитання

1. Функціональне призначення розділової ємності. Наведіть приклади її використання.
2. Функціональне призначення блокувальної ємності. Наведіть приклади її використання.
3. Яке призначення резистора R_1 у схемі рис. 2.2а)?
4. Яким повинно бути співвідношення опорів резисторів R_1 та R_2 в схемі рис. 2.2а) у випадку, коли резистор R_1 вводиться у схему спеціально?
5. Чим визначається опір навантаження для розділової ємності у

схемі рис. 2.16)?

6. Які функції виконують резистори R_1 та R_3 у схемі на рис. 2.16)?

7. Яку функції виконує резистор R_2 у схемі на рис. 2.16)?

8. Які функції виконують резистори R_1 та R_2 у схемі на рис. 2.26)?

9. Яку функції виконує резистор R_3 у схемі на рис. 2.26)?

10. Дайте визначення перехідної характеристики. Наведіть схему інтегрувального RC-кола та його перехідну характеристику.

11. Як можна визначити перехідну характеристику інтегрувального RC-кола?

12. Що таке постійна часу RC-кола? Як пов'язана з нею тривалість перехідного процесу?

13. Що таке АЧХ і ФЧХ? Який вигляд мають АЧХ та ФЧХ інтегрувального RC-кола?

14. Дайте визначення перехідної характеристики. Наведіть схему диференціувального RC-кола та його перехідну характеристику.

15. Що таке АЧХ і ФЧХ? Який вигляд мають АЧХ та ФЧХ диференціувального RC-кола?

16. Який вигляд мають ЛАЧХ інтегрувального та диференціувального RC-кола?

17. Який вигляд і кількісні параметри матимуть АЧХ та ФЧХ каскадного з'єднання двох інтегрувальних RC-кіл?

18. Який вигляд і кількісні параметри матимуть АЧХ та ФЧХ каскадного з'єднання двох диференціувальних RC-кіл?

19. Чому можна вважати, що інтегрувальне коло виконує функції ФНЧ? Навести математичне та схемотехнічне обґрунтування.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАСКАДНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Лабораторна робота №2

Мета роботи: дослідження моделі двокаскадного підсилювача на базі операційного підсилювача (ОП).

3.1 Короткі теоретичні відомості

Операційним підсилювачем називається інтегральна мікросхема з диференціальним входом, яка являє собою підсилювач постійного струму з параметрами, що наближаються до ідеальних. Це — високий коефіцієнт підсилення (сотні тисяч), великий вхідний та малий вихідний опір. Частотна характеристика ОП не має спаду в області низьких частот, а верхня гранична частота має достатньо велике значення.

Вхідним каскадом ОП є балансний диференціальний підсилювач, що має два сигнальних входи.

Живлення ОП здійснюється, як правило, від двох різнополярних джерел живлення однакової напруги. Умовне позначення ОП зображене на рис. 3.1.

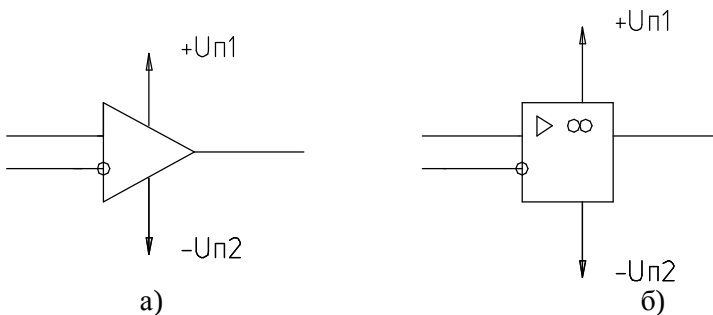
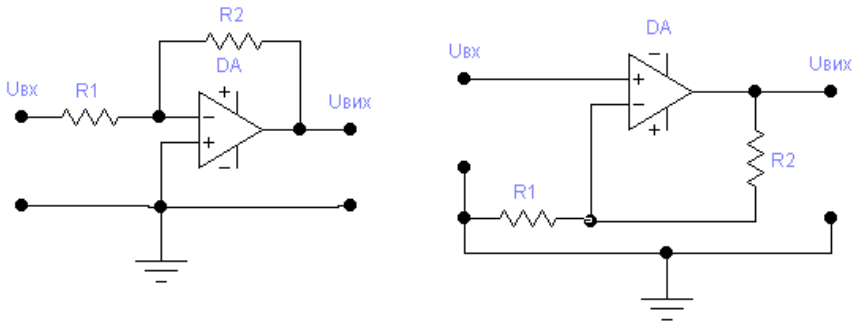


Рисунок 3.1 – Позначення операційного підсилювача: а) за літературою; б) за стандартом

Верхній на малюнках вхід ОП називається неінвертуючим входом (при подачі сигналу на цей вхід фаза сигналу на виході

співпадає з фазою вхідного), а нижній — інвертуючим входом (при подачі сигналу на цей вхід фаза сигналу на виході має зсув на 180° відносно вхідного).

Оскільки коефіцієнт підсилення ОП дуже великий, то використання його в якості підсилювача можливо лише при охопленні його від'ємним зворотним зв'язком (ВЗЗ). Найбільш типові схеми підсилювача на базі ОП мають вигляд, наведений на рис.3.2 (DA – позначення ОП). Коефіцієнти підсилення (K) таких підсилювачів визначаються параметрами ланцюга ВЗЗ і формули для їхнього обчислення наведені на рис.3.2.



а) $K = - R2/R1$

б) $K = R2/R1 + 1$

Рисунок 3.2 – Інвертуючий (а) та неінвертуючий (б) підсилювачі з від'ємним зворотним зв'язком

Амплітудні характеристики інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів з від'ємним зворотним зв'язком зображено на рис.3.3.

Нахил робочої ділянки характеристики визначається коефіцієнтом підсилення (K) підсилювача.

На характеристиках є яскраво виражені ділянки насичення, які характеризуються тим, що, починаючи з деякого значення вхідної напруги $U_{вх.max}$, вихідна напруга не збільшується, а залишається постійною на рівні деякого значення $\pm U_{нас}$, що визначається напругою живлення ОП. Максимальна вихідна напруга $\pm U_{нас}$ менша напруги живлення $\pm U_{ж на}$ (0,7-2)В.

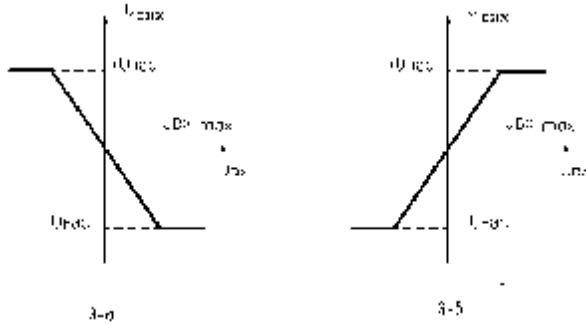


Рисунок 3.3 – Амплітудні характеристики інвертуючого а) та неінвертуючого б) підсилювачів

При підсиленні змінної напруги ділянка насичення виявляє себе тим, що амплітуда вихідної напруги не збільшується, а залишається на рівні $\pm U_{\text{нас}}$, і з'являються спотворення, які зростають зі зростанням вхідного сигналу (рис.3.4).

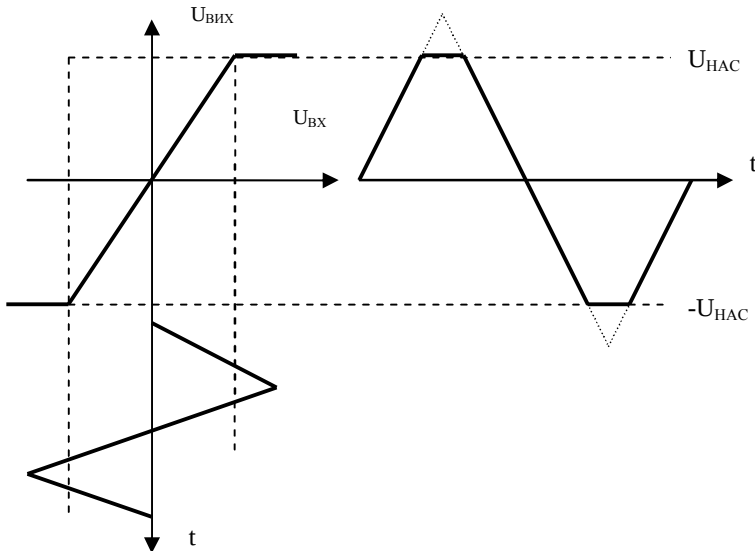


Рисунок 3.4 – Спотворення сигналу при підсиленні із входженням у режим насичення

3.2 Підготовка до виконання роботи

3.2.1 Схема, що досліджується, та вимірювальні прилади зображені на рис.3.5.

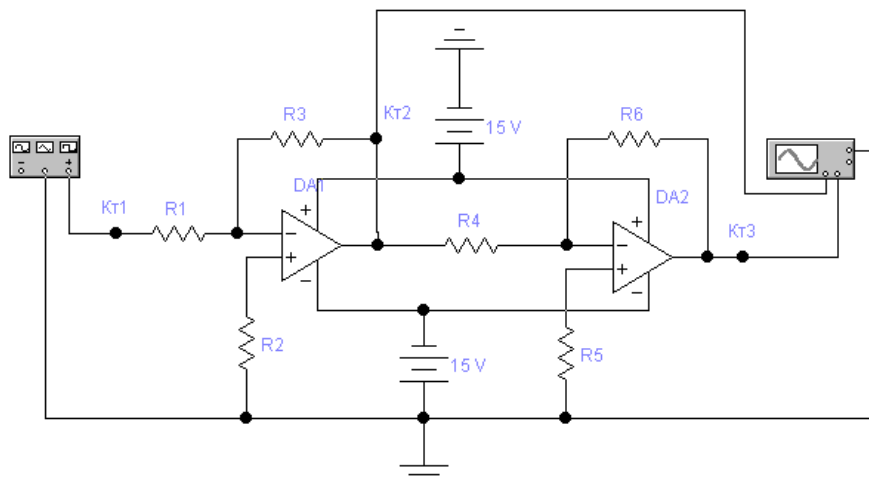


Рисунок 3.5 – Схема двокаскадного підсилювача

3.2.2 Предметом дослідження в цій лабораторній роботі є модель двокаскадного підсилювача, зібрана на макромоделі ОП типу LM741.

Значення опорів резисторів схеми: $R1=R2=R4=R5=2.2\text{ кОм}$.

Значення опорів резисторів $R3$ та $R6$ – відповідно до табл.3.1.

Таблиця 3.1

Резистор	Значення опору по варіантах, кОм									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R3	4,7	5,6	6,8	8,2	10	4,7	5,6	6,8	8	9
R6	5,1	8,2	10	7,5	4,7	6,8	10	8,2	6	7

ОП живляться від джерела симетричної напруги: $\pm 15\text{В}$.

У схемі передбачені контрольні точки (к.т.) для спостереження та виміру сигналів:

- на вході підсилювача “Кт1”,

- на виході першого каскаду “Кт2”,
- на виході підсилювача “Кт3”.

Синусоїдальний сигнал, що підсилюється, подається на підсилювач від вимірювального генератору.

Спостереження та вимірювання сигналів на вході та виході підсилювача здійснюється за допомогою осцилографа та мультиметра. Осцилограф та мультиметр може підключатися до трьох контрольних точок схеми: “Кт1”, “Кт2” та “Кт3”.

3.2.3 До виконання роботи проведіть розрахунок параметрів (K , $\pm U_{\text{нас}}$) каскадів підсилювача відповідно до свого варіанту.

3.3 Виконання роботи

3.3.1 Завантажте програму Electronics Workbench.

Складіть схему підсилювача, наведену на рис.3.5, використовуючи панелі інструментів. Встановіть опори резисторів R3, R6 відповідно табл.3.1. Встановіть вузли та позначки на них у контрольних точках у відповідності з рис.3.5.

3.3.2 Дослідження амплітудної характеристики (АХ) підсилювача

3.3.2.1 У програмі EWB немає спеціалізованих засобів для вимірювання АХ. Тому найпростішим способом визначення АХ є зняття по точках відповідності між вхідною і вихідною напругою при поступовому збільшенні амплітуди вхідного сигналу від генератора. Далі треба побудувати за отриманими даними графік АХ. Напруги можна вимірювати мультиметром або за допомогою маркерів осцилографа. Проте існує інша можливість отримати АХ, використавши специфічний режим осцилографа.

3.3.2.2 Встановіть форму вихідного сигналу генератора трикутною, частоту $F=1\text{Гц}$, коефіцієнт заповнення 50%, амплітуду напруги генератора такою, щоб у випадку розрахункового значення коефіцієнту підсилення K вихідна напруга була в 1,3...1,5 разів більша за напругу живлення ОП.

3.3.2.3 Підключіть канал А осцилографа до Кт1, а канал В – до

Кт2. Встановіть режим розгортки осцилографа: «В/А». Встановіть зручний масштаб зображення АХ першого каскаду підсилювача регулюванням чутливості каналів осцилографа (V/Div). При допомозі маркерів визначте напругу насичення ОП, якщо ОП переходить в режим насичення. Збережіть зображення АХ для звіту.

3.3.2.4 Повторіть вимірювання АХ всього підсилювача аналогічно п.3.3.2.3, перемкнувши канал В осцилографа у Кт3.

На рис.3.6 приведений приклад результату визначення наскрізної АХ при $K=9,68$ і амплітуді вхідної напруги 3В. На рисунку видно, що нульовому значенню напруг відповідає центр екрану осцилографа. Також видно оптимізовані для даного випадку режими розгортки та масштабу зображення. Видно також за маркерами значення напруги насичення ОП: $\pm 14,11\text{В}$, при напрузі живлення $\pm 15\text{В}$.

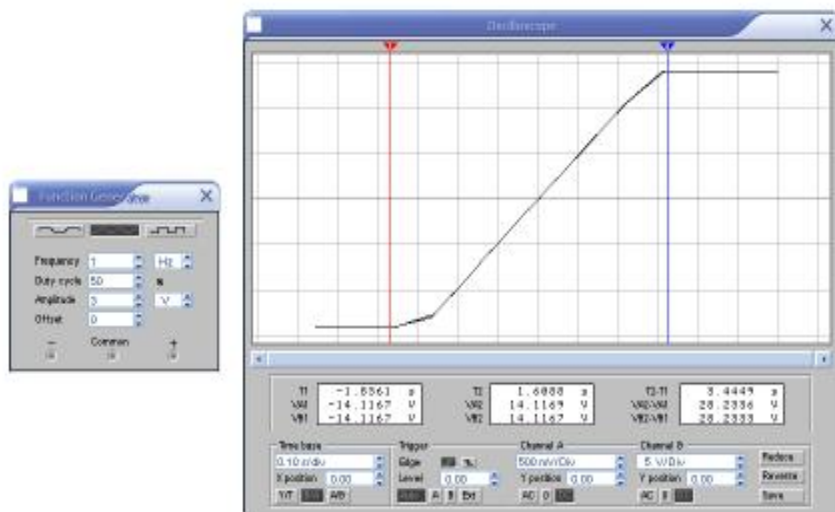


Рисунок 3.6 – Відображення АХ підсилювача

3.3.3 Дослідження АЧХ та ФЧХ підсилювача

3.3.3.1 Встановіть синусоїдальну форму сигналу генератора. Встановіть замість осцилографа прилад для вимірювання АЧХ та ФЧХ, який називається у EWB Бодє-плоттер (БП). Підключіть вхід БП до генератора (КТ1), а вихід – до виходу підсилювача (КТ3).

3.3.3.2 Встановіть у вікні AC Frequency Analysis, або на панелі БП межі частотного аналізу $F_{\min}=1\text{кГц}$, $F_{\max}=1\text{МГц}$, та межі зміни коефіцієнту передачі приблизно від 20дБ до 0дБ. Програма автоматично вибере оптимальне значення вхідного сигналу.

3.3.3.3 Ввімкніть на декілька секунд процес аналізу кнопкою живлення на панелі інструментів. На екрані БП з'явиться зображення АЧХ. При необхідності скорегуйте межі зміни коефіцієнту передачі так, щоб зображення АЧХ займало майже всю площу екрану БП (при цьому необхідно повторити аналіз).

3.3.3.4 У вікні Graph знаходиться більш детальне відображення АЧХ. Крім того це зображення можна зручно редагувати. Виберіть логарифмічні масштаби по вісях частот і коефіцієнту передачі, та встановіть сітку на графіку АЧХ. Визначте межу смуги пропускання за допомогою маркера. Параметри маркера відображаються у додатковому вікні «Gain». Аналогічно оптимізуйте масштаб для ФЧХ. Встановіть необхідні написи на графіках. Збережіть отримані АЧХ та ФЧХ для звіту.

Приклад визначення АЧХ та ФЧХ приведено на рис.3.7. На графіку АЧХ встановлено лівий маркер (x_1 , y_1) у положення межі смуги пропускання, а правий (x_2 , y_2) – на частоту у 4 рази вищу, ніж у лівого. У додатковому вікні «Gain» видно відліки:

- $\max y = 19,7\text{дБ}$ (максимальне значення К);
- $x_1 = 156\text{Гц}$ і $y_1 = 16,7\text{дБ}$ (тобто межа смуги пропускання $f_c = 156\text{Гц}$);
- $x_2 = 628\text{Гц}$ і $y_2 = 2,4\text{дБ}$ (звідкіля з урахуванням параметрів лівого маркера можна визначити нахил ЛАЧХ: $-7,2\text{дБ/окт}$, тобто близько до ФНЧ першого порядку).

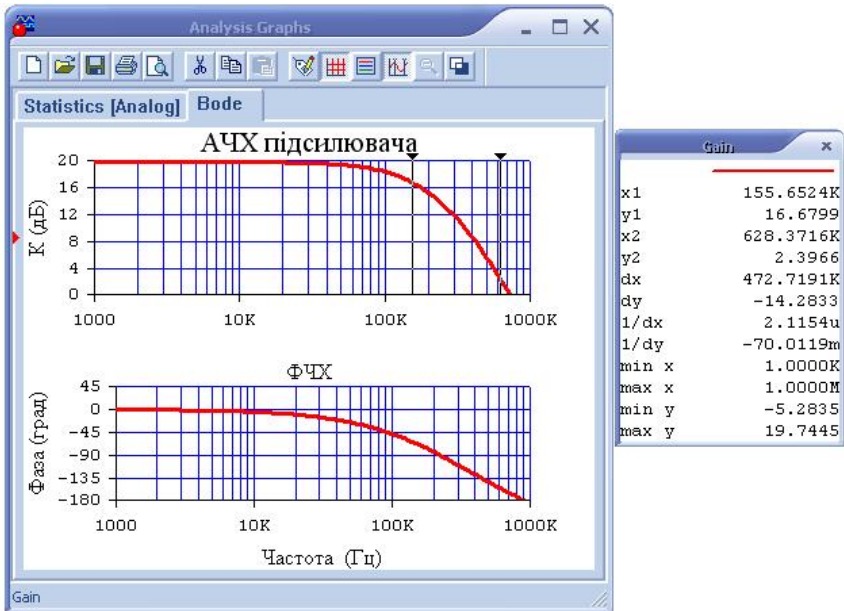


Рисунок 3.7 – Приклад визначення АЧХ та ФЧХ підсилювача

3.4 Контрольні запитання

1. Що називається операційним підсилювачем?
2. Перелічіть та дайте визначення основних параметрів ОП.
3. У чому полягають основні властивості диференційних входів ОП?
4. Чим пояснюється необхідність введення від'ємного зворотного зв'язку у схемах підсилювачів на базі ОП?
5. Яка нижня межа частотного діапазону роботи ОП?
6. Які причини обумовлюють зменшення коефіцієнту підсилення ОП на високих частотах?
7. Чим визначається коефіцієнт підсилення підсилювача на базі ОП в реальних схемах?
8. Якими параметрами підсилювача на базі ОП визначається діапазон вхідної напруги підсилювача?

9. Чим визначається максимальне значення напруги на виході ОП?

10. Який порядок проведення виконаної лабораторної роботи по аналізу електронних схем в програмному комплексі Electronics Workbench?

11. Порядок використання осцилографа у EWB, та налагодження його параметрів.

12. Порядок використання Бode-плоттера у EWB, та налагодження його параметрів.

13. Порядок використання режиму Analysis-AC Frequency для отримання АЧХ та можливості редагування результатів у вікні Graph.

14. Розкажіть про панелі компонентів схеми.

15. Розкажіть про команди редагування схеми (переміщення, вилучення елементів, зміна масштабу, зміна сполучень компонентів).

16. Який алгоритм встановлення параметрів компонентів (резисторів, конденсаторів, операційних підсилювачів)?

17. Як встановити параметри вихідного сигналу функціонального генератора?

18. Як користуватись мультиметром?

19. Що таке амплітудна характеристика підсилювача?

20. Як можна виміряти АХ у програмі EWB?

21. Як можна виміряти АЧХ у програмі EWB?

22. Як можна забезпечити коефіцієнт підсилення менше одиниці у неінвертуючому підсилювачі на базі ОП?

23. Як можна забезпечити оперативне регулювання коефіцієнту підсилення в підсилювачі на базі ОП?

24. Як можна забезпечити різне значення коефіцієнту підсилення для постійної і змінної складових вхідного сигналу у підсилювачі на базі ОП?

4 ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГОВОГО КОМПАРАТОРА

Лабораторна робота №3

Мета роботи: дослідження параметрів та характеристик імітаційної моделі аналогового компаратора електричних сигналів.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Найпростішим аналоговим компаратором є операційний підсилювач без ВЗЗ (рис.4.1).

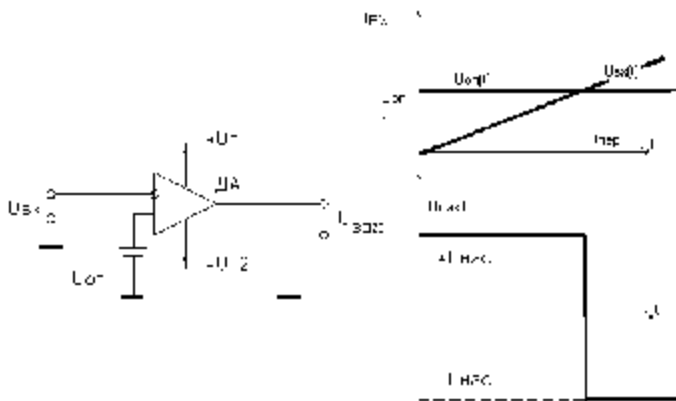


Рисунок 4.1 – Аналоговий компаратор та часові характеристики його роботи

При подачі на один з входів компаратора ДА вхідної напруги $U_{вх}$, а на інший — опорної напруги $U_{оп}$, яка для даної схеми дорівнює пороговій напрузі $U_{пор}$, момент їхньої рівності відзначається компаратором зміною рівня напруги на виході з “+ $U_{нас}$ ” на “- $U_{нас}$ ” (рис.4.1). Амплітудна характеристика компаратора зображена на рис.4.2.

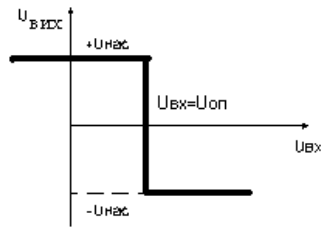


Рисунок 4.2 – Амплітудна характеристика аналогового компаратора

Наведений вище компаратор відноситься до двовхідних, на відміну від одновхідного компаратора, виконаного на ОП, схема та амплітудна характеристика якого надана на рис.4.3.

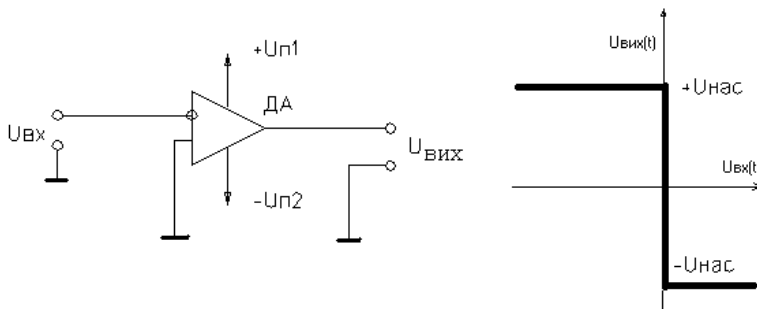


Рисунок 4.3 – Схема одновхідного компаратора та його амплітудна характеристика

При застосуванні одновхідного компаратора можна ввести схему подачі опорної напруги за допомогою суматора, виконаного на резисторах R1 - R3 (рис.4.4). Вхідний сигнал може подаватися і на неінвертуючий вхід ОП. Мікросхеми компараторів можуть мати однополярне живлення. Мікросхеми одновхідних компараторів з однополярним живленням мають не нульове значення порогової напруги, яке визначається внутрішніми ланцюгами мікросхеми.

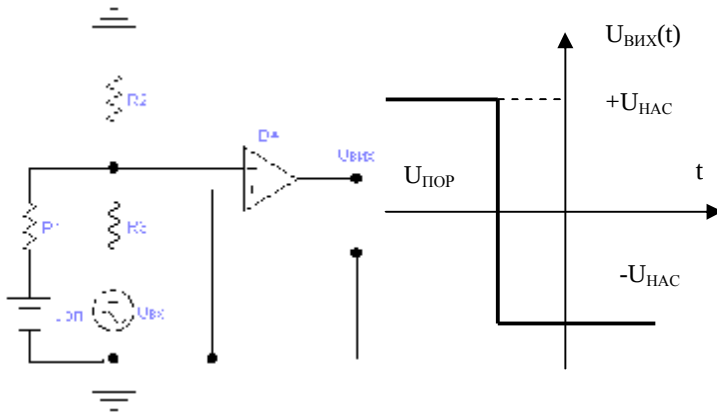


Рисунок 4.4 – Схема підключення опорної напруги ($U_{оп}$) за допомогою резисторного суматора та амплітудна характеристика із зміщенням порогової напруги ($U_{пор}$)

Порогова напруга ($U_{пор}$), тобто напруга на вході ОП, при якій відбудеться спрацювання компаратора, визначається виразом (якщо вихідний опір джерела опорної напруги достатньо малий у порівнянні з R_2 , і $R_1 \gg R_3$):

$$U_{i\delta} \approx -U_{oi} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1}. \quad (4.1)$$

У схемі компаратора (рис.4.4) напруга сигналу також поступає на вхід ОП лише частково:

$$U_C \approx U_{ВХ} \cdot R_2 / (R_2 + R_3). \quad (4.2)$$

Якщо на схему компаратора (рис.4.4) подати синусоїдальну вхідну напругу, то на виході його формуються прямокутні імпульси із шпаруватістю(Q), котра визначається як:

$$Q = \frac{t_1 + t_2}{t_1}, \quad (4.3)$$

і залежить як від порогової напруги ($U_{пор}$) (рис.4.5), так і від напруги вхідного сигналу:

$$Q = 2p / \left(p \pm 2 \cdot \arcsin \left(\frac{|U_{пор}|}{U_m} \right) \right), \quad (4.4)$$

де U_m – амплітудне значення напруги сигналу на вході ОП (рис.4.5).

Знак « $\pm$ » у знаменнику формули (4.4) протилежний полярності джерела $U_{ОП}$ для схеми рис.4.4.

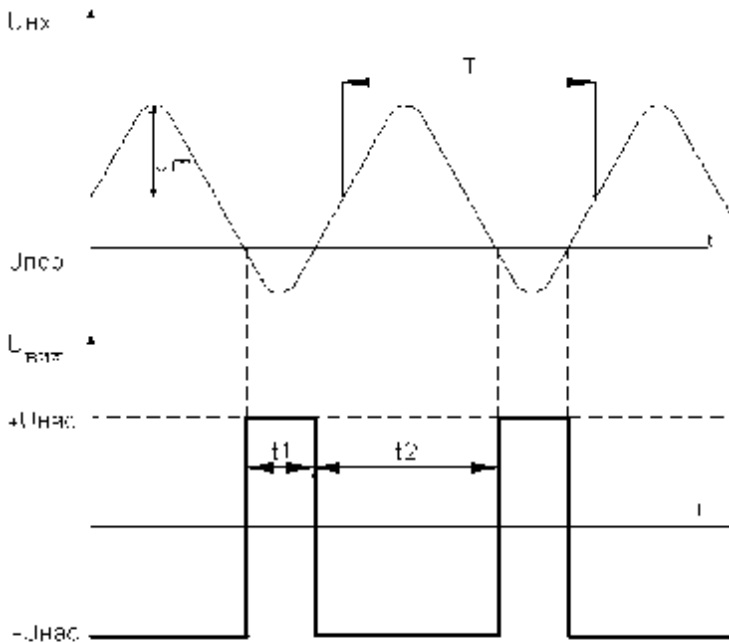


Рисунок 4.5 – Часові діаграми формування компаратором прямокутних імпульсів

До складу мікросхеми компараторів окрім ОП входить ще схема формування рівня вихідного сигналу (з окремим виводом живлення)

з тим, щоб його можна було безпосередньо подавати на входи цифрових інтегральних мікросхем.

4.2 Підготовка до виконання роботи

4.2.1 На рис. 4.6 приведена принципова схема компаратора, що досліджується в лабораторній роботі.

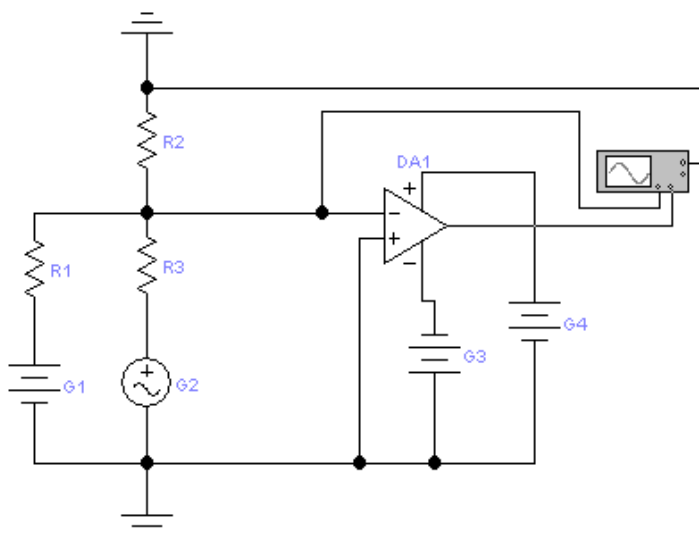


Рисунок 4.6 – Схема компаратора

На інвертуючий вхід компаратору DA1 окрім опорної напруги $U_{оп}$ з генератору G1 подається ще й змінний синусоїдальний сигнал $U_{вх}(t)$ з генератору G2.

Опорна напруга та вхідний сигнал подаються на вхід компаратора через резисторний суматор з параметрами: $R1=10\text{кОм}$; $R2=1\text{кОм}$; $R3=10\text{кОм}$.

Спостереження форми та вимірювання параметрів вхідного і вихідного сигналу з компаратора здійснюється підключенням осцилографа до відповідних вузлів схеми компаратора.

4.2.2 Проведіть розрахунок передатної характеристики схеми

при значенні U_{OP} , що відповідає табл.4.1.

Таблиця 4.1

№ вар.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_{OP}, B	1,5	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	-3,0	-5,0	-6,0	-9,0

4.2.3 Проведіть розрахунок шпаруватості імпульсів при ефективному значенні синусоїдальної напруги вхідного сигналу згідно табл.4.2 (звернути увагу, що у формулу (4.4) входить U_m).

Таблиця 4.2

№ вар.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_{BX}, B	2,5	4	5	6	8	9	4,5	7	7	10

4.2.4 Оцініть, як може вплинути затримка перемикавання вихідної напруги ОП на форму вихідної напруги компаратора.

4.3 Виконання роботи

4.3.1 Завантажте програму Electronics Workbench.

4.3.2 Зберіть схему імітаційної моделі компаратора, яка наведена на рис. 4.6.

4.3.3 Встановіть параметри генератора та джерела опорної напруги у відповідності з потрібним варіантом (табл.4.1, табл.4.2). Встановіть частоту генератора 1кГц.

4.3.4 Отримайте осцилограми вхідної та вихідної напруги в оптимальному масштабі. Збережіть їх для звіту. На рис.4.7 приведений приклад виконання вимірювань.

4.3.5 Збільшіть частоту генератора до (20...50)кГц і отримайте нові осцилограми. Запишіть значення часу затримки перемикавання вихідної напруги для моделі використаної мікросхеми; чи значення максимальної швидкості наростання вихідної напруги.

4.3.6 Відобразіть у звіті відповідність форми вихідної напруги

компаратора тим спотворенням, які Ви визначили в п.4.2.4.

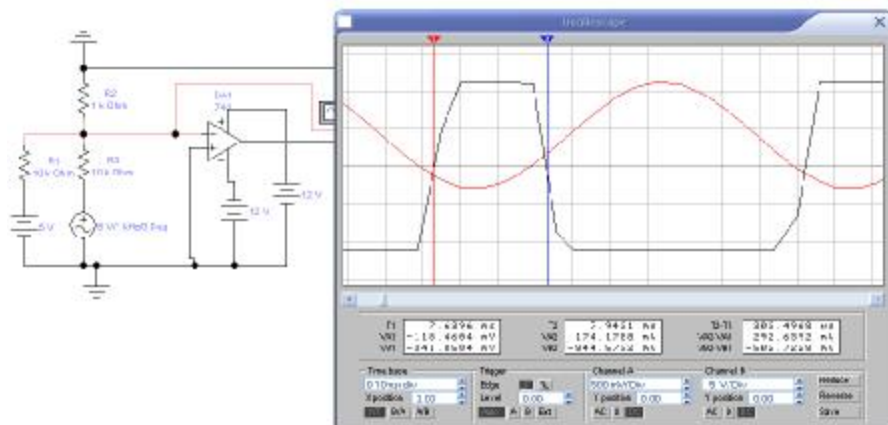


Рисунок 4.7 – Схема компаратора та результати вимірювань

4.4 Контрольні запитання

1. Що називається аналоговим компаратором?
2. Що є основою для побудови схем аналогових компараторів?
3. У чому різниця між одновходовим та двовходовим компаратором?
4. Чим визначаються рівні вихідної напруги компаратора?
5. Чим визначається поріг спрацьовування одновходового компаратора?
6. Якісно оцініть параметри вихідного сигналу компаратора при подачі на його вхід сигналів однакової амплітуди, але різної форми.
7. Як можна зробити поріг спрацьовування компаратора регульованим?
8. Чому у виразі (4.1) не враховується опір резистору R1?
9. Чому у виразі (4.2) не враховується опір резистору R2?
10. Як визначається ефективне (діюче) значення напруги, що має гармонічний закон зміни у часі?

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

Лабораторна робота №4

Мета роботи: вивчення роботи одного з варіантів виконання електричних схем генераторів сигналів спеціальної форми.

5.1 Короткі теоретичні відомості

Принцип дії генераторів електричних сигналів заснований на використанні явища додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ), що охоплює підсилювальні каскади (рис. 5.1).

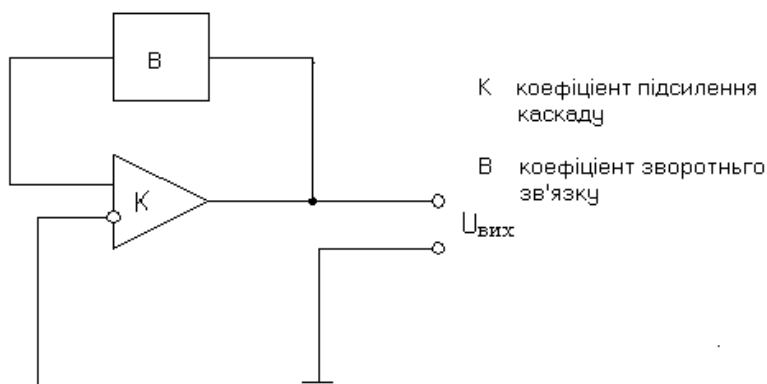


Рисунок 5.1 – Вмикання ланцюгу додатного зворотного зв'язку

Причому, для виникнення генерації необхідно, щоб коефіцієнт підсилення каскаду K — перевищував деяке критичне значення, що при використанні сучасної елементної бази не є проблемою.

Форма сигналу, що виробляється генератором, залежить від вигляду ланцюга додатного зворотного зв'язку. Якщо у якості елементу ланцюга зворотного зв'язку використати смуговий фільтр високої добротності, то генератор буде виробляти сигнал

синусоїдальної форми певної частоти. Такі прилади носять назву генераторів гармонічних сигналів.

До іншого класу генераторів належать так звані генератори сигналів спеціальної форми, що виробляють сигнали прямокутної, трикутної, пилоподібної та ін. форми.

Схемні реалізації згаданих генераторів досить різноманітні. Розглянемо одну з них.

На рис. 5.2 зображена схема генератора сигналу прямокутної форми. Такі генератори також називають мультивібраторами.

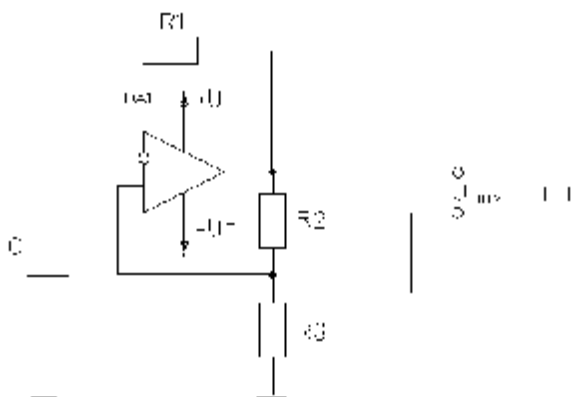


Рисунок 5.2 – Схема генератора сигналів прямокутної форми

Наведений генератор являє собою операційний підсилювач ОП-DA1, охоплений додатним зворотним зв'язком через ланцюг $R2 - R3$ та від'ємним зворотним зв'язком через частотнозалежний ланцюг $R1 - C$. З іншого боку, цю схему можна охарактеризувати виходячи з того, що ОП DA1 з резисторами $R2 - R3$ являє собою регенеративний компаратор (так званий тригер Шмітта), охоплений ВЗЗ по ланцюгу $R1 - C$.

Епюри напруг, що пояснюють роботу генератора, зображені на рис.5.3.

Розглянемо роботу генератора.

При включенні живлення в силу дії додатного зворотного зв'язку в схемі відбувається лавиноподібний процес, в результаті

якого напруга на виході ОП встановлюється на рівні напруги насичення додатної або від'ємної полярності. Нехай, наприклад, в момент часу $t=0$ встановилася напруга $+U_{нас}$.

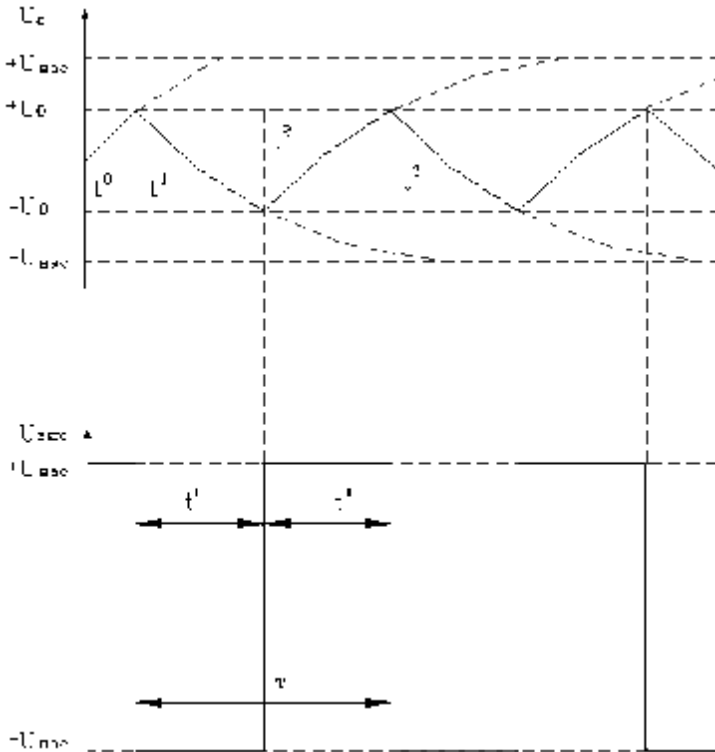


Рисунок 5.3 – Епюри напруг, що пояснюють роботу генератора

З цього моменту часу починається заряд конденсатора C по колу: $(+U_{оп1}) \rightarrow (\text{вихід DA1}) \rightarrow (R1) \rightarrow (C) \rightarrow (\text{“корпус”} \rightarrow \perp)$.

Напруга на конденсаторі U_c зростає по експоненті, прагнучи до величини $+U_{нас}$ (інтервал $t_0 \rightarrow t_1$ на рис. 5.3).

На цьому відрізку часу на неінвертуючому вході ОП діє додатна напруга U_0 , що визначається співвідношенням:

$$U_0 = \frac{U_{нас} \cdot R3}{R2 + R3}, \quad (5.1)$$

Як тільки зростаюча напруга на конденсаторі U_c , що діє на інвертуючому вході ОП, досягне цього значення, відбудеться лавиноподібний процес, який призводить до встановлення на його виході напруги - $U_{нас}$ — момент часу t_1 .

З цього моменту відбувається перезарядження конденсатору C по колу: (“корпус” — $\perp$) — (C) — $(R1)$ — (вихід DA1) — $(-U_{п2})$ і напруга змінюється по експоненціальному закону, прагнучи до напруги - $U_{нас}$ (дільниця t_1 — t_2).

На цьому відрізку часу на неінвертуючому вході ОП діє вже від’ємна напруга U_0 , що визначається співвідношенням (5.1). Як тільки напруга на конденсаторі досягне цього значення, відбудеться черговий лавиноподібний процес та на виході ОП встановлюється напруга $+U_{нас}$ (момент t_2).

З цього моменту часу відбувається чергове перезарядження конденсатору C . Описані процеси повторюються, тобто в генераторі встановлюється періодичний процес, що формує на його виході різнополярну напругу прямокутної форми з амплітудою:

$$U_m = U_{нас} . \quad (5.2)$$

Оскільки процес зміни знаку напруги на конденсаторі відбувається по колах, що містять ідентичні елементи, інтервали часу t' та t'' зміни напруги рівні між собою і визначаються постійною часу:

$$t = R1 \cdot C . \quad (5.3)$$

Виходячи з наведених вище міркувань, легко отримати співвідношення для визначення часових параметрів вихідного сигналу:

$$T = t_1 + t_2 , \quad (5.4)$$

$$t_1 = t_2 = t \cdot \ln \left(1 + 2 \cdot \frac{R3}{R2} \right) . \quad (5.5)$$

З формули (5.5) випливає, що регулювання частоти вихідного сигналу можна робити зміною параметрів елементів, що визначають постійну часу τ , тобто зміною опору резистора $R1$ та (або) зміною

ємності конденсатору C . З іншого боку, частота залежить також від співвідношення опорів резисторів R_3/R_2 , яке визначає порогову напругу спрацювання ОП, а отже впливає на тривалість процесів заряду і розряду конденсатора C .

Як видно з епюр на рис. 5.3, напруга на конденсаторі U_C має форму, близьку до форми трикутного сигналу, з тієї лише різницею, що фронти цього сигналу не лінійні, а експоненціальні.

5.2 Підготовка до виконання роботи

5.2.1 Дані резисторів та конденсатору схеми генератора приведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1

Елемент	Значення опору (кОм) та ємності (мкФ) для варіанту:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
C_1	1	2	0,5	0,3	1	2	0,5	0,3	3	1,5
R_1	3	2	4	1	2	4	3	5	2	1
R_2	100	100	150	150	100	100	150	150	100	150
R_3	47	22	33	68	33	56	47	22	15	75

Сигнал трикутної (експоненціальної) форми можна подати для спостереження на один з входів двопроменевого осцилографу, а сигнал з виходу ОП – на інший вхід осцилографу.

5.2.2 Користуючись значеннями параметрів схеми генератора та формулами (5.3) - (5.5) проведіть розрахунки періоду та частоти вихідного сигналу генератора.

5.2.3 Виходячи з умови, що напруга насичення на виході операційного підсилювача на (0,7 - 2) В менша напруги живлення, визначіть очікувану амплітуду $U_{\max}$ прямокутних імпульсів на виході генератора.

5.2.4 Виходячи з епюр сигналів на виході генератора (рис. 5.3) та параметрів елементів схеми, проведіть розрахунки амплітуди імпульсів трикутної форми на конденсаторі C_1 . Результати розрахунків занесіть до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Сигнал		Параметри сигналу					
		t_1	t_2	T	F	$+U_{\max}$	$-U_{\max}$
на вих. ОП	розрах.					-	-
	вимір.						
на С1	розрах.						
	вимір.						

5.3 Виконання роботи

5.3.1 Завантажте програму Electronics Workbench.

5.3.2 Складіть схему генератора, наведену на рис. 5.2, використовуючи панелі інструментів.

5.3.3 Встановіть номінали елементів схеми відповідно до варіанту виконання (табл.5.1).

5.3.4 Спостерігаючи сигнал прямокутної та трикутної форми на виході генератора, визначіть їхні параметри (амплітуду та частоту). Отримані дані занесіть до таблиці 5.2, а осцилограму збережіть для звіту.

5.3.5 Послідовно змінюючи номінал одного з елементів схеми (C1, R1, R2, R3), наприклад на 30%, спостерігайте вплив зміни параметрів кожного елемента на відносну зміну (в %) параметрів вихідного сигналу прямокутної та трикутної форми (частоту і амплітуду). Отримані дані приведіть у звіті у вигляді таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Змінюваний елемент	Відносна зміна параметру, %	
	Частота	Амплітуда U_C
C1		
R1		
R2		
R3		

5.3.6 Порівняйте результати моделювання з розрахунковими даними. Приклад виконання вимірювань приведений на рис.5.4.

5.3.7 Зробіть висновки.

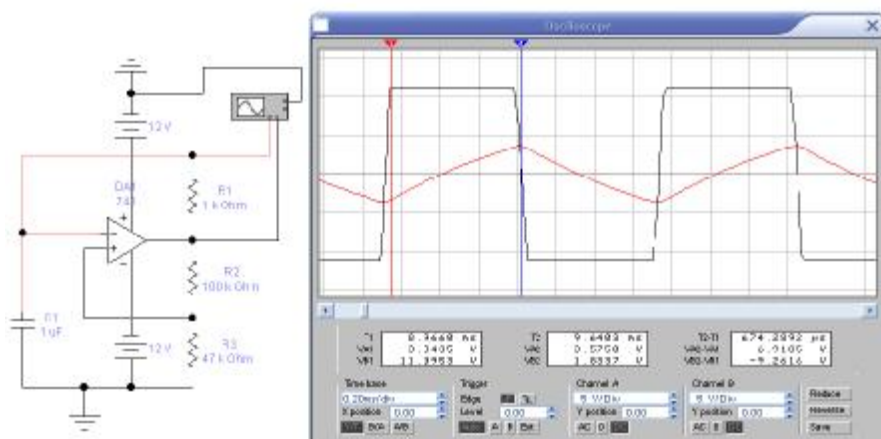


Рисунок 5.4 – Мультивібратор на ОП

5.4 Контрольні запитання

1. Що таке додатний зворотний зв'язок?
2. На які класи поділяються генератори електричних сигналів?
3. Що називається мультивібратором?
4. Чим визначається частота та амплітуда вихідних імпульсів генератора, що досліджується?
5. Чим визначається амплітуда напруги на конденсаторі С?
6. Які елементи схеми впливають на значення частоти вихідного сигналу ОП і яким саме чином?
7. Чи можна змінити амплітуду напруги на конденсаторі С не змінюючи частоту генерованих сигналів?
8. Чи можна реалізувати аналог досліджуваного генератора при однополярному живленні ОП?
9. Як можна змінити значення скважності вихідного (прямокутного) сигналу схеми, тобто порушити рівність $q = 2$?
10. Чому в момент часу t_2 або t_3 (рис.5.3) напруга $U_{\text{вих}}$ змінюється за знаком?

11. Чим визначається тривалість фронтів імпульсів на виході генератору на рис.5.4?

6 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ

Лабораторна робота №5

Мета роботи: дослідження параметрів та характеристик схеми компенсаційного стабілізатора напруги.

6.1 Короткі теоретичні відомості

Вихідна напруга випрошувальних схем джерел електроживлення звичайно має пульсації, а також сильно залежить від коливань напруги мережі і зміни опору навантаження. Для зменшення впливу цих чинників можна застосовувати включений послідовно з навантаженням елемент із регульованим опором. Такий засіб називається послідовною стабілізацією напруги.

Найпростішим послідовним стабілізатором напруги є емітерний повторювач, базу транзистора якого підключено до джерела опорної напруги (рис. 6.1).

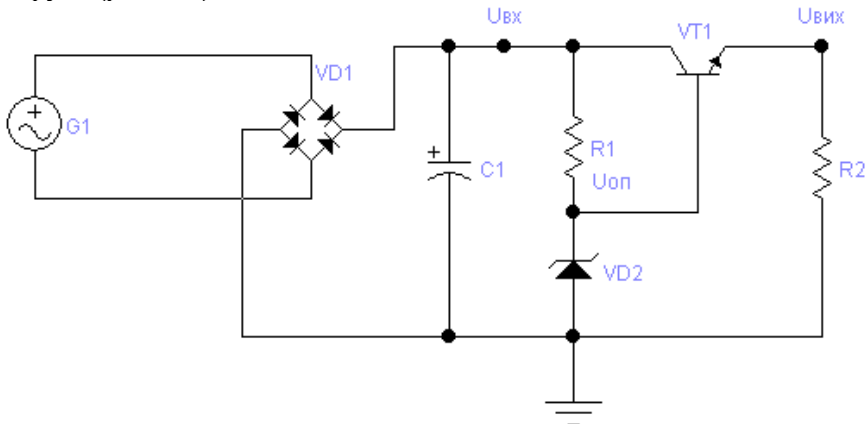


Рисунок 6.1 – Стабілізація напруги за допомогою емітерного повторювача

Опорну напругу $U_{оп}$, прикладену до бази регулюючого

транзистору VT1, можна отримати, наприклад, за допомогою параметричного стабілізатора напруги, який складається з резистора R1 та стабілітрона VD2, із нестабілізованої вхідної напруги $U_{вх}$.

За рахунок від'ємного зворотного зв'язку по напрузі вихідна напруга $U_{вих}$ стабілізатора встановлюється приблизно рівною:

$$U_{\text{вх}} \approx U_{i\bar{i}} - U_{be}(\text{VT1}). \quad (6.1)$$

Зміна вихідної напруги в залежності від струму навантаження визначається вихідним опором стабілізатора:

$$R_{\text{вих}} = - \frac{dU_{\text{вих}}}{dI_{\text{вих}}}. \quad (6.2)$$

Значення $R_{\text{вих}}$ бажано мати щонайменшим. Схема включення біполярного транзистора, як емітерного повторювача, якраз відповідає такій умові.

Коливання вхідної напруги $\Delta U_{\text{вх}}$ згладжуються завдяки малому диференціальному опору стабілітрона r_{cm} . Зміна вихідної напруги стабілізатора є:

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{i\bar{i}} + \Delta U_{be}, \quad (6.3)$$

де $\Delta U_{\text{оп}}$ – зміна $U_{\text{оп}}$, обумовлена зміною $U_{\text{вх}}$,

ΔU_{be} – зміна $U_{be}(\text{VT1})$, обумовлена зміною струму навантаження і залежить від прохідної характеристики регулюючого транзистора.

Величина $\Delta U_{\text{вх}} / \Delta U_{\text{вих}}$ називається коефіцієнтом стабілізації $K_{\text{СТ}}$ з напруги. Для розглянутої схеми він лежить у межах 10-100.

У описаній вище схемі вихідний опір стабілізатора визначався параметрами емітерного повторювача. Він може бути ще більше знижений шляхом застосування регулюючого підсилювача, охопленого від'ємним зворотнім зв'язком (рис.6.2). Перевагою такої схеми є те, що вихідна напруга може бути точно відрегульована шляхом зміни співвідношення опорів регулюючих резисторів (R_1 , R_2 на рис. 6.2).

На рис.6.2. показано схемну реалізацію стабілізатора для

додатної вихідної напруги. Схема складається з операційного підсилювача ОП (DA1), із від'ємним зворотнім зв'язком по напрузі, вихідний струм якого посилюється емітерним повторювачем на транзисторі VT1. Живлення операційного підсилювача можна здійснювати не симетричними щодо спільної шини напругами, як звичайно, а однополярною додатною напругою.

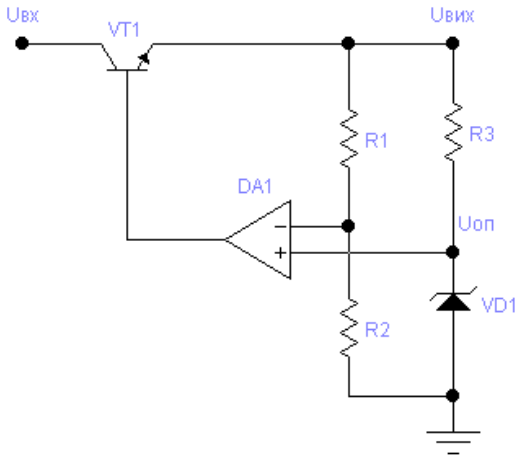


Рисунок 6.2 – Стабілізація напруги за допомогою регулюючого підсилювача

Це накладає обмеження на допустимий діапазон вхідних і вихідних сигналів, що можуть бути тільки додатними. Для схем джерел живлення таке обмеження не грає ролі, тому від використання від'ємної напруги живлення операційного підсилювача можна відмовитися, а величина напруги живлення може бути подвоєна у порівнянні з випадком живлення симетричними щодо спільної шини напругами.

Вихідна напруга такого стабілізатора визначається формулою:

$$U_{\text{в\ddot{e}o}} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \cdot U_{\text{и\ddot{r}}}. \quad (6.4)$$

Коливання напруги живлення практично не впливають на стабільність вихідної напруги, тому що дрейф вихідної напруги, що

викличеться зміною напруги живлення, в операційних підсилювачах у край малий.

6.2 Підготовка до виконання роботи

6.2.1 На рис.6.3 приведена принципова схема стабілізатора напруги, що досліджується в лабораторній роботі.

Спостереження форми та вимірювання параметрів здійснюється підключенням осцилографа та вольтметра до входу та виходу компенсаційного стабілізатора напруги.

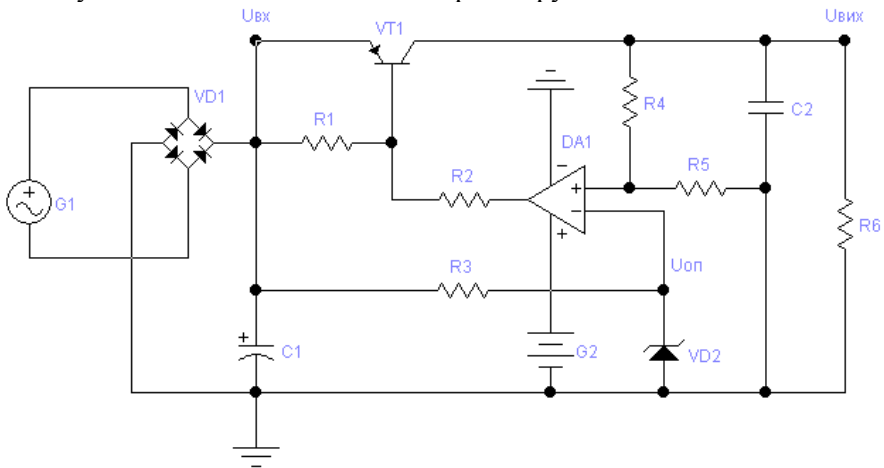


Рисунок 6.3 – Схема компенсаційного стабілізатора напруги

Величина опорів резисторів становить: $R1=2,2\text{кОм}$, $R2=330\text{Ом}$, $R3=1\text{кОм}$, $R4=1\text{кОм}$. Ємність конденсатора: $C2=1\text{мкФ}$. Напруга живлення ОП: $U_{G2}=1,5 \cdot U_{G1}$.

Досліджувана схема відрізняється від наведеної на рис.6.2 наступним:

- регулюючий транзистор VT1 включений по схемі із спільним емітером (зверніть увагу, що при цьому керуючий сигнал подано на неінвертуючий вхід ОП);
- опорна напруга подана на інвертуючий вхід ОП, що

обумовлене зміною схеми включення регулюючого транзистора.

Схема також доповнена мостовим діодним випростувачем, який власне до схеми стабілізатора безпосередньо не відноситься. Також встановлено конденсатор фільтру C1, який має велике значення для кінцевих параметрів усієї схеми. Ємність конденсатору C2 має менший вплив на параметри стабілізатора і його дія полягає у згладжуванні імпульсних завад, що можуть виникнути при різких змінах струму навантаження.

Слід зробити важливе зауваження щодо досліджуваної схеми в цілому. Напруга на виході випростувача, тобто на конденсаторі C1, містить постійну та змінну складові. При відсутності C1 напруга двічі за період первинного джерела змінної напруги G1 короткочасно мала би нульове значення. В таких умовах взагалі говорити про стабілізацію напруги некоректно, оскільки регулюючий транзистор стабілізатора забезпечує лише падіння надлишкової по відношенню до напруги стабілізації частини вихідної напруги випростувача у вигляді напруги між емітером та колектором. Коли ж напруга випростувача стає меншою напруги стабілізації, то схема взагалі втрачає здатність до виконання функції стабілізації напруги. Наявність конденсатору C1 призводить до того, що після проходження вихідною напругою випростувача свого максимуму $U_{вхmax}$ близького до амплітудного значення напруги первинного джерела G1 навантаження R6 живиться фактично від зарядженого конденсатора C1 напруга на якому поступово знижується по експоненті доти, доки на наступному півперіоді випростувача напруга не стане вищою, ніж на конденсаторі. Максимальне значення вихідної напруги випростувача становить:

$$U_{вхmax} = U_{жmax} - 2 \cdot U_{VD1},$$

де $U_{жmax}$ - амплітудне значення напруги первинного джерела G1,

U_{VD1} - падіння напруги на одному діоді діодного мосту VD1.

Далі конденсатор C1 знову зарядиться до напруги $U_{вхmax}$ і цикл повториться. Таким чином, мінімальна напруга на вході схеми стабілізатора напруги (емітері регулюючого транзистора) залежить від ємності конденсатора C1 і опору (струму) навантаження всієї схеми і повинна бути вищою, ніж напруга стабілізації. Різниця між максимальним та мінімальним значенням напруги на C1 становить

подвійну амплітуду пульсацій, тобто змінної складової напруги випростувача.

Крім сказаного вище, ОП повинен бути здатним мати вихідну напругу не меншу, ніж максимальне значення вихідної напруги випростувача.

6.2.1 Користуючись теоретичним матеріалом лабораторної роботи та конспектом лекцій, самостійно вивчіть роботу компенсаційного стабілізатора напруги.

6.2.2 Проведіть розрахунок вихідної напруги компенсаційного стабілізатора (рис.6.3) для свого варіанту опору резистору R5, ефективного значення напруги первинного джерела живлення G1 ($U_{\text{ж}}$), та напруги стабілізації стабілітрона $U_{\text{СТ}}$ згідно таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R5, кОм	1	2	1,5	2,7	1	2,2	0,68	1,5	1	3,3
$U_{\text{ж}}$, В	9	7	9	7,5	12	9	18	12	18	11
$U_{\text{СТ}}$, В	3,9	3,9	4,7	4,7	5,6	5,6	6,8	6,8	8,2	8,2

6.3 Виконання роботи

6.3.1 Завантажте програму Electronics Workbench.

6.3.2 Зберіть схему компенсаційного стабілізатора напруги, яка наведена на рис.6.3. Встановіть значення ємності конденсатора C1 330мкФ та опору навантаження 70 Ом. Підключіть один канал осцилографа до виходу випростувача, а другий – до виходу стабілізатора.

6.3.3 Виміряйте, наприклад мультиметром, величину сталої складової вихідної напруги стабілізатора (резистор навантаження R6) і випростувача (конденсатор C1). Виміряйте за допомогою маркерів

осцилографа величину подвійної амплітуди пульсацій напруги на виходах стабілізатора та випростувача (на конденсаторі С1). Зверніть увагу на форму напруги пульсацій. Збережіть результати вимірювань сталої складової вихідної напруги стабілізатора та осцилограми і вимірювання пульсацій для звіту. Результати вимірів внесіть до табл.6.2.

6.3.4 Повторіть дослідження згідно п.6.3.3 при значеннях ємності конденсатора С1 1000 мкФ та 47 мкФ.

6.3.5 Повторіть дослідження п.6.3.3 та п.6.3.4 для опору навантаження 20 Ом і значень ємності конденсатора С1 330 мкФ та 1000 мкФ.

6.3.6 Збільшіть значення напруги первинного джерела живлення на 20% і повторіть виміри п.6.3.3.

Таблиця 6.2

Параметр	$U_{\text{ж}}$					$1,2U_{\text{ж}}$
	$R_{\text{н}}=70 \text{ Ом і } C1, \text{ мкФ}$			$R_{\text{н}}=20 \text{ Ом і } C1, \text{ мкФ}$		$R_{\text{н}}=70 \text{ Ом}$ $C1=330$
	330	1000	47	330	1000	
$U_{\text{С1 пост}}, \text{ В}$						
$2U_{\text{П}}(C1), \text{ В}$						
$U_{\text{ВИХ пост}}, \text{ В}$						
$2U_{\text{ПВИХ}}, \text{ мВ}$						

6.3.7 Визначте зміну сталої складової вхідної напруги стабілізатора ($\Delta U_{\text{ВХ}}$), обумовлену зміною напруги первинного джерела G1 (виміри п.6.3.3 і п.6.3.6). Визначте зміну вихідної напруги стабілізатора ($\Delta U_{\text{ВИХ}}$) для цих же випадків. Визначте коефіцієнт стабілізації напруги: $K_{\text{СТ}} = \Delta U_{\text{ВХ}} / \Delta U_{\text{ВИХ}}$ та приведіть його значення у звіті.

6.3.8 Зробіть висновки щодо величини коефіцієнта стабілізації та ефективності зниження пульсацій в залежності від величини ємності конденсатора С1 і опору навантаження R6 .

6.4 Контрольні питання

1. Що називається стабілізатором напруги?
2. Наведіть основні параметри стабілізаторів напруги.
3. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора, що складається з параметричного стабілізатора напруги та емітерного повторювача.
4. Яку роль відіграє регулюючий підсилювач у схемі стабілізатора, зображений на рис. 6.2 ?
5. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора від'ємної напруги на основі емітерного повторювача.
6. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора від'ємної напруги, яка була б аналогом досліджуваної схеми.
7. Чим визначається рівень вихідної напруги стабілізатора, зображеного на рис.6.1 ?
8. Чим визначається рівень вихідної напруги стабілізатора, зображеного на рис.6.2 ?
9. Чим визначається рівень вихідної напруги стабілізатора, зображеного на рис.6.3 ?
10. Чим визначається вихідний опір стабілізатора?
11. Які елементи впливають на величину пульсацій вихідної напруги стабілізатора?
12. Чому необхідно використовувати конденсатор підключений паралельно виходу випростувача (конденсатор С1 у досліджуваній схемі) незалежно від схемної реалізації власне стабілізатора напруги?
13. Якісно оцініть вихідні параметри стабілізатора, що досліджується.
14. Від яких елементів схеми залежить коефіцієнт стабілізації з напруги (для досліджуваної схеми)?
15. Від яких елементів схеми залежить величина пульсацій вихідної напруги (для досліджуваної схеми)?
16. Чи присутня змінна складова напруги на стабілітроні досліджуваної схеми і як це впливає на параметри стабілізатора у

випадку її наявності?

17. Як можна зробити вихідну напругу компенсаційного стабілізатора оперативно регульованою?

18. Пояснити принцип дії параметричного стабілізатора напруги (джерело U_{OP} для розглянутих схем стабілізаторів).

19. Які елементи входять в джерело U_{OP} для схем на рис.6.2 та рис.6.3?

20. Яке призначення конденсатора C_2 в схемі досліджуваного стабілізатора напруги?

21. Чому можна використати однополярне живлення операційного підсилювача у досліджуваній схемі стабілізатора напруги?