

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Основи теорії кіл: Моделювання в LTSpice

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем»
спеціальності 172 «Електронні телекомунікації та радіотехніка»

Укладачі: Г.В. Іваннік, В.М. Бондаренко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Пілінський В.В.*, канд. техн. наук, професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем, факультет електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Корнєв В.П.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 02.06.2023 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 05/2023 від 22.05.2023 р.)*

Навчальний посібник має сприяти виконанню завдань на самостійну роботу, спрямованих на опанування основних прийомів роботи з програмою моделювання електронних схем LTSpice, яка застосовується в лабораторному практикумі дисципліни «Основи теорії кіл. Частина 1» в умовах дистанційного режиму навчання. У навчальному посібнику викладено загальні відомості про програму LTSpice компанії Analog Devices Inc., наведено інформацію про завантаження програми та її встановлення на комп'ютер, приділено увагу моделюванню аналогових електронних схем, вимірюванню струмів, напруг та відображенню результатів вимірювання тощо. Для кращого засвоєння студентами матеріалу посібник містить приклади використання програми, питання для самоконтролю та завдання.

Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 172 «Електронні телекомунікації та радіотехніка», буде також корисним для студентів спеціальності 171 «Електроніка».

Реєстр. № НП 22/23-870. Обсяг 1.4 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Завантаження дистрибутиву та встановлення програми на комп'ютер.....	4
2. Інтерфейс програми.....	5
3. Графічний редактор програми LTSpice	13
4. Моделювання електронних схем.....	19
5. Трактовка результатів вимірювання.....	27
6. Приклади застосування програми LTSpice для аналізу схем на постійному струмі.....	29
6.1. Перший закон Кірхгофа.....	29
6.2. Другий закон Кірхгофа.....	33
6.3. Принцип суперпозиції	38
6.4. Теорема про еквівалентний генератор	44
7. Питання для самоперевірки.....	49
8. Завдання	50
Перелік посилань.....	58
Список рекомендованої літератури.....	58
Додаток А. Перелік скорочень, умовних позначень, термінів.....	59

Вступ

Дисципліна «Основи теорії кіл. Частина 1» розкриває основні методи аналізу електронних кіл на постійному струмі, основи теорії схемних функцій, теорії чотириполіусників. Дисципліна викладається студентам на першому курсі у другому семестрі на кафедрі конструювання електронно-обчислювальної апаратури факультету електроніки. Надбанні теоретичні знання студенти застосовують при виконанні відповідних лабораторних робіт як у лабораторіях, так і в дистанційному режимі. В останньому випадку використовуються програми моделювання електронних схем, однією з яких є програма LTSpice компанії Analog Devices Inc. (USA, Wilmington). Програма має безкоштовну ліцензію, постійно підтримується розробником та регулярно оновлюється. Інтерфейс LTSpice зручний, зрозумілий та простий, сама програма є потужною та швидкодіючою, що забезпечує ефективність її використання у самостійній роботі студентів, а також в дистанційному режимі виконання лабораторних робіт.

1. Завантаження дистрибутиву та встановлення програми на комп'ютер

Програма LTSpice вільно розповсюджується компанією Analog Devices Inc. (USA, Wilmington). Посилання [1] відкриває WEB-сторінку (рис.1.1), де розміщені дистрибутиви для комп'ютерів з операційними системами Windows та MacOS. Потрібно вибрати дистрибутив, який відповідає характеристикам вашого комп'ютера, завантажити його та запустити програму встановлення LTSpice на комп'ютер. Наприклад, якщо ви вибрали опцію "LTSpice Download for Windows 10 64-bit and forward", на комп'ютер буде завантажено файл LTSpice64.msi у папку "Завантаження". Після запуску файлу на виконання починається процес встановлення. По завершенні на робочому столі комп'ютера з'являється ярлик для запуску програми. На сайті також розміщено навчальні англійські матеріали [2; 3] тощо, якими можна

користуватися для поглибленого вивчення програми. При написанні даного навчального посібника використовувалась програма LTSpice (x64) версії 17.1.6 для операційної системи Windows 10.

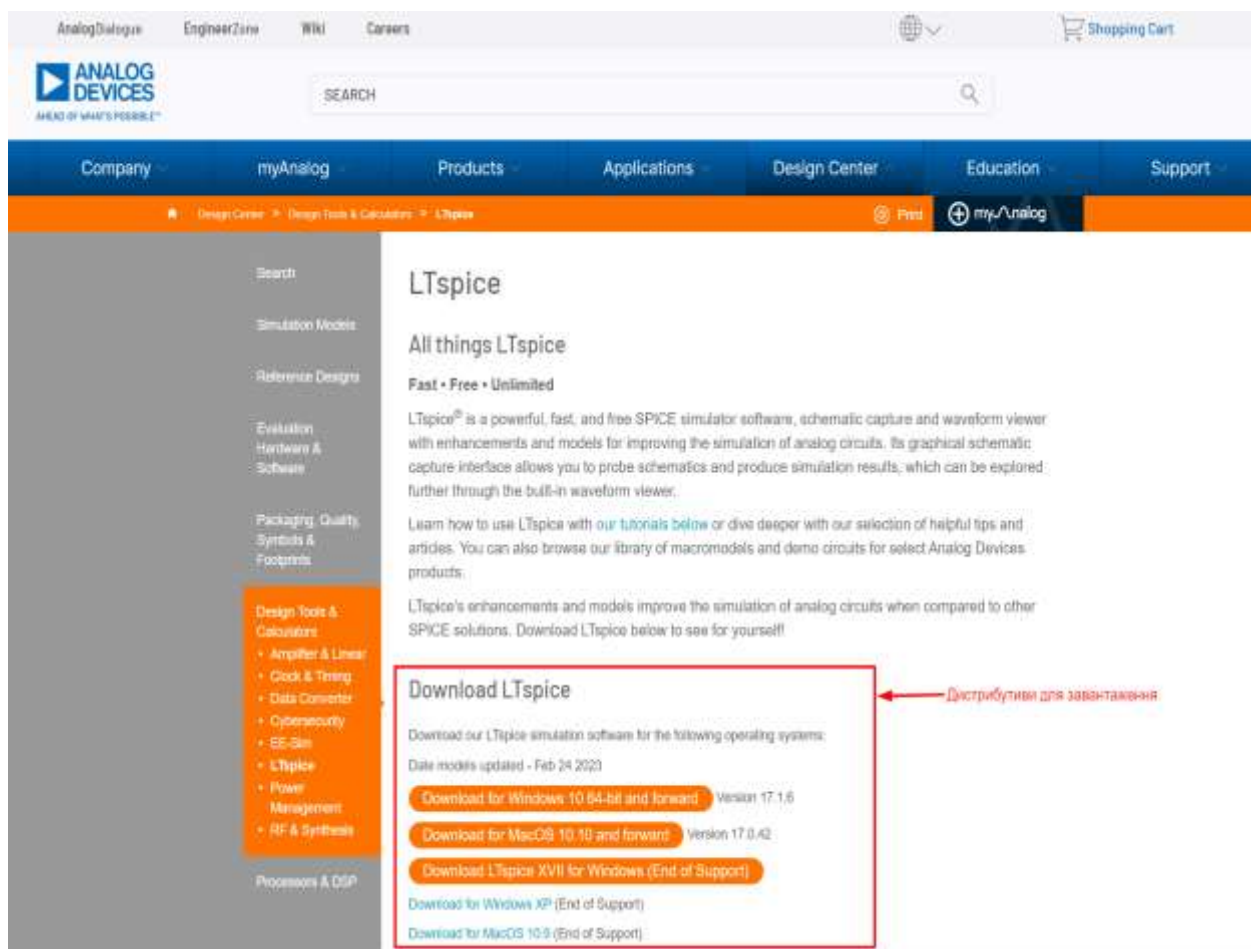


Рис.1.1. WEB-сторінка компанії Analog Devices Inc. для завантаження дистрибутива програми LTSpice

2. Інтерфейс програми

Після запуску програми відкривається головне вікно LTSpice (рис.2.1), у якому розташовані робоче поле, панель меню та панель інструментів. При виборі конкретного пункту на панелі меню відкривається підменю з відповідними командами. На панелі інструментів розташовані піктограми команд, які часто використовуються при створенні та редагуванні електронних схем. Для запуску будь-якої команди потрібно клікнути лівою кнопкою миші (ЛКМ) на піктограмі команди, для виключення команди -

клікнути правою кнопкою миші (ПКМ) або натиснути клавішу Esc. На панелі меню розташована вкладка Help, яка надає доступ до розгорнутого англomовного опису можливостей програми моделювання електронних схем LTSpice. У нижній частині робочого поля розташований рядок підказки (рядок статусу), де з'являються різні повідомлення при певних діях у програмі.

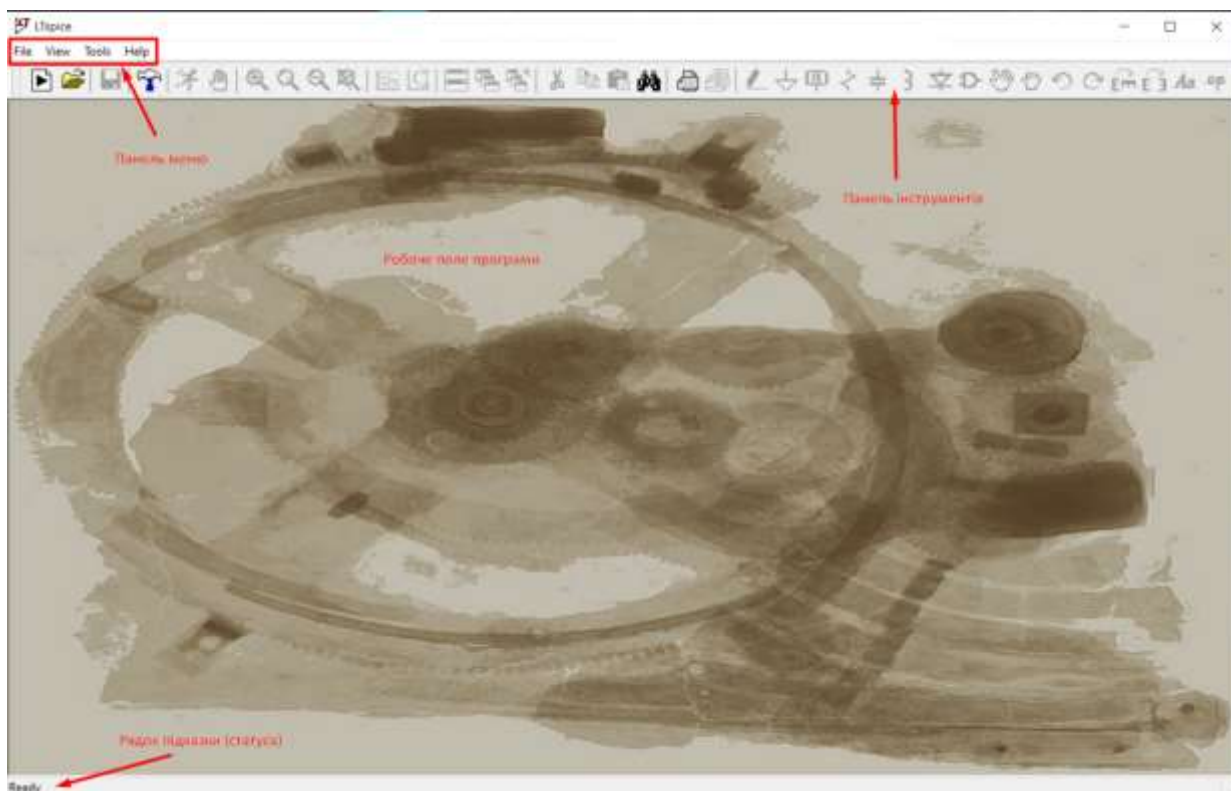


Рис.2.1. Головне вікно програми LTSpice

Для створення нової електронної схеми потрібно виконати команду **File/New Schematic** (Файл/Нова схема) або клікнути ЛКМ на піктограмі з трикутником (зліва крайня піктограма на панелі інструментів). Для редагування вже існуючої схеми (файлу з розширенням .asc) потрібно виконати команду **File/Open** (Файл/Відкрити) або клікнути ЛКМ на другій піктограмі зліва на панелі інструментів. Після виконання цих дій робоче поле стає світло-сірого кольору (це поле графічного редактора), піктограми команд на панелі інструментів стають активними, що говорить про можливість їх використання при створенні електронної схеми у графічному редакторі програми (рис.2.2). Зліва на панелі меню з'являється умовне

графічне позначення транзистора та зверху - ім'я файлу нової схеми Draft1.asc, яке програма надає автоматично. Для зміни імені файлу потрібно виконати команду **File/ Save as** (Файл/Зберегти як) та написати нове ім'я. На панелі меню з'являються додаткові пункти: **Edit** (Редагувати), **Hierarchy** (Ієрархія), **Simulate** (Симуляція), **Window** (Вікно).

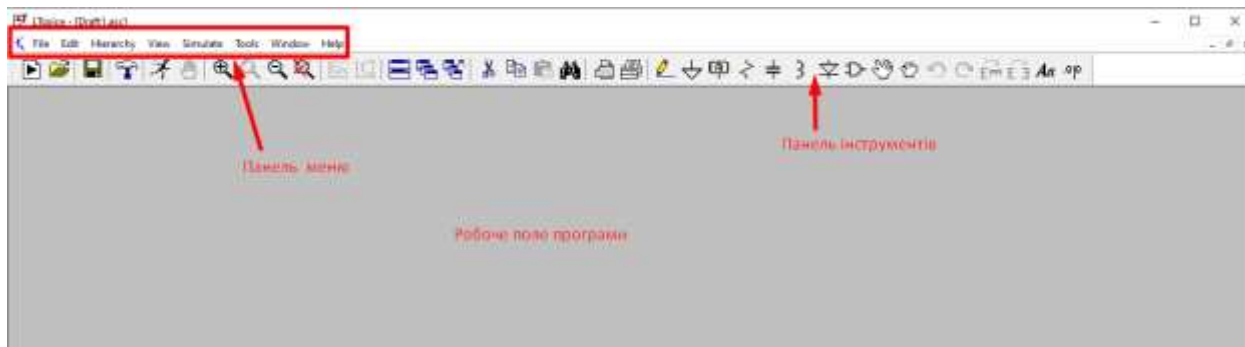


Рис.2.2. Вікно графічного редактора програми LTSpice

Перелік команд меню **File** та **Edit** показано на рис.2.3.

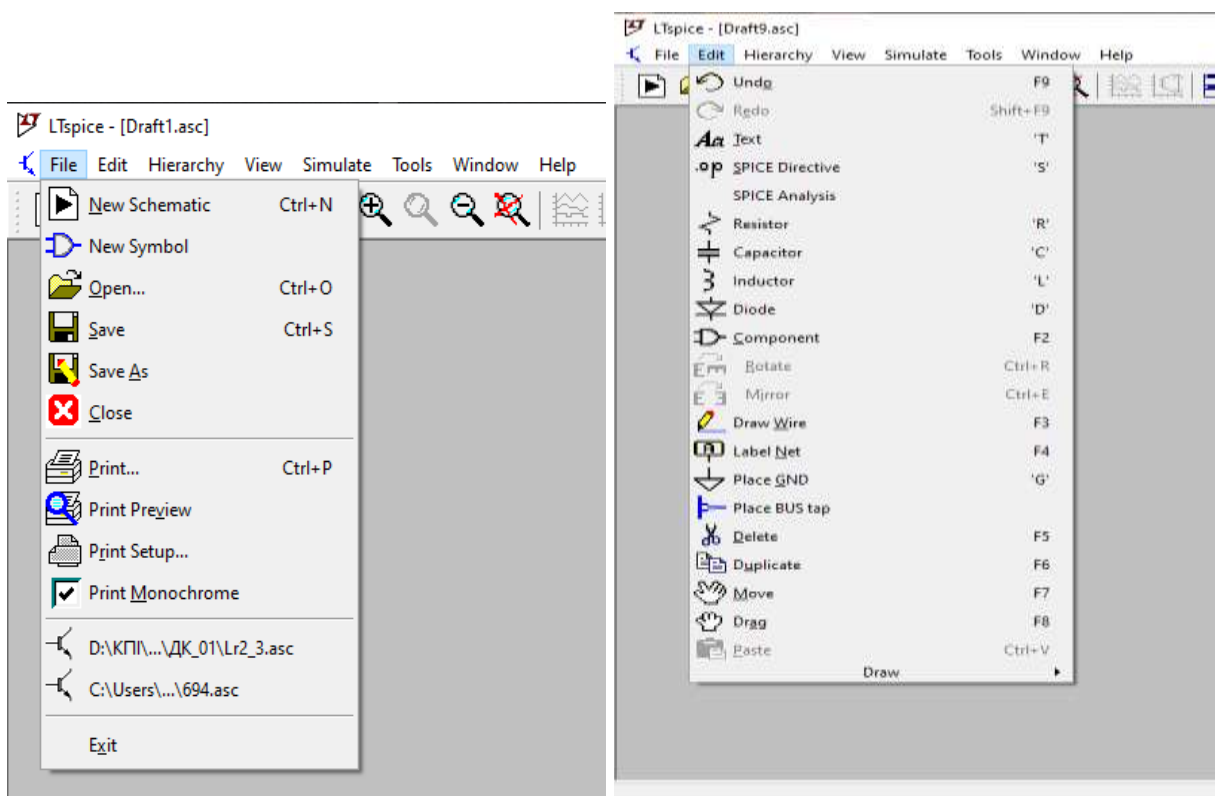


Рис. 2.3. Перелік команд меню **File** (Файл) та **Edit** (Редагувати)

В меню наведено піктограми команд, їх найменування та, так звані, “гарячі” клавіші для швидкого введення команд. Наприклад, в меню **File** - це

комбінація клавіш Ctrl+N, Ctrl+O, Ctrl+S, Ctrl+P; в меню **Edit** - клавіші F9, Shift+F9, T, S, R, C, L, D, F2, Ctrl+R, Ctrl+E, F3, F4, G, F5, F6, F7, F8, Ctrl+V.

Команди меню **File** та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

New Schematic - почати створювати нову схему;

New Symbol - почати створювати новий символ схемного компонента;

Open - відкрити існуючий файл з розширенням .asc;

Save - зберегти схему на диск комп'ютера у вигляді файлу .asc;

Save As - зберегти схему у файлі з іншим ім'ям;

Close - закрити існуючу схему;

Print - надрукувати схему, яка знаходиться у вікні графічного редактора;

Print Preview - попередньо переглянути зображення друку;

Print Setup - налаштувати режими друку;

Print Monochrome - вибрати тип друку: кольоровий чи чорно-білий;

Exit - вийти з програми.

Команди меню **Edit** та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

Undo - повернутися до попереднього стану;

Redo - повернутися до наступного стану;

Text - вставити текст у схему;

SPICE Directive - вставити текст директиви у схему;

SPICE Analysis - ввести або редагувати директиву аналізу;

Resistor - вставити резистор у схему;

Capacitor - вставити ємність у схему;

Inductor - вставити індуктивність у схему;

Diode - вставити діод у схему;

Component - вставити схемний компонент у схему з бібліотеки;

Rotate - повернути обраний компонент на 90 градусів;

Mirror - дзеркально відобразити обраний компонент;

Draw Wire - створити провідник на схемі;

Label Net - створити маркер (число або літера, символний рядок) вузла;

Place GND - створити глобальний вузол “Земля”;

Place BUS Tap - вставити графічний символ, який імітує підключення до загальної шини;

Delete - видалити обраний схемний компонент або групу компонентів;

Duplicate - копіювати обраний схемний компонент або групу компонентів;

Move - перемістити обраний схемний компонент або групу компонентів;

Paste - вставити скопійований схемний компонент;

Drag - змістити елемент або групу елементів без розриву електричних зв'язків;

Draw - намалювати графічну фігуру (пряма лінія, прямокутник, круг, дуга) на схемі.

Перелік команд меню **Hierarchy** (Ієрархія) та **View** (Вид) показано на рис.2.4.

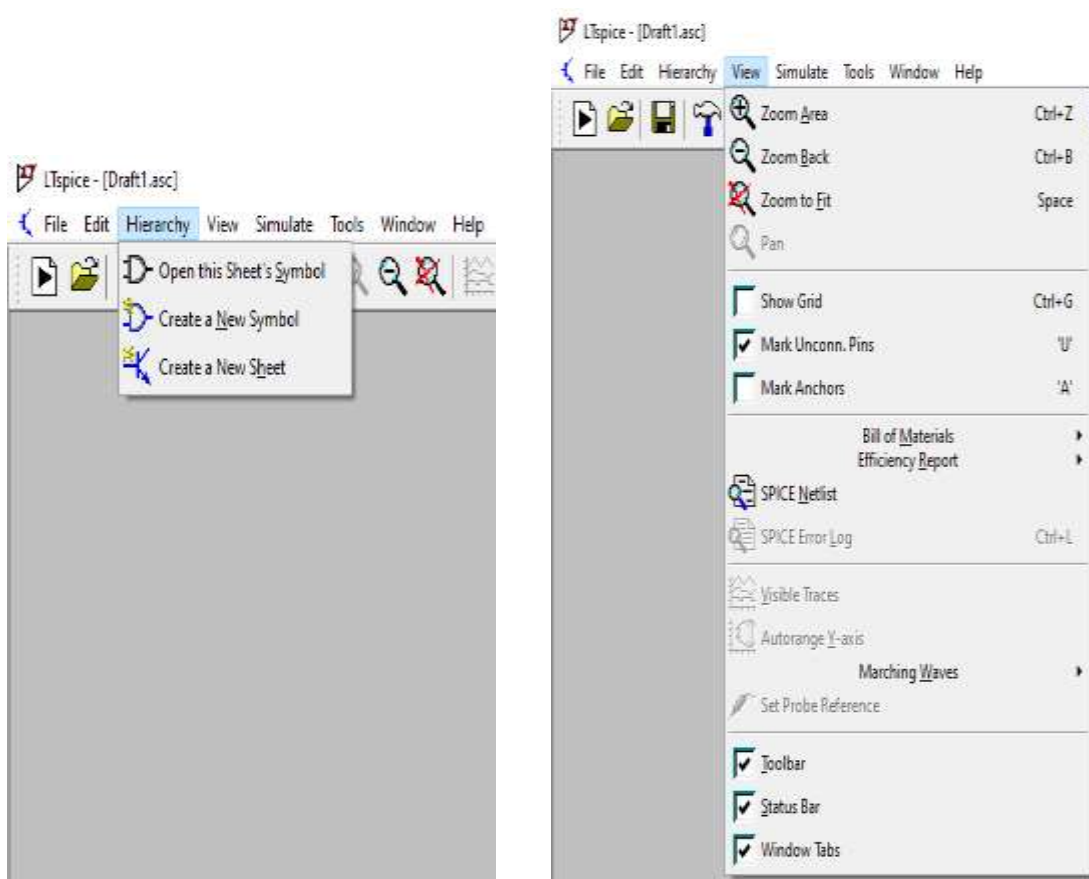


Рис. 2.4. Перелік команд меню **Hierarchy** (Ієрархія) та **View** (Вид)

Команди меню **Hierarchy** (Ієрархія) та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

Open this Sheet's Symbol - відкрити символ поточної сторінки схеми;

Create a New Symbol - створити новий символ у редакторі символів;

Create a New Sheet - відкрити нову сторінку схеми.

Команди меню **View** (Вид) та короткий опис дії команди в LTSpice:

Zoom Area - збільшити зображення схеми;

Zoom Back - зменшити зображення схеми;

Zoom to Fit - застосувати масштаб відображення схеми, при якому відбувається найкраще заповнення вікна графічного редактора схеми;

Pan - відмітити місце, яке повинно бути в центрі екрану;

Show Grid - увімкнути/вимкнути сітку у вікні графічного редактора схеми;

Mark Unconn. Pins - увімкнути/вимкнути видимість не підключених виводів схемних компонентів;

Mark Text Anchors - увімкнути/вимкнути точку прив'язки тексту;

Bill of Materials - показати перелік компонентів схеми;

SPICE Netlist - показати перелік з'єднань поточної схеми;

SPICE Error Log - показати зміст LOG-файлу;

Visible Traces - показати перелік трас вузлів та компонентів схеми;

Autorange Y-axis - автоматичне встановлення масштабу по вісі Y;

Marching Waves - показати діаграми у вікні плотера;

Set Probe Reference - вказати вузол, відносно якого будуть виконуватися вимірювання;

Toolbar - показати/прибрати панель інструментів;

Status Bar - показати/прибрати рядок підказки (рядок статусу);

Window Tabs - показати/прибрати строку з найменуваннями відкритих файлів.

Перелік команд меню **Simulate** (Моделювати) та **Tools** (Інструменти) показано на рис.2.5.

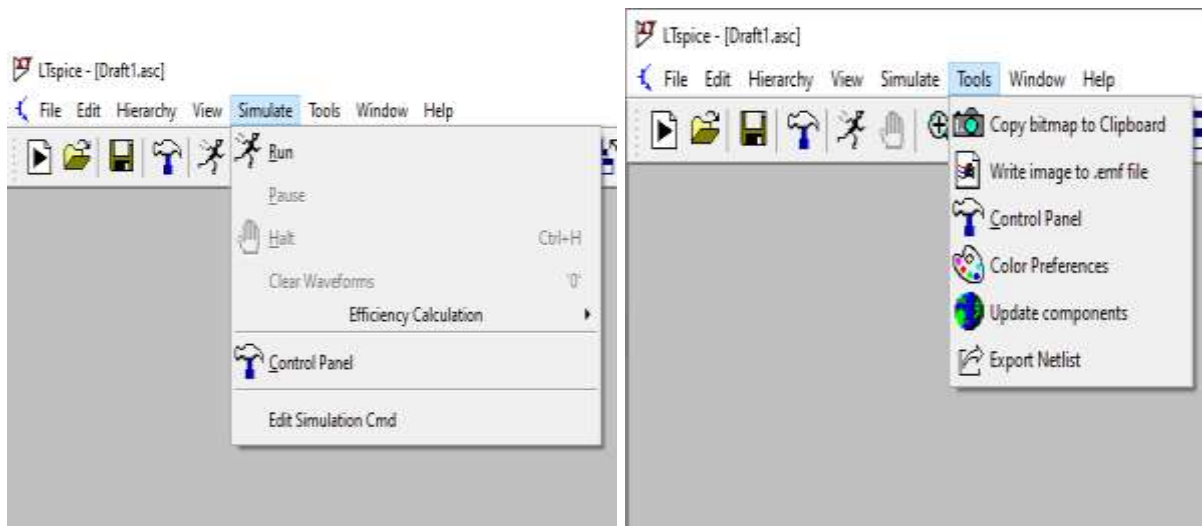


Рис. 2.5. Перелік команд меню **Simulate** (Моделювати) та **Tools** (Інструменти)

Команди меню **Simulate** (Моделювати) та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

- Run** - включити процес моделювання електронної схеми;
- Pause** - тимчасово зупинити процес моделювання схеми;
- Halt** - зупинити процес моделювання схеми;
- Clear Waveforms** - очистити діаграми;
- Efficiency Calculation** - калькулятор ефективності;
- Control Panel** - показати панель керування;
- Edit Simulation Cmd** - показати панель для редагування директив моделювання.

Команди меню **Tools** (Інструменти) та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

- Copy bitmap to Clipboard** - скопіювати зображення активного вікна програми LTSpice у буфер обміну;
- Write to a.wmf file** - записати зображення активного вікна програми LTSpice у графічний файл формату WMF;
- Control Panel** - показати панель керування;
- Color References** - встановити кольори;
- Update Components** - оновлення бази схемних компонентів;
- Export Netlist** - експортувати список зв'язків.

Перелік команд меню **Window** (Вікно) та **Help** (Допомога) показано на рис.2.6.

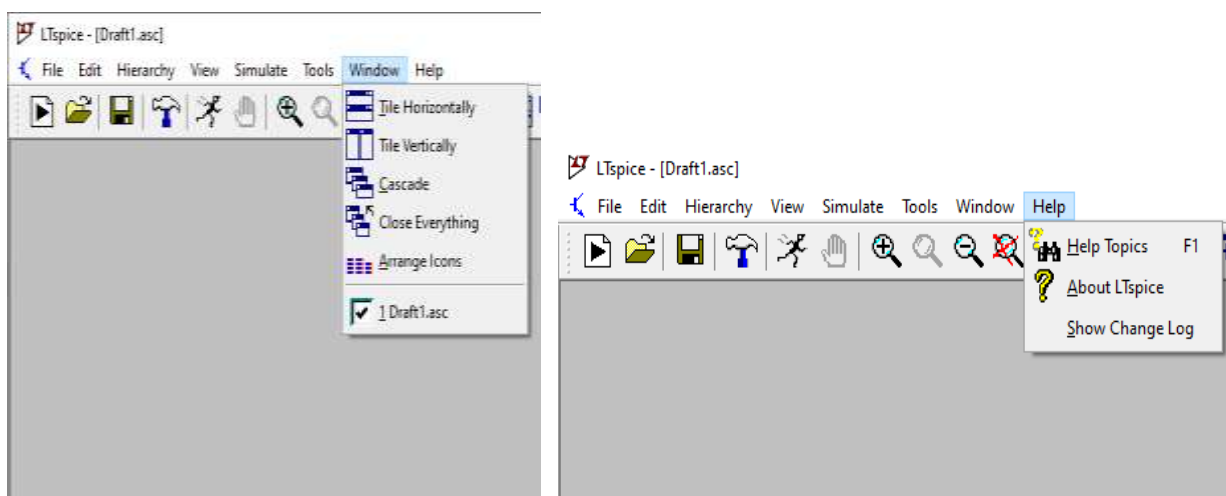


Рис. 2.6. Перелік команд меню **Window** (Вікно) та **Help** (Допомога)

Команди меню **Window** (Вікно) та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

Tile Horizontally - розташувати горизонтально;

Tile Vertically - розташувати вертикально;

Cascade - розташувати каскадом;

Close Everything - закрити всі вікна;

Arrange Icons - упорядкувати піктограми.

Команди меню **Help** (Допомога) та короткий опис дії команди у програмі LTSpice:

Help Topics - теми допомоги, опис використання програми LTSpice;

About LTSpice - інформація про програму LTSpice;

Show Change Log - показати файл ChangeLog.txt.

Список усіх гарячих клавіш для швидкого введення команд LTSpice розташовано на вкладці Keyboard Shortcut Map, доступ до якої відкривається послідовним розкриттям вікон меню: **Simulate/Control Panel/Waveforms/Keyboard Shortcuts.**

3. Графічний редактор програми LTSpice

Графічний редактор використовується для створення нових або для редагування вже існуючих схем. Розмір електронної схеми обмежується тільки ресурсами комп'ютера, на якому встановлена програма LTSpice. Програма має вбудовану бібліотеку схемних компонентів, яка нараховує близько 800 одиниць. Це резистори, конденсатори, операційні підсилювачі, компаратори, варактори, транзистори, діоди тощо. В основному LTSpice орієнтована на використання компонентів, які виробляються компанією Analog Devices Inc. (USA). Програма має у своєму складі засоби, які дозволяють при необхідності створювати нові схемні елементи та їх моделі.

Для створення нової схеми у графічному редакторі застосовують команди меню **Edit**, з яких найбільш часто використовують команди **Resistor**, **Capacitor**, **Inductor**, **Diode**, **Component**. Піктограми, які відповідають вказаним командам розташовані на панелі інструментів, що значно прискорює роботу у графічному редакторі. Для розміщення на робочому полі, наприклад, резистора, потрібно клікнути ЛКМ на піктограмі резистора, розмістити його у потрібному місці, клікнути ЛКМ для фіксації резистора на робочому полі. Автоматично з'являється новий резистор, який також можна розмістити у відповідному місці та зафіксувати кліком ЛКМ. З'являється третій резистор тощо. Для того, щоб повернути резистор у робочому полі на 90 градусів потрібно натиснути клавішу **Ctrl** і, не відпускаючи **Ctrl**, натиснути клавішу **R**. Скорочено така дія позначається наступним чином: **Ctrl+R**. Якщо вводити резистори більше не потрібно, необхідно вимкнути команду **Resistor** кліком ПКМ. Для дзеркального відображення елемента на робочому полі застосовується комбінація клавіш **Ctrl+E**. Аналогічним чином вводяться та розміщуються на робочому полі інші компоненти схеми: конденсатори, індуктивності, діоди, джерела живлення тощо. В якості прикладу розглянемо створення в LTSpice резистивної схеми з декількома джерелами живлення напруги. Спочатку

потрібно розташувати компоненти схеми на робочому полі програми (рис.3.1).

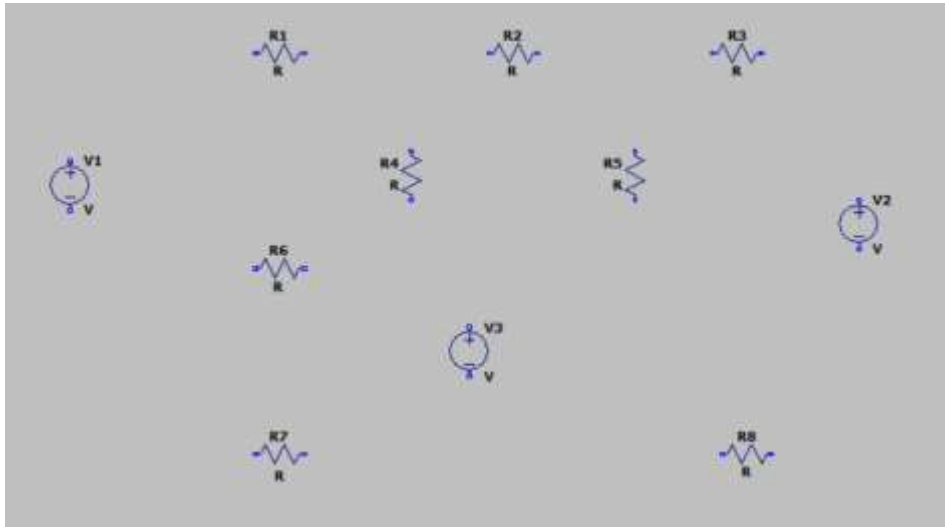


Рис.3.1. Розташування компонентів схеми на робочому полі графічного редактора LTSpice

Для вибору джерела живлення напруги потрібно натиснути клавішу **F2** або піктограму **Component** на панелі інструментів (рис.3.2). Відкривається вкладка (рис.3.3), на якій вибираємо джерело живлення Voltage кліком ЛКМ.

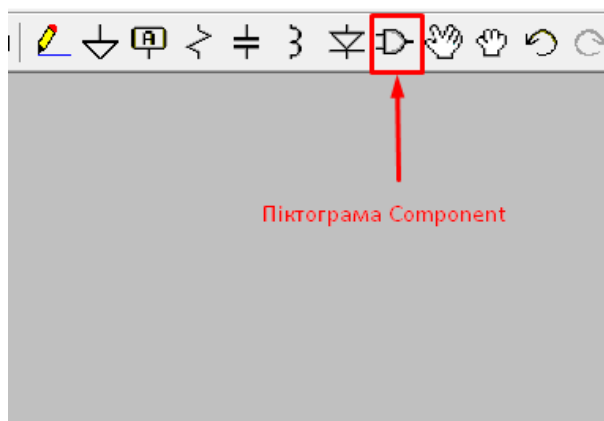


Рис. 3.2. Піктограма **Component**

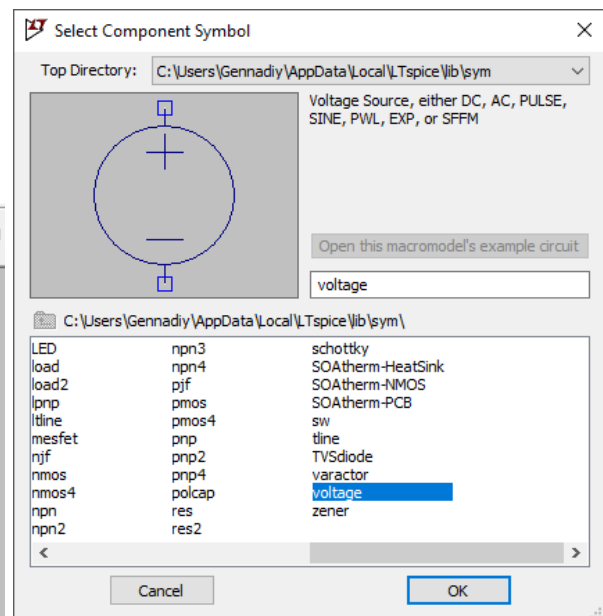


Рис. 3.3. Джерело живлення напруги

Розташовуємо джерело живлення напруги у відповідному місці робочого поля, фіксуємо положення джерела живлення кліком ЛКМ, потім

вимикаємо команду Voltage кліком ПКМ. На показаній вкладці знаходяться різноманітні компоненти електронних схем: транзистори, конденсатори, індуктивні котушки, мікросхеми, стабілітрони, варактори тощо, які обираються та використовуються в залежності від досліджуваної схеми.

Для видалення помилково введеного компонента потрібно на панелі інструментів натиснути піктограму **Cut** (зображення у вигляді ножиць) або клавішу **F5**, навести курсор на компонент та натиснути ЛКМ. Для вимикання команди **Cut** необхідно натиснути ПКМ.

Далі потрібно з'єднати компоненти схеми провідниками. Для цього достатньо клікнути ЛКМ на піктограмі **Wire** (зображення у вигляді олівця) або натиснути клавішу **F3**. На робочому полі з'являються горизонтальна та вертикальна пунктирні лінії, перехрестя яких потрібно послідовно поєднувати з контактами схемних компонентів та клікати ЛКМ. З'єднавши всі компоненти отримуємо схему. Для відключення команди **Wire** достатньо клікнути ПКЛ. До одного з вузлів створеної схеми потрібно обов'язково приєднати елемент **Ground** (Земля). Без нього моделювання схеми не буде відбуватися. Програма зафіксує помилку. Відповідна команда **Place Gnd** розташована в меню **Edit**. Можливо також використовувати цю команду через піктограму **Ground** на панелі інструментів (справа від піктограми **Wire**). Створена електрична схема показана на рис.3.4.

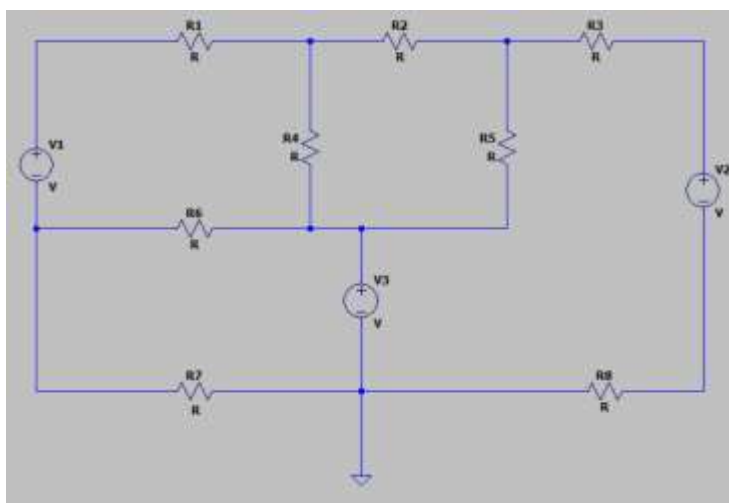


Рис.3.4. Приклад електричної схеми

Для введення номінального значення схемного компонента потрібно навести курсор на вибраний компонент та клікнути ПКМ. На робочому полі з'являється додаткове вікно (рис.3.5, рис.3.6), в якому необхідно написати номінальне значення. **При написанні десяткової дробі потрібно використовувати крапку, а не кому.** Наприклад, “1.5” - правильний запис числа в LTSpice, “1,5” - неправильний запис числа у програмі. При написанні номінального значення компонента можливе використання суфіксів (табл.3.1) для масштабування числа. Правильною є також експоненціальна форма запису. Наприклад, число 1500 можна написати у вигляді 1.5k, або 1.5e3.

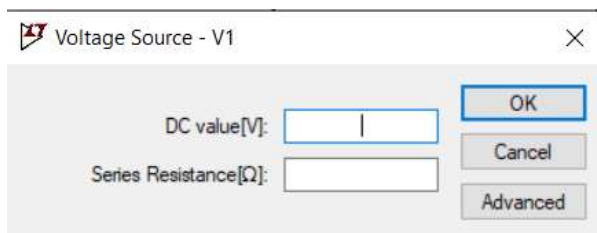


Рис.3.5 Вікно для введення значення напруги і опору джерела напруги

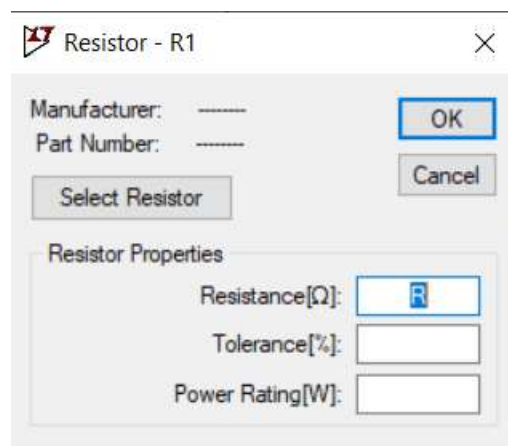


Рис.3.6. Вікно для введення значення опору резистора

Таблиця 3.1
Суфікси та масштабні коефіцієнти

Суфікс	Масштабний коефіцієнт	Експоненціальна форма	Найменування
f	10^{-15}	1e-15	Фемто
p	10^{-12}	1e-12	Піко
n	10^{-9}	1e-9	Нано
u	10^{-6}	1e-6	Мікро
m	10^{-3}	1e-3	Мілі

Суфікс	Масштабний коефіцієнт	Експоненціальна форма	Найменування
k	10^3	1e3	Кіло
meg	10^6	1e6	Мега
g	10^9	1e9	Гіга
t	10^{12}	1e12	Тера

Програма LTSpice не розрізняє великі та малі літери. Запис 1.5k еквівалентний запису 1.5K. Символи за числом, які програма не розпізнає, ігноруються. Наприклад, записи “10”, “10V”, “10H” програма сприймає як “10”. Програма сприймає як масштабний коефіцієнт, тільки перший символ після числа. Тобто, запис “0.01u” еквівалентний запису “0.01uF”.

Для зручності та наглядності наступних вимірювань промаркуємо числами від 1 до 7 усі вузли схеми. Для цього використовується спеціальна команда **Label Net** меню **Edit** або клавіша **F4**. На панелі інструментів розташована відповідна піктограма з літерою “A”. Вузол **Ground** є глобальним, має номер “0”, який програма надає автоматично. Загалом, в якості номера або маркера вузла може бути будь-який символний рядок. Якщо не виконати маркування вузлів, програма нумерує їх автоматично, але номерів на схемі не буде видно.

Схема нашого прикладу з номінальними значеннями схемних компонентів та пронумерованими вузлами показана на рис.3.7.

У табл.3.2 наведено основні команди графічного редактора програми LTSpice, призначені для розміщення, редагування, переміщення, копіювання, видалення схемних компонентів.

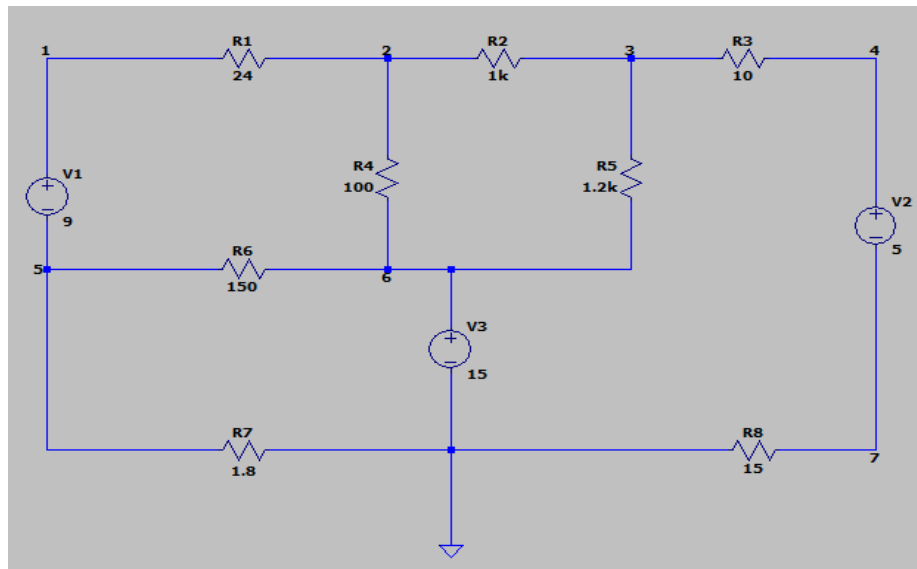


Рис.3.7. Схема з номінальними значеннями компонентів та пронумерованими вузлами

Програма моделювання LTSpice зберігає створену схему у файлі з розширенням .asc. Для збереження потрібно в меню **File** вибрати команду **Save** або **Save as**.


Таблиця 3.2

Основні команди графічного редактора програми LTSpice

Піктограма	Гаряча клавіша	Найменування, дія
	R	Resistor, розмістити резистор на схемі
	C	Capacitor, розмістити конденсатор на схемі
	L	Inductor, розмістити індуктивну котушку на схемі
	D	Diode, розмістити діод на схемі
	F2	Component, розмістити схемний компонент на схемі шляхом вибору із меню
	F7	Move, перемістити елемент або групу елементів
	F8	Drag, змістити елемент або групу елементів без розриву електричних зв'язків

Піктограма	Гаряча клавіша	Найменування, дія
	Ctrl+R	Rotate, поворот компонента на 90 градусів
	Ctrl+E	Mirror, дзеркальне відображення елемента
	F9	Undo, повернутися до попереднього стану
	Shift+F9	Redo, повернутися до наступного стану
	F5	Cut, видалити елемент або групу елементів
	F6	Copy, копіювати елемент або групу елементів
	Ctrl+F	Search, знайти елемент (після знаходження елемент виділяється жовтим кольором)
	F3	Draw Wire, створити провідник на схемі
	G	Ground, створити вузол "Земля"
	F4	Label Net, створити маркер (число або літера, символний рядок) вузла

4. Моделювання електронних схем

Після створення у робочому полі графічного редактора схеми з номінальними значеннями компонентів можна виконати її моделювання в LTSpice. Існує декілька режимів моделювання, які відображені на вкладці меню **Simulate/Edit Simulation Cmd** (рис.4.1). Доступ до цієї вкладки можна також отримати, якщо після створення схеми у графічному редакторі клікнути ЛКМ на піктограмі з зображенням людини, що біжить  на інструментальній панелі програми. Можна також клікнути ПКМ на вільному місці у робочому полі та у розкритому додатковому меню вибрати

команду **Edit Simulation Cmd**. За замовчуванням панель **Edit Simulation Cmd** відкривається з відкритою вкладкою **Transient**. В цьому режимі виконується аналіз перехідних процесів і взагалі поведінка схеми у часі після підключення джерела живлення, визначаються постійні струми (напруги) у робочій точці. Саме цей режим використовуємо при виконанні лабораторних робіт у кредитному модулі “Основи теорії кіл. Частина 1”.

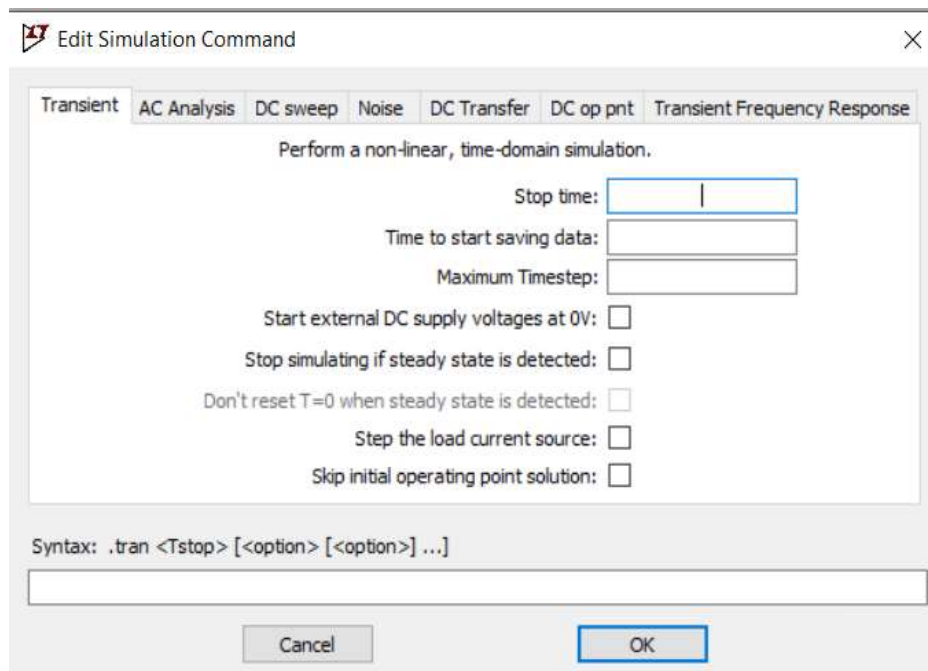



Рис.4.1. Вкладка меню **Simulate/Edit Simulation Cmd** з режимами моделювання LTSpice

На вкладці **Transient** потрібно як мінімум задати параметр “Stop time”, який визначає час закінчення аналізу у цьому режимі моделювання. Для нашої схеми можна встановити “Stop time” рівним, наприклад, 100 мілісекунд. Пам’ятаємо про суфікси (табл.3.1), правильний запис буде наступним: “100m”. Далі натиснути кнопку “ОК”. На робочому полі з’явиться напис директиви програми “.tran 100m”, який потрібно розташувати у зручному місці робочого поля та зафіксувати його кліком ЛКМ. Для запуску моделювання потрібно виконати одну із наступних дій:

клікнути ЛКМ на піктограмі  на панелі інструментів або вибрати команду **Run** в меню **Simulate** або клікнути ПКМ на вільному місці у робочому полі та у розкритому додатковому меню вибрати команду **Run**.

При відсутності помилок робочий екран буде розділено на два вікна: вікно графічного редактора зі схемою та вікно плотера (рис.4.2). Плотер призначений для графічного відображення результатів аналізу.

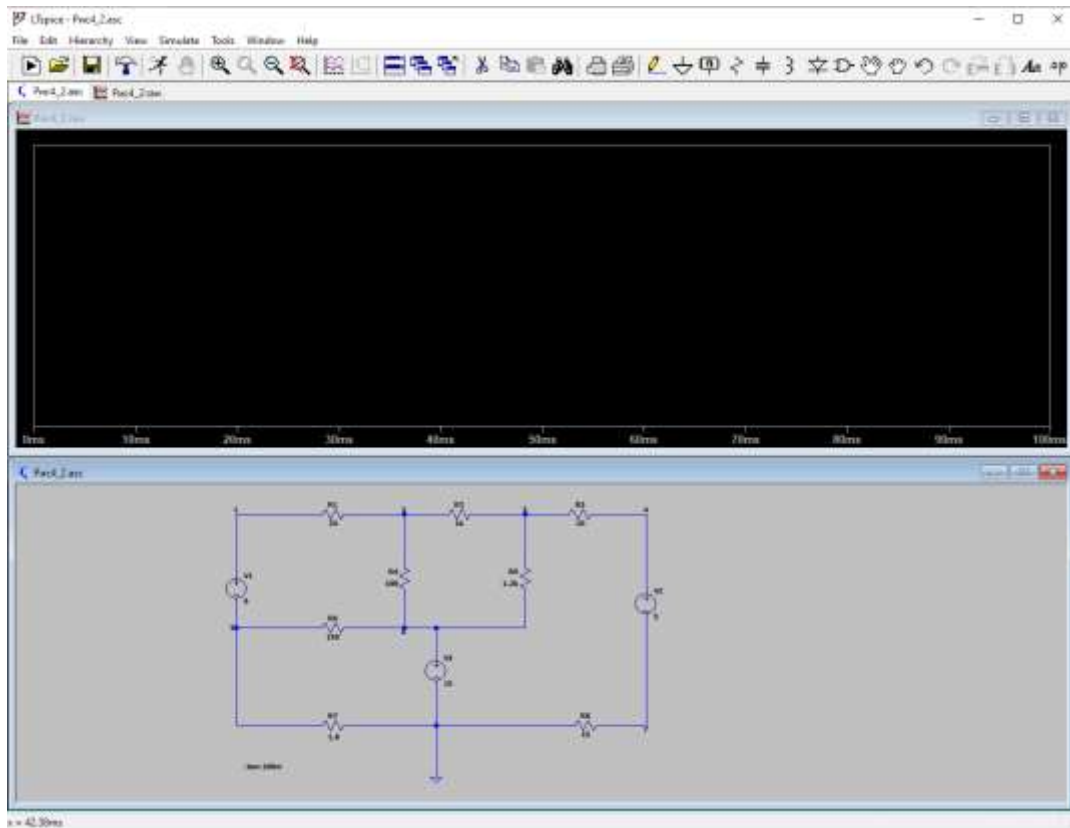


Рис.4.2. Вигляд екрану після запуску команди **Run**

Для вимірювання струму потрібно навести курсор на схемний компонент, наприклад, на R6. Вигляд курсору змінюється з перехрестя на струмові кліщі з червоною стрілкою. Напрямок стрілки показує умовний позитивний напрямок, відносно якого програма розраховує значення струму через обраний компонент схеми. Далі потрібно клікнути ЛКМ. У вікні плотера з'являється зображення струму, вертикальна шкала з одиницями виміру та відповідне маркування струму $I(R6)$. На рис.4.3 показано результати вимірювання струмів через R1, R2, R4, R6. Для визначення точного значення вимірюваного струму потрібно у вікні плотера навести курсор на маркування обраного струму. Вигляд курсору змінюється з перехрестя на долонь з вказівним пальцем, далі клікнути ЛКМ. У правому нижньому кутку екрану з'являється додаткове вікно з числовими результатами вимірювання

струму. В якості прикладу на рис.4.4 та рис.4.5 показано результати вимірювання струмів через R6, R4: $I(R6) = -98.311968 \text{ mA}$, $I(R4) = 47.302142 \text{ mA}$.

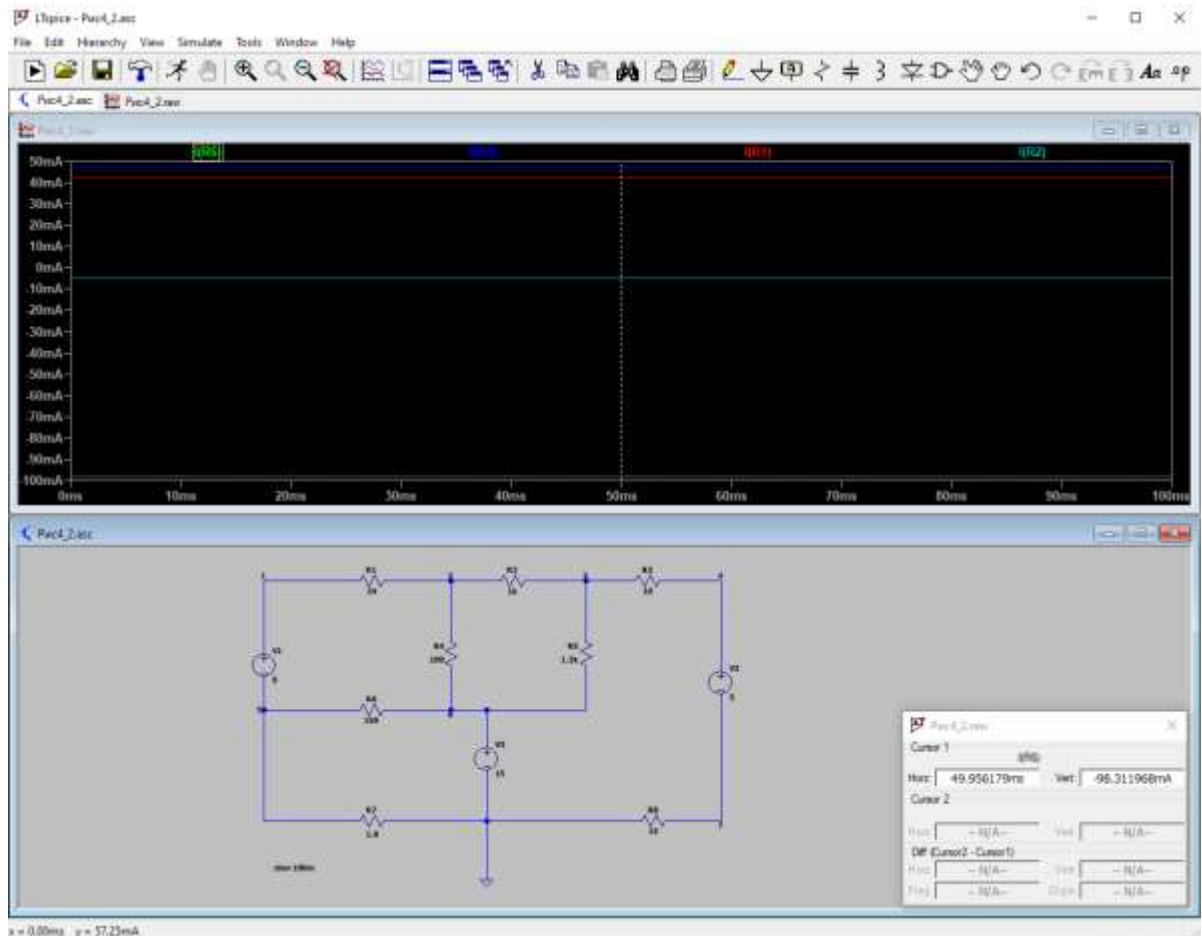


Рис.4.3. Результати вимірювання струмів через R1, R2, R4, R6

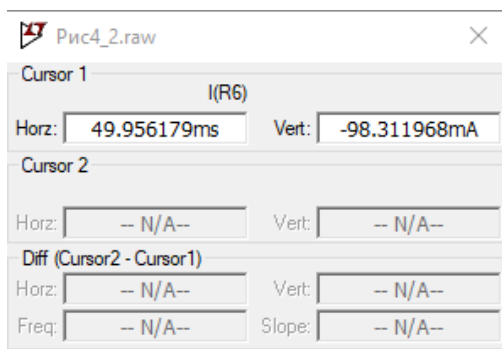


Рис.4.4. Числові результати вимірювання $I(R6)$

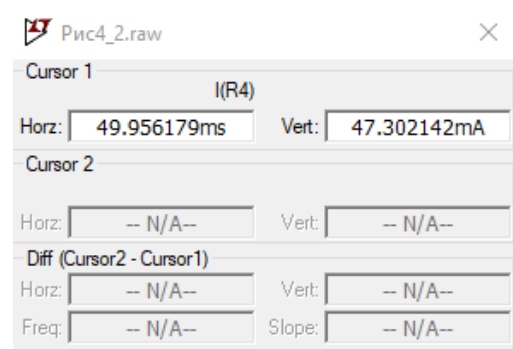


Рис.4.5. Числові результати вимірювання $I(R4)$

Для вимірювання вузлової напруги (тобто напруги, яка вимірюється відносно землі) потрібно навести курсор на обраний вузол. Перехрестя

курсору змінюється на зонд червоного кольору, далі клікнути ЛКМ. У вікні плотера з'являється зображення напруги, вертикальна шкала з одиницями виміру та відповідне маркування напруги, наприклад, V(1), V(2). Цифра у дужках означає номер або маркування вузла. Для вимірювання напруги між вузлами схеми потрібно навести курсор на один вузол схеми. Перехрестя курсору змінюється на зонд червоного кольору. Натиснути ЛКМ та, не відпускаючи ЛКМ, навести зонд на другий вузол схеми. Червоний колір зонду змінюється на чорний колір, потім відпустити ЛКМ. У вікні плотера з'являється зображення напруги та відповідне маркування напруги, наприклад, V(2,6), V(3,4). На рис.4.6 показано результати вимірювання напруг.

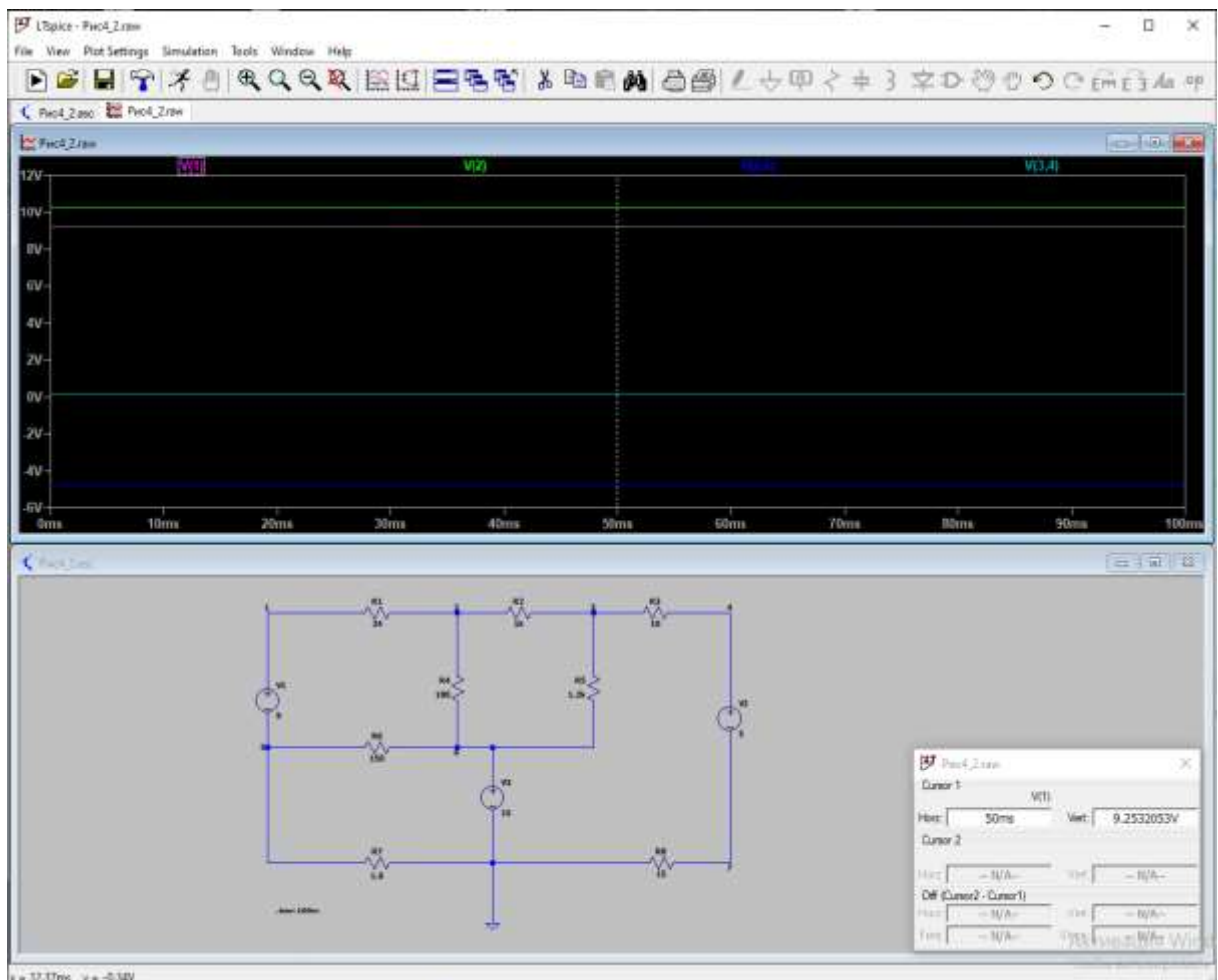


Рис.4.6. Результати вимірювання напруг

Для визначення точного значення виміряних напруг потрібно у вікні плотера навести курсор на маркування обраної напруги. Вигляд курсору

змінюється з перехрестя на долонь з вказівним пальцем, далі клікнути ЛКМ. У правому нижньому кутку екрану з'являється додаткове вікно з числовими результатами вимірювання. В якості прикладів на рис.4.7, рис.4.8, рис.4.9 та рис.4.10 показано результати вимірювання напруг: $V(1)=9.2532053\text{В}$, $V(2)=10.269786\text{В}$, $V(2,6)=-4.7302141\text{В}$, $V(3,4)=130.06973\text{мВ}$

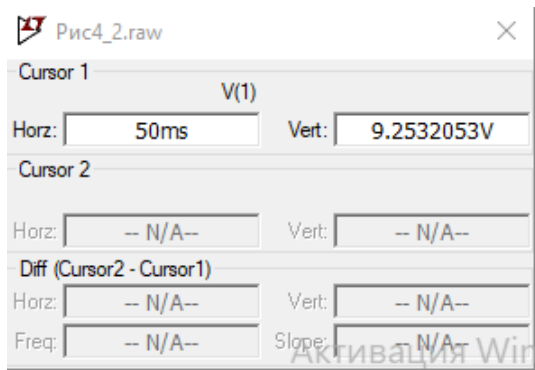


Рис.4.7. Числові результати вимірювання $V(1)$

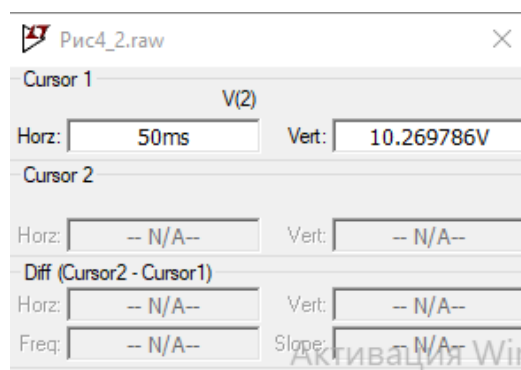


Рис.4.8. Числові результати вимірювання $V(2)$

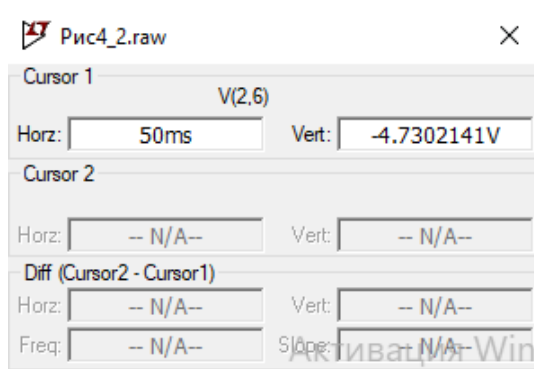


Рис.4.9. Числові результати вимірювання $V(2,6)$

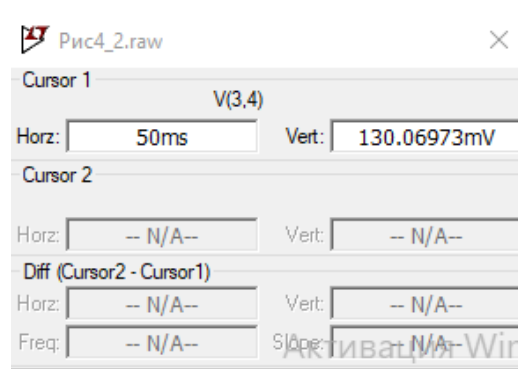


Рис.4.10. Числові результати вимірювання $V(3,4)$

У маркуванні результатів вимірювання напруг, наприклад, $V(3,4)$ перша цифра у дужках завжди означає номер вузла, до якого був приєднаний червоний зонд, друга цифра - номер вузла, до якого був приєднаний при вимірюванні зонд чорного кольору.

Програма LTSpice дозволяє визначити потужність, яка виділяється на схемному компоненті. Для цього потрібно у полі графічного редактора навести курсор на обраний елемент, наприклад R2, та натиснути клавішу Alt, курсор приймає вигляд термометра. Далі, не відпускаючи клавішу Alt, клікнути ЛКМ. У вікні плотера з'являються результати розрахунку

потужності (рис.4.11): $V(3,2)*I(R2)=24.449185\text{мВт}$. Результат додатній, резистор R2 споживає енергію.

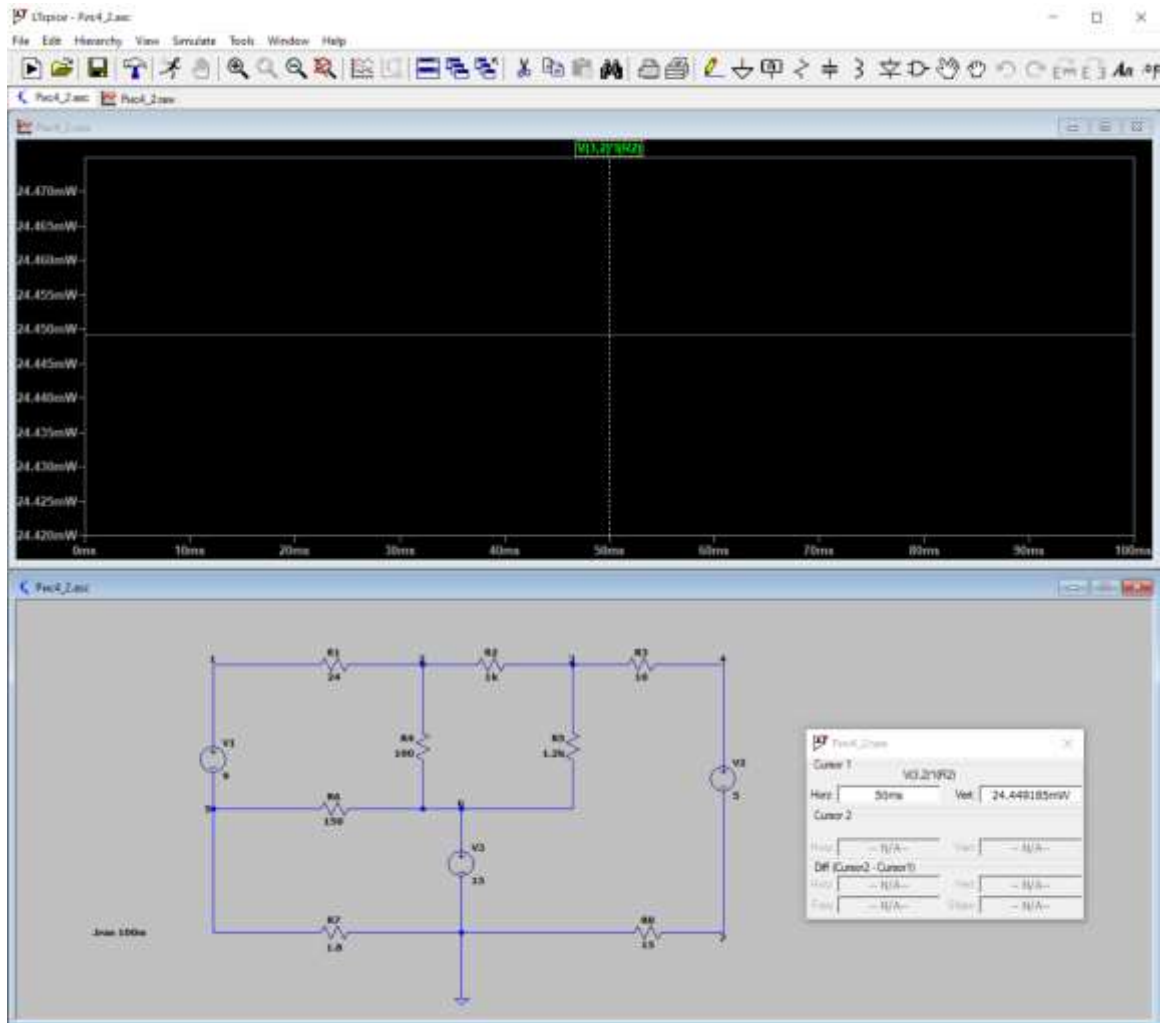


Рис.4.11. Результати вимірювання потужності на резисторі R2

В схемах з кількома джерелами живлення (наприклад, рис.4.11) потужність джерела живлення в схемі може бути і додатною і від'ємною, в залежності від того, чи генерує енергію джерело (тобто віддає її в електричне коло), чи споживає енергію. Якщо результати вимірювання потужності джерела від'ємні - джерело живлення генерує енергію і віддає її в електричне коло. Якщо результати вимірювання потужності джерела живлення додатні - джерело споживає енергію, яка існує в електричному колі. На рис.4.12 наведено результати вимірювання потужностей джерел живлення напруги V1, V2, V3 схеми на рис.4.11.



Рис.4.12. Результати вимірювання потужностей джерел живлення напруги V1, V2, V3 схеми на рис.4.11

Результати вимірювання показують, що джерело V3 генерує електричну енергію, а V1, V2 - її споживають. Для будь-якої схеми повинен виконуватися баланс потужностей: алгебраїчна сума потужностей джерел живлення дорівнює арифметичній сумі потужностей схемних компонентів, які споживають електричну енергію. Для нашого прикладу алгебраїчна сума потужностей джерел живлення дорівнює:

$$V(1,5)*I(V1)+V(4,7)*I(V2)-V(6)*I(V3)= \\ =0,381\text{Вт} + 0,065\text{Вт} - 2,305\text{Вт} = -1,859 \text{ Вт}$$

Результати вимірювання потужностей резисторів R1-R8, які споживають електричну енергію та виділяють її у вигляді тепла, наведено на рис.4.13 та рис.4.14.



Рис.4.13. Результати вимірювання потужностей R1-R4

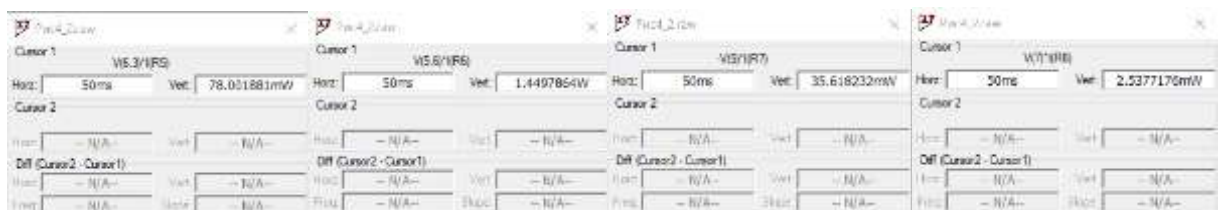


Рис.4.14. Результати вимірювання потужностей R5-R8

Сума потужностей, які споживаються резисторами R1-R8, з точністю до 0.1 мВт дорівнює:

$$43.1+24.5+1.7+223.5+78.0+1449.8+35.6+2.5=1858.7 \text{ (мВт)}=1.859\text{Вт}$$

Алгебраїчна сума потужностей джерел живлення напруги V1, V2, V3 співпадає з сумою потужностей резисторів R1-R8, що підтверджує баланс потужностей для електричного кола.

5. Трактовка результатів вимірювання

Одним із головних питань при аналізі схем на постійному струмі є визначення реального напрямку струму та напруги. Це потрібно знати при розрахунках електричної схеми, зокрема при використанні першого та другого законів Кірхгофа, принципу суперпозиції тощо.

Будемо користуватися наступними домовленостями. Реальний напрямок струму, наприклад через резистор, спрямований від вузла з більшою вузловою напругою до вузла з меншою вузловою напругою. Напрямок напруги на резисторі спрямований у протилежну сторону від напрямку струму. Тобто, від вузла з меншою вузловою напругою до вузла з більшою вузловою напругою (рис.5).

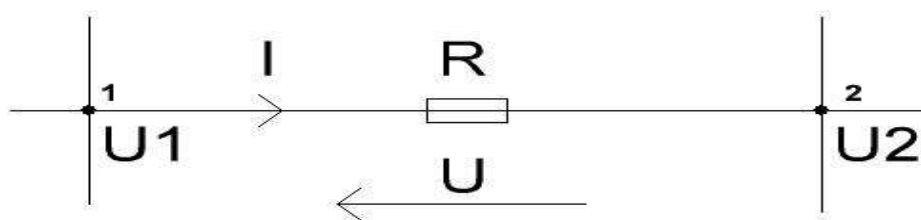


Рис.5.1. Ілюстрація домовленостей при вимірюваннях на постійному струмі:

1, 2 - номери вузлів; U1, U2 - вузлові напруги, виміряні відносно загального вузла (землі);
 $U1 > U2$

Результати вимірювання постійного струму в LTSpice трактуються наступним чином. Якщо результат вимірювання струму додатній, то

реальний напрямок струму співпадає з напрямком червоної стрілки струмових кліщів. Якщо результат вимірювання струму від'ємний, то реальний напрямок струму спрямований у протилежну сторону від напрямку червоної стрілки. Так, наприклад, при вимірюванні постійного струму через резистор R6 червона стрілка струмових кліщів була спрямована від вузла 5 до вузла 6 (рис.4.3), результат є від'ємним $I(R6) = - 98.311968\text{mA}$ (рис.4.4). Це означає, що реальний напрямок струму спрямований від вузла 6 до вузла 5. При вимірюванні постійного струму через резистор R4 червона стрілка струмових кліщів була спрямована від вузла 6 до вузла 2 (рис.4.3), результат є додатнім $I(R4) = 47.302142\text{mA}$ (рис.4.5). Це означає, що реальний напрямок струму спрямований від вузла 6 до вузла 2.

Результати вимірювання постійної напруги у вікні плотера LTSpice відображаються у вигляді $V(N1, N2)$, де N1 та N2 - номери вузлів схеми, трактуються наступним чином. Якщо результат вимірювання додатній, це означає, що вузлова напруга N1 (червоний зонд) більша за вузлову напругу N2 (чорний зонд), реальний напрямок струму прямує від вузла N1 до N2, напрямок напруги спрямований від N2 до N1. Якщо результат вимірювання напруги $V(N1, N2)$ від'ємний, це означає, що вузлова напруга N1 (червоний зонд) менша за вузлову напругу N2 (чорний зонд), реальний напрямок струму прямує від вузла N2 до N1, напрямок напруги спрямований від N1 до N2. Так, наприклад, при вимірюванні постійної напруги у схемі (рис.4.3) між вузлами 2 та 6 маємо результат (рис.4.9) $V(2,6) = - 4.7302141\text{V}$. Реальний напрямок струму прямує від вузла 6 до вузла 2, напрямок напруги спрямований від вузла 2 до вузла 6. При вимірюванні постійної напруги у схемі (рис.4.3) між вузлами 3 та 4 маємо результат (рис.4.10) $V(3,4) = 130.06973\text{mV}$. Реальний напрямок струму прямує від вузла 3 до вузла 4, напрямок напруги спрямований від вузла 4 до вузла 3.

6. Приклади застосування LTSpice для аналізу схем на постійному струмі.

6.1. Перший закон Кірхгофа. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа для вузлів 2, 3, 5 електричної схеми на рис.6.1.

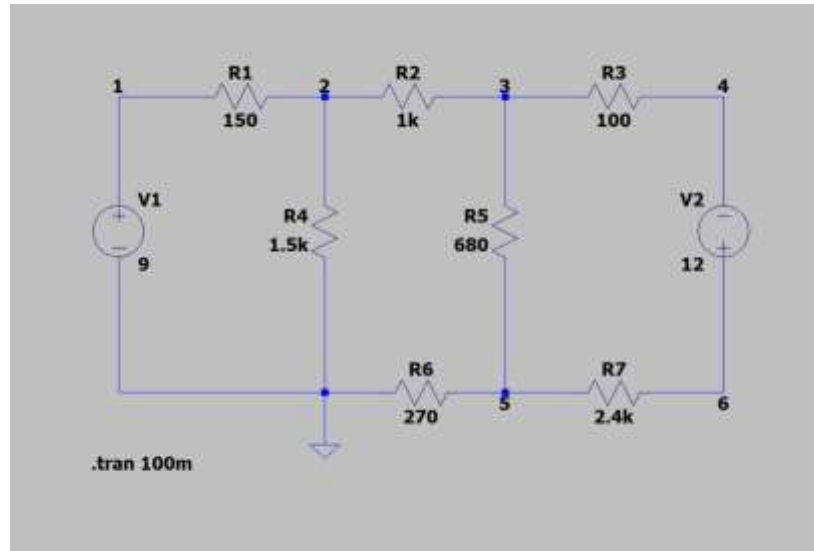


Рис.6.1. Досліджувана електрична схема

Вузол 5. Умовне зображення струмових кліщів та напрямку червоної стрілки програми (широка стрілка) при вимірюванні струмів $I(R5)$, $I(R6)$, $I(R7)$ показано на рис.6.2. Тонкі червоні стрілки на рис.6.2 показують реальний напрямок струмів (з урахуванням домовленостей з розділу 5) відповідно до результатів вимірювання струмів $I(R5)$, $I(R6)$, $I(R7)$, наведених на рис.6.3. За першим законом Кірхгофа алгебраїчна сума струмів інцидентних з обраним вузлом електричної схеми дорівнює нулю. Якщо вважати струми спрямовані від вузла, наприклад, додатними, а струми спрямовані до вузла від'ємними, рівняння нульового балансу можна записати наступним чином:

$$I(R6) - I(R5) - I(R7) = 0$$

$$5.537 \text{ mA} - 0.579 \text{ mA} - 4.958 \text{ mA} = 0$$

Числові значення струмів взято з точністю до 1 мкА (рис.6.3). Арифметичний розрахунок показує, що перший закон Кірхгофа для вузла 5 схеми рис.6.2 виконується.

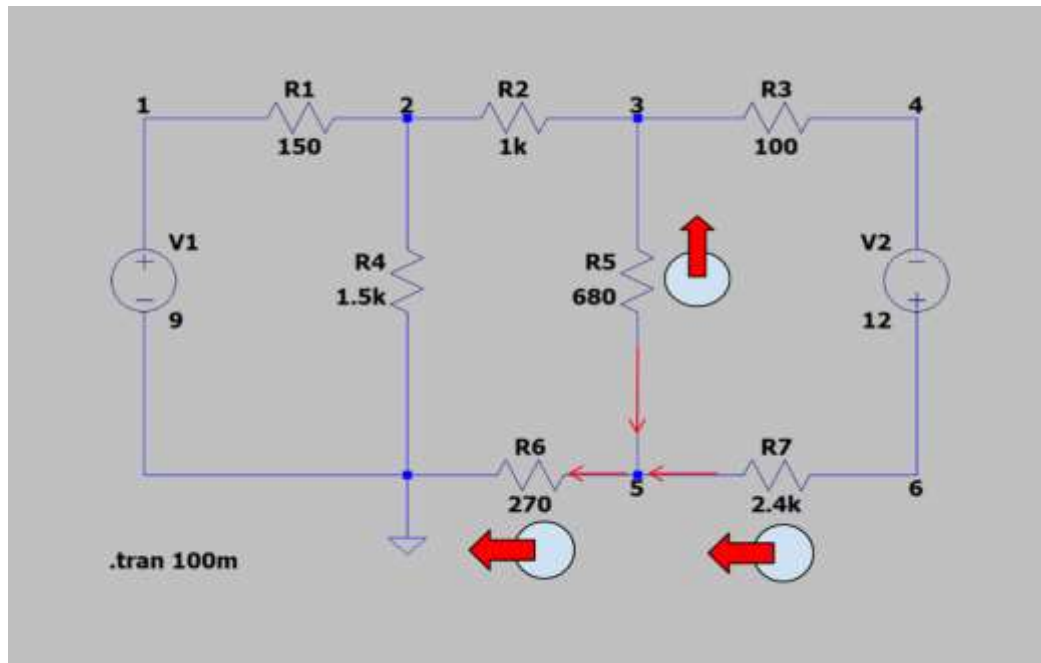


Рис.6.2. Струмові кліщі LTSpice (широкі стрілки) та реальний напрямок вимірних струмів (тонкі стрілки) $I(R5)$, $I(R6)$, $I(R7)$

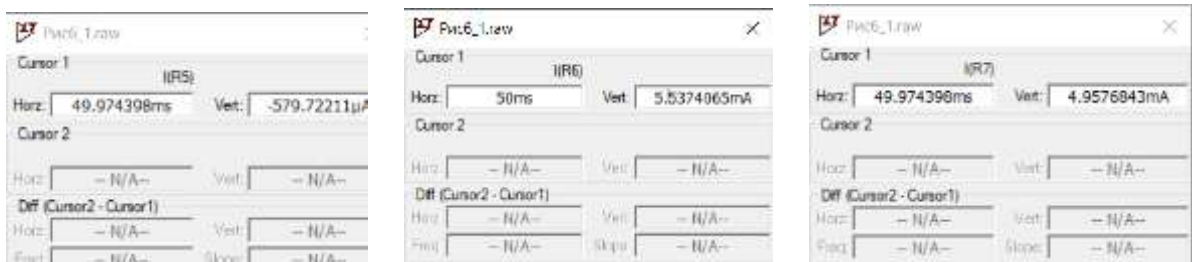


Рис.6.3. Числові значення вимірних струмів $I(R5)$, $I(R6)$, $I(R7)$

Вузол 3. Умовне зображення струмових кліщів та напрямку червоної стрілки програми (широка стрілка) при вимірюванні струмів $I(R2)$, $I(R3)$, $I(R5)$ показано на рис.6.4. Тонкі червоні стрілки на рис.6.4 показують реальний напрямок струмів (з урахуванням домовленостей з розділу 5) відповідно до результатів вимірювання струмів $I(R2)$, $I(R3)$, $I(R5)$, наведених на рис.6.5.

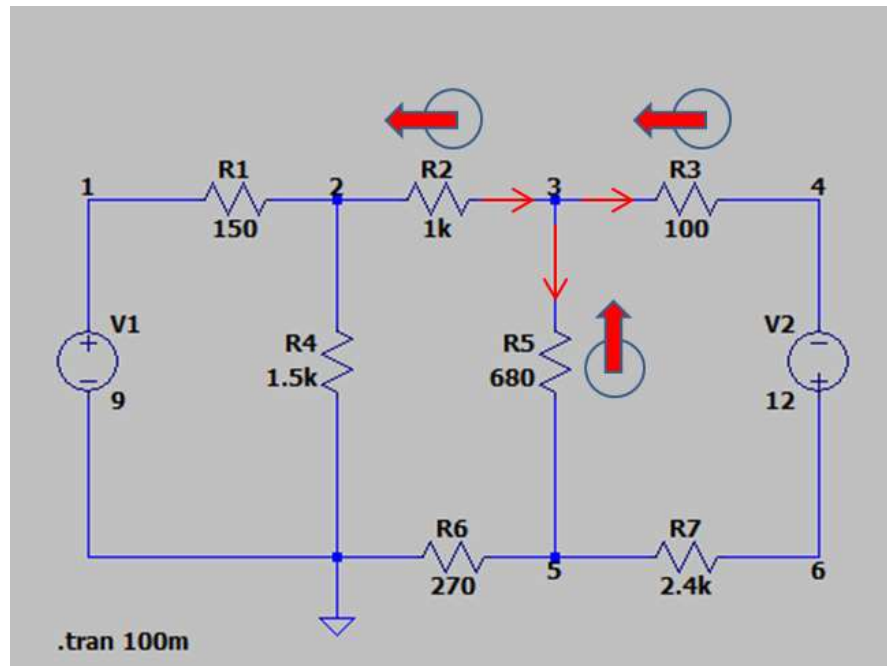


Рис.6.4. Струмові кліщі LTSpice (широкі стрілки) та реальний напрямок виміряних струмів (тонкі стрілки) $I(R2)$, $I(R3)$, $I(R5)$

За першим законом Кірхгофа алгебраїчна сума струмів інцидентних з обраним вузлом електричної схеми дорівнює нулю. Якщо вважати струми спрямовані від вузла, наприклад, додатними, а струми спрямовані до вузла від'ємними, рівняння нульового балансу можна записати наступним чином:

$$I(R3) + I(R5) - I(R2) = 0$$

$$4.958 \text{ mA} + 0.579 \text{ mA} - 5.537 \text{ mA} = 0$$

Числові значення струмів взято з точністю до 1 мкА (рис.6.5). Арифметичний розрахунок показує, що перший закон Кірхгофа для вузла 3 схеми рис.6.4 виконується.

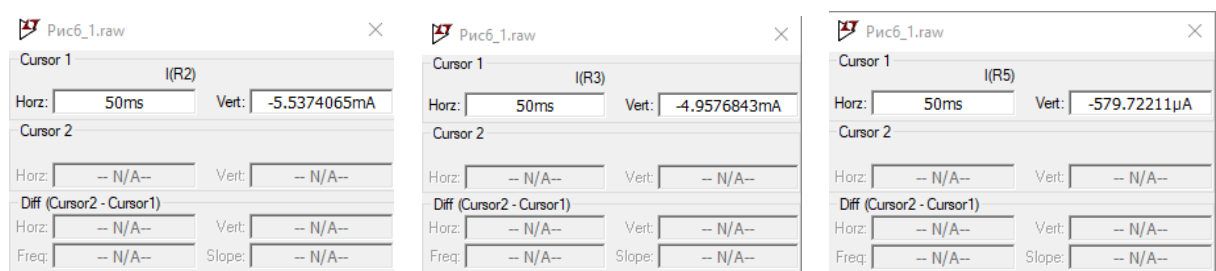


Рис.6.5. Числові значення виміряних струмів $I(R2)$, $I(R3)$, $I(R5)$

Вузол 2. Умовне зображення струмових кліщів та напрямку червоної стрілки програми (широка стрілка) при вимірюванні струмів $I(R1)$, $I(R2)$, $I(R4)$ показано на рис.6.6. Тонкі червоні стрілки на рис.6.6 показують реальний напрямок струмів (з урахуванням домовленостей з розділу 5) відповідно до результатів вимірювання струмів $I(R1)$, $I(R2)$, $I(R4)$, наведених на рис.6.7.

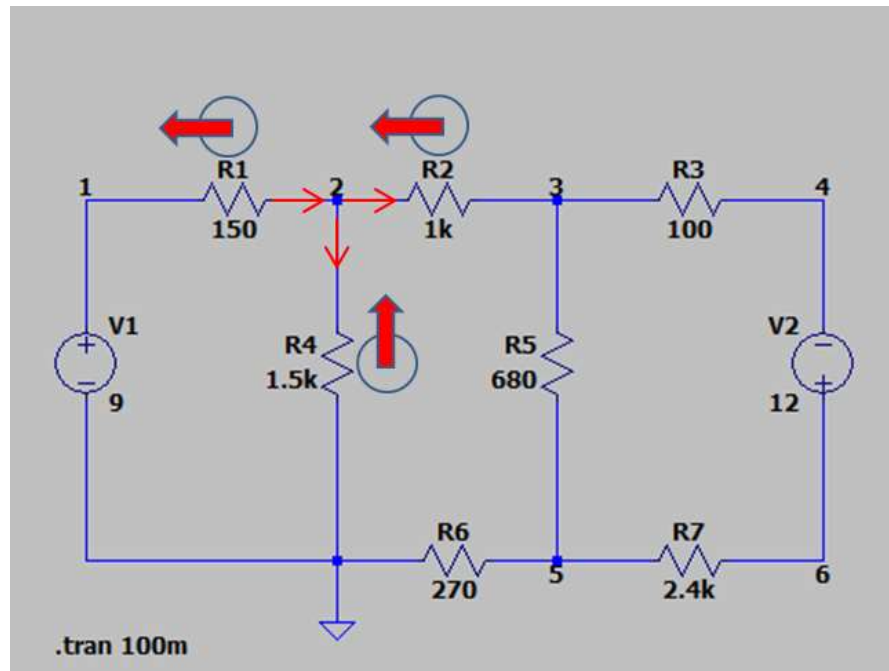


Рис.6.6. Струмові кліщі LTSpice (широкі стрілки) та реальний напрямок виміряних струмів (тонкі стрілки) $I(R1)$, $I(R2)$, $I(R4)$

За першим законом Кірхгофа алгебраїчна сума струмів інцидентних з обраним вузлом електричної схеми дорівнює нулю. Якщо вважати струми спрямовані від вузла, наприклад, додатними, а струми спрямовані до вузла від'ємними, рівняння нульового балансу можна записати наступним чином:

$$I(R2) + I(R4) - I(R1) = 0$$

$$5.537 \text{ мА} + 4.951 \text{ мА} - 10.488 \text{ мА} = 0$$

Числові значення струмів взято з точністю до 1 мкА (рис.6.7). Арифметичний розрахунок показує, що перший закон Кірхгофа для вузла 2 схеми рис.6.6 виконується.

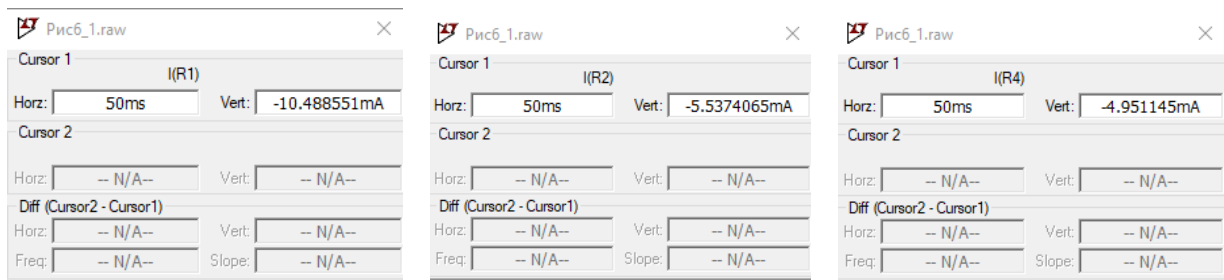


Рис.6.7. Числові значення вимірних струмів I(R1), I(R2), I(R4)

6.2. Другий закон Кірхгофа. Перевірити виконання другого закону Кірхгофа для будь-яких чотирьох контурів схеми на рис.6.8.

Контур V1, R1, R2, R3, V2, R7, R6. Другий закон Кірхгофа перевіряється шляхом вимірювання відповідних напруг на резисторах обраного контуру. Напрямки напруг (з урахуванням домовленостей з розділу 5), напрямок обходу контуру (як приклад, за годинниковою стрілкою) показано на рис.6.8.

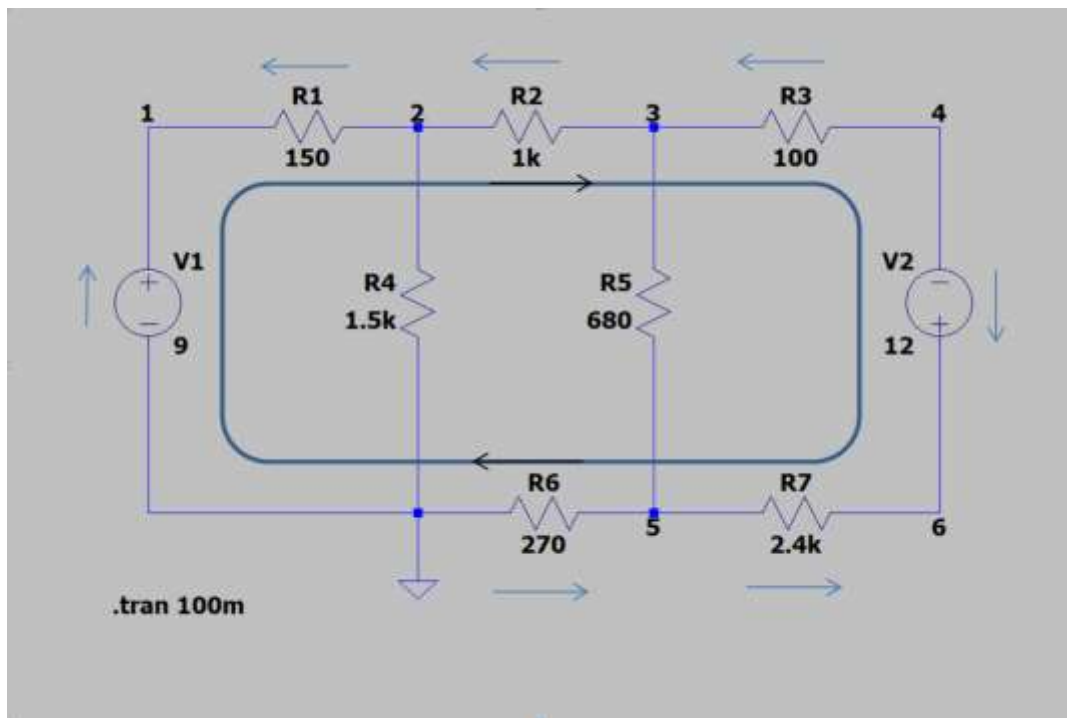


Рис.6.8. Напрямки вимірних напруг (сині стрілки) та напрямок обходу контуру (чорні стрілки)

Числові результати вимірних напруг наведено на рис.6.9 та рис.6.10.

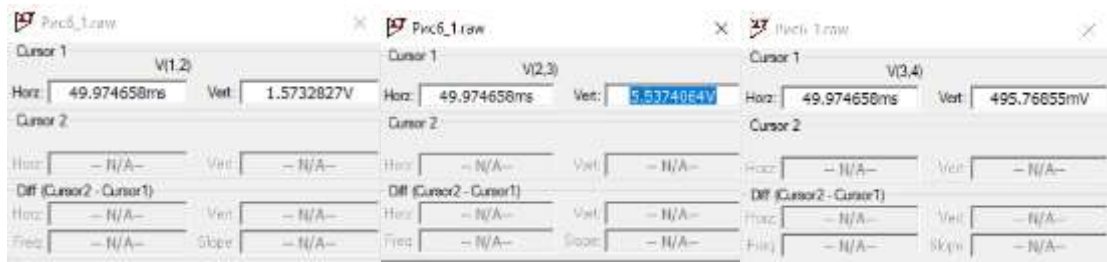


Рис.6.9. Числові значення вимірних напруг на R1, R2, R3

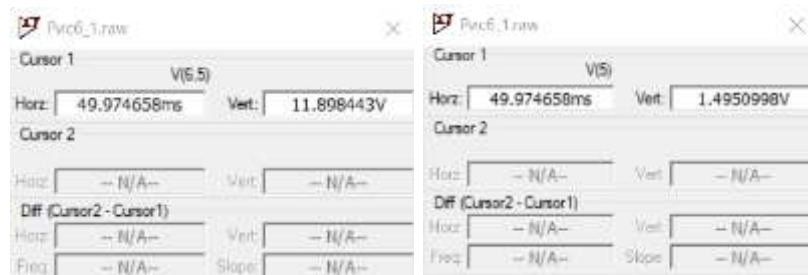


Рис.6.10. Числові значення вимірних напруг на R7, R6

За другим законом Кірхгофа алгебраїчна сума діючих електрорушійних сил (ЕРС) у замкненому контурі дорівнює алгебраїчній сумі напруг на схемних компонентах цього контуру. Для нашого прикладу рівняння має вигляд:

$$V1 + V2 = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3} + U_{R7} + U_{R6}$$

$$V1 + V2 = V(1,2) + V(2, 3) + V(3, 4) + V(6,5) + V(5)$$

або у вигляді рівняння нульового балансу:

$$V1 + V2 - V(1,2) - V(2, 3) - V(3, 4) - V(6,5) - V(5) = 0$$

Існує правило: якщо напрямок обходу контуру співпадає з напрямком ЕРС (напрямок ЕРС - від мінуса до плюса джерела живлення), то у рівнянні нульового балансу їх беруть із знаком плюс, в іншому випадку - із знаком мінус. Якщо напрямок обходу контуру співпадає з напрямком напруги на резисторах, то у рівнянні нульового балансу їх беруть із знаком плюс, в іншому випадку - із знаком мінус. Рівняння з числами має вигляд (значення беремо з точністю до 1 мВ):

$$9В + 12В - 1.573В - 5.537В - 0.496В - 11.899В - 1.495В = 0$$

Арифметичний розрахунок показує, що другий закон Кірхгофа для обраного контуру виконується.

Контур R4, R2, R5, R6 (рис.6.11). Для цього контуру рівняння нульового балансу має вигляд:

$$U_{R4} - U_{R2} - U_{R5} - U_{R6} = 0$$

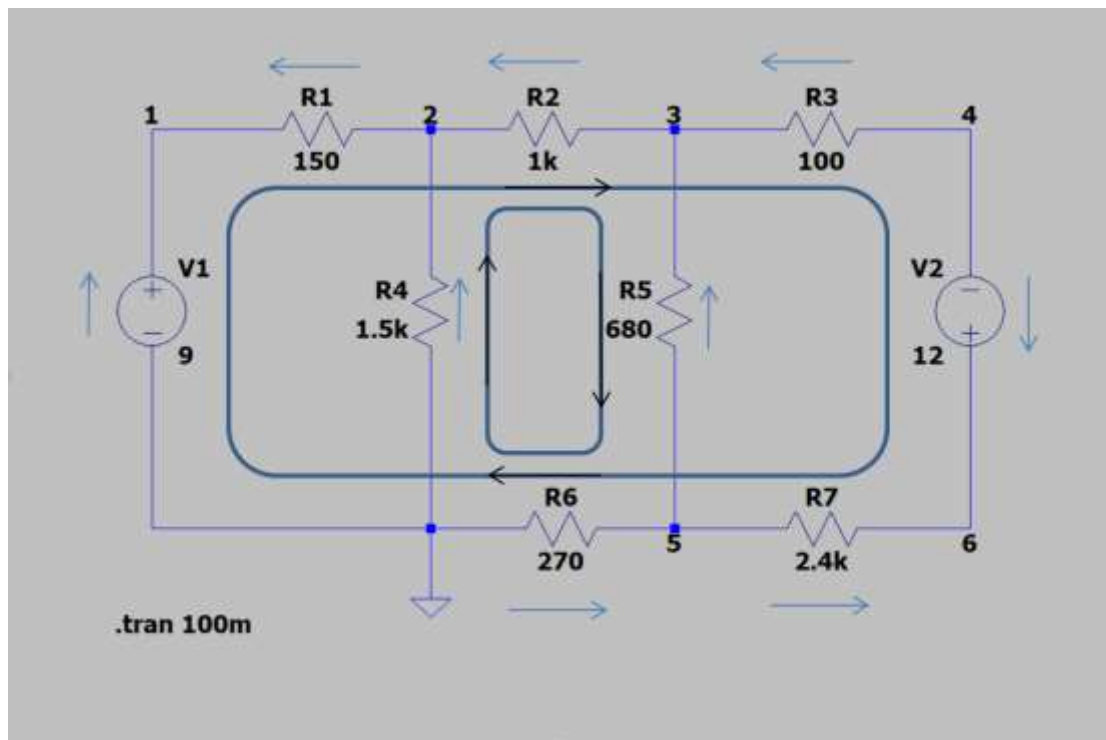


Рис.6.11. Напрямки вимірюваних напруг (сині стрілки) для контуру R2, R5, R6, R4 та напрямок обходу контуру (чорні стрілки)

Числові результати вимірювання напруг на R4, R2, R5, R6 наведено на рис.6.12.



Рис.6.12. Числові результати вимірювання напруг на R4, R2, R5, R6

Рівняння нульового балансу з числовими значеннями напруг для контуру R4, R2, R5, R6:

$$U_{R4} - U_{R2} - U_{R5} - U_{R6} = 0$$

$$V(2) - V(2,3) - V(3,5) - V(5) = 0$$

$$7.426\text{В} - 5.537\text{В} - 0.394\text{В} - 1.495\text{В} = 0$$

Арифметичний розрахунок показує, що другий закон Кірхгофа для контуру R4, R2, R5, R6 виконується.

Контур R3, V2, R7, R5 (рис.6.13). Другий закон Кірхгофа перевіряється шляхом вимірювання відповідних напруг на резисторах обраного контуру. Напрямки напруг (з урахуванням домовленостей з розділу 5), напрямок обходу контуру (як приклад, за годинниковою стрілкою) показано на рис.6.13.

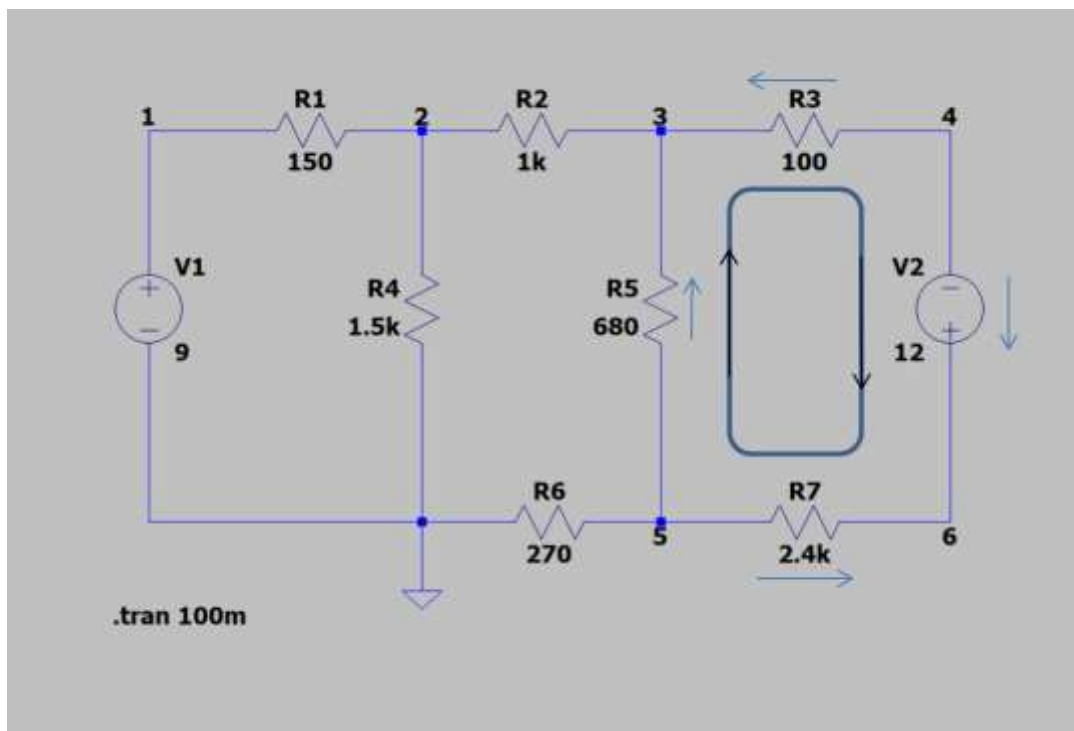


Рис.6.13. Напрямки вимірних напруг (сині стрілки) для контуру R3, V2, R7, R5 та напрямок обходу контуру (чорні стрілки)

Числові результати вимірювання напруг на R3, R7, R5 наведено на рис.6.14.



Рис.6.14. Числові результати вимірювання напруг на R3, R7 та R5

Рівняння нульового балансу з числовими значеннями напруг для контуру R3, V2, R7, R5:

$$V2 - U_{R7} + U_{R5} - U_{R3} = 0$$

$$V(2) - V(6,5) + V(3,5) - V(3,4) = 0$$

$$12\text{В} - 11,898\text{В} + 0,394\text{В} - 0,496\text{В} = 0$$

Арифметичний розрахунок показує, що другий закон Кірхгофа для обраного контуру виконується.

Контур V1, R1, R4 (рис.6.15). Другий закон Кірхгофа перевіряється шляхом вимірювання відповідних напруг на резисторах обраного контуру. Напрямки напруг (з урахуванням домовленостей з розділу 5), напрямок обходу контуру (як приклад, за годинниковою стрілкою) показано на рис.6.15.

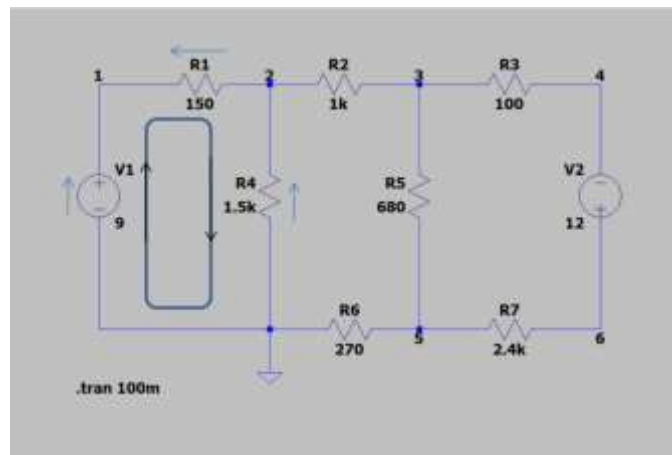


Рис.6.15. Напрямки вимірних напруг (сині стрілки) для контуру V1, R1, R4 та напрямок обходу контуру (чорні стрілки)

Числові результати вимірювання напруг на R1, R4 наведено на рис.6.16.

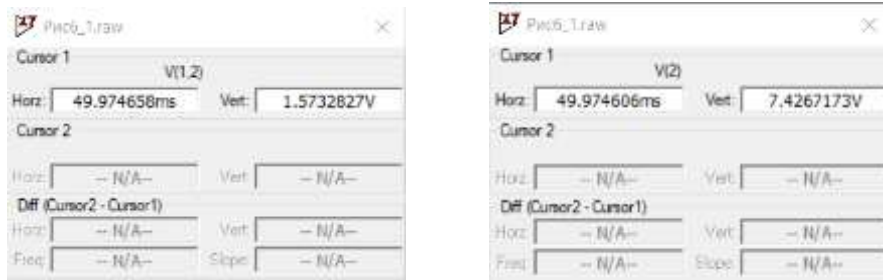


Рис.6.16. Числові результати вимірювання напруг на R1 та R4

Рівняння нульового балансу з числовими значеннями напруг для контуру V1, R1, R4:

$$V1 - U_{R1} - U_{R4} = 0$$

$$V1 - V(1,2) - V(2) = 0$$

$$9\text{В} - 1,573\text{В} - 7,427\text{В} = 0$$

Арифметичний розрахунок показує, що другий закон Кірхгофа для обраного контуру виконується.

6.3. Принцип суперпозиції. Перевірка виконання принципу суперпозиції на резисторі R4 електричної схеми рис.6.17.

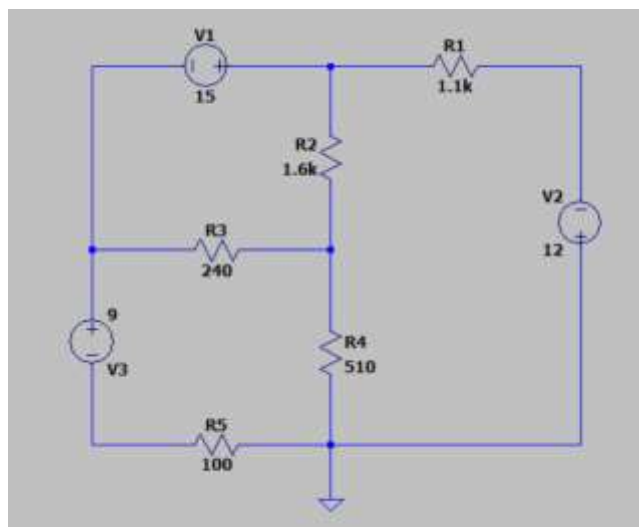


Рис.6.17. Досліджувана схема

Відповідно до принципу суперпозиції для лінійної електричної схеми з декількома джерелами живлення струм (напруга) будь-якого схемного компонента дорівнює алгебраїчній сумі часткових струмів (напруг), кожен з яких визначається впливом лише одного джерела живлення та відключенням решти. При цьому, при відключенні джерела напруги на його місці залишається короткозамкнений дріт з нульовим опором, при відключенні джерела струму - залишається розрив електричного кола.

Виконаємо перше вимірювання, коли у схемі залишається джерело живлення $V1=15V$, а два інших джерела напруги $V2=12V$, $V3=9V$ вилучаються зі схеми. На місці $V2$, $V3$ залишаються короткозамкнені дроти з нульовим опором. Результати вимірювання першого часткового струму $I(R4)_1 = 0.872 \text{ mA}$ та його реальний напрямок (тонка червона стрілка) наведено на рис.6.18. Струмові кліщі програми умовно показані широкою червоною стрілкою. Значення струму взято з точністю до 1 мікроампера.

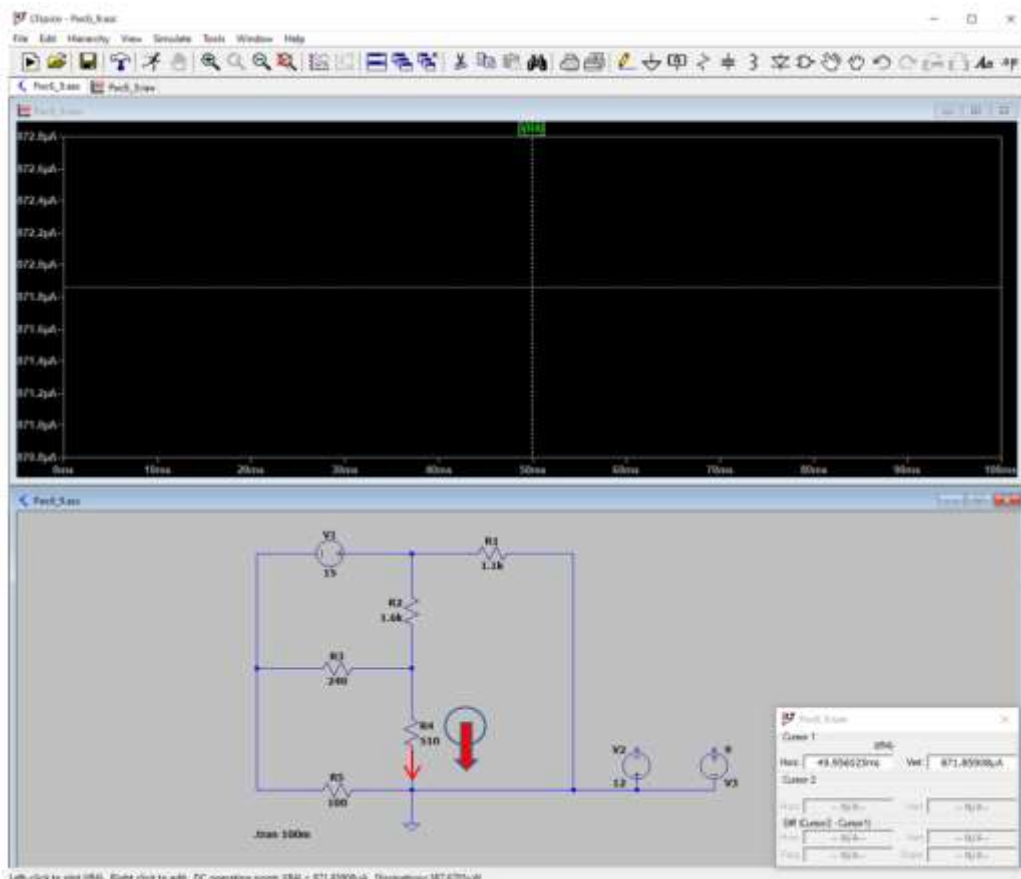


Рис.6.18. Результати вимірювання струму $I(R4)_1$

Виконаємо друге вимірювання, коли у схемі залишається джерело живлення $V_2=12\text{В}$, а два інших джерела напруги $V_1=15\text{В}$, $V_3=9\text{В}$ вилучаються зі схеми. На місці V_1 , V_3 залишаються короткозамкнені дроти з нульовим опором. Результати вимірювання другого часткового струму $I(R_4)_2= 1.234 \text{ мА}$ та його реальний напрямок (тонка червона стрілка) наведено на рис.6.19.

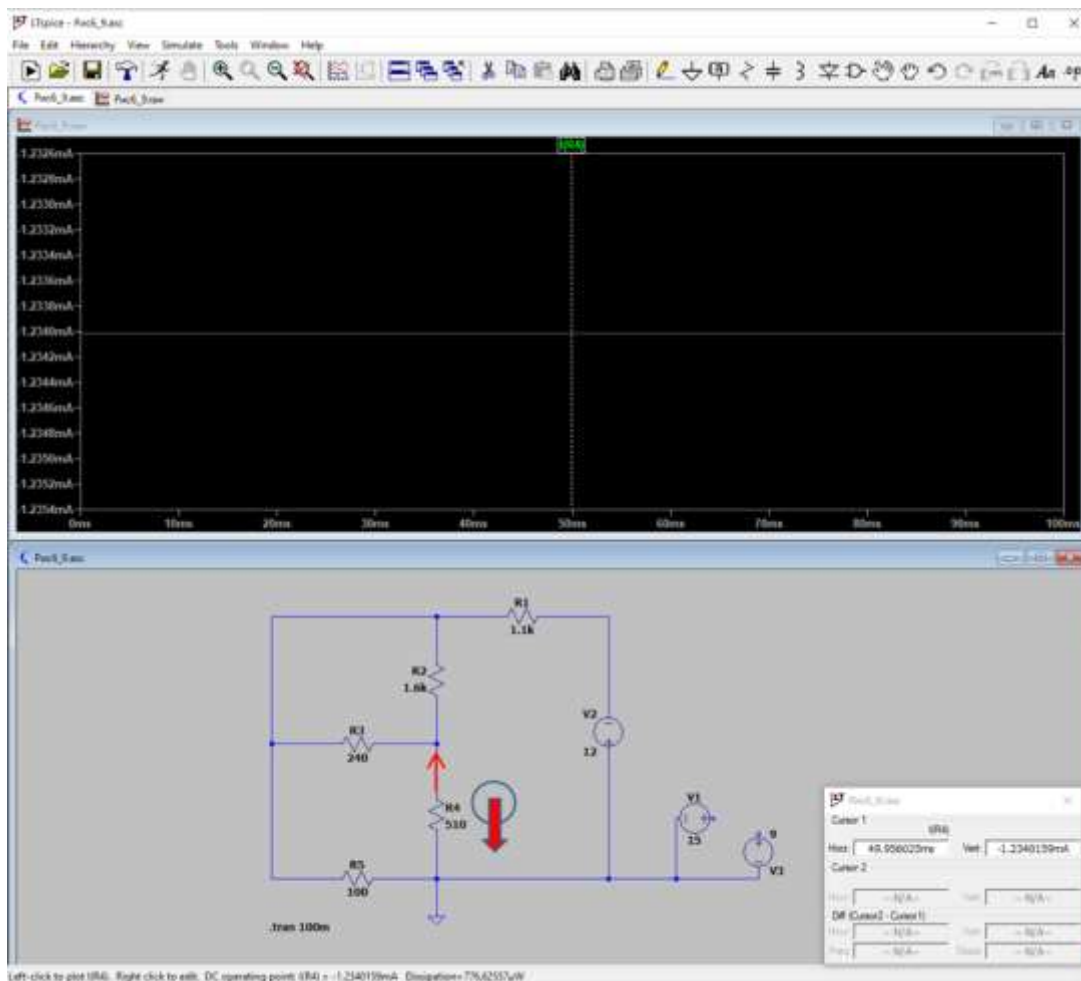


Рис.6.19. Результати вимірювання струму $I(R_4)_2$

Виконаємо третє вимірювання, коли у схемі залишається джерело живлення $V_3=9\text{В}$, а два інших джерела напруги $V_1=15\text{В}$, $V_2=12\text{В}$ вилучаються зі схеми. На місці V_1 , V_2 залишаються короткозамкнені дроти з нульовим опором. Результати вимірювання третього часткового струму $I(R_4)_3= 10.181 \text{ мА}$ та його реальний напрямок (тонка червона стрілка) наведено на рис.6.20.

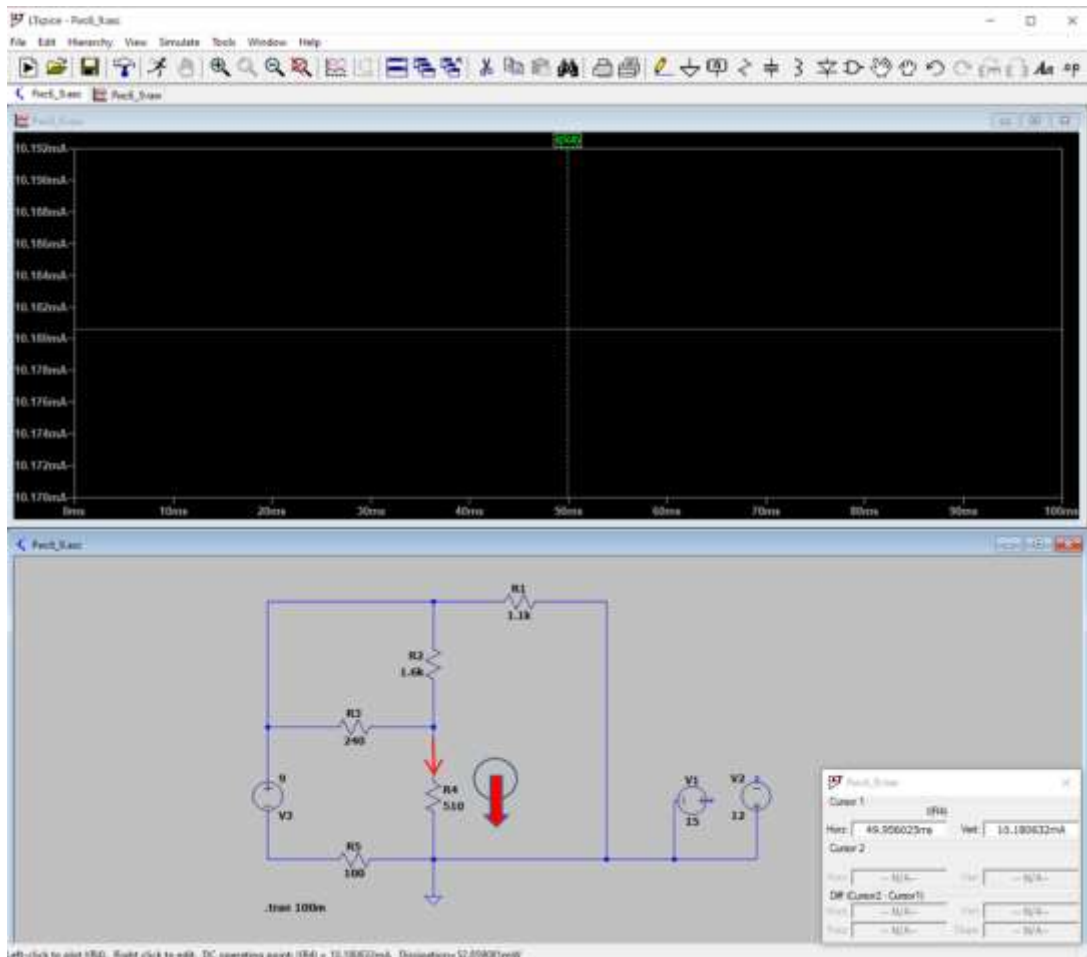


Рис.6.20. Результати вимірювання струму $I(R4)_3$

Сумарний струм за результатами трьох вимірювань з урахуванням реальних напрямків часткових струмів дорівнює:

$$I(R4) = I(R4)_1 - I(R4)_2 + I(R4)_3$$

$$I(R4) = 0.872 \text{ mA} - 1.234 \text{ mA} + 10.181 \text{ mA} = 9.819 \text{ mA}$$

Для перевірки виконаємо вимірювання струму $I(R4)$, коли всі джерела напруги V1, V2, V3 підключені до електричного кола. Результати вимірювання струму $I(R4) = 9.819 \text{ mA}$ та його реальний напрямок (тонка червона стрілка) наведено на рис.6.21. Значення струму взято з точністю до 1 мікроампера.

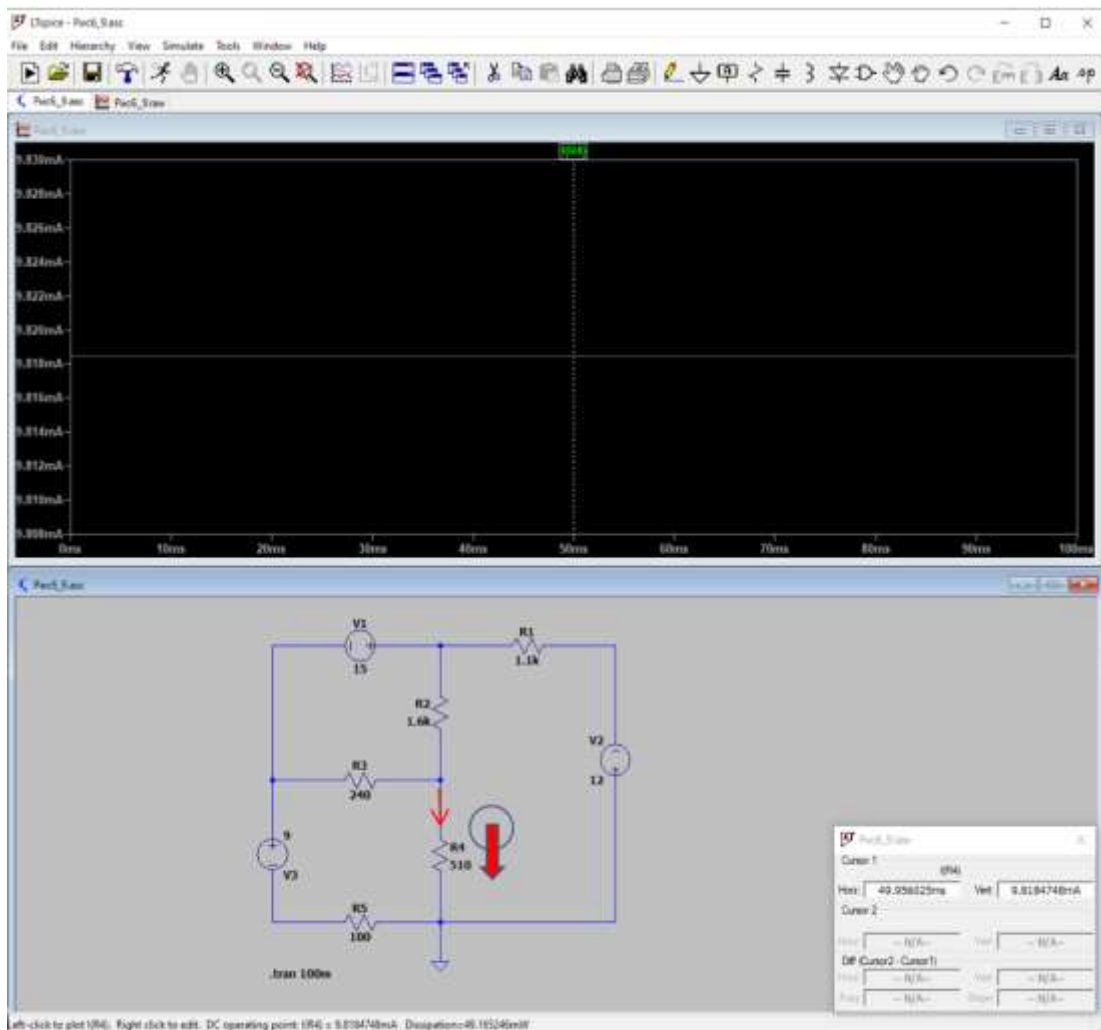


Рис.6.21. Результати вимірювання струму $I(R4)$

Результати знаходження струму $I(R4)$ з використанням принципу суперпозиції співпадають з результатами вимірювання цього струму при дії всіх джерел живлення, що підтверджує справедливість принципу для лінійних електричних кіл.

Розглянемо виконання наступного завдання: використовуючи принцип суперпозиції, визначити струм через резистор $R1$ схеми рис.6.17. Послідовність дій аналогічна алгоритму перевірки принципу суперпозиції, який вже розглянуто.

Визначимо перший частковий струм $I(R1)_1$ при дії лише одного джерела живлення $V1$. Результати вимірювання показано на рис.6.22, $I(R1)_1=12,427$ мА.

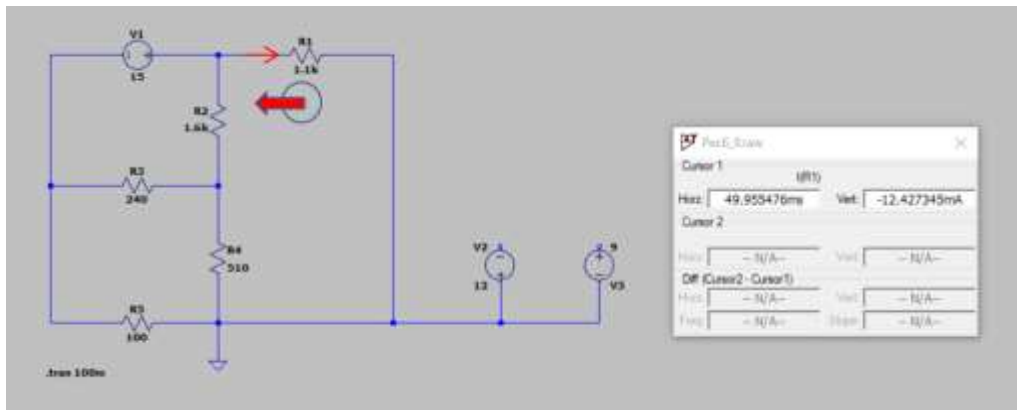


Рис.6.22. Результати вимірювання струму $I(R1)_1$

Визначимо другий частковий струм $I(R1)_2$ при дії лише одного джерела живлення $V2$. Результати вимірювання показано на рис.6.23, $I(R1)_2=10,103$ мА.

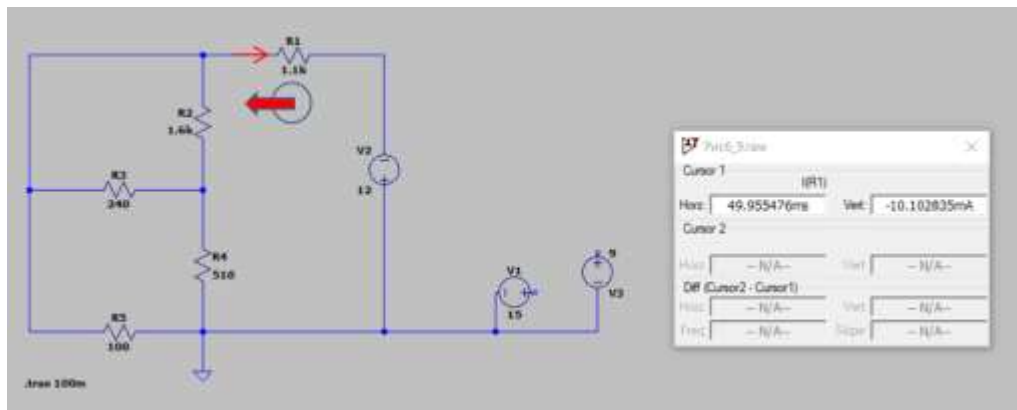


Рис.6.23. Результати вимірювання струму $I(R1)_2$

Визначимо третій частковий струм $I(R1)_3$ при дії лише одного джерела живлення $V3$. Результати вимірювання показано на рис.6.24, $I(R1)_3=6,652$ мА.

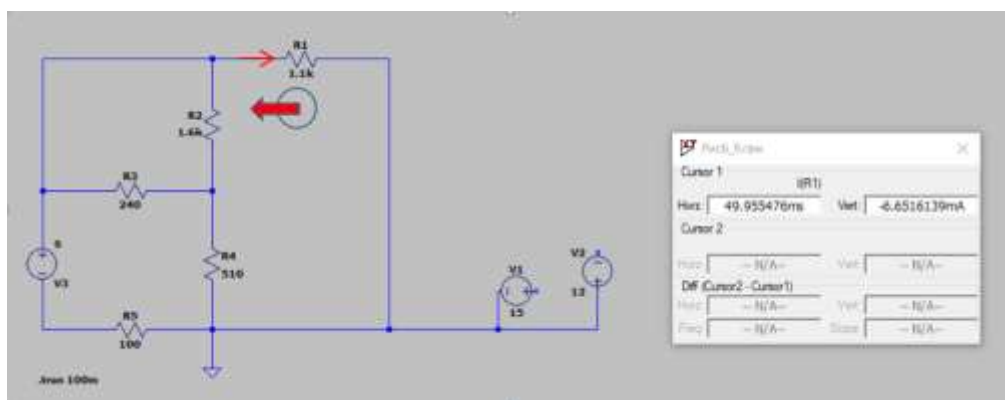


Рис.6.24. Результати вимірювання струму $I(R1)_3$

Струм через резистор R1 при дії всіх джерел живлення V1, V2, V3 визначається алгебраїчною сумою трьох часткових струмів. Оскільки напрямки часткових струмів співпадають, сумарний струм дорівнює:

$$I(R1) = I(R1)_1 + I(R1)_2 + I(R1)_3$$

$$I(R1) = 12,427 \text{ мА} + 10,103 \text{ мА} + 6,652 \text{ мА} = 29,182 \text{ мА}$$

Перевіримо отриманий результат шляхом вимірювання струму $I(R1)$ у програмі LTSpice при дії всіх джерел живлення V1, V2, V3. Результат вимірювання на рис.6.25 підтверджує правильність знаходження струму $I(R1)$ за допомогою принципу суперпозиції.

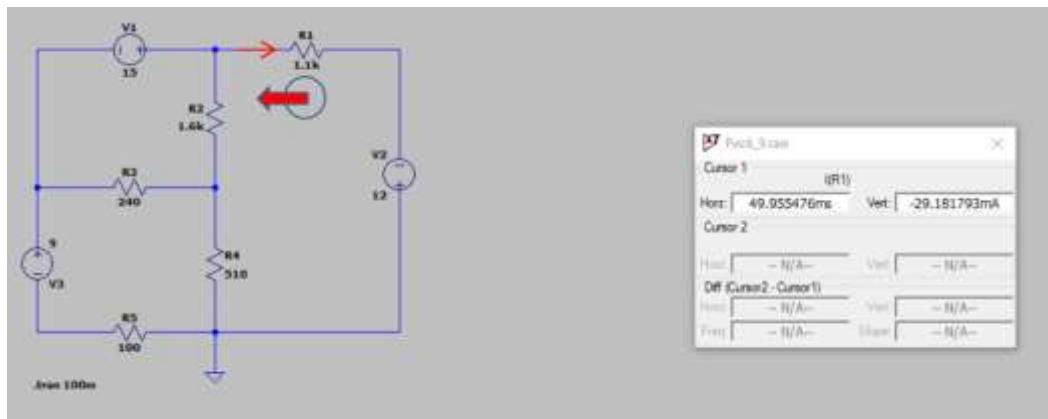


Рис.6.25. Результат вимірювання струму $I(R1)$ при дії джерел живлення V1, V2, V3

6.4. Теорема про еквівалентний генератор. Необхідно визначити струм через резистор R3 в електричній схемі (рис.6.26), використовуючи теорему про еквівалентний генератор.

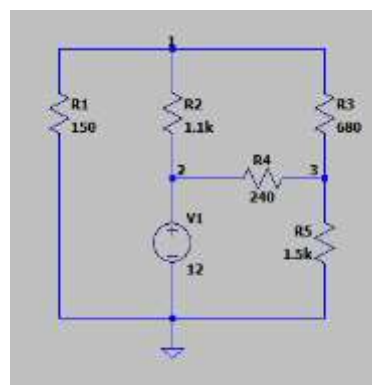


Рис.6.26. Досліджувана схема

Ця теорема дозволяє спростити розрахунок струму в одній гілці будь-якої складної схеми (у нашому випадку R3) шляхом еквівалентної заміни решти схеми на еквівалентний генератор (рис.6.27) та знаходження струму за формулою:

$$I(R3)=V_{екв}/(R_{екв}+R3),$$

де $V_{екв}$ - ЕРС еквівалентного генератора

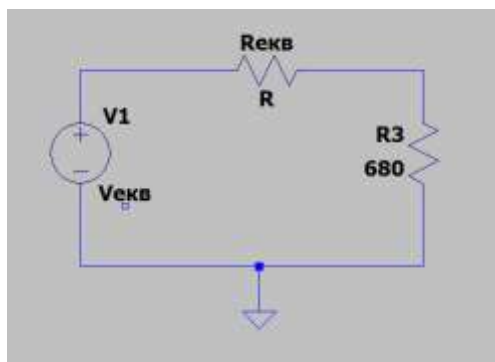


Рис.6.27. Перетворення схеми відповідно до теореми про еквівалентний генератор

Відповідно до теореми про еквівалентний генератор, будь-яка лінійна схема (двополюсник), у складі якої є незалежні джерела живлення, може бути представлена еквівалентним генератором з внутрішнім опором $R_{екв}$. Значення ЕРС еквівалентного генератора дорівнює напрузі холостого ходу (XX) обраного двополюсника, а внутрішній опір генератора $R_{екв}$ дорівнює внутрішньому опору обраного двополюсника та розраховується за формулою:

$$R_{екв}= U_{xx}/I_{кз},$$

де U_{xx} - напруга XX на розімкнутих затискачах двополюсника, $I_{кз}$ - струм короткого замикання (КЗ) двополюсника, коли його затискачі замкнені перемичкою з нульовим опором.

На початку видалимо зі схеми R3 та визначимо напругу XX шляхом вимірювання напруги між вузлами 1 та 3. На рис.6.28 показано результати вимірювання в LTSpice:

$$U_{XX} = V(3,1) = 8.905\text{В} \text{ (взято з точністю до 1 мВ).}$$

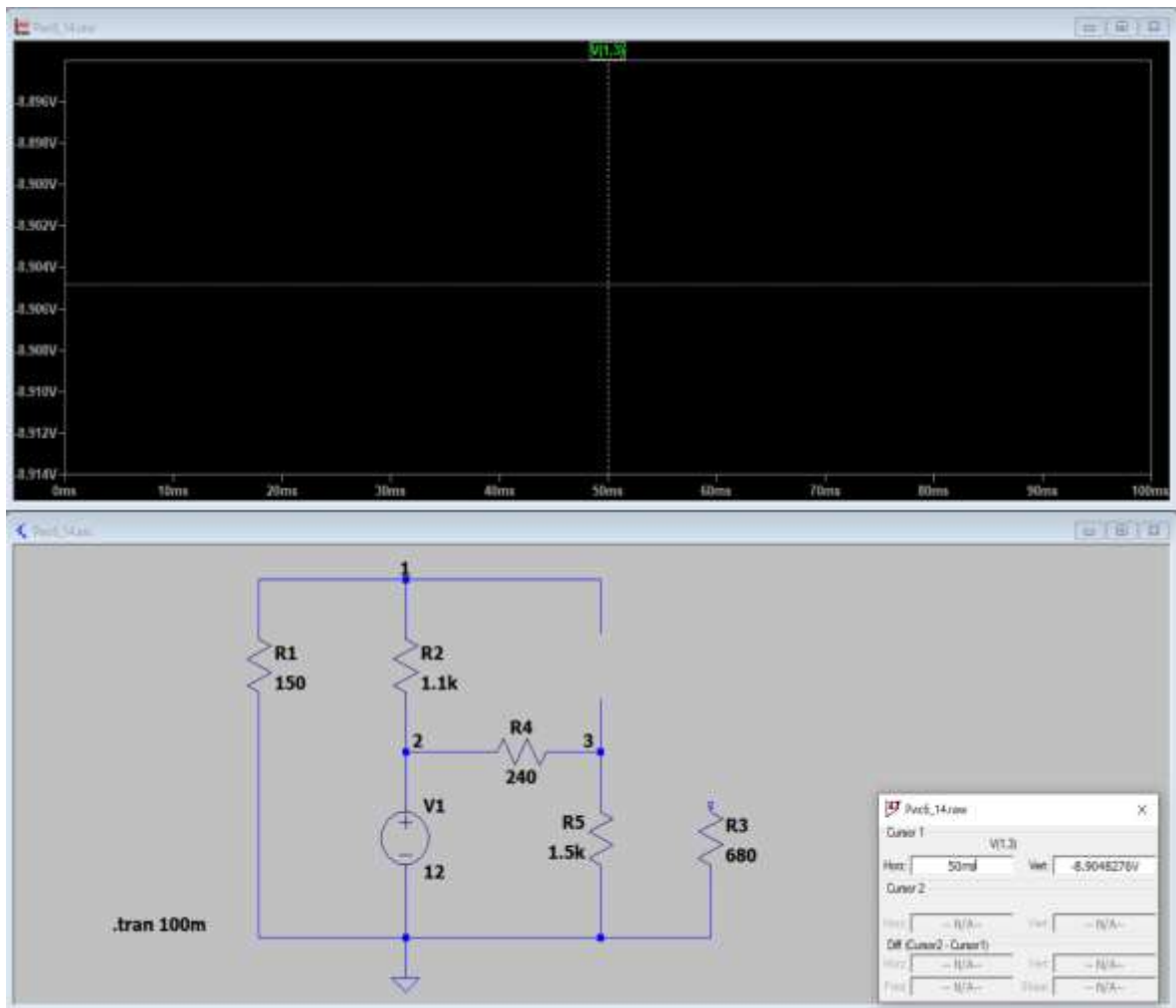


Рис.6.28. Вимірювання напруги XX

Для вимірювання струму K3 потрібно резистор R3 замінити на резистор R6=0.01 Ом та виміряти струм через R6. Він практично співпадає із струмом K3. Результати вимірювання показано на рис.6.29:

$$I_{K3} = I(R6) = 26.275\text{ мА}$$

Струм взято з точністю до 1 мкА. Внутрішній опір еквівалентного генератора дорівнює:

$$R_{\text{кв}} = U_{\text{хх}} / I_{\text{кз}} = 8.905\text{В} / 26.275 \text{ мА} = 0.339 \text{ кОм} = 339 \text{ Ом}$$

Розрахуємо струм через резистор R3:

$$I(R3) = U_{\text{хх}} / (R_{\text{кв}} + R3) =$$

$$= 8.905\text{В} / (339 \text{ Ом} + 680 \text{ Ом}) = 0.008739 \text{ А} = 8.739 \text{ мА}$$

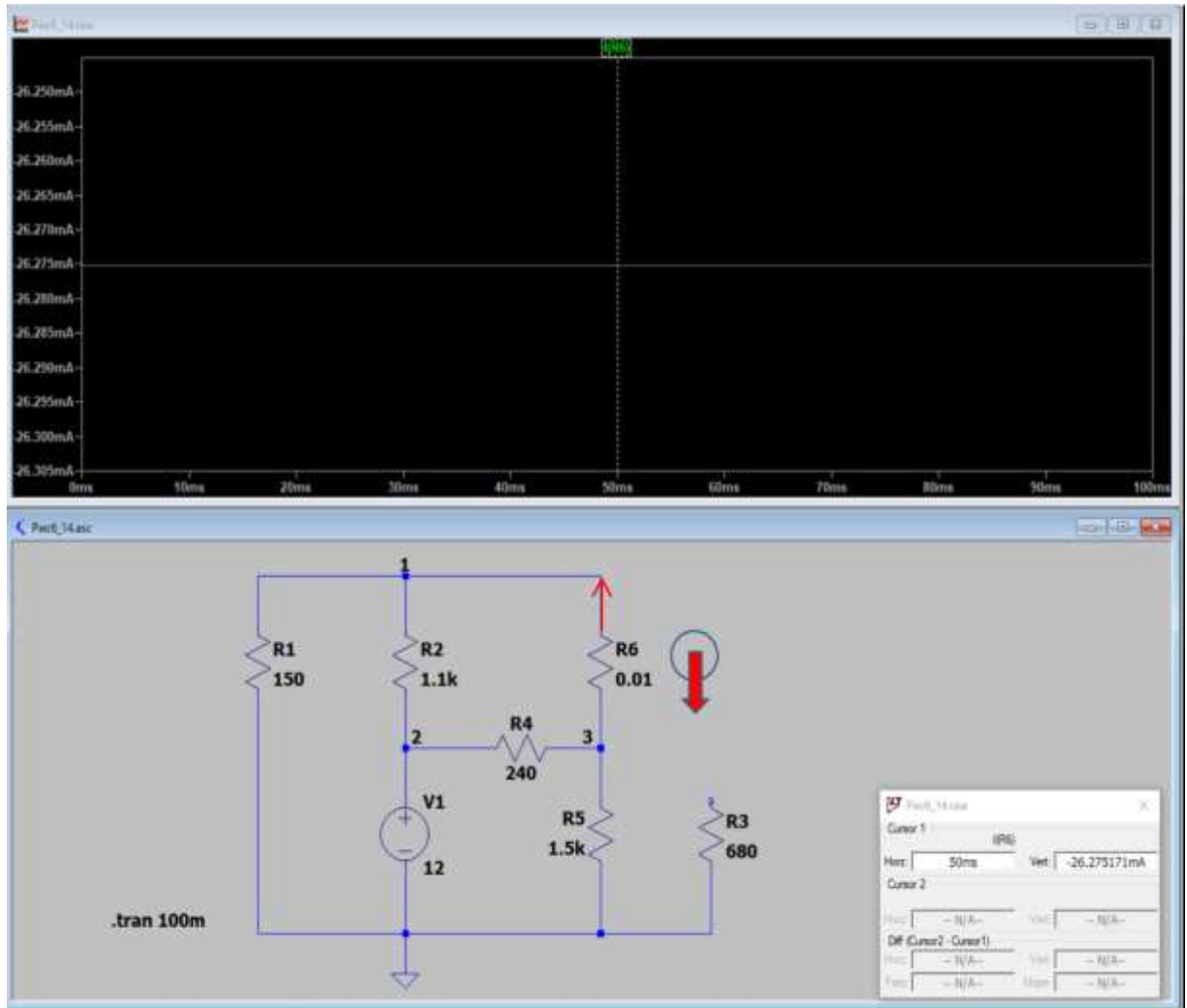


Рис.6.29. Вимірювання струму КЗ

Для перевірки правильності знаходження струму через резистор R3 виконаємо вимірювання струму через обраний резистор безпосередньо у вихідній схемі (рис.6.30): $I(R3) = 8.739 \text{ мА}$.

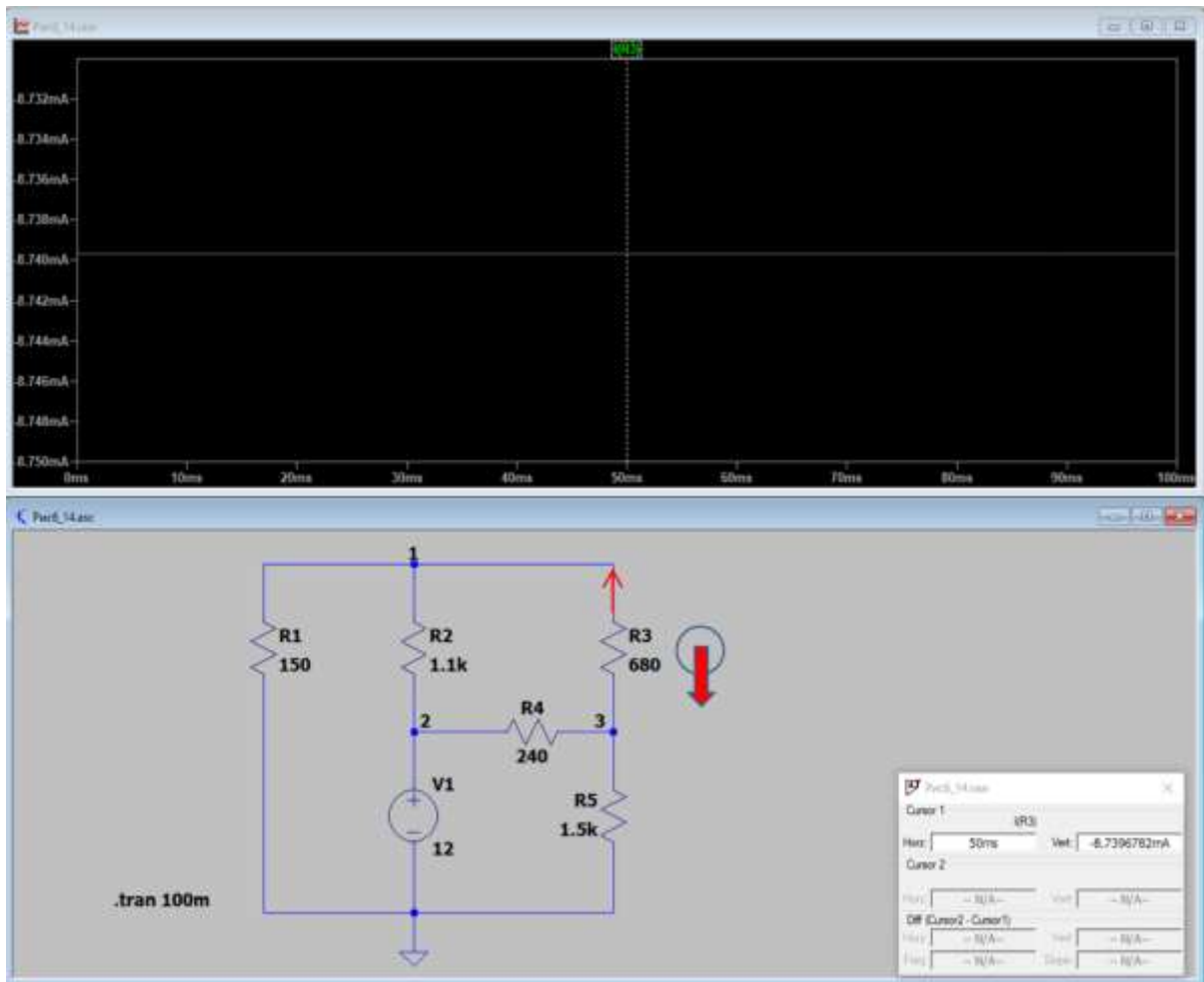


Рис.6.30. Вимірювання струму через резистор R3 у вихідній схемі

Виміряний струм $I(R3)$ співпадає по значенню з розрахованим раніше, що підтверджує справедливість теореми про еквівалентний генератор для лінійних схем.

7. Питання для самоперевірки

1. Поясніть призначення графічного редактора програми LTSpice.
2. Дайте визначення вузла схеми.
3. Який номер програма надає «заземленому» вузлу?
4. Поясніть, чи є обов'язковим маркування (нумерація) вузлів.
5. У файл з яким розширенням програма LTSpice зберігає створену схему?
6. Поясніть, яким чином виконується налаштування режиму моделювання.
7. Які розрахунки виконує програма LTSpice в режимі Transient?
8. За яких умов в схемі настає режим постійного струму?
9. Поясніть призначення плотера програми LTSpice.
10. Дайте визначення вузлової напруги.
11. Який зв'язок поміж напругою на компоненті схеми і вузловими напругами?
12. Який напрямок струму вважають позитивним?
13. Який напрямок напруги вважають позитивним?
14. Поясніть, що таке баланс потужності в схемі.
15. Сформулюйте перший закон Кірхгофа.
16. Дайте визначення контуру схеми.
17. Сформулюйте другий закон Кірхгофа.
18. Сформулюйте принцип суперпозиції.
19. Сформулюйте теорему про еквівалентний генератор.
20. Поясніть, що таке напруга холостого ходу, струм короткого замикання.

8. Завдання

При виконанні завдань 8.1 - 8.10 числові значення схемних компонентів взяти з табл.8.1.

Таблиця 8.1.

Числові значення схемних компонентів

V1, В	V2, В	V3, В	R1, кОм	R2, Ом	R3, кОм	R4, кОм	R5, Ом	R6, Ом	R7, кОм	R8, кОм
9	15	3,3	1,0	270	1,2	5,6	680	150	6,8	1,8

8.1. Створити у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.1. Виконати вимірювання постійного струму через усі резистори електричної схеми, результати вимірювання оформити у вигляді таблиці, намалювати реальні напрямки струмів на схемі.

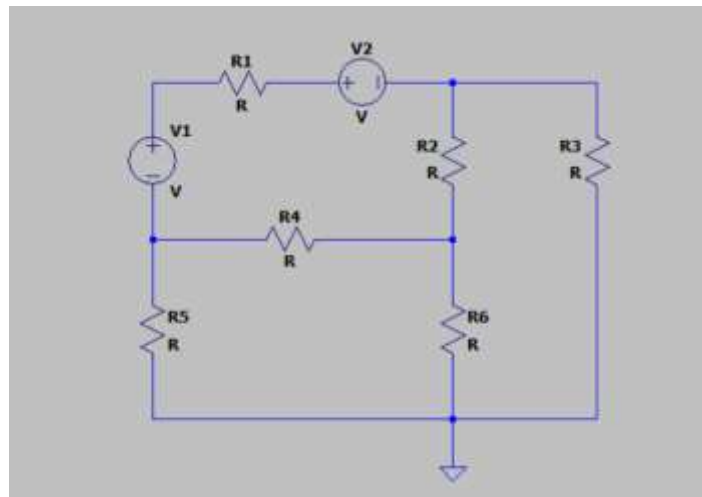


Рис.8.1. Досліджувана схема

8.2. Для схеми рис.8.1 перевірити виконання принципу суперпозиції для резисторів R3, R4: виміряти в програмі LTSpice струми через R3, R4 при роздільній дії джерел живлення, намалювати на схемі напрямки вимірюваних струмів, визначити результуючі струми за принципом суперпозиції; виміряти струми через R3, R4 при спільній дії джерел живлення, виконати порівняння цих струмів зі значеннями струмів, які визначені за принципом суперпозиції.

8.3. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.2. Виконати вимірювання постійної напруги на всіх компонентах електричної схеми, результати вимірювання оформити у вигляді таблиці, показати реальні напрямки напруги на компонентах схеми.

8.4. Для схеми рис.8.2 перевірити виконання першого закону Кірхгофа для трьох вузлів схеми. Виміряти відповідні струми в програмі LTSpice, намалювати на схемі їх напрямки, написати рівняння балансу струмів за першим законом Кірхгофа для обраних вузлів та виконати відповідні розрахунки.

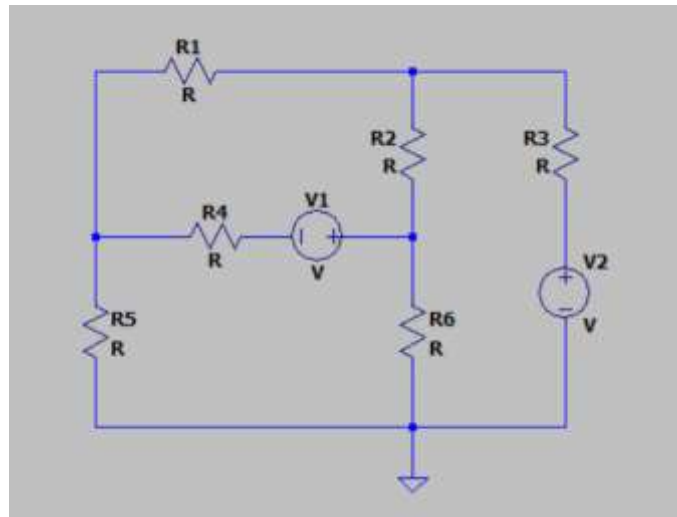


Рис.8.2. Досліджувана схема

8.5. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.3. Визначити струми через резистори R3 та R5, використовуючи принцип суперпозиції. Результати вимірювання оформити у вигляді таблиці. Показати напрямки часткових та результуючих струмів на відповідних компонентах схеми R3, R5 при роздільній та спільній дії джерел живлення. Виміряти струми через R3, R5 при спільній дії джерел живлення, виконати порівняння цих струмів зі значеннями струмів, які визначені за принципом суперпозиції.

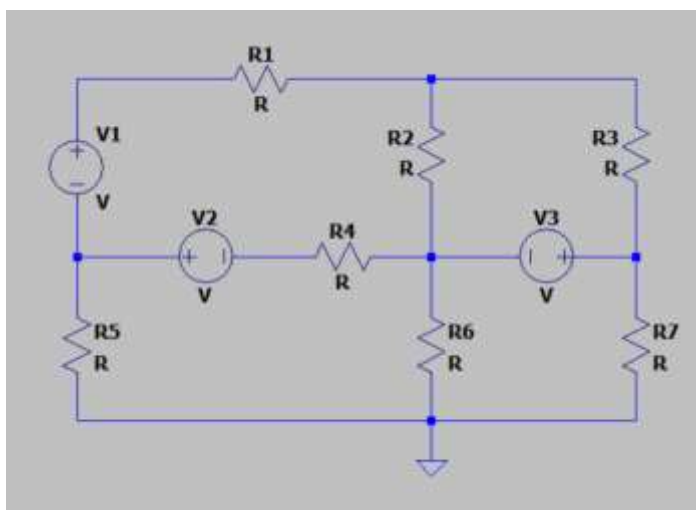


Рис.8.3. Досліджувана схема

8.6. Для схеми рис.8.3 для будь яких трьох контурів перевірити виконання другого закону Кірхгофа: в програмі LTSpice виміряти відповідні напруги, намалювати на схемі їх напрямки, написати рівняння за другим законом Кірхгофа для обраних контурів та виконати необхідні обчислення.

8.7. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.4. Визначити струми через резистори R1 та R4, використовуючи принцип суперпозиції. Результати вимірювання оформити у вигляді таблиці. Показати напрямки часткових та результуючих струмів на відповідних компонентах схеми R1, R4 при роздільній та спільній дії джерел живлення.

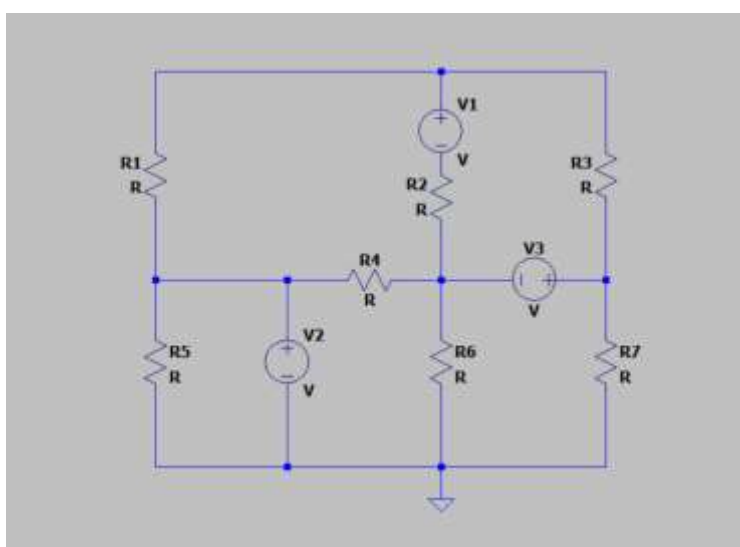


Рис.8.4. Досліджувана схема

8.8. Для схеми рис.8.4 для контуру V1, R2, R4, R1 та контуру V3, R7, R5, R4 перевірити виконання другого закону Кірхгофа: в програмі LTSpice виміряти відповідні напруги, намалювати на схемі їх напрямки, написати рівняння за другим законом Кірхгофа для обраних контурів та виконати необхідні обчислення.

8.9. Створити у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.5. Визначити постійний струм через резистори R4 та R2, використовуючи теорему про еквівалентний генератор.

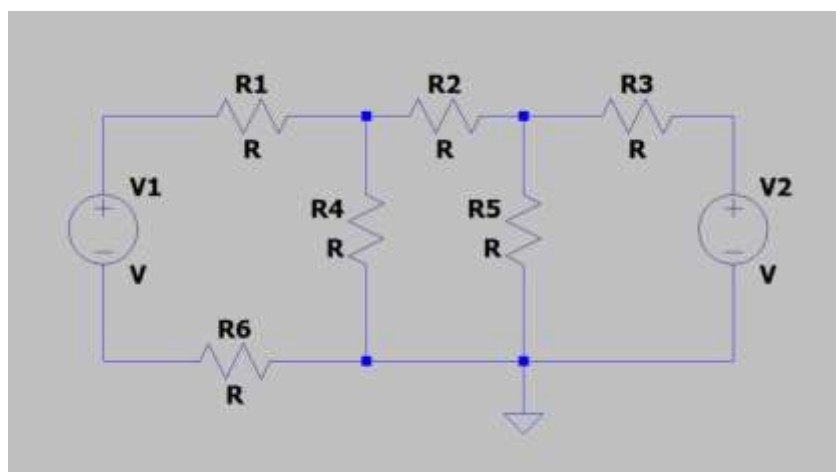


Рис.8.5. Досліджувана схема

8.10. Для схеми рис.8.5 перевірити виконання першого закону Кірхгофа для всіх вузлів схеми. Виміряти відповідні струми в програмі LTSpice, намалювати на схемі їх напрямки, написати рівняння балансу струмів за першим законом Кірхгофа для обраних вузлів та виконати відповідні розрахунки. Для контуру V1, R1, R4, R6 виміряти напруги на схемних компонентах, намалювати на схемі напрямки напруг та перевірити виконання другого закону Кірхгофа для даного контуру.

8.11. Створити у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.6. Виконати у програмі LTSpice вимірювання струмів через всі резистори схеми, визначити напрямки струмів та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання першого закону Кірхгофа для всіх вузлів схеми.

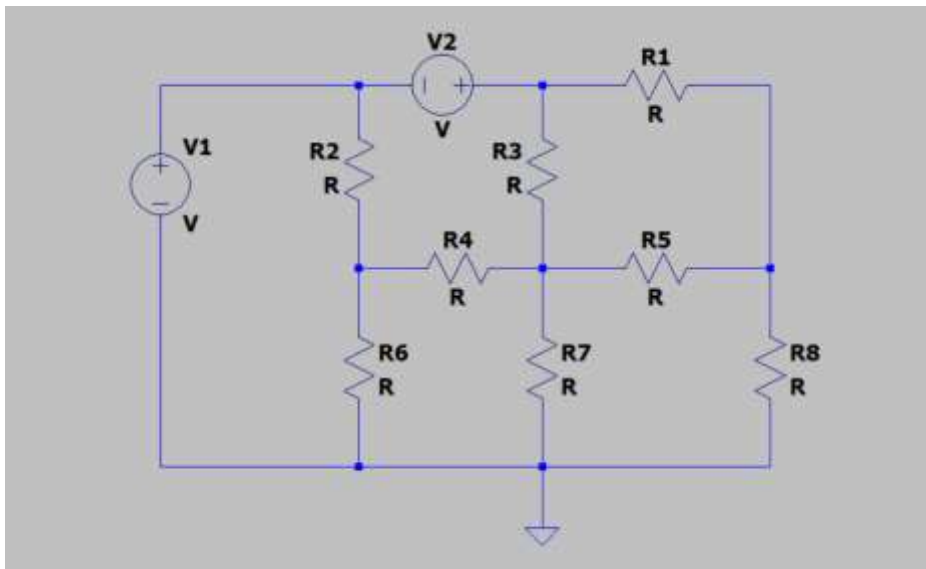


Рис.8.6. Досліджувана схема

8.12. Для схеми рис.8.6 визначити струми через резистори R2 та R7, використовуючи принцип суперпозиції. Результати вимірювання оформити у вигляді таблиці. Показати напрямки часткових та результуючих струмів на відповідних компонентах схеми R2, R7 при роздільній та спільній дії джерел живлення. Необхідні вимірювання виконати у програмі LTSpice.

8.13. Створити у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.7. Визначити постійний струм через резистор R1 та R3, використовуючи теорему про еквівалентний генератор.

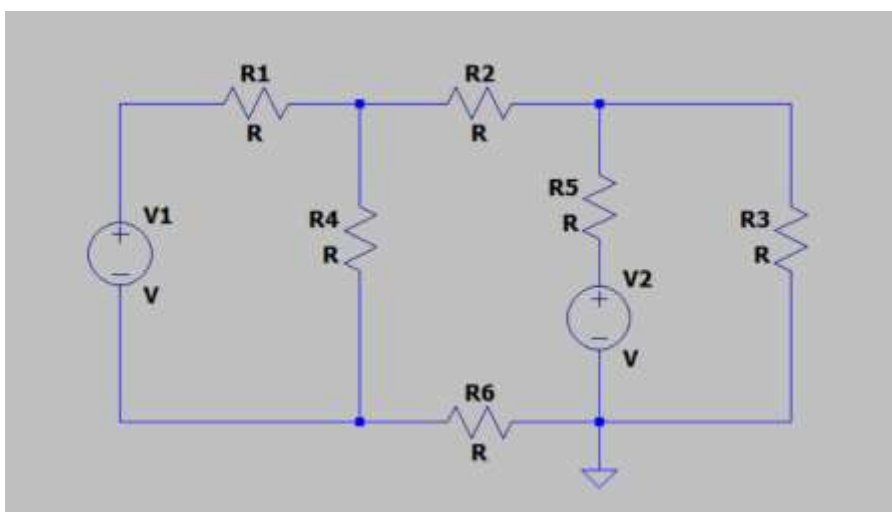


Рис.8.7. Досліджувана схема

8.14. Для схеми рис.8.7 виконати у програмі LTSpice вимірювання струмів через всі резистори схеми, визначити напрямки струмів та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання першого закону Кірхгофа для всіх вузлів схеми.

8.15. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.8. Виконати вимірювання напруги на всіх резисторах схеми, визначити напрямки напруги та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання другого закону Кірхгофа для контуру V1, R1, R5, R4, R2, контуру R5, V2, R7 та контуру R4, R7, R6.

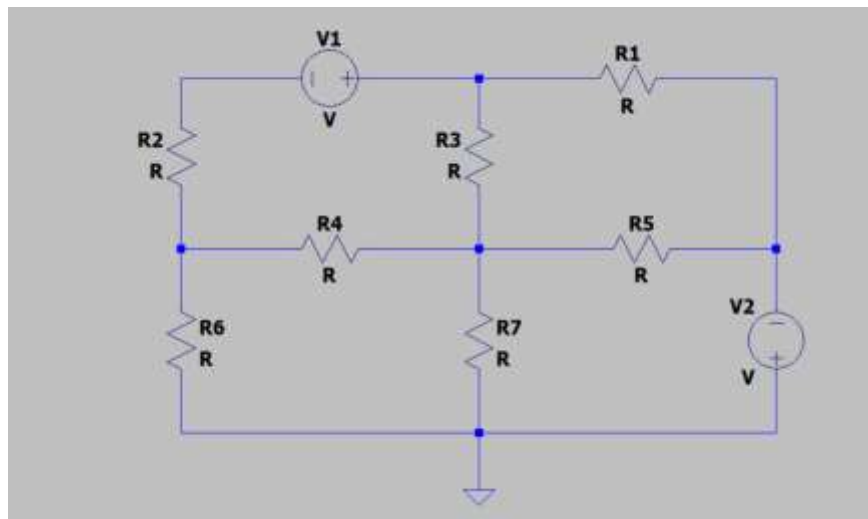


Рис.8.8. Досліджувана схема

8.16. Для схеми рис.8.8 визначити струми через резистори R1 та R6, використовуючи принцип суперпозиції. Результати вимірювання оформити у вигляді таблиці. Показати напрямки часткових та результуючих струмів на відповідних компонентах схеми R1, R6 при роздільній та спільній дії джерел живлення. Необхідні вимірювання виконати у програмі LTSpice.

8.17. Створити у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.9. Виконати вимірювання струмів через всі резистори схеми, визначити напрямки струмів та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання першого закону Кірхгофа для всіх вузлів схеми.

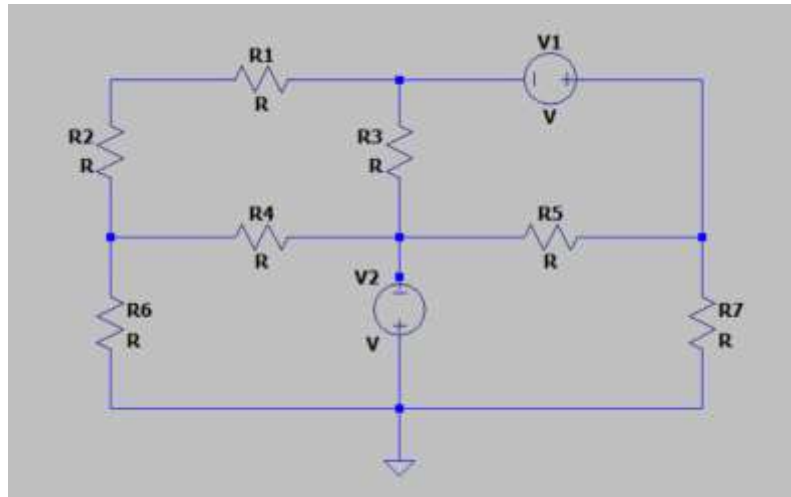


Рис.8.9. Досліджувана схема

8.18. Для схеми рис.8.9 виконати вимірювання напруги на всіх резисторах схеми, визначити напрямки напруги та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання другого закону Кірхгофа для контуру V1, R5, R4, R2, R1, контуру R1, R3, R4, R2 та контуру V2, R5, R7. Необхідні вимірювання виконати у програмі LTSpice.

8.19. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.10. Виконати вимірювання напруги на всіх резисторах схеми, визначити напрямки напруги та намалювати їх на схемі, результати оформити у вигляді таблиці, перевірити виконання другого закону Кірхгофа для контуру V1, R1, V2, V3, R6, контуру V1, R3, R4, R2, контуру V2, V3, R8, R3, R1.

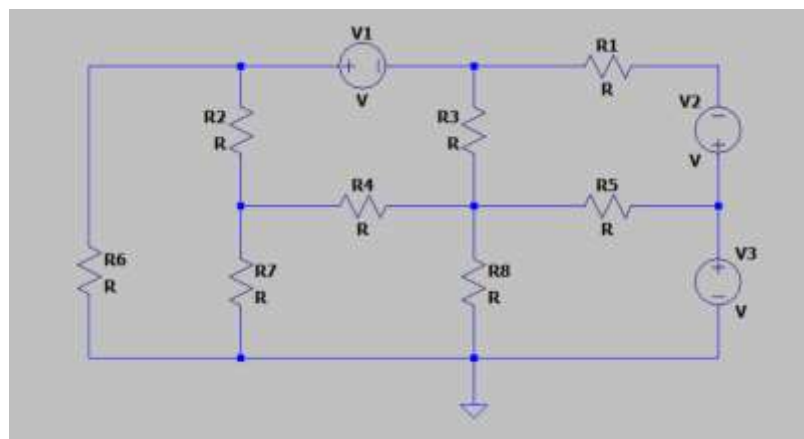


Рис.8.10. Досліджувана схема

8.20. Для схеми рис.8.10 визначити струми через резистори R3 та R6, використовуючи принцип суперпозиції. Результати вимірювання оформити у вигляді таблиці. Показати напрямки часткових та результуючих струмів на відповідних компонентах схеми R3, R6 при роздільній та спільній дії джерел живлення. Необхідні вимірювання виконати у програмі LTSpice.

8.21. Намалювати у графічному редакторі програми LTSpice схему рис.8.11. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа для всіх вузлів схеми. Виміряти відповідні струми в програмі LTSpice, намалювати на схемі їх напрямки, написати рівняння балансу струмів за першим законом Кірхгофа для обраних вузлів та виконати відповідні розрахунки.

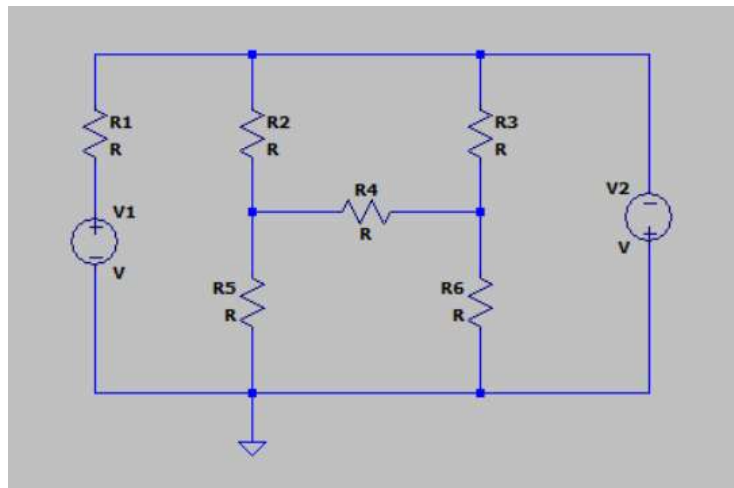


Рис.8.11. Досліджувана схема

8.22. Для схеми рис.8.11 виміряти напруги на схемних компонентах контуру V1, R1, R2, R5, контуру R2, R3, R6, R5, контуру V2, R6, R3, намалювати на схемі напрямки напруг та перевірити виконання другого закону Кірхгофа для обраних контурів.

8.23. Для схеми рис.8.11 визначити постійний струм через резистори R5 та R3, використовуючи теорему про еквівалентний генератор. Необхідні вимірювання напруг та струмів виконати у програмі моделювання електронних схем LTSpice.

Перелік посилань

1. LTSpice. *ANALOG DEVICES*. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (дата звернення 14.03.2023).
2. Gabino Alonso. Get Up and Running with LTSpice. *Analog Dialogue*. URL: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/get-up-and-running-with-ltspice.html> (дата звернення 14.03.2023).
3. LTSpice® Technical Information and Guides. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator/ltspice-recommended-reading-list.html> (дата звернення 14.03.2023).

Список рекомендованої літератури

1. Основи теорії кіл-1: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», спеціалізації «Інформаційно-обчислювальні засоби радіоелектронних систем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Бондаренко, Г. В. Іваннік. Електронні текстові дані (1 файл: 4,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 28 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/51654> (дата звернення 14.03.2023).
2. Бондаренко В. М. Основи радіоелектроніки. Розд.: «Основи теорії електронних схем» [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати» / НТУУ «КПІ». Електронні текстові дані (1 файл: 1,77 Мбайт). Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/241> (дата звернення 14.03.2023).
3. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Стахів П. Г., Писаренко Л.Д., Якименко Ю.І. Основи теорії електронних кіл: Підручник / За ред. д.т.н., проф. Стахіва П.Г. Львів: «Магнолія 2006», 2017. 296 с.

Додаток А. Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

1. ЕРС - електрорушійна сила.
2. КЗ - коротке замикання.
3. ЛКМ - ліва кнопка миші.
4. ПКМ - права кнопка миші.
5. ХХ - холостий хід.
6. $I(R5)$ - вимірний струм через резистор R5 електричної схеми.
7. $V(3)$ - виміряна вузлова напруга між вузлом 3 та загальним вузлом (землею) електричної схеми.
8. $V(2, 4)$ - виміряна напруга між вузлами 2 та 4 електричної схеми.