

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 1

Затверджено науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»

протокол від 12 червня 2025 р. № 4

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторних робіт
«АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА»
для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 163 «Біомедична інженерія»,
освітньо-професійна програма «Біомедична інженерія»;
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,
освітньо-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»,
освітньо-професійна програма «Інформаційні відеосистеми та системи
контролю доступу»
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій
кафедра комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях

Розглянуто і рекомендовано
на засіданні кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях
протокол від 14 квітня 2025 р. № 3

Розробники: к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях Роман КОЛОМІЄЦЬ;
старший викладач кафедри комп'ютерних технологій у медицині та
телекомунікаціях Вадим БУРА.

Житомир
2025 р.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 2

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з курсу «Аналогова схемотехніка» для студентів освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальностями 163 «Біомедична інженерія», 172 «Телекомунікації та радіотехніка», (автори Коломієць Р.О., Бура В.В.), 2025. 64 с. Електронне видання (Протокол НМР №4 від 12.06.2025 р.).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 3

ЗМІСТ

Правила роботи в лабораторії.....	4
1 Випрямлячі напруги. Діодний міст.....	5
2 Підсилювач на біполярному транзисторі, включеному за схемою із спільним емітером.....	23
3 Підсилювач на біполярному транзисторі, включеному за схемою із спільною базою.....	27
4 Мультивібратор на біполярних транзисторах.....	31
5 Дослідження інвертуючої та неінвертуючої схем включення операційного підсилювача.....	35
6 Дослідження інвертуючої та неінвертуючої схем суматорів на операційному підсилювачі.....	41
7 Активні фільтри на ОП.....	47
8 Генератори на ОП.....	58
Перелік допоміжних джерел.....	64

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 4

ПРАВИЛА РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ

1. Перед початком першого заняття студенти зобов'язані ознайомитись з правилами техніки безпеки для даної лабораторії і розписатися у відповідному журналі.

2. Для ведення протоколів і оформлення звітів по лабораторних роботах кожен студент повинен мати особистий робочий зошит (достатньо звичайного шкільного зошита). Оформлення звіту можна проводити з використанням комп'ютера або писати від руки.

3. Напередодні дня виконання лабораторної роботи студент повинен:

- ознайомитися з метою і змістом роботи;
- заготовити в робочому зошиті або з використанням комп'ютера бланк протоколу з необхідними таблицями відповідно до вимог, викладених в описі кожної роботи;
- підготуватися до відповідей на контрольні питання, перелік яких приведено в кінці кожної роботи.

Успішні відповіді на питання є необхідною умовою допуску студента до роботи.

4. Виконувати лабораторну роботу потрібно в порядку, викладеному в даних методичних вказівках. Розрахунки і отримані експериментальні результати по кожному пункту кожен студент фіксує у власному бланку протоколу і пред'являє викладачеві для перевірки. Виконання роботи затверджується в протоколі кожного студента підписом викладача і датою. Протоколи на окремих листах до розгляду не приймаються.

5. За результатами виконання всіх пунктів роботи потрібно оформити і захистити звіт, прикривши до нього протокол. Захист звіту затверджується підписом викладача і супроводжується виставлянням оцінки.

6. Перед виходом з лабораторії студент повинен привести робоче місце в порядок: **вимкнути прилади, прибрати сполучні дроти**, поставити на місце стільці.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 5

Лабораторна робота №1

ВИПРЯМЛЯЧІ НАРУГИ. ДІОДНИЙ МІСТ

Мета роботи: навчитися збирати прості електричні схеми та досліджувати їх роботу у програмі LTspice XVII — на прикладі двохпівперіодних випрямлячів, зокрема діодного мосту.

Обладнання: ПК, LTspice.

1.1 Теоретичні відомості

1.1.1 Основи роботи з LTspice XXIV

LTspice — це найбільш популярний на сьогоднішній день некомерційний (безкоштовний) симулятор роботи електричних схем, що використовує SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — алгоритм моделювання процесів, що протікають в електронних схемах, зокрема тих, що містять мікросхеми. Цей алгоритм був розроблений у кінці 70-х років XX століття в університеті Берклі (Каліфорнія, США), і нині є стандартом де-факто для систем автоматизованого проектування (САПР) електронних схем. Алгоритми SPICE використовують як комерційні (MultiSim, HSPICE, CircuitMaker, MicroCap), так і некомерційні програми. LTspice — програмний продукт фірми Linear Technology, доступний для безкоштовного та вільного завантаження і використання. На відміну від комерційних продуктів LTspice має відносно малу бібліотеку готових компонентів, проте в ньому є можливість створювати свої компоненти.

1.1.2 Встановлення

LTspice працює від будь-якою версією ОС Windows, також працює в Linux з-під емулятора Wine. Завантажується з офіційного сайту <http://www.linear.com>.

Встановлюється як звичайна Windows-програма. Оскільки LTspice є некомерційним продуктом, до нього немає ніяких кряків, кейгенів тощо. В нього також немає тріальних версій — лише повноцінні робочі. Встановили?.. Тоді почнемо огляд...

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 6

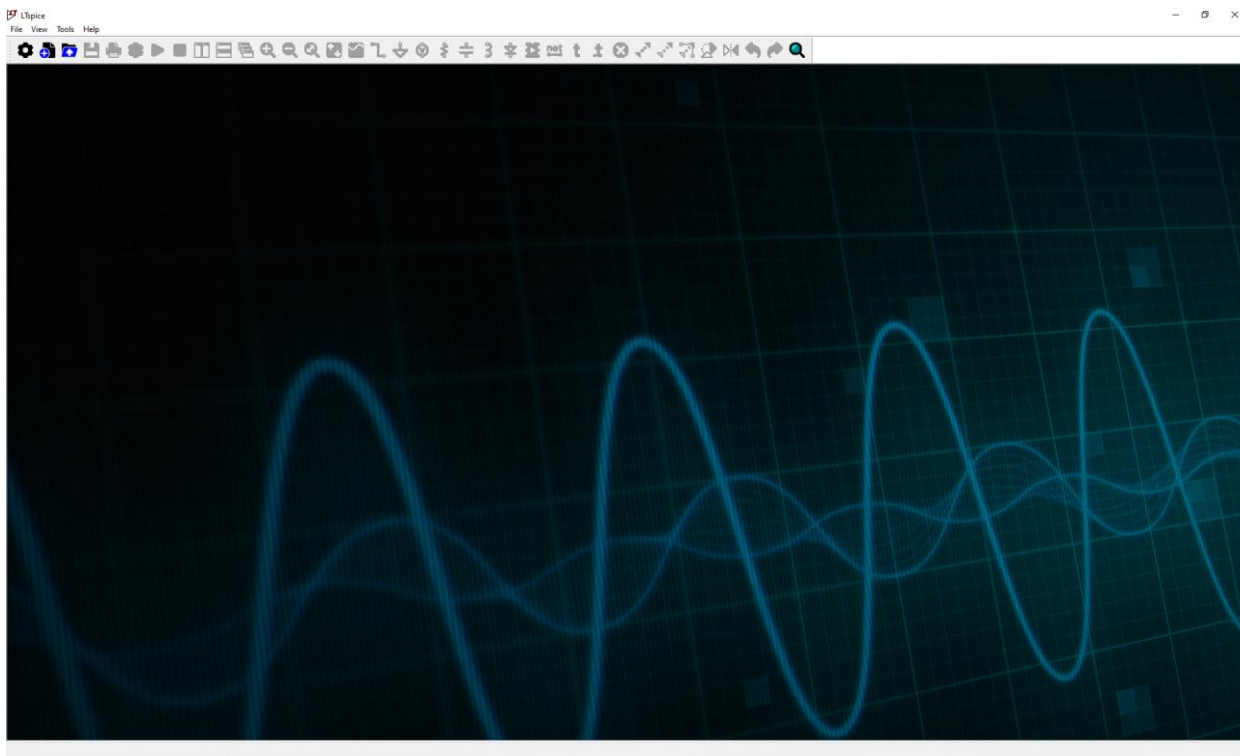


Рис. 1.1 – Головне вікно LT Spice

1.1.3 Короткий огляд LTspice

На рис. 1.1 показаний вигляд головного вікна програми LTspice XXIV. Бачимо стандартні рядок заголовку, рядок меню та панель інструментів зверху.

Взагалі SPICE-симулятори працюють із спеціальним файлом – так званим нетлістом – файлом, який містить опис з’єднань електрорадіоелементів (ЕРЕ). Цей файл може мати розширення .cir, .net або .sc. По великому рахунку, це текстовий файл, який може бути написаний як вручну у будь-якому текстовому редакторі, або згенерований з файлу .asc – файлу графічного представлення електричної схеми. Для створення такого файлу натискаємо на панелі інструментів New Schematic. Після цього стають активними інші кнопки (зауваження для власників нетбуків з малим екраном: панель інструментів можна за допомогою мишки „відкріпити“ зверху і змінити розміри, наприклад, як на рис. 1.2). Якщо робоче поле без сітки (а за її допомогою схеми малювати значно простіше), то її можна включити через меню *View* → *Show grid*.

В наступній таблиці коротенько розглянуті інструменти LTspice, доступні з панелі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 7

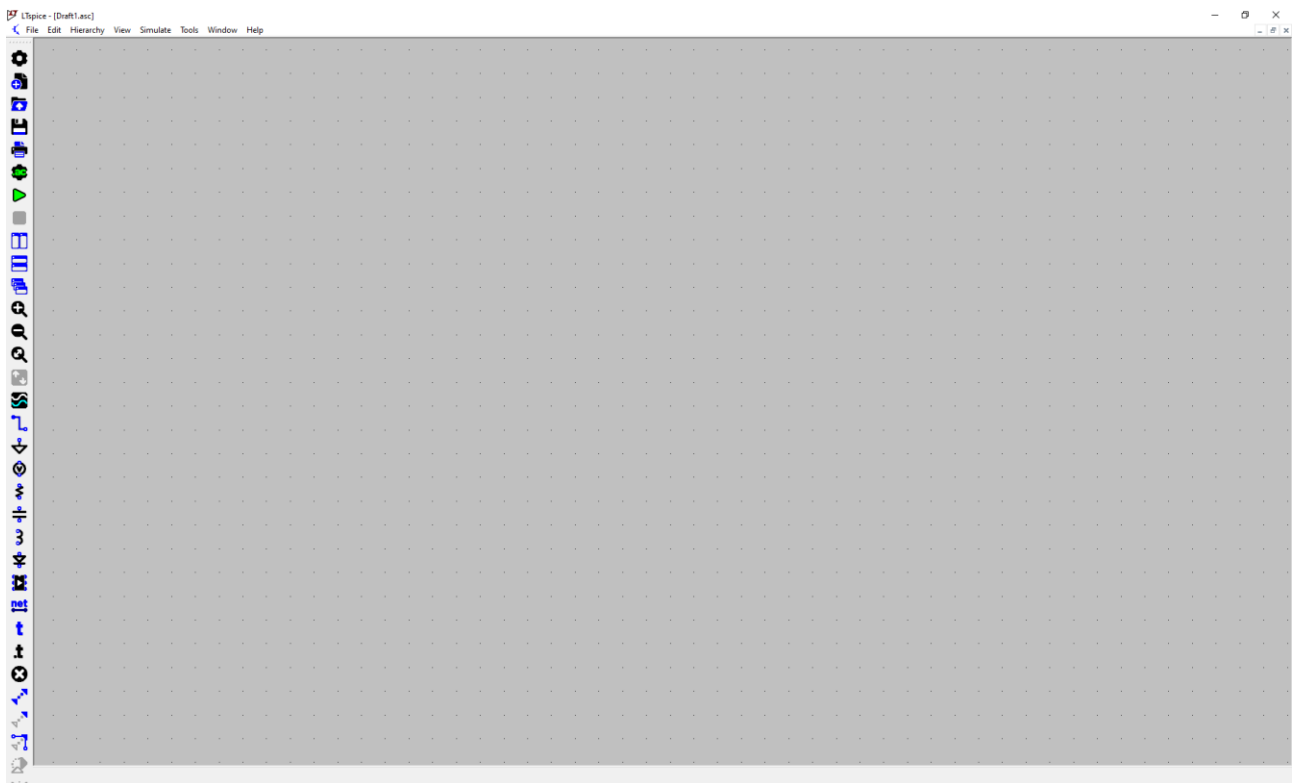


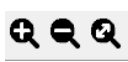
Рис. 1.2 – Головне вікно LTSpice

В наступній таблиці коротенько розглянуті інструменти LTSpice, доступні з панелі.

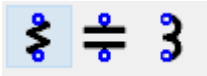
Таблиця 1.1 Елементи панелі управління та їх функції

Знак	Дія
	New Schematic — відкриває пусту робочу область для створення нової схеми.
	Open — відкриває файл із схемою (.asc), нетліст (.cir, .net або .sc), дані сигналу симуляції (.raw, .fra), файл EPE (.asy).
	Save — зберігає файл із схемою (.asc), нетліст (.cir, .net або .sc), дані сигналу симуляції (.raw, .fra), або файл EPE (.asy) — в залежності від того, яке вікно є активним.
	Configure Analys — відкриває панель з вкладками налаштувань симуляції.
	Run — запуск симуляції.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 8

	Pause — призупинити симуляцію (кнопка стає активною лише тоді, коли йде симуляція роботи схеми).
	Break — зупинити симуляцію (кнопка стає активною лише тоді, коли йде симуляція роботи схеми).
	Zoom — масштабування того, що знаходиться в активному вікні — будь то схема, графік симуляції чи щось інше. У вікні редактора схеми масштабування робиться прокручуванням коліщатка миші.
	Pic Visible Traces — показує вікна із симулюваними сигналами. на відміну від багатьох комерційних програм симуляції в LTspice немає віртуального осцилографа, натомість осцилограму сигналу можна безпосередньо подивитися в будь-якій точці схеми, просто тицьнувши в неї віртуальним щупом.
	Tile Windows, Cascade Windows, Close All — вистроює вікна плиткою, каскадом, або взагалі всі закриває. В LTspice для схем та симуляцій відводяться різні вікна, ці кнопки призначені для швидкого керування ними.
	Print — налаштування друку та друк.
	Wire — електричне з’єднання ЕРЕ (віртуальним проводом).
	Ground — встановлення „землі“ (нульового вузла) на схему. В будь-якій схемі повинен бути як мінімум один земляний вузол, якщо їх кілька — то їх потенціали однакові, ставлять їх кілька для зручності, щоб не було зайвих з’єднань на схемі.
	Label Net — „мітка“, електричне з’єднання між виводами різних ЕРЕ, які знаходяться в різних частинах схеми, щоб не захаращувати схему зайвими провідниками. Такий вузол може бути одно- або двонаправленим.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 9

	<i>Resistor, Capacitor, Inductor</i> — встановлення на схему відповідно резистора, конденсатора та котушки індуктивності.
	<i>Diode</i> — встановлення на схему діода, який по замовчуванню вважається ідеальним (тобто має нульовий опір у прямому напрямку і нескінченно великий — в оберненому). Якщо потрібно, можна вибрати модель якогось реального діода.
	<i>Component</i> — встановлення на схему всіх інших компонентів: біполярних і польових транзисторів, джерел напруги/струму, логічних елементів, операційних підсилювачів та інших мікросхем, стабілітронів, діодів Шоттки тощо...
	<i>Delete, Duplicate, Move, Stetch</i> — видалення, копіювання, переміщення ЕРЕ по робочому полю, переміщення зі з'єднанням
	<i>Undo, Redo</i> — відмінити дію, повернути відмінену дію.
	<i>Rotate, Mirror</i> — перевернути або віддзеркалити ЕРЕ. Інструменти активні тільки тоді, коли вибрано <i>Drag</i> або <i>Move</i> , тобто при переміщенні ЕРЕ.
	<i>Text</i> — помістити на схему текстовий коментар
	<i>SPICE Directive</i> — помістити на схему SPICE-директиву (спеціальну команду для SPICE-алгоритму).

Тепер розглянемо для прикладу моделювання роботи однопівперіодного випрямляча в LTspice.

1.1.4 Приклад моделювання роботи однопівперіодного випрямляча

Для початку треба позакривати всі вікна (крім панелі інструментів, якщо вона у такому вигляді, як на рис. 1.2). Натиснути New Schematic, і якщо треба, увімкнути видимість сітки (для зручності малювання схеми).

Однопівперіодному випрямлячу потрібне джерело синусоїдальної напруги. На практиці таким джерелом є, як правило, мережевий трансформатор, який перетворює напругу з 220 В на якесь менше значення. Почнемо з цієї мережевої напруги.

Для створення імітатора мережевої напруги треба натиснути на *Component*, і вікні, яке відкрилося, вибрати *Voltage* (джерело напруги) — рис. 1.3.

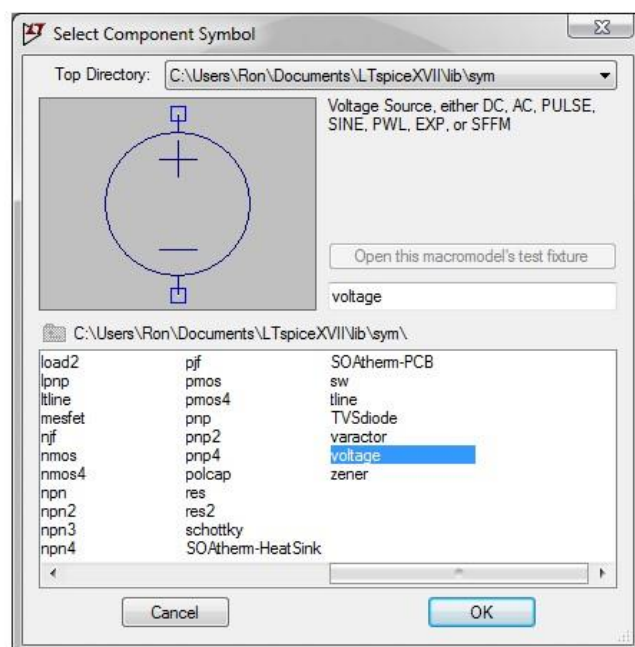


Рис. 1.3 – Вікно вибору елементів LT Spice

Джерело напруги розмістіть десь на робочому полі, воно автоматично буде назване «V1». Джерело «V2» можна „скинути“, натиснувши кнопку ESC або праву кнопку миші. Наведіть вказівник мишки на джерело напруги, щоб він перетворився на руку. Тоді натисніть праву кнопку — з'явиться вікно *Voltage Source – V1*. Це налаштування джерела постійної напруги. Але нам потрібна змінна напруга, тому в цьому вікні натискаємо кнопку *Advanced* і виставляємо форму сигналу — синусоїдальну, зміщення (*DC offset*) — 0 В, амплітудне значення 310 В і частоту 50 Гц (див. рис. 1.4). Зверніть увагу, що в LTspice

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 11

вимагає ставити не діюче (220 В), а амплітудне значення напруги, яке визначається як

$$U_{amp} = \sqrt{2} U_{rms}.$$

У випадку електричної мережі маємо

$$U_{amp} = \sqrt{2} \cdot 220 = 1.414 \cdot 220 \approx 310(\text{V}).$$

У стандартній бібліотеці компонентів LTspice трансформаторів немає. Їх потрібно створювати вручну. З одного боку, це незручно, проте з іншого — створення трансформатора в LTspice дозволяє врахувати його неідеальність, що дає точніші результати моделювання.

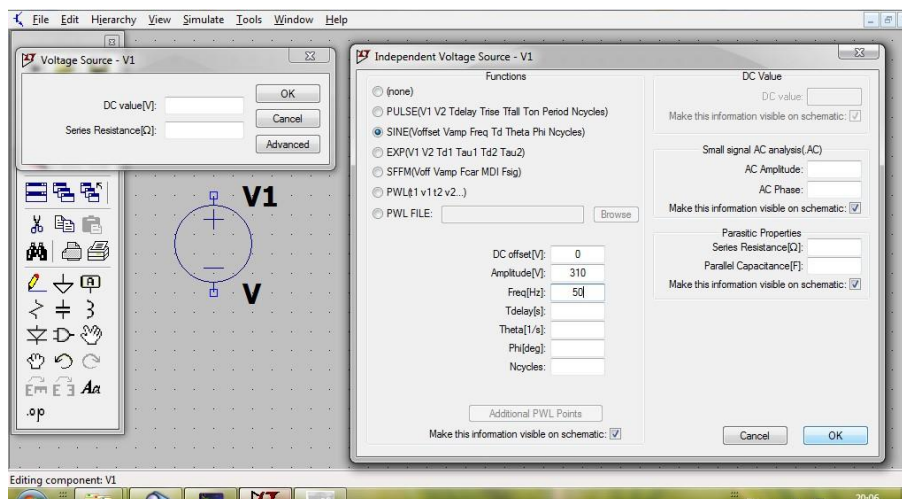


Рис. 1.4 – Вікно встановлення параметрів джерела живлення

Для створення трансформатора в LTspice потрібно винести на робочу область дві котушки індуктивності, вказати їхні параметри, і, найголовніше, задати їх коефіцієнт зв'язку. Вибираємо на панелі інструментів *Inductor*, встановлюємо на робочу область дві котушки індуктивності. Для наочності одну з них віддзеркалюємо за допомогою відповідного інструменту на панелі або комбінації клавіш *Ctrl+E*. Також виносимо на робочу область „землю“ і за допомогою інструменту *Wire* з'єднуємо так, як показано на рис. 1.5.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 12

Для того, щоб задати параметри трансформатора, потрібно задати індуктивності та активні опори обмоток, а також коефіцієнт магнітного (взаємодуктивного) зв'язку між обмотками. Для початку задамо індуктивність.

Припустимо, що індуктивність первинної обмотки становить 100 Гн (це доволі реалістичне число для трансформатора потужністю пару десятків Вт, виконаному на якісному осерді з електротехнічної сталі, у якої $\mu \approx 400$, і первинна обмотка якого містить десь біля 1000 або більше витків тонкого дроту). Якщо ми захочемо, щоб вихідна напруга становила приблизно 12В, то коефіцієнт трансформації буде дорівнювати:

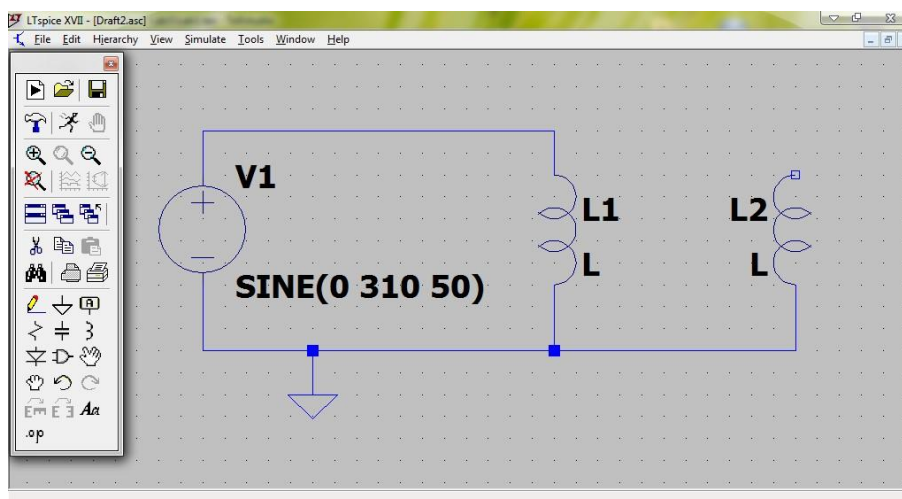


Рис. 1.5 – Створення трансформатора у LT Spice

$$K_{tr}^2 = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{12} = 18,33.$$

$$K_{tr} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{in}}{U_{out}} = \frac{220}{12} = 18,33.$$

Для правильно виготовленого трансформатора (якщо витримана правильна кількість витків на вольт, і передача енергії з первинної обмотки у вторинну відбувається з мінімальними втратами) справедливе співвідношення

$$L_1 = L_2 K_{tr}^2 ,$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 13

де L_1 — індуктивність первинної обмотки (більше число), а L_2 — індуктивність вторинної обмотки (менше число). Тоді

$$L_2 = \frac{L_1}{K_{tr}^2} = \frac{100}{18,33^2} \approx 0,2976 \text{ мГн},$$

Знаючи, що первинні обмотки мережевих понижувальних трансформаторів мотаються тонким дротом і містять велику кількість витків, і тому мають більший активний опір, а вторинні обмотки мотаються товстішим дротом і тому мають суттєво менший активний опір, покладаємо, що опір первинної обмотки становить 100 Ом, а вторинної — 1 Ом. Наводимо вказівник миші на відповідну індуктивність, натискаємо праву кнопку та відкриваємо вікно виставлення параметрів котушки. Для L_1 виставляємо індуктивність 100 Гн та опір 100 Ом (див. рис. 1.6), а для індуктивності L_2 — відповідно $L = 0,2976$ Гн та опір $R_{ser} = 1$ Ом. Інші параметри можна не задавати. Крім того, можна поставити галочку навпроти пункту *Show Phase Dot* — тоді LTspice відобразить точкою початок обмотки (хоча і в даному випадку це не суттєво).

Тепер вкажемо коефіцієнт зв'язку між обмотками. У якісних трансформаторів ця величина досягає 0,999. Для її задання потрібно скористатися SPICE-директивою за допомогою відповідного інструменту. Справа в тому, що взаємна індуктивність між обмотками — це все ж таки індуктивність, але це не окрема деталь. Для таких «неіснуючих якби деталей» (а крім взаємної індуктивності це ще й різноманітні паразитні параметри) і придумали SPICE-директиви. SPICE-директива — це якби команда, яка додає у схему «невидимий» компонент, але він має якісь електричні параметри і враховується при моделюванні. Для задання коефіцієнту взаємоіндуктивного зв'язку додаємо SPICE-директиву (з пробілами) як показано на рис. 1.7.

$K1 \ L1 \ L2 \ 0.999$

Зверніть увагу, що дробові числа вводяться з крапкою (як це прийнято в англійських країнах), а не з комою. У цьому вікні натискаємо ОК і поміщаємо отримане магічне заклинання десь під трансформатором. В результаті всіх проведених маніпуляцій повинно получитися щось схоже на рис. 1.8. Також

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/OK17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 14

зверніть увагу, що при переміщенні компонента зв'язок не переміщується, тому спочатку правильно розставляйте компоненти, і лише потім з'єднайте їх.

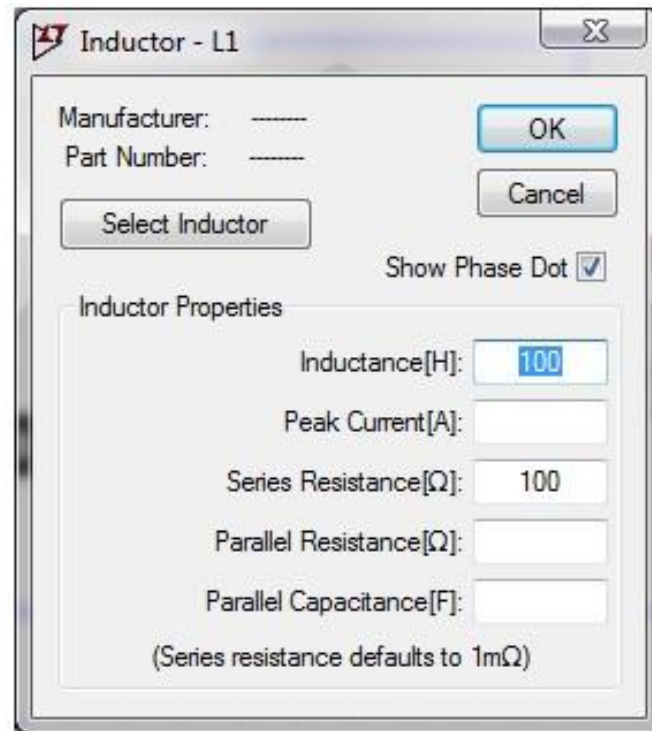


Рис. 1.6 – Параметри котушки індуктивності

Тепер на схему потрібно помістити діод, згладжуючий конденсатор та резистор, який виконує роль опору навантаження.

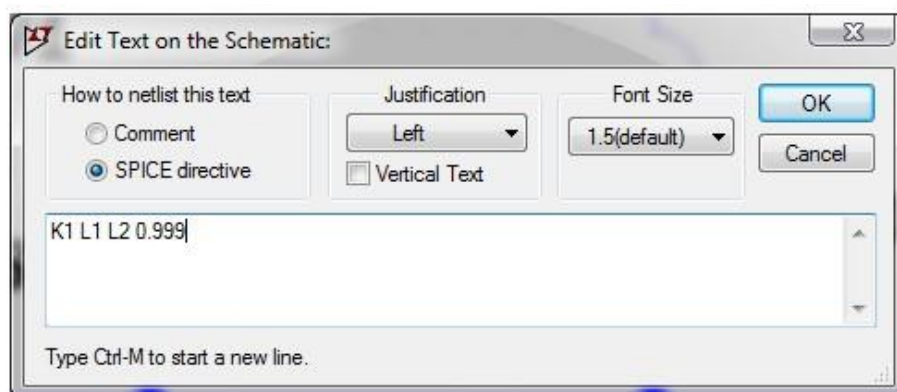


Рис. 1.7 – Задання spice-директиви трансформатора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 15

Виставляємо всі ці компоненти на робоче поле. Для конденсатора задаємо значення 4700 мкФ (для задання одиниці вимірювання мкФ у відповідному вікні налаштування параметрів конденсатора потрібно ввести «4700u», оця літера „u“ вказує на мікрофаради (μF)). Крім того, ще потрібно вказати паразитний опір конденсатора. У випрямлячах мережевої напруги, як правило, використовуються електrolітичні конденсатори, які мають відносно велику ємність, але і малий паразитний опір (тобто великий паразитний струм утікання). Тому у рядку *Equiv. Series Resistance* виставляємо 1 Ом (рис.1.9).

Для задання опору резистора припустимо, що при напрузі 12 В струм через навантаження становить 0,1 А. Тоді по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,1} = 120 \text{ Ом}$$

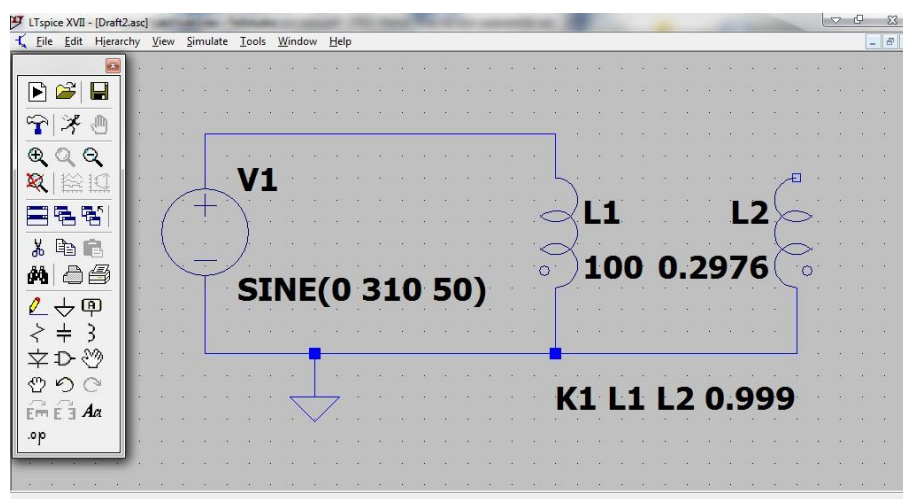


Рис. 1.8 – Трансформатор створений у LTSpice

Отримане число виставляємо у відповідному рядку параметрів резистора, а у рядку *Tolerance* (точність, допуск) виставляємо 5% (рис. 1.10).

Діод обираємо ідеальний, нічого не налаштовуємо. Зверніть увагу, що для всіх використаних компонентів по натисненню на кнопку *Select ...* можна вибрати модуль якогось реального EPE.

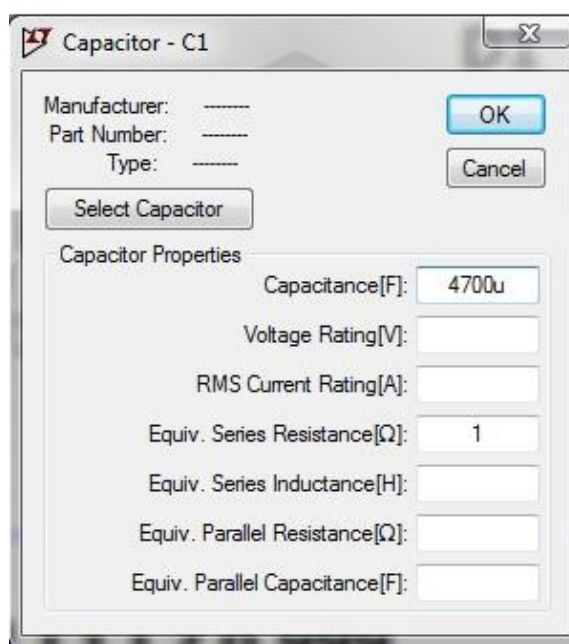


Рис. 1.9 – Вікно параметрів конденсатора

В результаті повинна получитися схема, схожа на рис. 1.11.

Тепер вибираємо на панелі інструментів команду *Run* і відкривається вікно *Edit Simulation Command*, у якому обов'язково треба виставити час закінчення симуляції (*Stop time*) та час початку запису даних симуляції (*Time to start saving data*). Інші опції LTspice виставить за замовчуванням сам. Для того, щоб не спостерігати перехідний процес, обмежимо інтервал симуляції 1,5...2 с (див. рис.1.12).

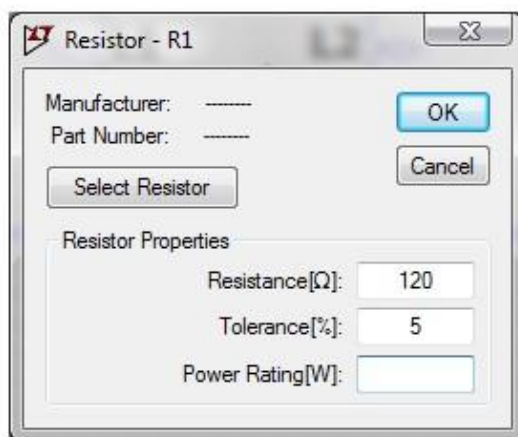


Рис. 1.10 – Вікно параметрів резистора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 17

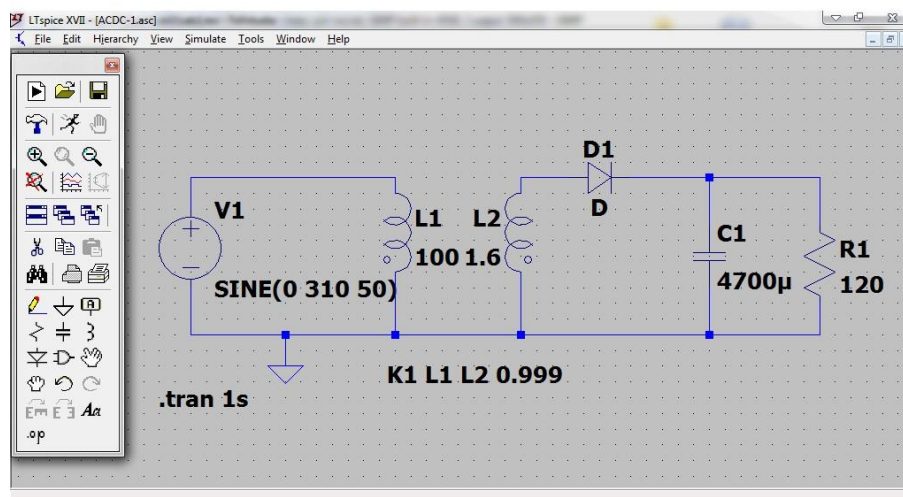


Рис. 1.11 – Схема однопівперіодного випрямляча

Натискаємо ОК, і на екрані з'являється додаткове вікно з результатами симуляції. Поки що воно пусте, для того, щоб щось побачити потрібно навести мишку на будь-який провід у схемі — вказівник перетворюється на щуп. Для нашої схеми є сенс подивитися на сигнал на резисторі (червона стрілка на рис. 13).

Зверніть увагу на пульсації вихідного сигналу, а також на те, що його середнє значення не дорівнює 12 В — воно більше. Це відбувається внаслідок того, що конденсатор дещо „перезаряджається“ за рахунок різниці між амплітудним та діючим значеннями напруги (тобто 12 В — це діюче значення, а не амплітудне). Також зверніть увагу на те, що графік сигналу по горизонталі промаркований ніби-то від нуля, хоча до цього нуля вже пройшло 1,5 с. По вертикалі графік маркується не від нуля, а масштаб напруги програма сама підбирає таким, щоб графік заповнював більшу частину площі вікна.

Тепер подивимось форму вхідного сигналу. Але спочатку трошки підкоригуємо інтервал симуляції. Для цього треба зайти в меню *Simulate* і вибрати *Edit Simulation Cmd.* Знову відкриється вікно, як на рис. 1.12. Виставте час закінчення 0,1 с, а час початку 0 с.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 18

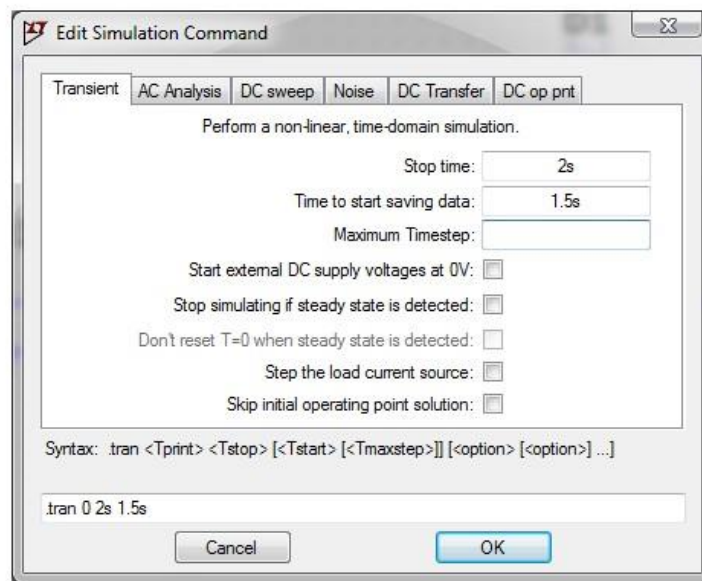


Рис. 1.12 – Вікно параметрів симуляції

Після цього потрібно знову зробити активним вікно із схемою і навести щуп на верхній край резистора (зелена стрілка на рис. 1.14). З'явиться новий графік (зелена крива). Зверніть увагу на перехідний процес — плавне наростання сигналу на самому початку. Це заряджається конденсатор. Тепер наведіть щуп між котушкою L_2 і діодом (синя стрілка на рис. 1.14). Ви побачите форму вхідного сигналу (синя крива).

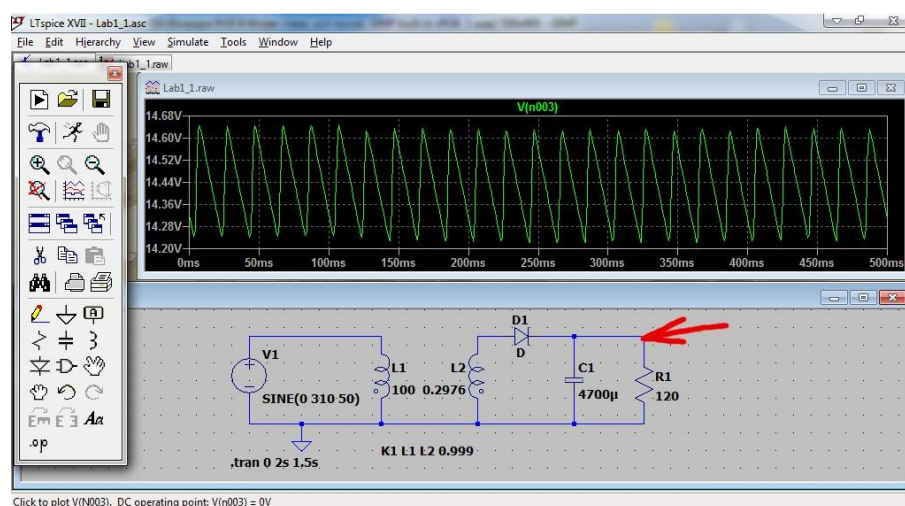


Рис. 1.13 – Вікна схеми та осцилограми у вказаній точці

Ну, і наостанок треба ще побачити пульсації вихідного сигналу без згладжувального конденсатора. Для цього закриваємо вікно симуляції,

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 19

видаляємо конденсатор та провідники біля нього за допомогою інструменту *Cut* („ножиці“, в LTspice елемент не можна просто виділити). Потім знову запускаємо симуляцію (команду редагувати не треба, можна залишити все як і було — від 0 до 0,1 с).

Наводимо мишку на провідник між резистором і діодом і отримуємо нашу добре відому осцилограму (рис. 1.15).



Рис. 1.14 – Осцилограма заряду конденсатора

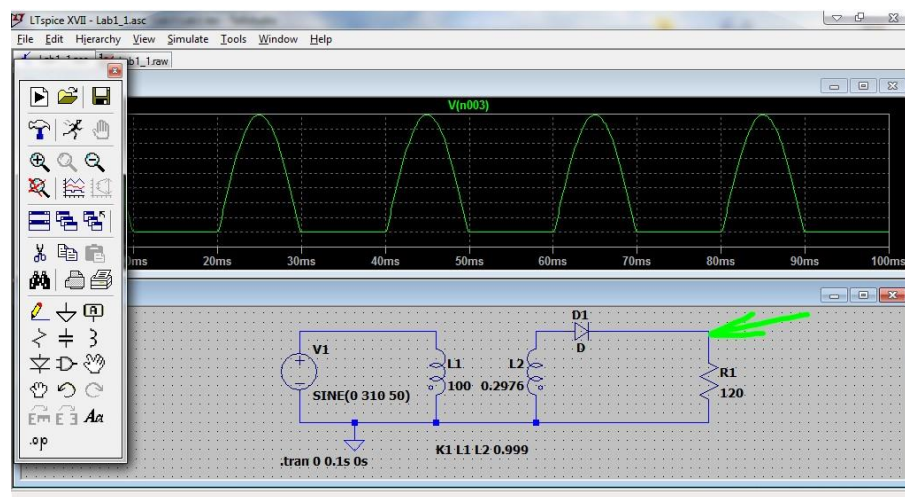


Рис. 1.15 – Осцилограма на виході після діода без конденсатора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 20

1.2 Порядок виконання лабораторної роботи

Отже, основним завданням даної лабораторної роботи є дослідження схеми двохпівперіодного (мостового) випрямляча напруги. Послідовність виконання роботи рекомендується наступна.

1. Зібрати схему мостового випрямляча. За основу можна взяти, наприклад, рис. 1.16. Індуктивність первинної обмотки, коефіцієнт трансформації, номінальне значення конденсатора та струм через резистор взяти з таблиці. Варіант — номер студента у списку групи. Діоди вважати ідеальними, вказаними у таблиці типоміналами діодів потрібно буде скористатися пізніше. Вхідна напруга вважається мережевою ($U_{amp} = 310V$, $f = 50Hz$). Індуктивність вторинної обмотки, вихідну напругу та опір навантаження потрібно обчислити за формулами, що були наведені раніше. Активний опір первинної обмотки прийняти рівним 100 Ом, вторинної обмотки — 1 Ом, коефіцієнт взаємодуктивного зв'язку — 0,99. Зробити скріншот вікна зі схемою для звіту.

Варіант	L_1 , Гн	K_{tr}	C_1 , мкФ	I , А	$D_1...D_4$
1	90	20	220	0,1	1N914
2	120	25	250	0,1	1N4148
3	100	15	200	0,3	1N5817
4	80	25	180	0,3	1N5818
5	120	25	200	0,3	1N5819
6	100	20	220	0,2	BAT54
7	90	20	250	0,3	MBR0520L
8	120	15	200	0,3	MBR0530L

2. Про моделювати зібрану схему. Самостійно вибрати інтервал симуляції, щоб на графіку було видно від 2 до 7...8 періодів сигналу. Зробити скріншот вікна з вхідним та вихідним сигналами для звіту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 21

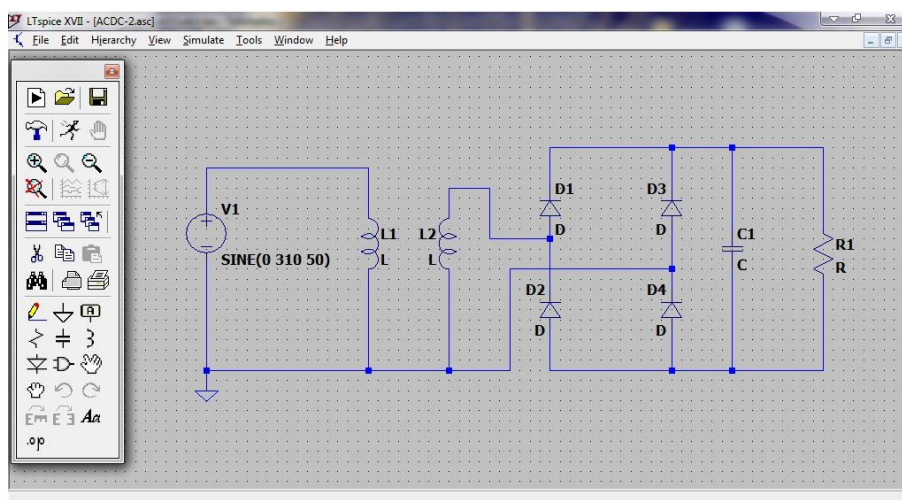


Рис. 1.16 – Схема мостового випрямляча

3. За результатами моделювання оцінити коефіцієнт пульсацій для даної схеми.

4. Замінити ідеальні діоди в схемі на ті, що вказані у таблиці, а також прибрати із схеми конденсатор. Промоделювати ще раз схему з моделями реальних діодів та без конденсатора, зробити скріншот вікна з графіком пульсуючого сигналу. Оцінити, чи відрізняється форма виходного сигналу від тієї, яка була при використанні ідеальних діодів. Зробити відповідний висновок.

1.3 Зміст звіту

Звіт рекомендується оформлювати у наступній послідовності.

- Назва роботи та мета її виконання.
- Варіант.
- Скріншот із зібраною схемою.
- Результати обчислення індуктивності вторинної обмотки та опору навантаження.
- Скріншот результатів симуляції при використанні ідеальних діодів.
- Результати розрахунку коефіцієнту пульсацій.
- Скріншот результатів симуляції при використанні моделей реальних діодів
- Результати розрахунку коефіцієнту пульсацій.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 22

– Скріншот результатів симуляції при використанні моделей реальних діодів.

– Висновки. Чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у вашій схемі? Чи не завадило б його зменшити? Як його можна зменшити? Чи відрізняються форми сигналів при використанні ідеальних та реальних діодів? Як вам LTspice?..

1.4 Орієнтовні теми питань на захисті

- 1) Для чого потрібно випрямляти напругу/сигнал?
- 2) Параметри і характеристики випрямних діодів.
- 3) Схеми діодних випрямлячів.
- 4) Як обчислюється та на що впливає коефіцієнт пульсацій?
- 5) Як розрахувати діод для схеми випрямляча?
- 6) Чому на виході схеми випрямляча потрібно ставити фільтр?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 23

Лабораторна робота №2

ПІДСИЛЮВАЧ НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ, ВКЛЮЧЕНОМУ ЗА СХЕМОЮ ІЗ СПІЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ

Мета роботи: дослідити роботу підсилювача на біполярному транзисторі, що включений за схемою із спільним емітером.

Обладнання: набірне поле “Електроніка”, цифровий генератор сигналів, осцилограф, блок живлення.

2.1 Короткі теоретичні відомості

При схемі підключення транзистора зі спільним емітером (СЕ) вхідний сигнал подається на базу, а знімається з колектора. При цьому фаза вихідного сигналу відрізняється від вхідного на 180° . Підсилює і струм, і напругу.

Особливістю схеми зі спільним емітером є максимальний серед трьох типових схем підсилювачів коефіцієнт підсилення за потужністю, тому схема найбільш розповсюджена. Проте при такій схемі мають місце ряд негативних проявів:

- відносно високі в порівнянні з іншими схемами включення транзистора нелінійні спотворення сигналу, що обумовлюється нелінійністю вхідної характеристики транзистора та високим вихідним опором схеми;
- низька частота зрізу через ефект Міллера.

Крім того, при даній схемі підключення, на характеристики підсилювача значно впливають зовнішні чинники, такі як напруга живлення, або температура довкілля. Зазвичай для компенсації цих чинників застосовують негативний зворотний зв'язок, але він знижує коефіцієнт підсилення.

Роботу необхідно зібрати на макетному полі та виконати свій варіант в LTSpice.

Оскільки під час виконання попередньої лабораторної роботи ми трохи навчилися працювати з LTSpice, то в цій лабораторній роботі детально будуть пояснені лише ті дії, яких не було на попередній. Вважається, що студент вже вмів зібрати в LTSpice електричну схему, задати параметри джерела напруги та

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 24

окремих електрорадіоелементів, вибрати діод/транзистор, додати SPICE-директиву, запустити симуляцію тощо. . .

2.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Визначитися із варіантом і обрати один з трьох транзисторів, які вказані у таблиці вхідних даних для виконання роботи. Транзистор обирається такий, на який вдалося знайти даташит в інтернеті. Після ознайомлення з даташитом потрібно оцінити, чи підійде даний транзистор для роботи при заданих параметрах напруги живлення U_{cc} та коефіцієнту підсилення по напрузі K_U та чи може він працювати на опір навантаження 1 кОм і при частоті вхідного сигналу 1 кГц. Якщо транзистор підходить, то переходимо до наступного пункту, якщо ні — то шукаємо даташит на інший транзистор із цього ж варіанту.

Таблиця 2.1 – Варіанти виконання схеми

Варіант	Транзистори	U_{in} , мВ	U_{cc} , В	K_U
1	2N2222, 2N3904, FZT849	100	12	20
2	ZTX1048A, 2N4124, 2N3391A	80	9	30
3	2N5089, 2N5210, 2N2219A	95	12	25
4	2N4401, 2N5550, 2N2369	110	9	30
5	2N5769, 2N3055, BCW60A	100	12	25
6	BCW60B, BCW60C, BCW60D	120	12	30
7	2N3019, BC547B, BC547C	100	9	25
8	BC847A, BC847B, BC847C	85	9	20
9	BC546B, BC846B, 2SC4081	95	12	25
10	2SC4102, 2SC4617, 2SC5876	80	9	30

2. Зібрати схему підсилювача на біполярному транзисторі. За основу можна взяти рис. 2.1. На номінали ЕРЕ особливої уваги звертати не слід, оскільки у кожного варіанту вони будуть свої. Виконати роботу можна різними способами. Попередньо розрахувати всі номінали ЕРЕ, виходячи з того, що це схема із спільним емітером, відома амплітуда і частота вхідного сигналу, задана напруга живлення, відомий опір навантаження. Ви повинні самостійно вибрати режим роботи підсилювача, положення робочої точки і оцінити потрібну напругу зміщення. Інший шлях - навмання підбирати номінали ЕРЕ доти, доки

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 25

не запрацює як слід. Розрахунок схеми робиться з головного припущення, що вхідний сигнал не має постійної складової, є синусоїдальним з частотою 1000 Гц, навантаження — 1 кОм і в таблиці вказано його амплітудне значення. Зверніть увагу на те, що джерело напруги $V1$ є, по суті, джерелом слабкого сигналу, тобто джерелом змінної напруги. Але джерело напруги $V2$ є джерелом електроживлення підсилювача, тобто є джерелом постійної напруги. Зробити скріншот остаточного варіанту схеми із розрахованими номіналами ЕРЕ.

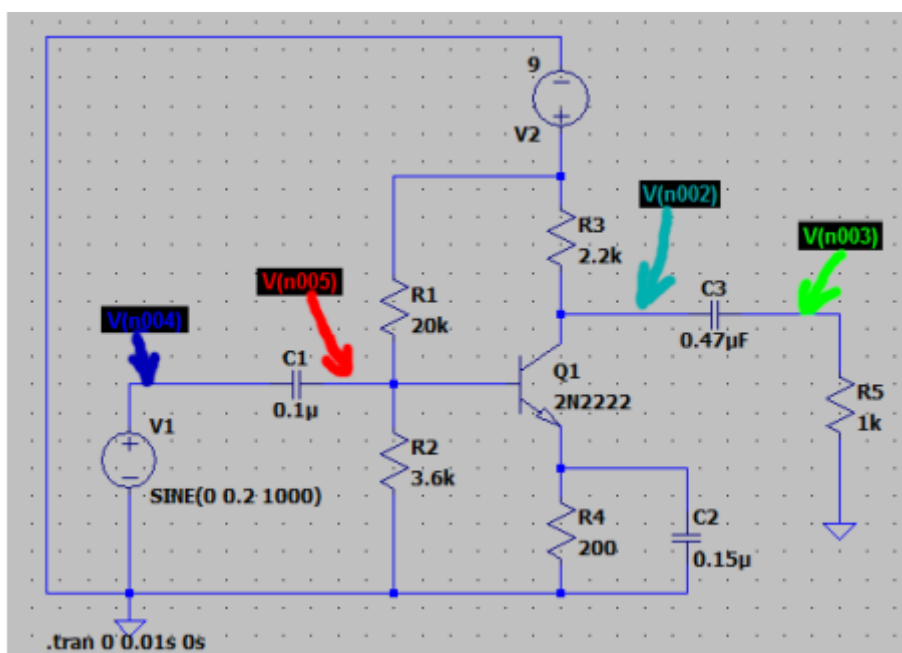


Рис. 2.1 - Схема підсилювача напруги включеного за схемою із спільним колектором з контрольними точками

3. Запустити симуляцію і показати сигнали в чотирьох точках (як на рис. 2.1 і 2.2). Назви вузлів у вас будуть інші (LTspice називає вузли у такій послідовності, як ви розміщуєте на робочому полі ЕРЕ), але місця повинні бути у відповідності із рис.2.1.

Форма вихідного сигналу на рис. 3 чисто синусоїдальна через те, що коефіцієнт підсилення по напрузі малий, і, відповідно, спотворення мінімальні. У вашому випадку значення K_U більші, і тому вихідний сигнал може бути спотвореним порівняно із вхідним. Зробити скріншот результатів симуляції; вказати, з якої точки схеми знімається який сигнал.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 26

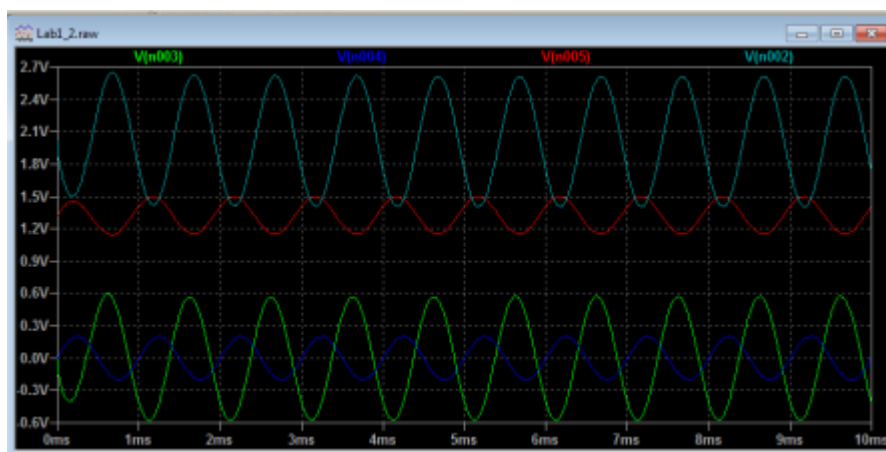


Рис. 2.2 - Осцилограми сигналів в контрольних точках

2.3 Зміст звіту

1. Назва роботи та мета її виконання.
2. Варіант та параметри вибраного транзистора, які потрібні для розрахунку схеми.
3. Розрахунок схеми підсилювача на вибраному транзисторі.
4. Скріншот із зібраною схемою.
5. Скріншот результатів симуляції у вказаних точках схеми.
6. Висновки: якого класу підсилювач у вас вийшов? Чи наявні спотворення вихідного сигналу чи значні вони? Якщо спотворення значні, чи можна їх якось зменшити?

2.4 Орієнтовні теми питань на захисті

- 1) Що таке коефіцієнти підсилення по напрузі, по струму і по потужності?
- 2) Чому коефіцієнти підсилення часто вимірюються в децибелах?
- 3) Як визначити коефіцієнт підсилення в децибелах?
- 4) Який типовий порядок величин коефіцієнтів підсилення по напрузі, по струму і по потужності для схеми із спільним емітером?
- 5) Від чого найсильніше залежить коефіцієнт підсилення у схемі із спільним емітером?
- 6) Чи змінює фазу сигналу схема із спільним емітером? Якщо змінює – то на скільки?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 27

Лабораторна робота №3

ПІДСИЛЮВАЧ НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ, ВКЛЮЧЕНОМУ ЗА СХЕМОЮ ІЗ СПІЛЬНОЮ БАЗОЮ

Мета роботи: дослідити роботу підсилювача на біполярному транзисторі, що включений за схемою із спільною базою.

Обладнання: набірне поле “Електроніка”, цифровий генератор сигналів, осцилограф, блок живлення.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Схема із спільною базою (СБ) не інвертує вхідний сигнал по напрузі (але інвертує по струму) та не підсилює по струму – підсилює лише по напрузі та по потужності. Загальний вигляд схеми представлений на наступному рисунку:

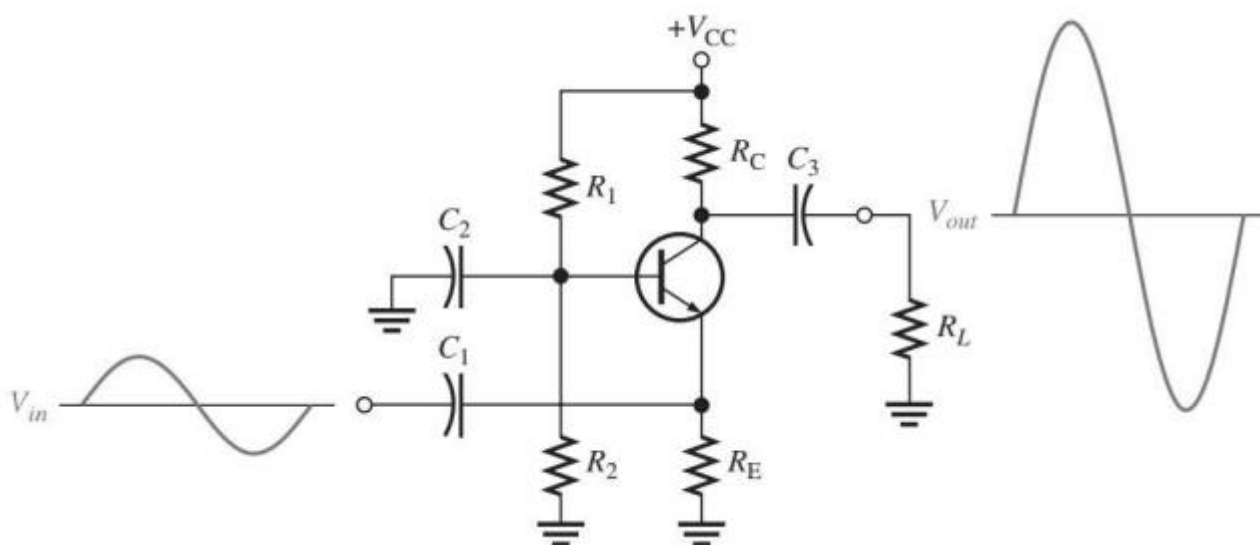


Рис. 3.1 - Підсилювач на біполярному транзисторі зі спільною базою

У схемі із СБ вхідний сигнал подається на емітер, а вихідний – знімається з колектора. Щоб усунути небажану постійну складову, використовуються конденсатори C_1 (на вході) і C_3 (на виході). Опори при колекторі R_C та емітері R_E не повинні бути великими (достатньо від пари сотень Ом до кількох кОм). Резистори R_1 і R_2 утворюють дільник напруги, який задає напругу зміщення на базі. Їх значення повинні становити кілька десятків кОм або пару сотень кОм (бо великого струму бази не треба – порядку пари десятків мкА повинно бути цілком

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 28

достатньо). Значення напруги зміщення може становити від 1...1,2 В до 2,4...3 В. Якщо напруга зміщення буде більше чи менше – можуть зростати спотворення сигналів. Розрахунок схеми достатньо простий [1]. Коефіцієнт підсилення по напрузі:

$$K_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{U_C}{U_E} = \frac{I_C R_{CL}}{I_E (r_E \parallel R_E)}, \quad (1)$$

де r_E – опір відкритого переходу база-емітер (у кремнієвих транзисторів його типове значення становить 26...27 Ом), а $R_{CL} = R_C \parallel R_L$. Як правило, в таку схему ставлять резистор при емітері з опором $R_E \gg r_E$ (до кількох кОм). Тоді $r_E \parallel R_E \approx r_E$ і коефіцієнт підсилення по напрузі буде дорівнювати

$$K_U = \frac{R_{CL}}{r_E}, \quad (2)$$

Струми скорочуються, бо у БТ $I_E = I_C + I_B$, але струм бази малий (вимірюється мікроамперами), і тому можна вважати, що $I_E \approx I_C$. Для того, щоб це дійсно було так, треба щоб $R_E \cong R_C$. Коефіцієнт підсилення по струму у схемі із СБ завжди менший від 1.

Схема із СБ на загальній spice-моделі ідеального БТ показана на наступному рисунку.

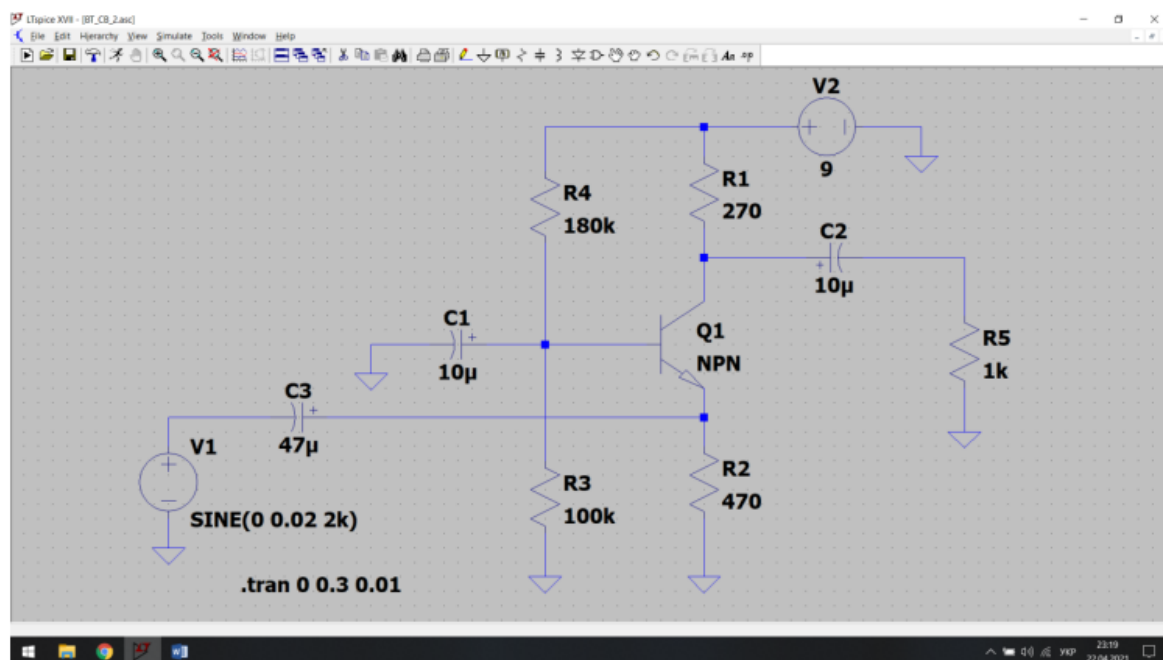


Рис. 3.1 – Схема підсилювача із спільною базою

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 29

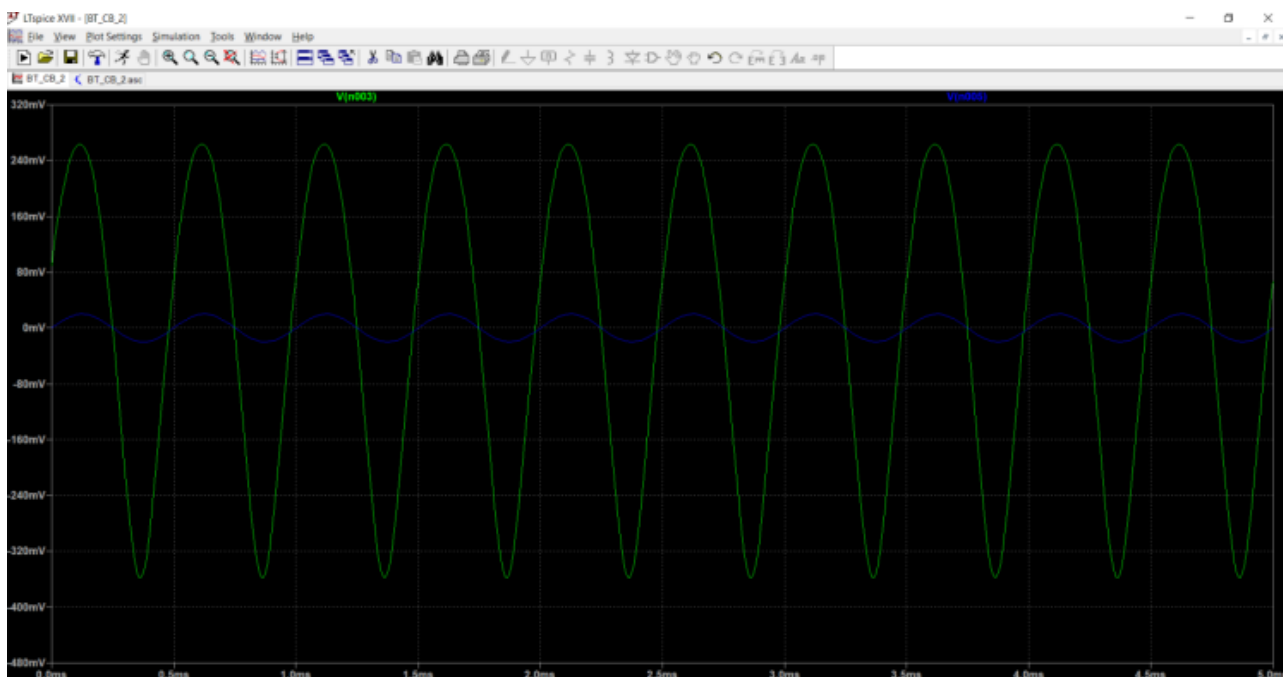


Рис. 3.2 - Результат симуляції схеми (зелений сигнал – вихідний, синій - вхідний)

3.2 Порядок виконання лабораторної роботи

Для транзистора, на якому ви робили схему із спільним емітером – зробити схему із спільною базою. Форма вхідного сигналу – синусоїдальна. Амплітуда вхідного сигналу становить 5...15 мВ (берете довільне число з цього діапазону), а частота $f_{in} = 1200 \cdot N$ (Гц), де N – ваш порядковий номер у списку групи. Коефіцієнт підсилення по напрузі – 150...200. Опір навантаження 1 кОм. Напруга живлення 9 В. Потрібно розрахувати схему і показати осцилограму вхідного та вихідного сигналів (напруг і струмів).

3.3 Зміст звіту

1. Вхідні дані для роботи (включаючи тип транзистора)
2. Розрахунок схеми
3. Скрін зібраною схеми із СБ в LTspice
4. Скрини результатів модулювання роботи схеми в LTspice (краще зробити окремі скрини для струмів та напруг – тоді по ним буде легше оцінювати відповідні коефіцієнти підсилення)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 30

5. Оцінка коефіцієнтів підсилення по струму і напрузі та порівняння їх з теоретичними (розрахунковими).

6. Висновки. Наскільки співпали розрахункові та експериментальні коефіцієнти підсилення по струму і напрузі. Чи наявні спотворення вихідного сигналу і чи значні вони. Як можна оцінити спотворення сигналу?

3.4 Орієнтовні теми питань на захисті

- 1) Що таке коефіцієнти підсилення по напрузі, по струму і по потужності?
- 2) Чому коефіцієнти підсилення часто вимірюються в децибелах?
- 3) Як визначити коефіцієнт підсилення в децибелах?
- 4) Який типовий порядок величин коефіцієнтів підсилення по напрузі, по струму і по потужності для схеми із спільним емітером?
- 5) Від чого найсильніше залежить коефіцієнт підсилення у схемі із спільним емітером?
- 6) Чи змінює фазу сигналу схема із спільним емітером? Якщо змінює – то на скільки?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 31

Лабораторна робота №4

МУЛЬТИВІБАТОР НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи: дослідити роботу мультивібратора на біполярних транзисторах як однієї з класичних та поширених схем генераторів.

Обладнання: набірне поле “Електроніка”, осцилограф, блок живлення.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Мультивібратори (від латинського *multum* – багато; *vibro* – коливаю) – це релаксаційні автогенератори напруги прямокутної форми (релаксаційний – такий, що різко відрізняється від гармонійного – синусоїдного; автогенератор – пристрій, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні і не має стійких станів).

Автоколивальний мультивібратор на транзисторах найчастіше виконують за симетричною схемою з колекторно-базовими зв'язками. Він складається з двох однакових каскадів підсилення з СЕ. Для забезпечення позитивного зворотного зв'язку, за рахунок якого мультивібратор самозбуджується, вихідна напруга кожного з каскадів подається на вхід іншого. Схему такого мультивібратора зображено на рис. 4.1.

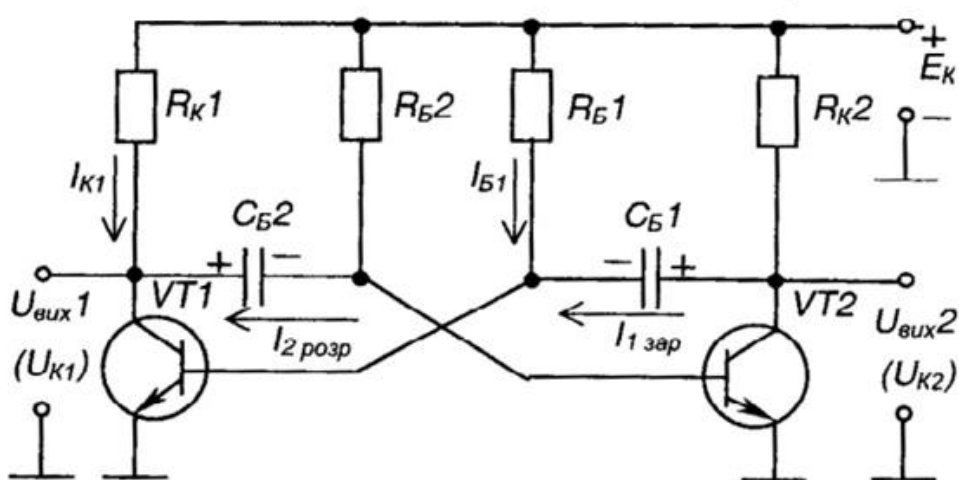


Рис. 4.1 – Симетричний мультивібратор на біполярних транзисторах

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 32

Симетрія схеми забезпечується тим, що задають: $R_{B1}=R_{B2}=R_B$, $R_{K1}=R_{K2}=R_K$ (вони призначені для забезпечення насиченого стану транзисторів), $C_{B1}=C_{B2}$ (забезпечують зв'язок між каскадами).

Стан 1: VT1 закритий, VT2 відкритий і насичений, C_{B1} заряджається струмом бази VT2 через R_{K1} і VT2, після чого при повністю зарядженому C_{B1} через R_{K1} струм не тече. C_2 , заряджений раніше в попередньому стані, починає повільно розряджатися через відкритий VT2 і R_{B1} .

Стан 2: те ж в дзеркальному відображенні (VT1 відкритий і насичений, VT2 закритий).

R_K підбираються набагато менші, ніж R_B , щоб зарядка конденсаторів через R_K була швидше, ніж розрядка через R_B . Чим більше буде час зарядки конденсаторів, тим пологішими виявляться фронти імпульсів.

Умовами працездатності мультівібратора є:

$$\begin{aligned} R_{K2} C_{B1} < R_{B2} C_{B2}; & R_{K1} C_{B2} < R_{B1} C_{B1}; \\ R_{K1} \beta_1 \geq R_{B1}; & R_{K2} \beta_2 \geq R_{B2} \end{aligned} \quad 4.1$$

4.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати в LTspice схему симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах. Схема представлена на рисунку 4.1. Транзистори вибирати з таблиці 2.1. Варіант – порядковий номер студента у списку групи. Тип транзистора – $n-p-n$. Напруга живлення – 9 В.

2. Розрахувати номінали резисторів та конденсаторів так, щоб отримати частоту вихідного сигналу таку, як задана в таблиці 4.1. Вихідна частота мультівібратора визначається виразом:

$$f = \frac{1}{1,38 RC}$$

де $R=R_{B1}=R_{B2}$, $C=C_{B1}=C_{B2}$. По цій формулі частота виходить в герцах, опір в омах, ємність у фарадах.

3. Про моделювати роботу мультівібратора, показати осцилограми сигналів з обох виходів і показати, що скважність вихідних сигналів дорівнює 50%.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 33

Таблиця 4.1

Вар-т	Транзистор	Вихідна частота, кГц	Скважність, %
1	2N4124	2,3	10
2	2N3391A	3,2	15
3	2N5089	4,7	20
4	2N5210	6,8	25
5	2N2219A	8,2	30
6	2N4401	9,1	35
7	2N5550	2,3	40
8	2N2369	3,2	10
9	2N5769	4,7	15
10	2N3055	6,8	20
11	2N3019	8,2	25
12	2N2222	9,1	30
13	2N3904	2,3	35
14	2N4124	3,2	40
15	2N3391A	4,7	10
16	2N5089	6,8	15
17	2N5210	8,2	20
18	2N2219A	9,1	25
19	2N4401	2,5	30
20	2N5550	7,8	35

4. Заміною значень R_{B2} і C_{B1} або R_{B1} і C_{B2} добитися того, щоб мультівібратор став несиметричним. Частота сигналу повинна залишитися незмінною, але скважність одного з сигналів потрібно зробити такою, як задана в таблиці 4.1.

5. Про моделювати роботу несиметричного мультівібратора, показати що скважність одного з вихідних сигналів відповідає величині, заданій в таблиці 4.1.

4.3 Зміст звіту

1. Титульна сторінка.
2. Назва та мета роботи, варіант.
3. Скріншот зібраної в LTspice схеми симетричного мультівібратора.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 34

4. Результати розрахунків значень резисторів та конденсаторів для отримання потрібної частоти вихідного сигналу.
5. Результати моделювання роботи симетричного мультівібратора – осцилограми вихідних сигналів.
6. Скріншот зібраної в LTspice схеми несиметричного мультівібратора.
7. Результати моделювання роботи несиметричного мультівібратора – осцилограми вихідних сигналів.
8. Оцінка скважності одного з вихідних сигналів – повинно бути число для відповідного варіанту з таблиці 2.1.
9. Висновки. Як ви визначили номінали опорів та ємностей несиметричного мультівібратора для заданих значень частоти і скважності?

4.4 Допоміжна інформація

<https://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/astable.html>

4.5 Орієнтовні теми питань на захисті

- 1) До якого класу аналогових електронних пристроїв відноситься мультівібратор?
- 2) Чому мультівібратор видає два сигнали?
- 3) При якому співвідношенні опорів у схемі мультівібратора вона може коректно працювати?
- 4) Чи можна в цій схемі використовувати полярні конденсатори? Якщо так – то за яких умов?
- 5) Чи буде схема коректно працювати, якщо транзистори в ній будуть різними?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 35

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНВЕРТУЮЧОЇ ТА НЕІНВЕРТУЮЧОЇ СХЕМ ВКЛЮЧЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Мета роботи: дослідити роботу операційного підсилювача, що включений за інвертуючою та неінвертуючою схемами.

Практично вся сучасна аналогова обробка сигналів (підсилення, фільтрація тощо) виконується на операційних підсилювачах (ОП). Основними схемами їх включення є інвертуюча та неінвертуюча. У схемах різноманітних пристроїв для перетворення форми сигналів (фільтрів, схем з автоматичною регуляцією підсилення, схем диференціювання та інтегрування сигналів, схем реалізації арифметичних дій із сигналами тощо) використовуються саме ці схеми включення ОП.

5.1 Порядок виконання роботи

1. Визначитися із варіантом і обрати ОП, який вказаний у таблиці вхідних даних для виконання роботи. Також з цієї ж таблиці беруться параметри вхідного сигналу (форма у всіх варіантах – синусоїдальна) і коефіцієнт підсилення по напрузі.

Варіант	ОП	U_{in} , мВ	f , кГц	K_U
1	AD549	100	12	5
2	AD711	80	9	8
3	AD712	95	12	10
4	AD713	110	9	5
5	AD744	100	12	8
6	AD746	120	12	10
7	AD795	100	15	5
8	AD8030	85	9	10
9	AD8033	95	12	8
10	AD8034	80	15	10

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/OK17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 36

Для встановлення ОП на схему потрібно вибрати команду *Component* на панелі інструментів, а потім — *[Opamps]* (див. рис. 5.1 ліворуч). Для повернення назад (для вибору іншого компонента) потрібно натиснути *Up One Level* (рис. 5.1 праворуч).

2. Зібрати інвертуючу схему включення ОП. Можна керуватися рис. 5.2. Опір навантаження R_L у всіх приймається рівним 1 кОм (оскільки ОП має незначний вихідний опір, то для практично для будь-якого опору навантаження він буде виступати джерелом напруги, і тому по великому рахунку ОП байдуже, який до нього приєднаний опір навантаження). Резистор R_1 , що підключений до прямого входу, також у всіх буде однаковим, і його опір можна прийняти рівним 10 кОм. Резистори зворотного зв'язку R_F та на інверсному вході R_G потрібно розрахувати самостійно, виходячи із заданого значення коефіцієнту підсилення по напрузі:

$$K_U = -\frac{R_F}{R_G}$$

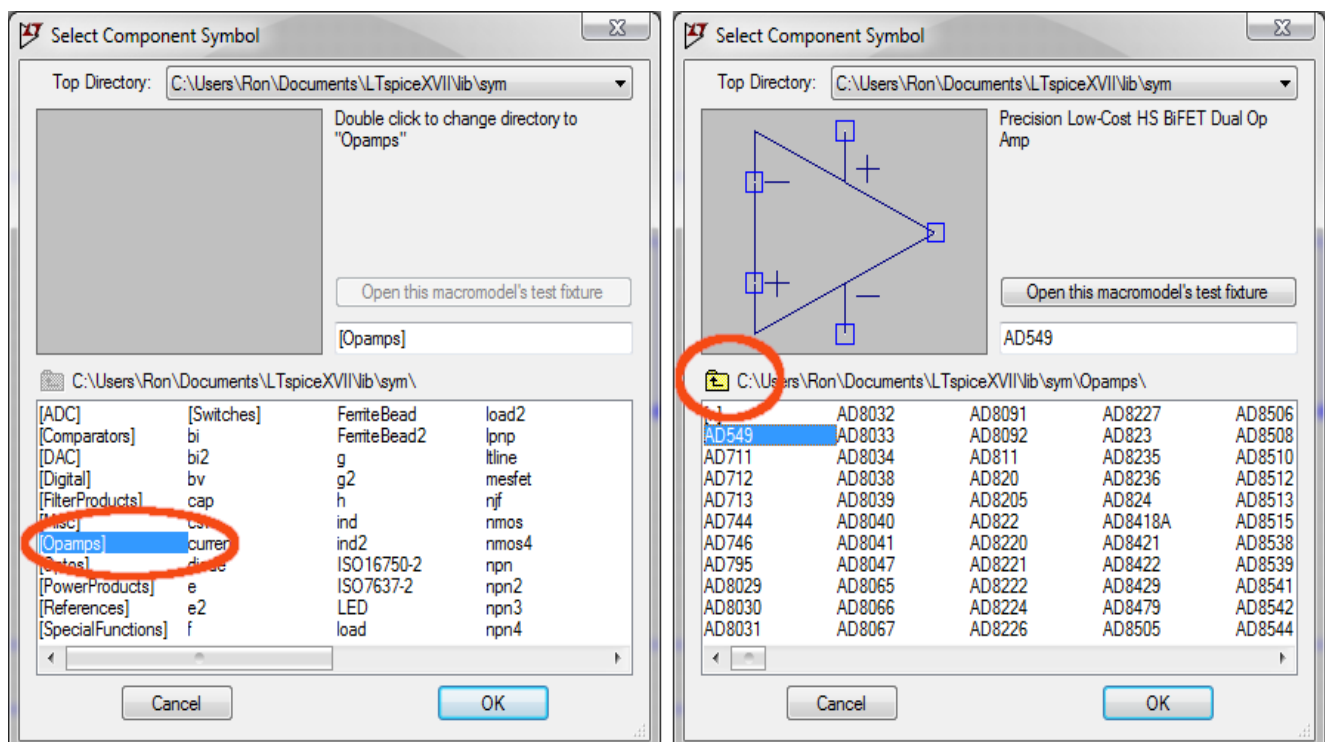


Рис. 5.1 – Вибір ОП в LTspice

Знак „мінус“ перед цим виразом вказує на те, що сигнал інвертується. Значення опору R_F повинно бути не меншим за 10 кОм.

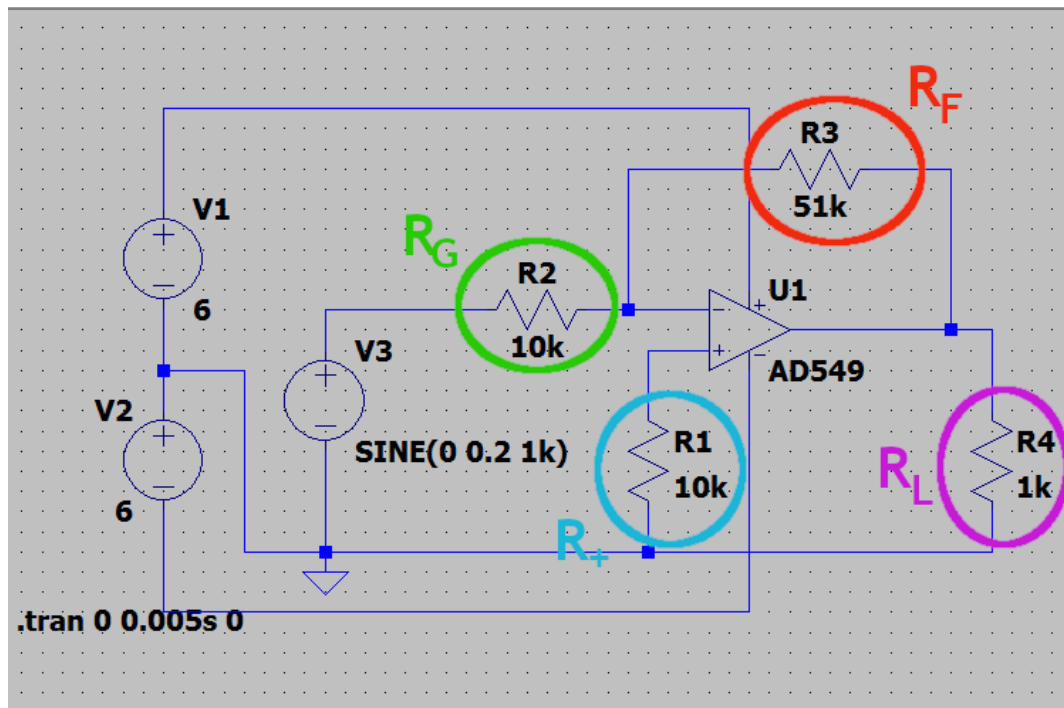


Рис. 5.2 – Модель інвертуючої схеми включення ОП в LTspice

Також зверніть увагу на те, що два однакових джерела напруг $V1$ і $V2$ з'єднані послідовно, причому точка їх з'єднання посаджена на „землю“. Це потрібно для того, щоб подати на ОП двохполярне живлення. Яку напругу живлення можна подавати на ваш ОП, треба з'ясувати по його даташиту (для більшості ОП напруга живлення може бути будь-якою від 3 до 15 В, але „+“ та „-“ повинні бути за модулем однакові).

Зробити скріншот зібраної схеми для звіту.

3. Про моделювати роботу схеми. В якості результатів моделювання навести осцилограми вхідного та вихідного сигналів. Повинно получитися щось схоже на рис. 5.3. Показати, що вихідний сигнал в K_U разів більший за вхідний.

Зробити скріншот вікна з результатами моделювання для звіту. Вказати на ньому, де інверсія сигналу. В LTspice можна ставити свої позначки та коментарі

у вікні результатів симуляції, вибравши в меню Plot Settings → Notes & Annotations → . . . (рис. 4).

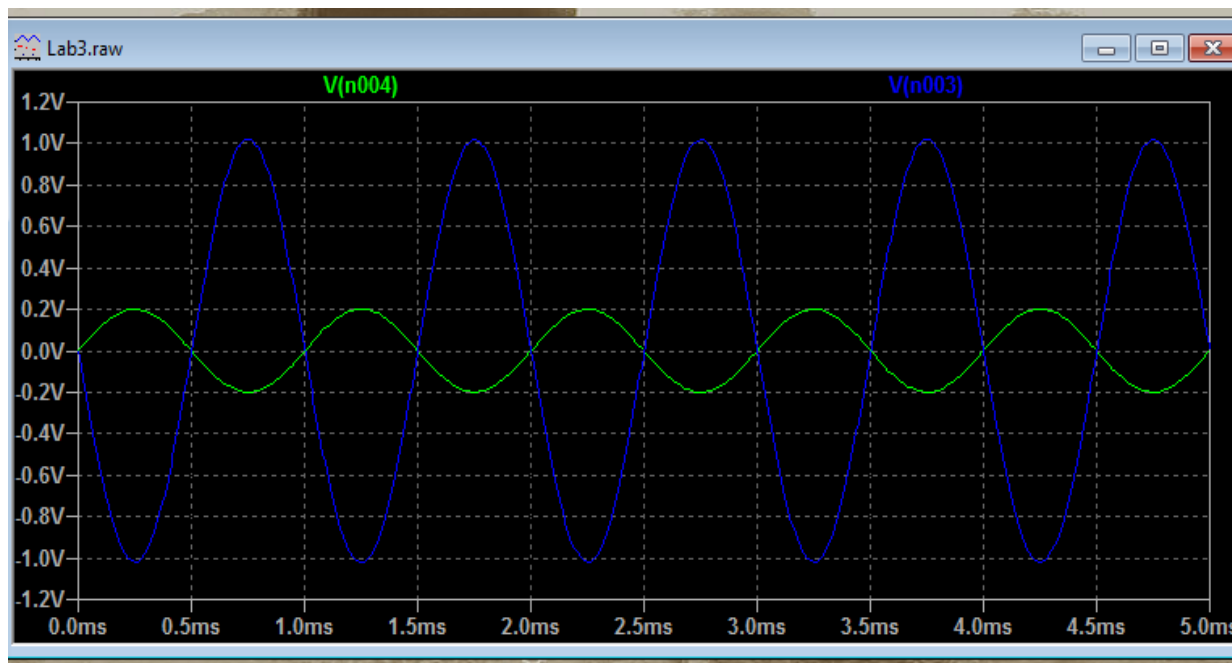


Рис. 5.3 – Приклад осцилограми сигналів в інвертуючій схемі включення ОП

4. Використовуючи ті ж самі початкові дані, зібрати неінвертуючу схему включення ОП. Для коректної роботи схеми потрібно пам'ятати, що в коло зворотного зв'язку ОП потрібно ставити резистор з опором не менше 10 кОм, і для неінвертуючої схеми коефіцієнт підсилення по напрузі задається виразом

$$K_U = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

Опір навантаження R_L знову прийняти рівним 1 кОм. Зробити скріншот зібраної схеми для звіту.

5. Про моделювати неінвертуючу схему. Зробити скріншот вікна симуляції. Показати, що коефіцієнт підсилення при ваших номіналах резисторів дорівнює заданому. Показати, що інверсії сигналу немає.

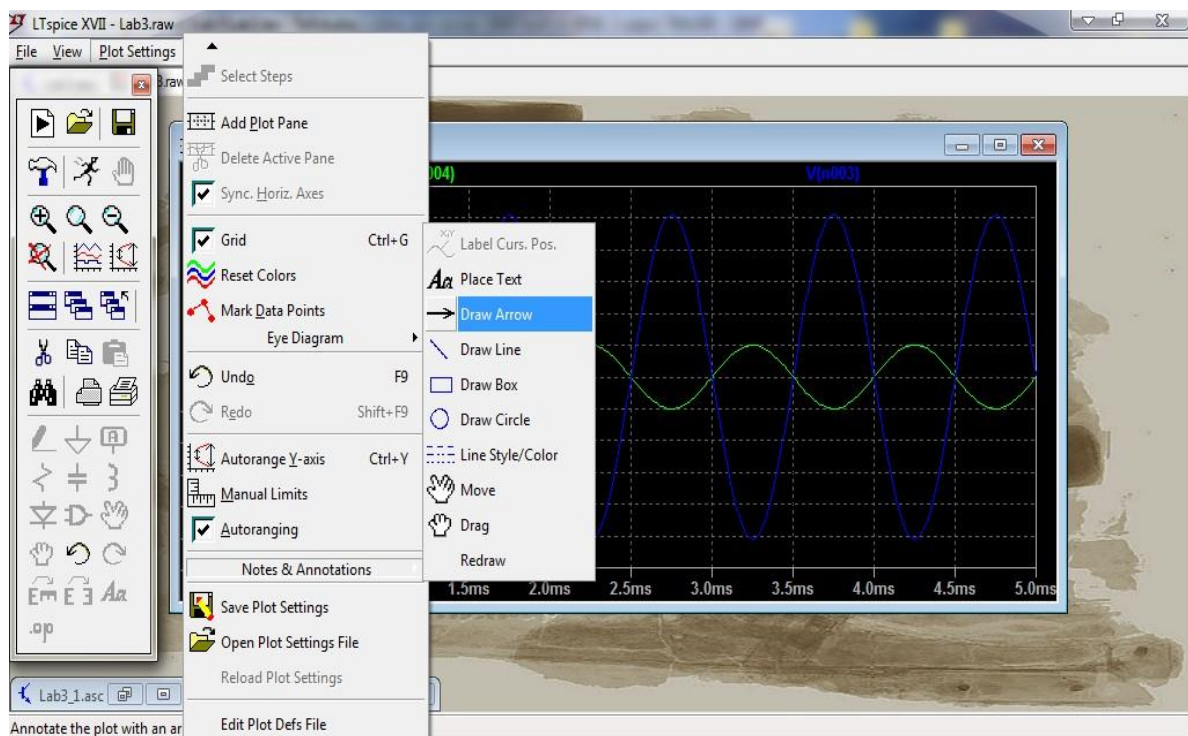


Рис. 5.4 – Як ставити позначки і коментарі безпосередньо в LTspice

5.2 Зміст звіту

Звіт рекомендується оформлювати у наступній послідовності.

1. Назва роботи та мета її виконання.
2. Варіант та параметри вибраного ОП, які потрібні для виконання лабораторної роботи.
3. Розрахунок інвертуючої схеми включення ОП.
4. Скріншот із зібраною інвертуючою схемою.
5. Скріншот результатів симуляції роботи інвертуючої схеми.
6. Розрахунок неінвертуючої схеми включення ОП.
7. Скріншот із зібраною неінвертуючою схемою.
8. Скріншот результатів симуляції роботи неінвертуючої схеми.
9. Висновки. Чи наявні спотворення вихідного сигналу і чи значні вони?

Якщо спотворення значні, чи можна їх якось зменшити?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 40

5.3 Орієнтовні теми питань на захисті

1. Чому підсилювач назвали «операційним»?
2. Що таке зворотний зв'язок і який він буває?
3. Чи можна ОП включати без зворотного зв'язку взагалі? Чи можна включати ОП без негативного зворотного зв'язку?
4. Для чого потрібен негативний зворотний зв'язок у схемах включення ОП?
5. Чи може бути коефіцієнт підсилення в класичних інвертуючій та неінвертуючій схемах включення ОП менше 1?
6. Чи може бути коефіцієнт підсилення в класичних інвертуючій та неінвертуючій схемах включення ОП максимально великим?
7. Що таке «ідеальний ОП»? Чому при описі ОП використовують модель ідеального ОП?
8. Що може бути, якщо в інвертуючій або неінвертуючій схемі включення ОП замість резисторів в ланку зворотного зв'язку включити конденсатор або котушку індуктивності?
9. Чи можна вихід ОП закоротити з його інвертуючим входом, тобто створити ланку негативного зворотного зв'язку з нульовим опором?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 41

Лабораторна робота №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНВЕРТУЮЧОЇ ТА НЕІНВЕРТУЮЧОЇ СХЕМ СУМАТОРІВ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

Мета роботи: дослідити роботу інвертуючої та неінвертуючої схем суматорів, зібраних на операційному підсилювачі.

6.1 Короткі теоретичні відомості

Суматор – це електричний вузол, який реалізує операцію математичного додавання сигналів. Найчастіше суматор являє собою інвертуючий підсилювач, який має кілька входів (рис. 6.1). Виводи всіх вхідних резисторів, що з'єднані з інвертуючим входом ОП, знаходяться під потенціалом віртуальної “землі”, і тому додавання входів не впливає на роботу вже існуючих.

Для розрахунку вихідної напруги, яка отримується при подачі сигналів на кожен з входів, використовується принцип суперпозиції:

$$V_{out} = k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_N V_N, \quad (6.1)$$

де $k_1, k_2, \dots, k_N$ – вагові коефіцієнти, що визначаються співвідношенням опорів вхідних резисторів $R_1, R_2, \dots, R_N$ та R_N . При врахуванні значень опорів цих резисторів для інвертуючого суматора справедлива формула (Картер, Манчіні, с.27):

$$V_{out} = - \left(\frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_F}{R_N} V_N \right). \quad (6.2)$$

Тут знак «мінус» вказує на те, що ця схема є інвертуючою.

По цілком аналогічному принципу працює і неінвертуючий суматор.

Завданням цієї роботи є дослідження форми вихідного сигналу при додаванні кількох вхідних. Результати цієї лабораторної роботи будуть

використовуватися при виконанні наступних «Активні фільтри» (які включають в себе фільтри НЧ та ВЧ, смугові та загороджувальні).

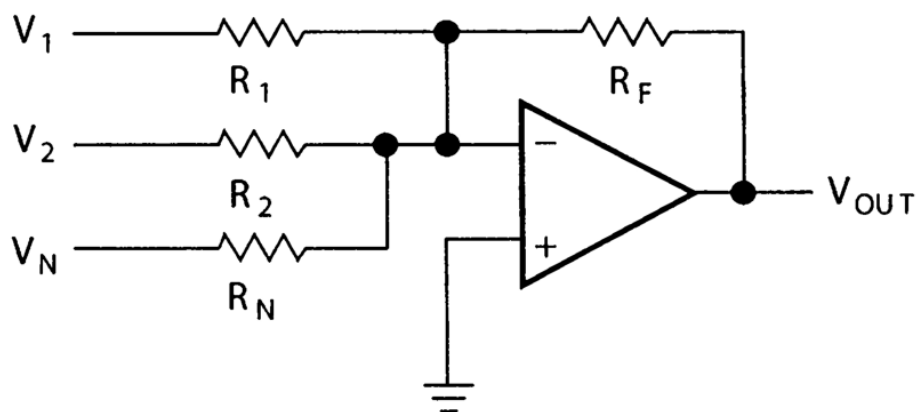


Рис. 6.1 – Схема інвертуючого суматора

6.2 Порядок виконання роботи

1. У середовищі LTspice зібрати схему інвертуючого суматора (рис. 6.1) з чотирма входами із амплітудами і частотами входних сигналів, заданими в таблиці (варіант — порядковий номер студента у списку академічної групи; напруга задана у вольтах, а частота – в Гц). В якості операційного підсилювача використовувати AD824 або ADTL084 (близькі аналоги LM324, який використовується в лабораторних роботах “в залізі”).

Варіант	U_1	f_1	U_2	f_2	U_3	f_3	U_4	f_4
1	0,5	1000	0,4	2000	0,3	3000	0,2	4000
2	0,7	2000	0,5	3000	0,3	5000	0,6	9000
3	0,5	2000	0,3	3000	0,5	4000	0,2	6000
4	0,4	1000	0,3	2000	0,6	3000	0,2	5000
5	0,6	1500	0,4	2700	0,7	3800	0,3	4200
6	0,2	1200	0,4	2400	0,6	3000	0,3	5300
7	0,5	1000	0,2	2000	0,3	3000	0,5	4000
8	0,7	1800	0,3	2700	0,5	3600	0,2	4400
9	0,5	1500	0,4	2600	0,3	3100	0,2	4900
10	0,3	1600	0,5	2500	0,7	3900	0,4	4300

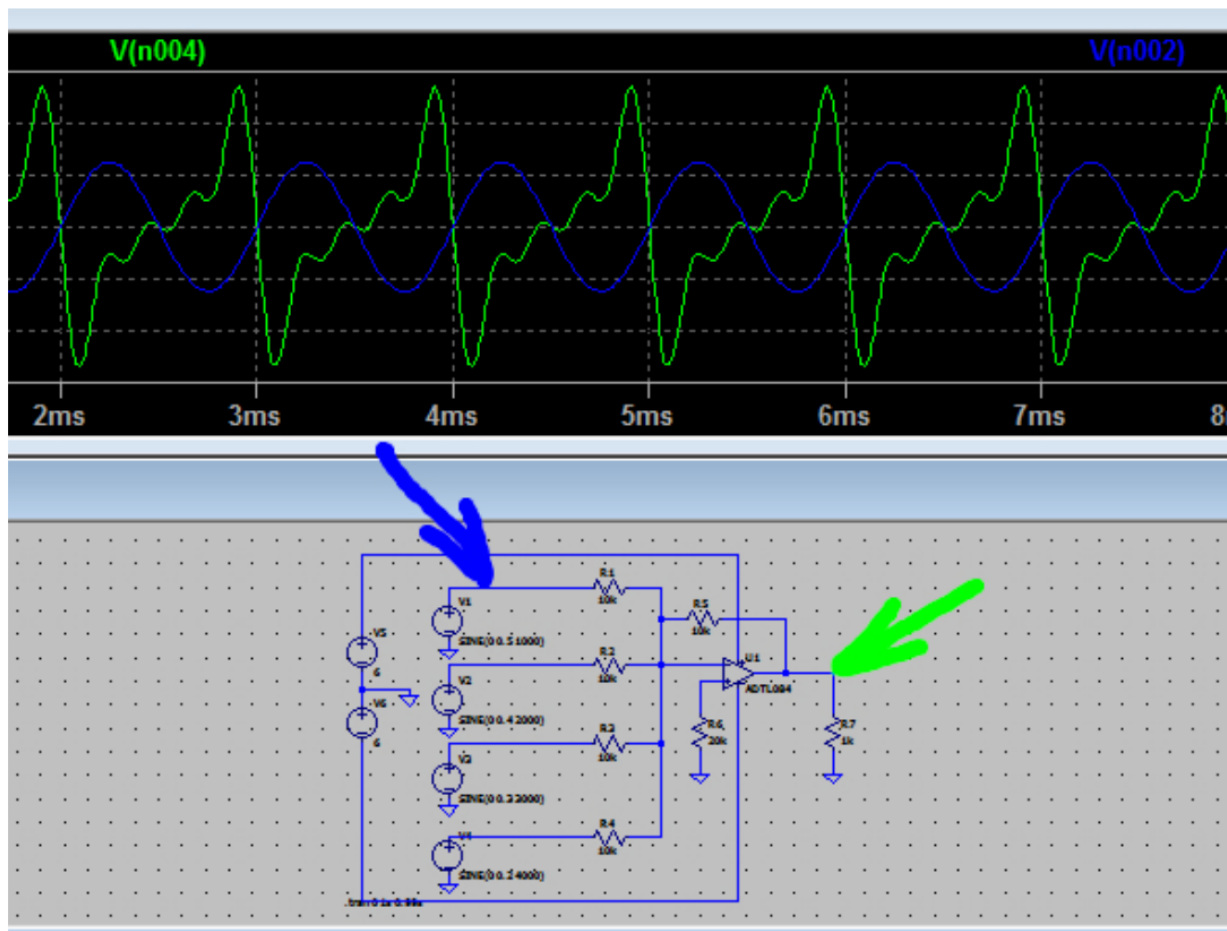


Рис. 6.2 – Приклад моделювання роботи інвертуючого суматора

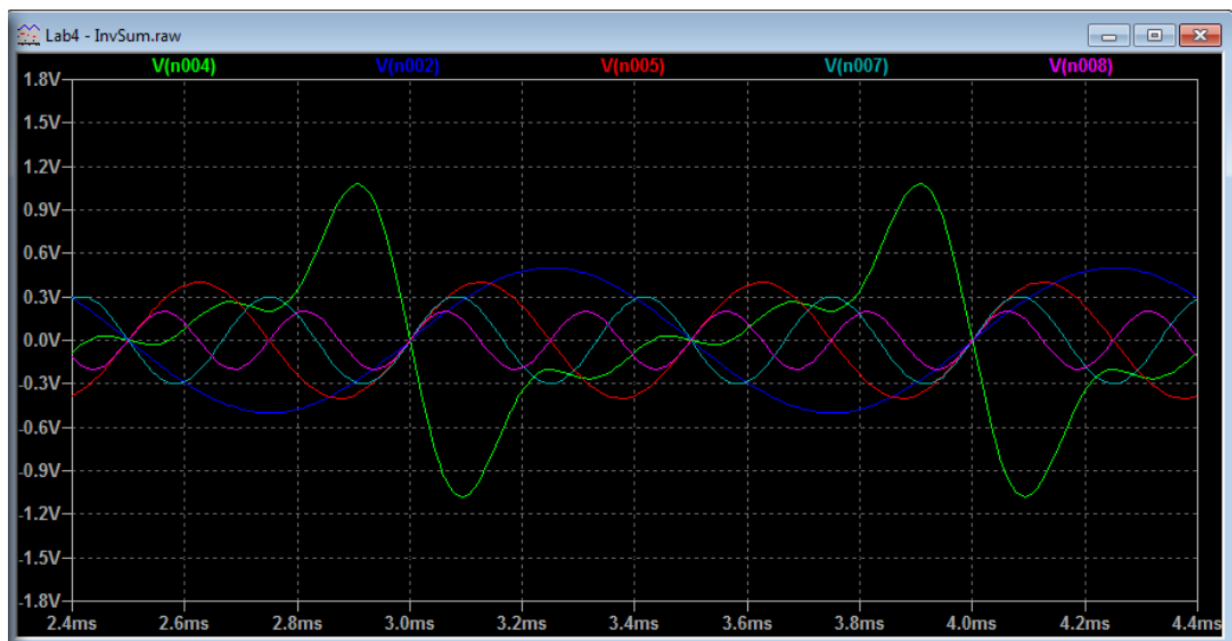


Рис. 6.3 – Вхідні та вихідний сигнали інвертуючого суматора з попереднього рисунку (вихідний сигнал – зелений)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 44

2. Про моделювати роботу схеми (приклад: див. рис. 6.2, 6.3). Обов'язково вказати вихідний та вхідні сигнали. Показати, як розміщені максимуми та мінімуми вхідних та вихідного сигналу. Якщо все зроблено правильно, то приблизно навпроти максимуму вихідного сигналу повинні бути мінімуми вхідних сигналів та навпаки (див. рис. 6.4).

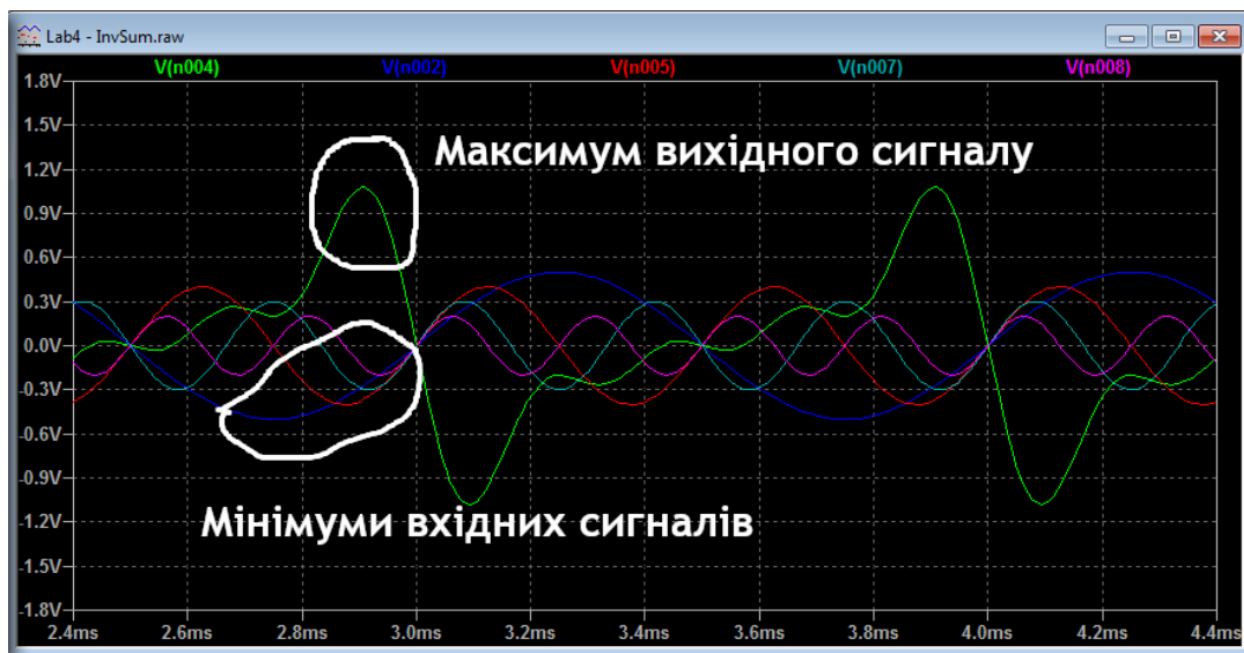


Рис. 6.4 – Інтерпретація сигналів інвертуючого суматора

3. Зібрати схему неінвертуючого суматора (за основу можна взяти рис. 6.5) з тими ж параметрами вхідних сигналів.

4. Про моделювати роботу неінвертуючого суматора. Показати, що мінімуми та максимуми вхідних сигналів приблизно співпадають відповідно із мінімумами та максимумами вихідного сигналу (рис. 6.6).

6.3 Зміст звіту

Звіт рекомендується оформлювати у наступній послідовності.

1. Назва роботи та мета її виконання.
2. Варіант та параметри вхідних сигналів.
3. Скріншот інвертуючої схеми суматора.
4. Скріншот результатів симуляції роботи інвертуючої схеми суматора.

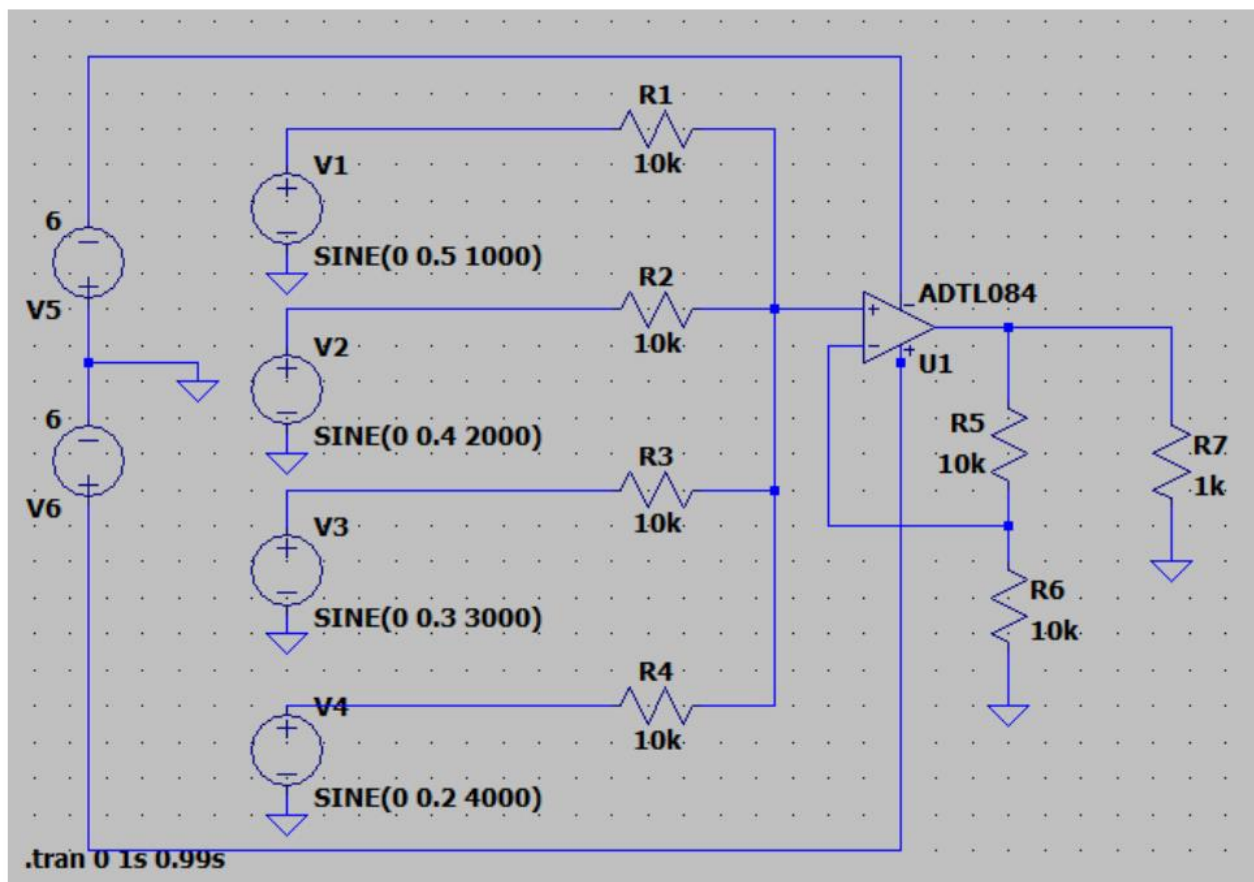


Рис. 6.5 – Приклад схеми неінвертуючого суматора

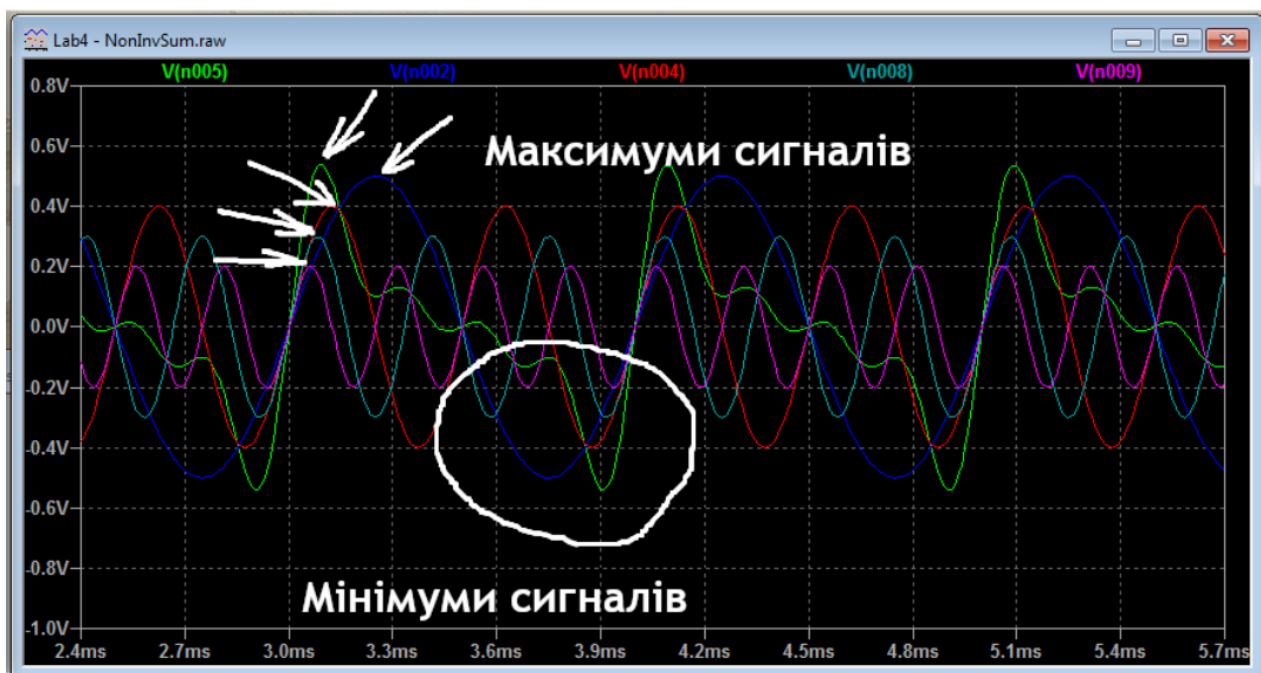


Рис. 6.6 – Інтерпретація сигналів неінвертуючого суматора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 46

5. Скріншот неінвертуючої схеми суматора.
6. Скріншот результатів симуляції роботи неінвертуючої схеми.
7. Висновки. Чи дійсно ваші схеми інвертуючі/неінвертуючі? Чому на осцилограмах особливі точки (максимуми, мінімуми) не співпадають ідеально точно?

6.4 Орієнтовні теми питань на захисті

1. Що таке суматор і яку операцію він робить?
2. Чи можна інвертуючий суматор умовно назвати «відніматором»?
3. Чи можна на схемі з одним ОП зробити так, щоб деякі сигнали додавалися, а деякі – віднімалися?
4. Чи може суматор зробити «розкладання» складного сигналу на складові?
5. Чи може бути так, що опори резисторів R1, R2, R3, R4 на схемах 6.2 і 6.5 – різні, але схема робоча?
6. Чи може суматор на ОП ще й додатково підсилювати результуючий сигнал?
7. Чи може суматор на ОП ще й додатково ослаблювати результуючий сигнал?
- 8*. Що відбувається зі спектрами сигналів при їх проходженні через суматор?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 47

Лабораторна робота №7

АКТИВНІ ФІЛЬТРИ НА ОП

Мета роботи: дослідити роботу фільтрів низьких та високих частот, зібраних по схемі Саллена–Кея та схемі з багатопетевим зворотним зв'язком; дослідити, як впливає порядок фільтра на його АЧХ.

7.1 Короткі теоретичні відомості

Електричний фільтр – це вузол, який пропускає сигнали з певного частотного діапазону і не пропускає всі інші частоти. Основною характеристикою фільтра є його АЧХ (амплітудно-частотна характеристика) – залежність амплітуди його вихідного сигналу від частоти ($U_{out}(f)$). На практиці найчастіше користуються залежністю коефіцієнту передачі від частоти ($K(f)$, $K = \frac{U_{out}}{U_{in}}$), але таку характеристику все одно називають амплітудно-частотною.

В залежності від виду АЧХ розрізняють:

- фільтри низьких частот (ФНЧ) – фільтри, які пропускають частоти нижче певної частоти f_0 , яку називають частотою зрізу, а частоти вищі за f_0 — не пропускають;
- фільтри високих частот (ФВЧ) – фільтри, які пропускають частоти вище частоти зрізу f_0 , а частоти нижчі за f_0 – не пропускають;
- смугові фільтри (СФ) – фільтри, які пропускають діапазон частот від f_{0L} до f_{0H} , і не пропускають інші частоти;
- загороджувальні, або режекторні – фільтри, які пропускають діапазони частот від 0 до f_{0L} та від f_{0H} і вище, але не пропускають частоти від f_{0L} до f_{0H} .

Далі буде наведений приклад моделювання пасивного смугового фільтра в середовищі LTspice XVII, а потім – формули для розрахунку схеми ФНЧ Саллена–Кея та схеми з багатопетлевим зворотним зв'язком. Після цього варто розглянути перехід від ФНЧ до ФВЧ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/OK17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 48

В даній роботі потрібно розрахувати ФНЧ на ОП, зібраних по схемі Саллена–Кея та схемі із багатопетлевим зворотним зв’язком, промоделювати їх роботу та показати, що частота зрізу та смуга пропускання фільтра відповідають поставленим вимогам.

7.1.1 Порядок моделювання роботи фільтра в LTspice XVII

Для прикладу розглянемо пасивний смуговий фільтр. Порядок моделювання схеми активного фільтра нічим не відрізняється від пасивного.

Схема пасивного смугового LC-фільтра, зібраного в середовищі LTspice XVII, показана на рис. 7.1. Для проведення частотного аналізу роботи схеми на її вхід повинно бути приєднане джерело напруги (на рис. 7.1 воно позначене V1), а для коректного відображення вихідних сигналів на виході повинен бути якийсь опір навантаження (на рис. 7.1 він позначений як R2=1 kΩ).

Для частотного аналізу при виборі параметрів джерела вхідного сигналу потрібно задати амплітуду його сигналу, а от форму і частоту не задають (форма вважається синусоїдальною, а частота задається у вигляді діапазона при запуску команди моделювання). Для цього потрібно виставити на робочу область джерело напруги (voltage), натиснути на ньому праву кнопку миші, і у вікні параметрів виставити *Functions* → *None*, а амплітуду виставити у поле *Small signal AC analysis (AC)* → *AC Amplitude* (див. рис. 7.2).

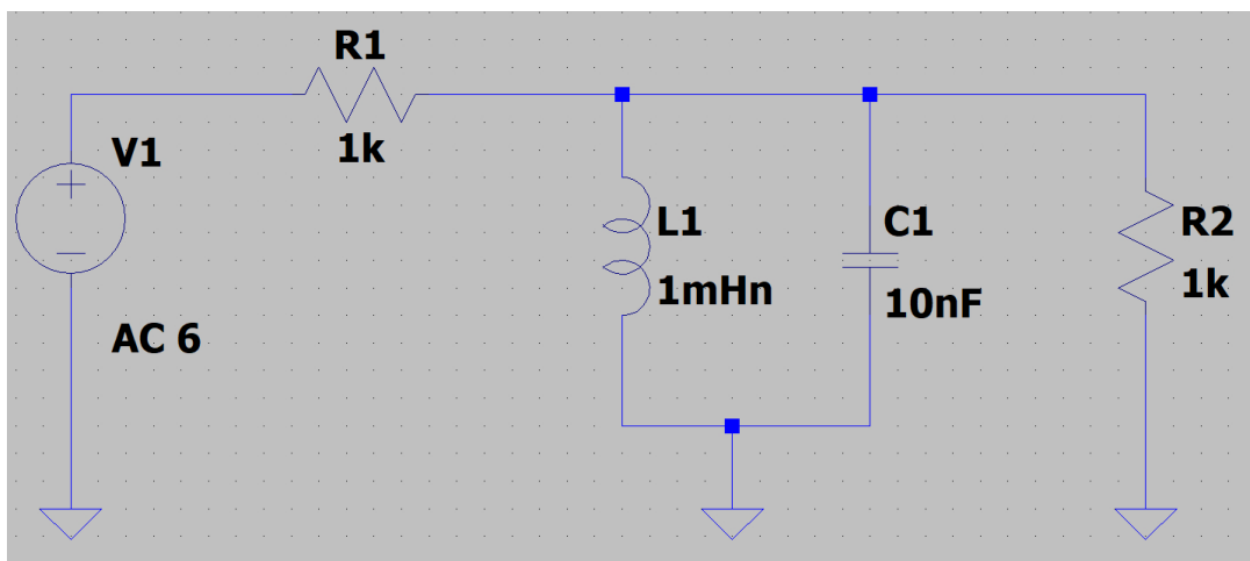


Рис. 7.1 – Пасивний смуговий LC-фільтр

Тепер, коли схема зібрана, можна приступати до моделювання. Заходимо в меню *Simulate* і вибираємо параметри команди симуляції (*Edit Simulation Command*). Для частотного аналізу вибираємо вкладку *AC Analysis* (див. рис. 7.3). У цьому вікні виставляємо тип графіку (підкреслено синім кольором; *Octave* та *Decade* відображаються в логарифмічному масштабі, а *Linear* та *List* – в лінійному. Як правило, при частотному аналізі бажано використовувати логарифмічний), кількість точок (підкреслено зеленим; тут чим більше – тим краще, але і розмір файлу симуляції та час обчислень зростає пропорційно), та діапазон частот (початкова і кінцева частоти, обведено фіолетовим; зверніть увагу, що в LTspice всякі мегагерци, мегаоми тощо — це meg, а якщо ви напишете M, то LTspice це зрозуміє як мілі- (тобто одну тисячну)). Важливо: початкова і кінцева частота – це не частоти зрізу смугового фільтра, це той діапазон частот, який буде відображений на графіку.

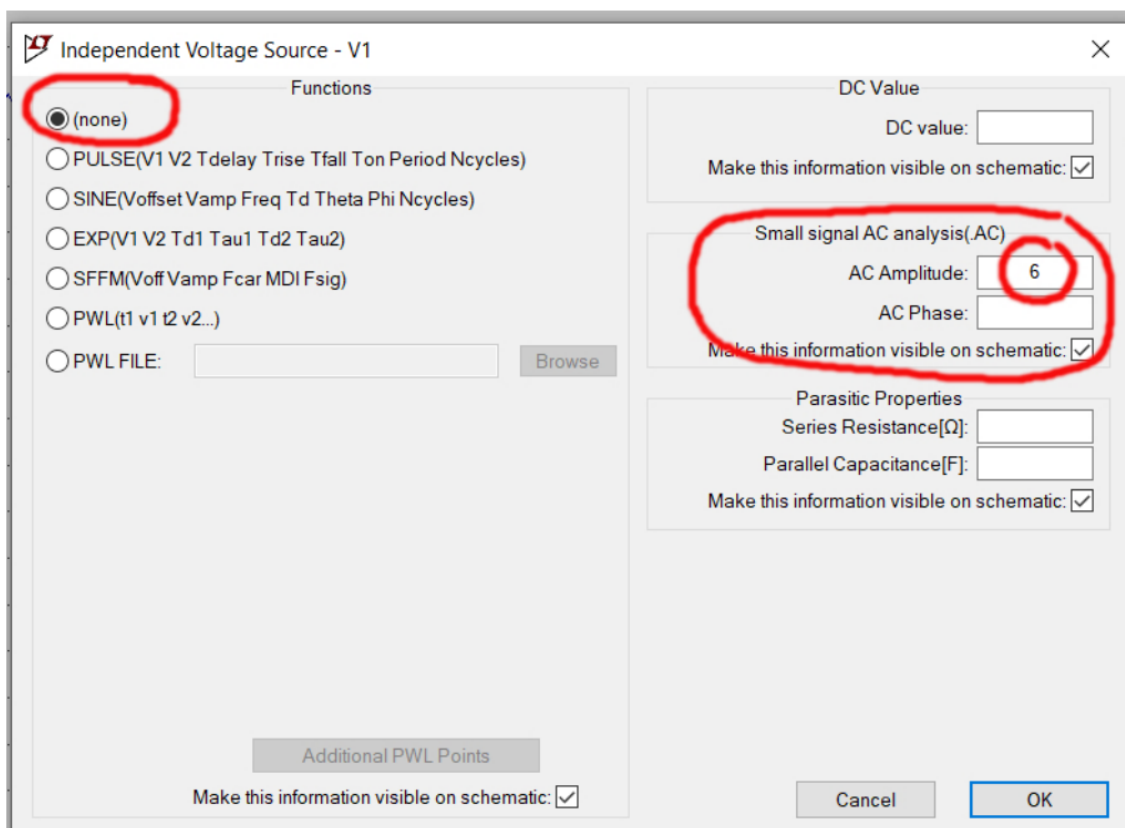


Рис. 7.2 – Параметри джерела вхідного сигналу

Натискаємо *OK*, під схемою з'являється напис типу «ac dec 10000 10 1000meg» — це означає, що в результаті симуляції буде відображено не форми

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 50

сигналів, а АЧХ і ФЧХ. Запускаємо симуляцію (Run) та дивимося АЧХ на виході схеми (рис. 7.4). В результаті частотного аналізу ми отримуємо амплітудно-частотну (АЧХ) і фазо-частотну (ФЧХ) характеристики.

На рис. 7.5 показані параметри смугового фільтра: центральна частота f_m та ширина смуги пропускання Δf .

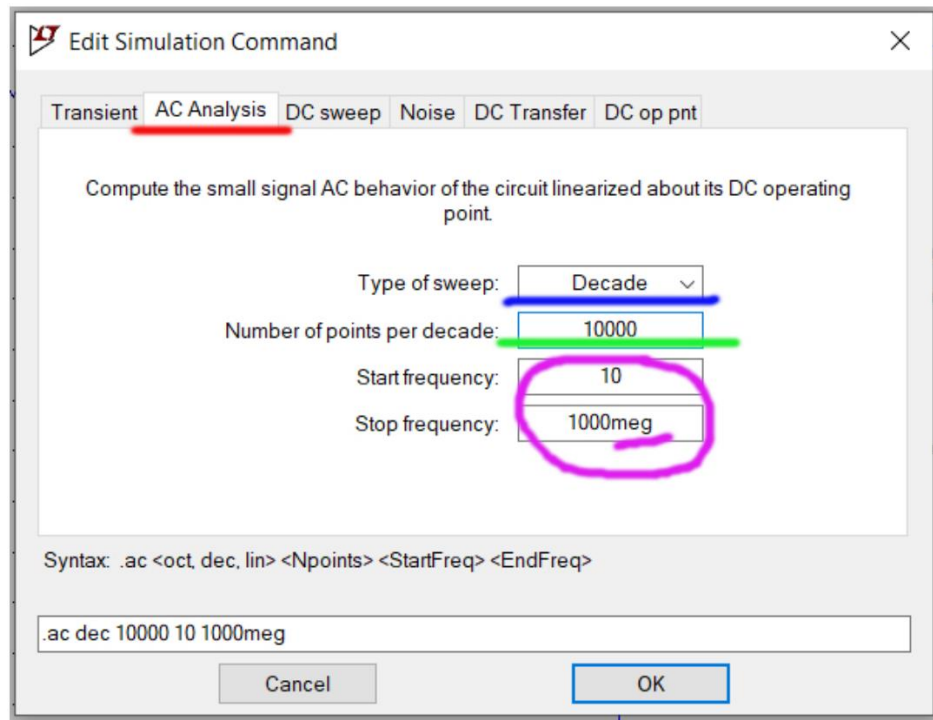


Рис. 7.3 – Вікно редагування параметрів симуляції при частотному аналізі

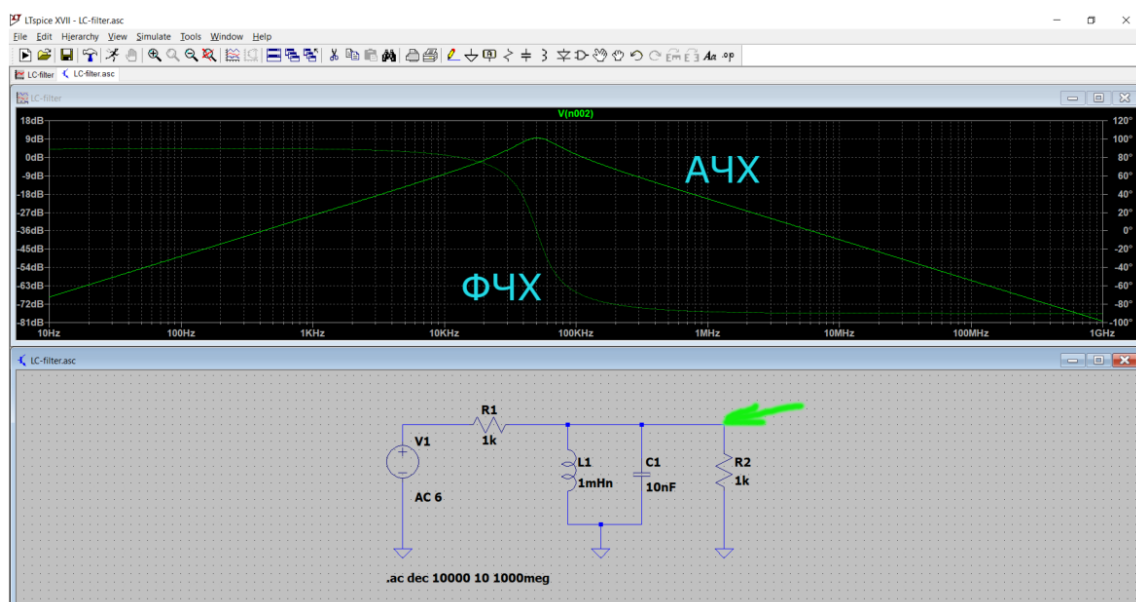


Рис. 7.4 – Частотний аналіз роботи схеми

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 51

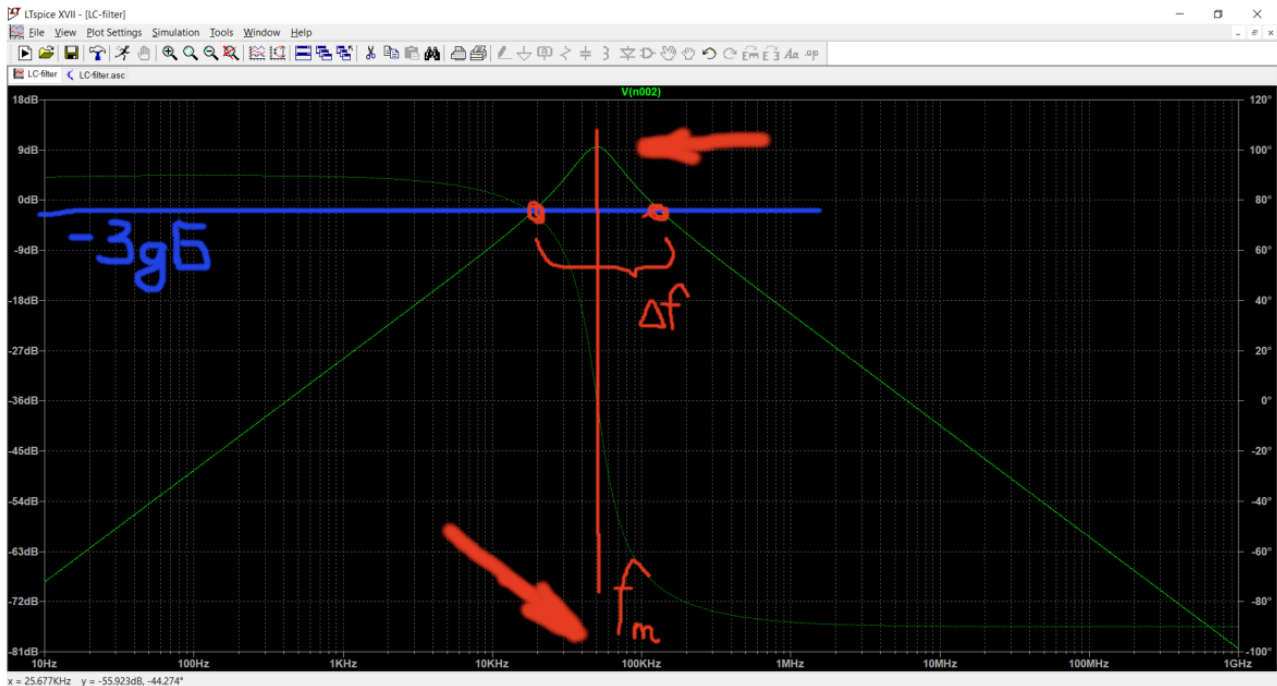


Рис. 7.5 – АЧХ смугового фільтра

7.1.2 Схема ФНЧ Саллена–Кея

Схема Саллена-Кея (рис. 7.6) – це одна з класичних схем активних фільтрів на ОП, неінвертуюча, забезпечує апроксимацію АЧХ поліномами Чебишева, Баттерворта або Бесселя – в залежності від розрахункових коефіцієнтів. Порядок фільтра, зібраного по цій схемі – другий.

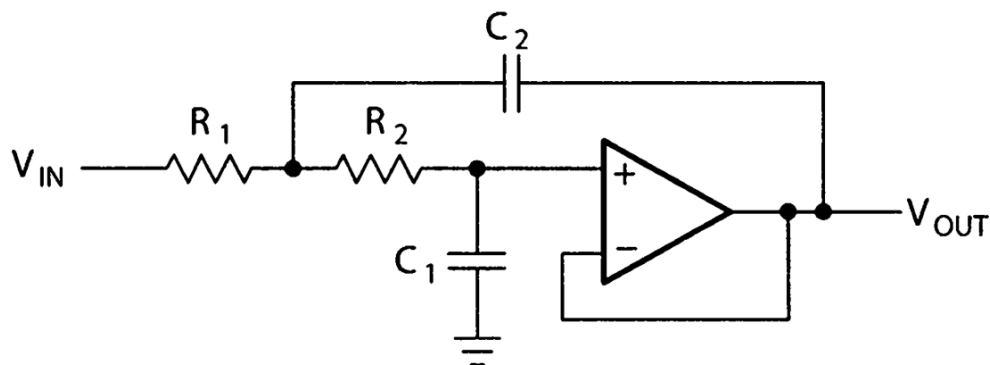


Рис. 7.6 – ФНЧ Саллена–Кея з одиничним коефіцієнтом передачі

Для розрахунку схеми спочатку обираються зі спеціальних таблиць (Картер, Манчіні) абираються коефіцієнти апроксимації a_1 і b_1 . Потім обирається

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 52

значення ємності конденсатора C_1 і обчислюється значення ємності конденсатора C_2 :

$$C_2 > C_1 \frac{4b_1}{a_1^2}.$$

Опори резисторів у схемі обчислюються за формулами:

$$R_1 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_0 C_1 C_2}, \quad R_2 = \frac{a_1 C_2 + \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_0 C_1 C_2},$$

де f_0 – частота зрізу.

При розрахунку схеми Саллена–Кея також використовуються перевіірочні співвідношення:

$$a_1 = 2\pi f_0 C_1 (R_1 + R_2), \quad b_1 = 4\pi^2 f_0^2 R_1 R_2 C_1 C_2.$$

7.1.3 Схема ФНЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком

Це друга класична схема активного фільтра на ОП, теж другого порядку, але інвертуюча (рис. 7.7). Розраховується також через коефіцієнти a_1 і b_1 , що теж беруться із тих же самих таблиць в залежності від виду апроксимації АЧХ. Схема із багатопетлевим зворотним зв'язком використовується, коли потрібне більше підсилення сигналу.

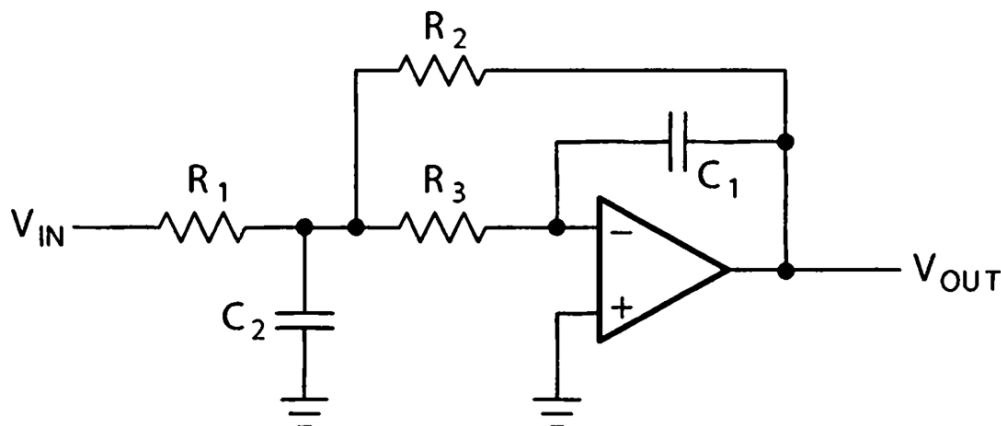


Рис. 7.7 – Схема із багатопетлевим зворотним зв'язком

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 53

Розрахункові формули:

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{-A_0}, \quad C_2 > C_1 \frac{4b_1(1-A_0)}{a_1^2},$$

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2 (1-A_0)}}{4\pi f_0 C_1 C_2}, \quad R_3 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_0^2 C_1 C_2 R_2}.$$

Перевірочні співвідношення для схеми із багатопетлевим зворотним зв'язком:

$$a_1 = 2\pi f_0 C_1 \left(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} \right),$$

$$b_1 = 4\pi^2 f_0^2 C_1 C_2 R_2 R_3.$$

7.1.4 Перехід від ФНЧ до ФВЧ

Зазвичай схема ФВЧ отримується із схеми ФНЧ шляхом заміни резисторів на конденсатори, а конденсаторів на резистори (рис. 7.8). АЧХ ФВЧ в такому випадку отримується як дзеркальне відображення АЧХ ФНЧ відносно частоти зрізу (рис. 7.9) шляхом заміни нормалізованої частоти Ω на $1/\Omega$ і S на $1/S$.

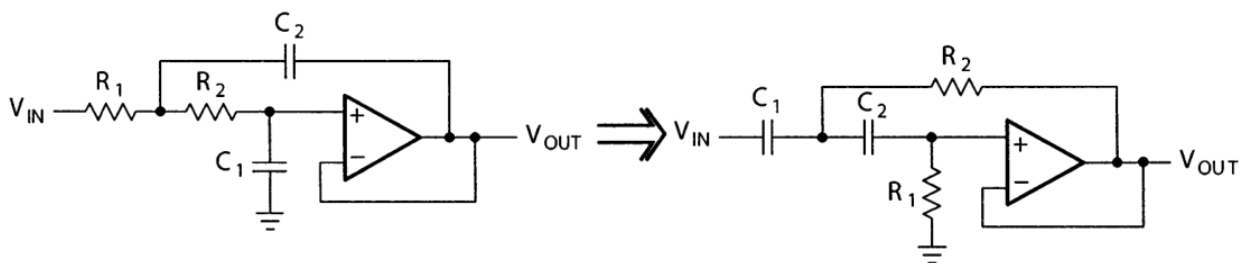


Рис. 7.8 – Перехід від ФНЧ до ФВЧ

Класичні схеми активних фільтрів Саллена–Кея та з багатопетльовим зворотним зв'язком є фільтрами другого порядку і вони забезпечують крутизну спаду АЧХ приблизно на 40 дБ/дек. У багатьох випадках на практиці потрібна більша крутизна спаду АЧХ, і тому порядок фільтра нарощують. Нарощування порядку фільтра відбувається шляхом дублювання схеми, тобто додаванням до виходу схеми ФНЧ/ФВЧ точно такої же схеми, але з дещо іншими номіналами елементів.

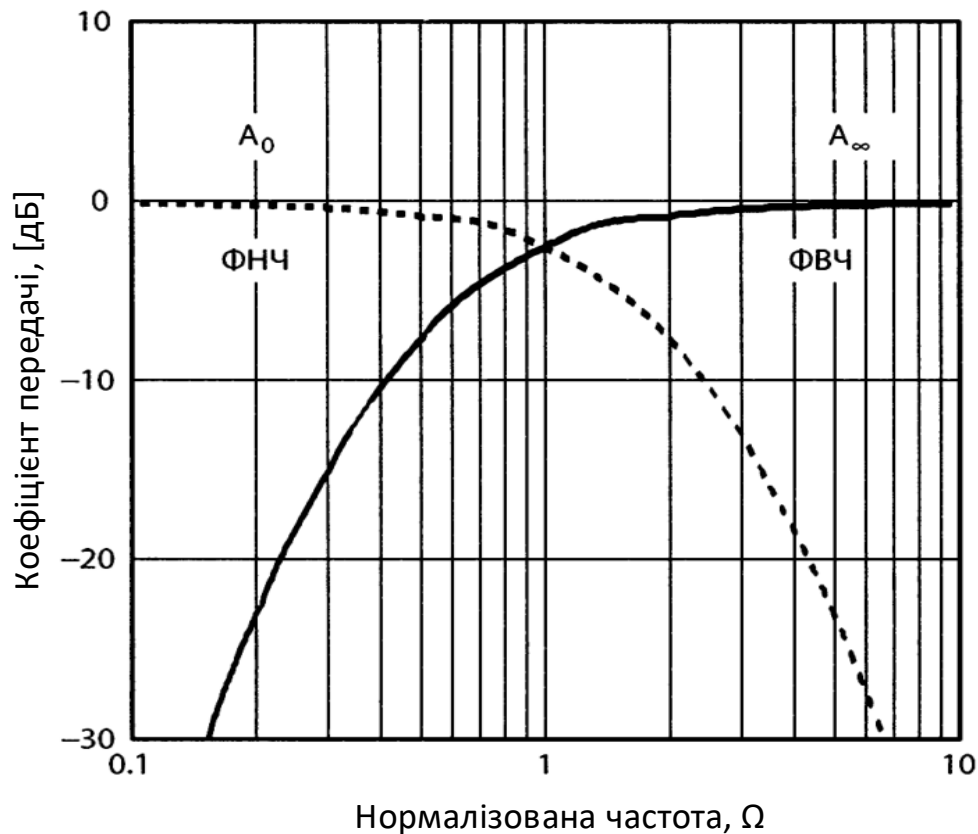


Рис. 7.9 – Утворення АЧХ ФВЧ з АЧХ ФНЧ

7.1.5 Схема ФВЧ Саллена-Кея

Схема ФВЧ Саллена-Кея показана на рис. 7.10. Для розрахунку схеми у першу чергу потрібно визначитися із типом апроксимації (по Чебишеву, Баттерворту чи Бесселю). Потім із спеціальних довідникових таблиць (Картер, Манчіні) вибираються коефіцієнти a_k та b_k для k -ї ланки фільтра. Для ФВЧ Саллена-Кея справедливі співвідношення:

$$a_1 = \frac{2}{\omega_0 R_1 C}, \quad b_1 = \frac{1}{\omega_0^2 R_1 R_2 C^2}$$

Таким чином, для розрахунку фільтра спочатку задають ємність конденсатора C . Потім із таблиць в залежності від виду апроксимації та порядку ланки беруть значення коефіцієнтів a_k і b_k , і обчислюють номінали опорів:

$$R_1 = \frac{1}{\pi f_0 C a_1}, \quad R_{2k} = \frac{a_1}{4\pi f_0 C b_1}$$

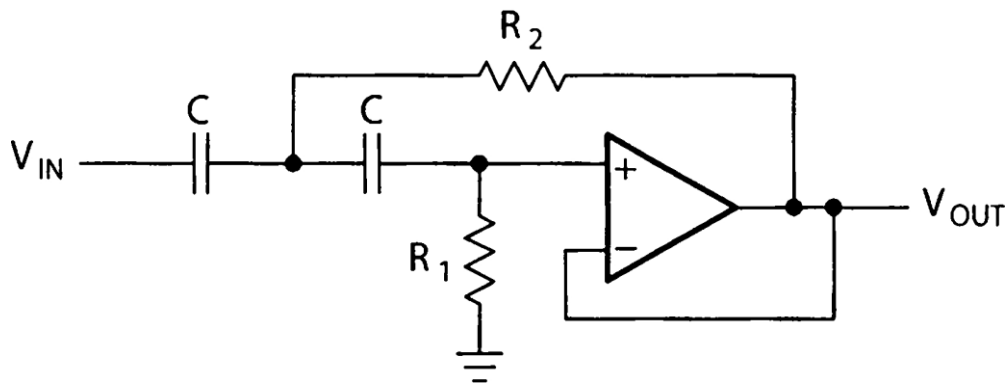


Рис. 7.10 – Схема ФВЧ Саллена-Кея з одиничним коефіцієнтом передачі

7.1.6 Схема ФВЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком

Схема ФВЧ із багатопетльовим зворотним зв'язком показана на рис. 7.11. Порядок її розрахунку в цілому такий самий, як і схеми Саллена–Кея, але самі розрахункові формули інші:

$$a_1 = \frac{2C_2 + C}{\omega_0 C C_2 R_1}, \quad b_1 = \frac{2C_2 + C}{\omega_0^2 R_1 R_2 C_2 C'}$$

$$R_1 = \frac{1 - 2A}{2\pi f_0 C a_1}, \quad R_2 = \frac{a_1}{2\pi f_0 b_1 C_2 (1 - 2A)},$$

де $A = -\frac{C}{C_2}$ – коефіцієнт передачі, який повинен бути від'ємним, оскільки схема з багатопетлевим зворотним зв'язком є інвертуючою.

Суттєвим недоліком цієї схеми вважається сильна залежність коефіцієнту передачі від співвідношення ємностей конденсаторів C та C_2 , причому оскільки конденсаторів з ємністю C у схемі два, то для практичної реалізації тут дуже бажано використовувати конденсатори з малим допуском по ємності.

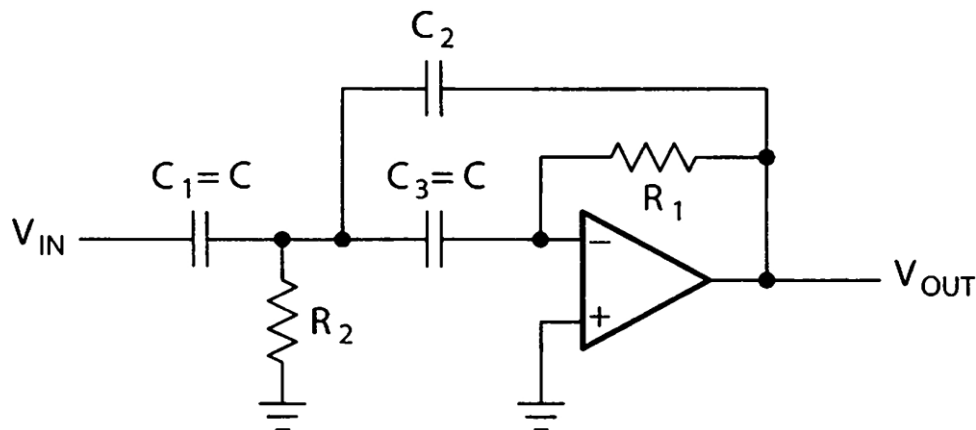


Рис. 7.11 – Схема ФВЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком

7.2 Порядок виконання роботи

1. Вибрати з таблиці нижче згідно списку групи варіант і вхідні дані для виконання роботи. Частота зрізу актуальна для обох схем (Саллена-Кея та з багатопетлевим зворотним зв'язком), а коефіцієнт підсилення A_0 – лише для схеми з багатопетлевим зворотним зв'язком. Зверніть увагу, що цей параметр має від'ємне значення, оскільки схема з багатопетлевим зворотним зв'язком є інвертуючою.

Варіант	Вид апроксимації	f_0 , Гц	$-A_0$
1	Чебишев	1000	4
2	Баттерворт	2000	5
3	Бессель	2000	3
4	Чебишев	1000	3
5	Баттерворт	1500	3
6	Бессель	1200	4
7	Чебишев	1000	2
8	Баттерворт	1800	3
9	Бессель	1500	4
10	Чебишев	1600	5

2. Розрахувати схему ФНЧ Саллена-Кея за рис. 7.6 та формулами з п. 7.1.2.
3. У середовищі LTspice зібрати схему Саллена-Кея із розрахованими номіналами резисторів та конденсаторів. В якості операційного підсилювача використовувати AD824 або ADTL084 (близькі аналоги LM324, який використовується в лабораторних роботах “в залізі”).
4. Про моделювати роботу схеми. На АЧХ обов'язково відзначити частоту зрізу та порівняти її з тим значенням, що було задано в таблиці.
5. Те ж саме зробити для схеми з багатопетлевим зворотним зв'язком (тобто розрахувати її, зібрати з розрахованими елементами, про моделювати).
6. (BONUS!) Спробувати об'єднати дві схеми так, щоб на одному графіку вивести (двома кольорами, звісно) АЧХ обох схем для порівняння.
7. Повторити пп. 2-6 для ФНЧ. Частоту зрізу бажано збільшити у 4...6 разів, так буде краще видно перехід від області затухання до області пропускання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 57

7.3 Зміст звіту

Звіт рекомендується оформлювати у наступній послідовності.

1. Назва роботи та мета її виконання.
2. Варіант та параметри схем.
3. Розрахунок схеми ФНЧ Саллена-Кея.
4. Скріншот результатів симуляції роботи розрахованої схеми ФНЧ Саллена-Кея.
5. Розрахунок схеми ФНЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком.
6. Скріншот результатів симуляції роботи розрахованої схеми ФНЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком.
7. Результати порівняння АЧХ обох схем (якщо получилось...)
8. Розрахунок схеми ФВЧ Саллена-Кея.
9. Скріншот результатів симуляції роботи розрахованої схеми ФВЧ Саллена-Кея.
10. Розрахунок схеми ФВЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком.
11. Скріншот результатів симуляції роботи розрахованої схеми ФВЧ з багатопетлевим зворотним зв'язком.
12. Результати порівняння АЧХ обох схем (якщо получилось...)
13. Результати порівняння АЧХ відповідних схем ФНЧ та ФВЧ.
14. Висновки. Чи співпадає розрахункова частота зрізу із заданою в таблиці? По чому видно, що ваші схеми – фільтри саме другого порядку? Для п.7: як порівняти роботу двох схем? Для п.13: чи вийшло щось схоже на рис. 7.9?

7.4 Орієнтовні теми питань на захисті

1. Чому ці фільтри називаються «активними»?
2. Чи може бути в цих схемах (Саллена-Кея та з багатопетлевим зворотним зв'язком) буде довільне значення коефіцієнту передачі?
3. Що таке порядок фільтра? На що він впливає?
4. Як по АЧХ визначити порядок фільтра (приблизно)?
5. Чи може бути порядок фільтра дробовим (не цілим) числом?
6. Що таке апроксимація АЧХ фільтра і для чого вона потрібна?
7. Які особливості та область застосування фільтрів з апроксимацією Бесселя?
8. Які особливості та область застосування фільтрів з апроксимацією Баттерворта?
9. Які особливості та область застосування фільтрів з апроксимацією Чебишева?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 58

Лабораторна робота №8

ГЕНЕРАТОРИ НА ОП

Мета роботи: дослідити роботу чотирьох класичних схем генераторів синусоїдальних сигналів на ОП.

7.1 Порядок виконання роботи

1. Зібрати в LTspice схему генератора з мостом Віна. Схема представлена на рис. 8.1. ОП вибирати з таблиці 8.1. Варіант – порядковий номер студента у списку групи. Напруга живлення – 6 або 9 В.

Таблиця 8.1.

Вар-т	ОП	Вихідна частота, кГц
1	AD549	2,3
2	AD711	3,2
3	AD712	4,7
4	AD713	6,8
5	AD744	8,2
6	AD746	9,1
7	AD795	2,3
8	AD8030	3,2
9	AD8033	4,7
10	AD8034	6,8
11	AD8038	8,2
12	AD8039	9,1
13	AD8040	2,3
14	AD8047	3,2
15	AD8066	4,7
16	AD8067	6,8
17	AD823	8,2
18	AD8512	9,1
19	AD8513	2,5
20	AD8613	7,8

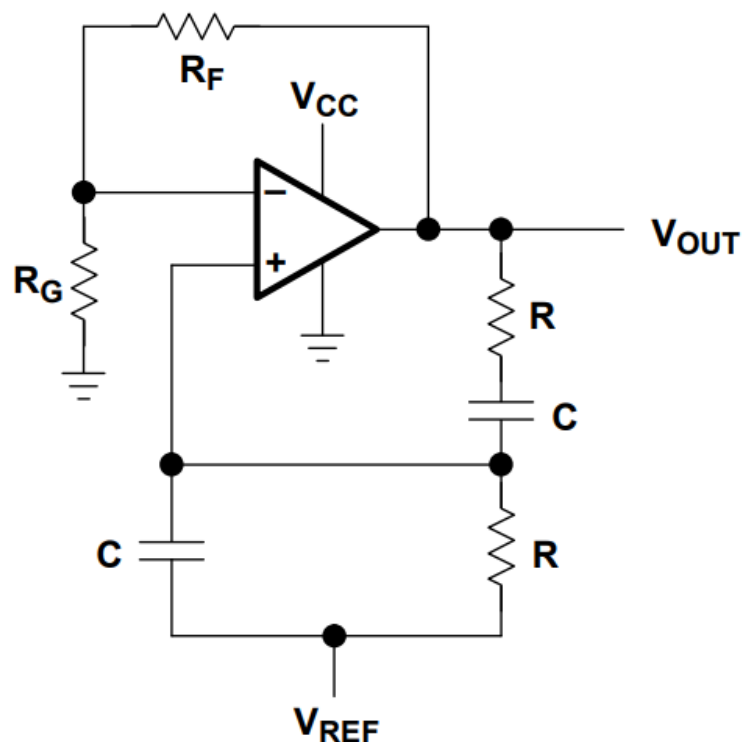


Рис. 8.1. – Схема генератора синусоїдального сигналу з мостом Віна

2. Розрахувати номінали резисторів та конденсаторів так, щоб получилася частота вихідного сигналу така, як задана в таблиці 8.1. Вихідна частота генератора з мостом Віна визначається виразом:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

По цій формулі частота виходить в герцах, опір в омах, ємність у фарадах.

Підсилення в цій схемі повинно дорівнювати 3, і тому $R_F = 2R_G$ (подумайте – чому саме так?)

3. Промоделювати роботу генератора, показати осцилограму вихідного сигналу.

4. Для тих же даних з таблиці 8.1 – зібрати схему генератора з ланцюжками зсуву фази (рис. 8.2). Для цієї схеми, згідно довідника [4], колова частота вихідного сигналу становить

$$\omega = 2\pi f = \frac{1,732}{RC}$$

тому що в схемі на рис. 8.2. три ланки зсуву фаз, а кожна ланка повинна забезпечувати кут зсуву фаз 60° (щоб у сумі було 180°) і $\tan 60^\circ = 1,732$.

Підсилення в цій схемі повинно бути не менше 8.

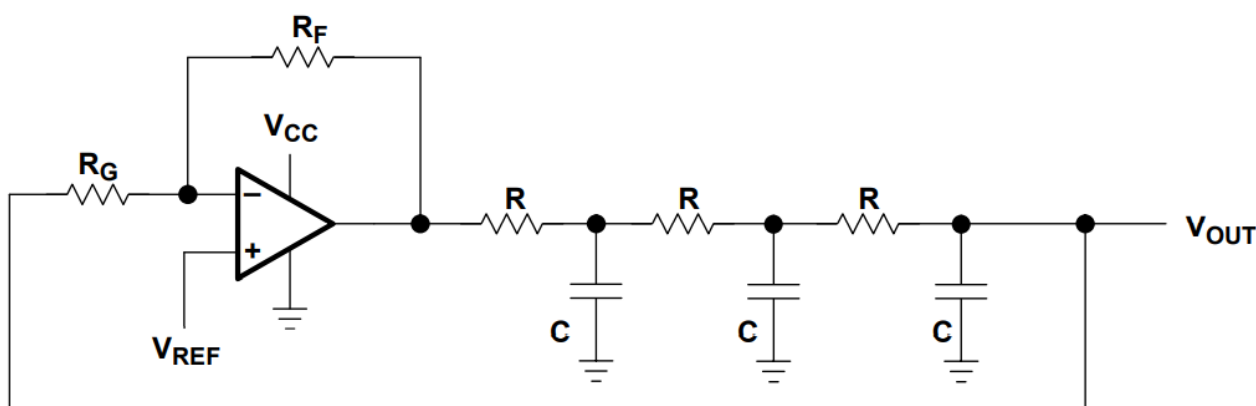


Рис. 8.2. – Схема генератора синусоїдального сигналу з ланцюжками зсуву фази

5. Про моделювати роботу зібраної схеми, показати осцилограму вихідного сигналу

6. Зібрати в LTspice схему квадратурного генератора (рис. 8.3). ОП вибирати з таблиці 8.1. Варіант – порядковий номер студента у списку групи. Напруга живлення – також 6 або 9 В.

7. Розрахувати номінали резисторів та конденсаторів так, щоб получилася частота вихідного сигналу така, як задана в таблиці 4.1. Для цього прийняти $R_1 = R_2 = R_3$ і $C_1 = C_2 = C_3$. Вихідна колова частота квадратурного генератора визначається виразом:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{RC}$$

По цій формулі частота виходить в герцах, опір в омах, ємність у фарадах.

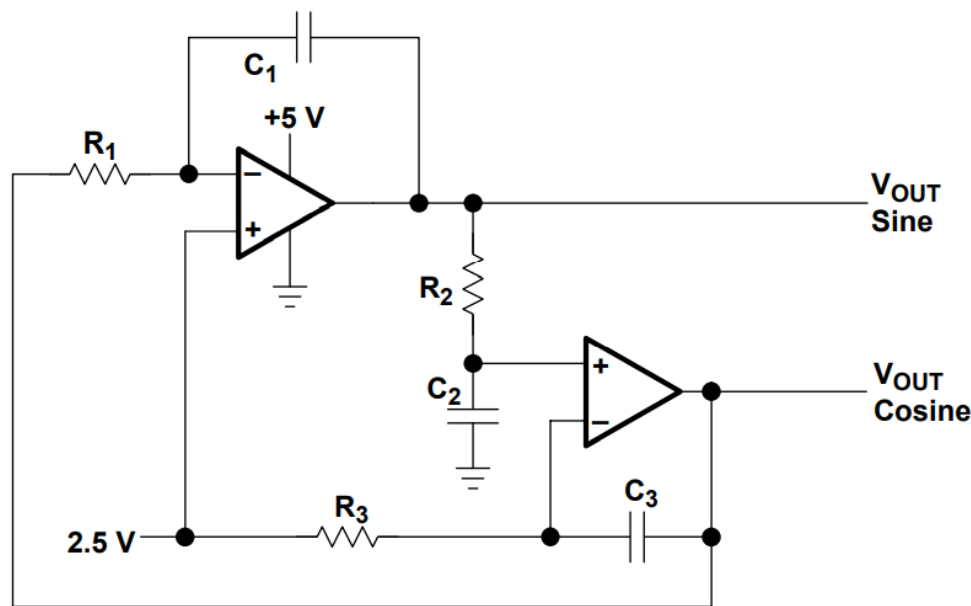


Рис. 8.3. – Схема квадратурного генератора

8. Промоделювати роботу генератора, показати осцилограми вихідних сигналів. Показати, що зсув фаз між ними дорівнює $\frac{\pi}{2}$, тобто один з цих сигналів є синусоїдальним, а один – косинусоїдальним.

9. Для тих же даних з таблиці 8.1 – зібрати схему генератора Бубба (рис. 8.4). Для цієї схеми, згідно довідника [4], колова частота вихідного сигналу становить

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{RC}.$$

Підсилення у першій ланки (тобто в того ОП, до якого приєднані резистори R_F та R_G) в цій схемі повинно бути не менше 4...5. Спробуйте самостійно визначити, по якому правилу розраховувати співвідношення опорів цих резисторів – як для інвертуючої чи як для неінвертуючої схем.

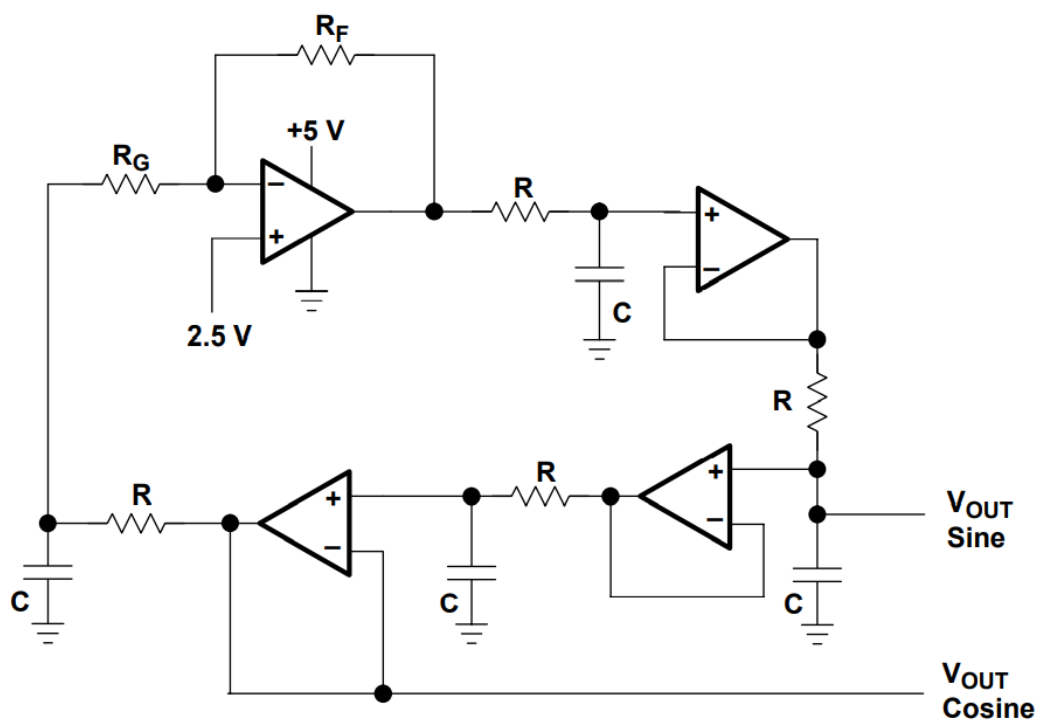


Рис. 8.4. – Схема генератора Бубба

10. Промоделювати роботу зібраної схеми, показати осцилограми вихідних сигналів. Оцінити, у якого сигналу – синусоїдального чи косинусоїдального – наявні більші спотворення.

8.2 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи, варіант.
2. Скріншот зібраної в LTspice схеми генератора синусоїдального сигналу з мостом Віна.
3. Результати розрахунків значень резисторів та конденсаторів для отримання потрібної частоти вихідного сигналу.
4. Результати моделювання роботи генератора синусоїдального сигналу з мостом Віна – осцилограма вихідного сигналу.
5. Скріншот зібраної в LTspice схеми генератора з ланками зсуву фази.
6. Результати розрахунків значень резисторів та конденсаторів для отримання потрібної частоти вихідного сигналу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк. 64 / 63

7. Результати моделювання роботи генератора з ланками зсуву фази – осцилограма вихідного сигналу.
8. Висновки по першій частині роботи. Чи дійсно отримані сигнали є синусоїдальними?
9. Скріншот зібраної в LTspice схеми квадратурного генератора.
10. Результати розрахунків значень резисторів та конденсаторів для отримання потрібної частоти вихідного сигналу.
11. Результати моделювання роботи квадратурного генератора – осцилограми вихідних сигналів. Оцінка зсуву фаз між цими сигналами.
12. Скріншот зібраної в LTspice схеми генератора Бубба.
13. Результати розрахунків значень резисторів та конденсаторів для отримання потрібної частоти вихідного сигналу.
14. Результати моделювання роботи генератора Бубба, оцінка зсуву фаз між сигналами.
15. Висновки по другій частині роботи. Чи дійсно отримані сигнали є синусоїдальними/ косинусоїдальними? Чи однакові рівні спотворень в обох сигналах (для обох схем)? Якщо ні – то з чим це може бути пов'язано?

8.3 Орієнтовні теми питань на захисті

1. Який тип зворотного зв'язку обов'язково повинен бути присутнім у схемі будь-якого генератора на ОП?
2. За яких умов схема на ОП починає генерувати сигнал?
3. Назвіть можливі області застосування генераторів синусоїдальних сигналів.
4. Чому в схемі релаксаційного генератора обов'язково повинні бути конденсатори?
5. Наскільки схема генератора з мостом Віна чутлива до похибок опорів резисторів та ємностей конденсаторів, що входять до її складу?
6. Наскільки схема генератора з ланцюжками зсуву фази чутлива до похибок опорів резисторів та ємностей конденсаторів, що входять до її складу?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.01/163.001/ОК17- 2025
	Екземпляр № 1	Арк 64 / 64

ПЕРЕЛІК ДОПОМІЖНИХ ДЖЕЛІВ

1. Загальна аналогова схемотехніка: <https://www.electronics-tutorials.ws/>
2. Навчальні матеріали по LTspice: <https://www.analog.com/en/resources/media-center/videos/series/ltpice-getting-started-tutorial.html> -
3. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. — 2-ге вид., допов. і переробл. — К.: Вища шк., 2004. — 366 с.: іл.
https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Boiko_P1_2004_366.pdf
4. Ron Mancini Op Amps for Everyone Design Guide (Rev. B, 2002) - https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf