

**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА:

**методичні вказівки
до виконання практичних робіт**

Запоріжжя 2026



УДК 621.3(072)
Е50

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 4 від 30.01.2026 р.)

Укладач:
Ісаєв А. Б., старший викладач кафедри АВЕРС

Е50 Електроніка та мікропроцесорна техніка : методичні вказівки до виконання практичних робіт / уклад. А. Б. Ісаєв. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 114 с.

Методичні рекомендації включають тематику практичних робіт відповідно до робочої програми навчальної дисципліни. Складаються з теоретичної та практичної частини, містять детальний хід виконання практичних робіт, а також контрольні питання для самоперевірки знань здобувачів.

Рекомендовано для студентів спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / G3 Електрична інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

УДК 621.3(072)

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1 ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ НА ЕОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМИ LTSPICE | 6 |
| 1.1 Призначення програми LTspice | 6 |
| 1.2 Встановлення та запуск програми | 7 |
| 1.3 Подання на екрані та основні елементи керування | 11 |
| 1.4 Основні прийоми створення та коригування схеми | 13 |
| 1.5 Запуск симуляції | 19 |
| 1.6 Моделювання схем змінного струму | 23 |
| 1.7 Завдання до лабораторної роботи | 31 |
| 1.8 Контрольні питання та завдання | 32 |
| 1.9 Перелік посилань | 32 |
| 2 ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМЛЯЧІВ | 33 |
| 2.1 Теоретичні дані | 34 |
| 2.1.1 Однофазний однонапівперіодний випрямляч | 34 |
| 2.1.2 Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом | 38 |
| 2.1.3 Однофазний мостовий випрямляч | 40 |
| 2.1.4 LC и RC фільтри | 44 |
| 2.1.5 Випрямлячі з подвоєнням та множенням напруги | 44 |
| 2.1.6 Трифазні випрямлячі | 47 |
| 2.1.7 Загальні зауваження щодо роботи випрямлячів | 50 |
| 2.2 Завдання до лабораторної роботи | 50 |
| 2.2.1 Дослідження однонапівперіодного випрямляча | 50 |
| 2.2.2 Дослідження мостового випрямляча | 54 |
| 2.2.3 Дослідження трифазного випрямляча | 56 |
| 2.2.4 Дослідження помножувача напруги | 57 |
| 2.3 Контрольні питання та завдання | 59 |
| 2.4 Перелік посилань | 59 |
| 3 ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ | 60 |
| 3.1 Теоретичні дані | 60 |
| 3.1.1 Короткі теоретичні відомості про тиристори | 60 |
| 3.1.2 Опис принципової електричної схеми тиристорного регулятора напруги | 65 |
| 3.2 Завдання до лабораторної роботи | 70 |
| 3.3 Контрольні питання та завдання | 77 |
| 3.4 Перелік посилань | 78 |
| 4 ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ | 79 |



| | | |
|-------|--|------------|
| 4.1 | Теоретичні дані | 79 |
| 4.1.1 | Загальні відомості..... | 79 |
| 4.1.2 | Інвертувальний підсилювач | 80 |
| 4.1.3 | Неінвертувальний підсилювач..... | 82 |
| 4.1.4 | Інвертувальний суматор..... | 83 |
| 4.1.5 | Неінвертувальний суматор | 84 |
| 4.1.6 | Інтегрувальний підсилювач (інтегратор) | 85 |
| 4.1.7 | Диференціювальний підсилювач (диференціатор) | 86 |
| 4.2 | Завдання до лабораторної роботи..... | 87 |
| 4.2.1 | Завдання 1: Дослідження інвертувального підсилювача | 87 |
| 4.2.2 | Завдання 2: Дослідження неінвертувального підсилювача | 90 |
| 4.2.3 | Завдання 3: Дослідження суматорів..... | 90 |
| 4.2.4 | Завдання 4: Дослідження інтегратора..... | 90 |
| 4.2.5 | Завдання 5: Дослідження диференціатора | 93 |
| 4.3 | Контрольні питання та завдання..... | 95 |
| 4.4 | Перелік посилань | 95 |
| 5 | ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 ДОСЛІДЖЕННЯ І СИНТЕЗ КОМБІНАТОРНИХ СХЕМ | 96 |
| 5.1 | Теоретичні дані | 96 |
| 5.1.1 | Досконала диз'юнктивна нормальна форма запису булевих виразів..... | 96 |
| 5.1.2 | Мінімізація логічних функцій | 97 |
| 5.2 | Завдання до практичної роботи | 101 |
| 5.3 | Контрольні питання та завдання..... | 102 |
| 5.4 | Перелік посилань | 102 |
| 6 | ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ І СИНТЕЗ ТРИГЕРІВ..... | 103 |
| 6.1 | Теоретичні дані | 103 |
| 6.1.1 | Асинхронні RS-тригери..... | 103 |
| 6.1.2 | Синхронні RS-тригери | 105 |
| 6.1.3 | T-тригер (тригер з рахунковим входом)..... | 107 |
| 6.1.4 | D-тригер (тригер затримки) | 108 |
| 6.2 | Завдання до практичної роботи | 109 |
| 6.3 | Контрольні питання та завдання..... | 114 |
| 6.4 | Перелік посилань | 114 |



ВСТУП


Практикум з дисципліни «Електроніка та мікропроцесорна техніка» забезпечує закріплення здобувачами отриманих теоретичних знань шляхом їх практичного застосування та набуття навичок з побудови, моделювання та дослідження електронних схем.

Для виконання практичних робіт використовується віртуальне середовище. Для створення і дослідження аналогових схем застосовується пакет програм LTspice. Для створення і дослідження цифрових схем застосовується пакет програм SimulIDE. Обидві програми є вільними до використання. Вони дозволяють з достатньою для навчальних цілей точністю відтворювати роботу схем, форму і амплітуду сигналів.

Перед виконанням робіт рекомендується ознайомитися з теоретичними положеннями, які наведені у цих методичних вказівках і у додатковій літературі. При виконанні робіт у відповідності до завдань необхідно скласти схеми, дослідити відповідні параметри, побудувати необхідні графіки. По результатах роботи необхідно скласти звіт, зміст якого наведено у методичних вказівках до роботи.

Оформлення звіту виконується за поточними загально прийнятими в університеті вимогами. Звіт і файли електронних схем необхідно завантажити до відповідні контрольні точки у системі дистанційного навчання для перевірки викладачем.

Критерії оцінювання робіт і кількість балів наводиться у навчальній програмі і силабусі дисципліни у відповідності до поточних політик оцінювання в університеті.



1 ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ НА ЕОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМИ LTSPICE

Мета практичної роботи:

Освоєння прийомів моделювання електронних схем на ЕОМ з прикладу програми LTspice. Ці навички будуть необхідні вивчення типових електронних схем з предмета курсу.

Завдання практичної роботи:

- Ознайомлення з інтерфейсом програми LTspice.
- Вміння створювати електричні схеми у програмі LTspice та запускати їхню симуляцію.
- Вміння інтерпретувати результати симуляції схем.

Посилання на завантаження програми LTspice

<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Приклад схеми з використанням джерел постійної напруги та резисторів. Навести необхідні пояснення та результати вимірювань.
- Приклад схеми з використанням резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, джерел постійного та змінного струму. Навести необхідні пояснення, результати вимірювань та побудови графіків.
- Висновки
- Перелік посилань

1.1 Призначення програми LTspice

Програма LTspice дозволяє накреслити на екрані комп'ютера принципові електричні схеми електричних пристроїв. Схема легко може бути відредагована, змінена, надрукована та ін.

Програма має широкий набір різних електронних елементів схем та цілий ряд бібліотек. Вони містять графічні зображення елементів.

Але найважливішим у програмі є те, що схема не тільки викреслюється на екрані. На логічному рівні встановлюються зв'язки між елементами схеми. Кожен елемент має набір параметрів та математичну модель, яка дозволяє розрахувати зміну поведінки елементів вхідних та вихідних сигналів у часі.

Розглядаючи всі з'єднані разом елементи, що утворюють схему, програма дозволяє виконати імітацію чи симуляцію роботи всієї схеми. Набір інструментів дозволяє контролювати роботу схеми та графіки зміни сигналів.

Таким чином, дана програма дозволяє досліджувати та аналізувати роботу електронних схем, досліджувати залежність роботи схеми від параметрів окремих її елементів, розробляти та досліджувати нові схемні рішення.

Слід сказати, що LTspice не єдина програма цього класу. Але завдяки простоті її використання може бути легко освоєно студентами. Серед програм, що використовуються в даній області, можна згадати також пакети OrCAD, PCAD, CircuitMaker, MapleSim, MATLAB Sumulink, Proteus, Multisim.

1.2 Встановлення та запуск програми

LTspice – це вільно-розповсюджувана програма, яку можна безкоштовно скачати з офіційного сайту її розробника Analog Devices за посиланням <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>. На сторінці загрузки ви можете обрати варіант дистрибутиву для саме вашої операційної системи (рис. 1.1).

Download LTspice

Download our LTspice simulation software for the following operating systems:

Date models updated - Sep 8 2025

[Download for Windows 10 64-bit and forward](#) Version 24.1.10

[Download for MacOS 10.15 and forward](#) Version 17.2.4

[Download for Windows XP \(End of Support\)](#)

[Download for MacOS 10.9 \(End of Support\)](#)

[Download LTspice XVII for Windows \(End of Support\)](#)

Рисунок 1.1- Завантаження LTspice

Для Windows 10 (верхнє посилання на рис. 1.1) файл дистрибутиву називається LTspice64.msi та займає лише 50 Мб.

Встановлення програми досить просте і не має ніяких особливостей. Але давайте роздивимось його повністю. Після запуску файлу LTspice64.msi ви побачите наступне вікно (рис. 1.2).

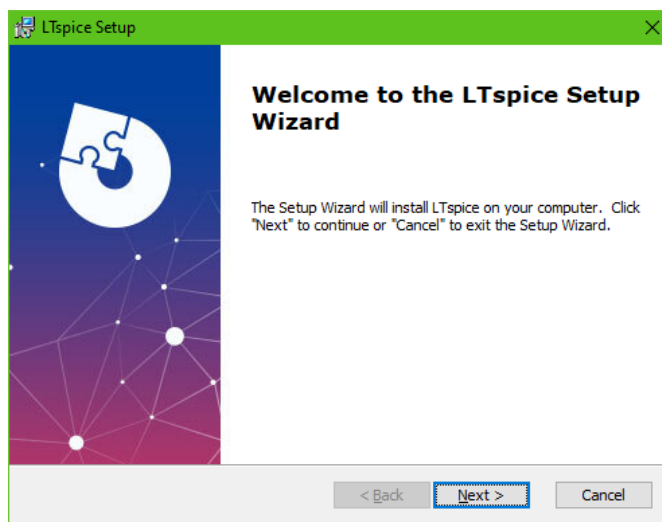


Рисунок 1.2 – Встановлення програми LTspice, крок 1

В ньому вам потрібно лише натиснути на кнопку “Next >”. Після цього ви побачите наступне вікно (рис. 1.3).

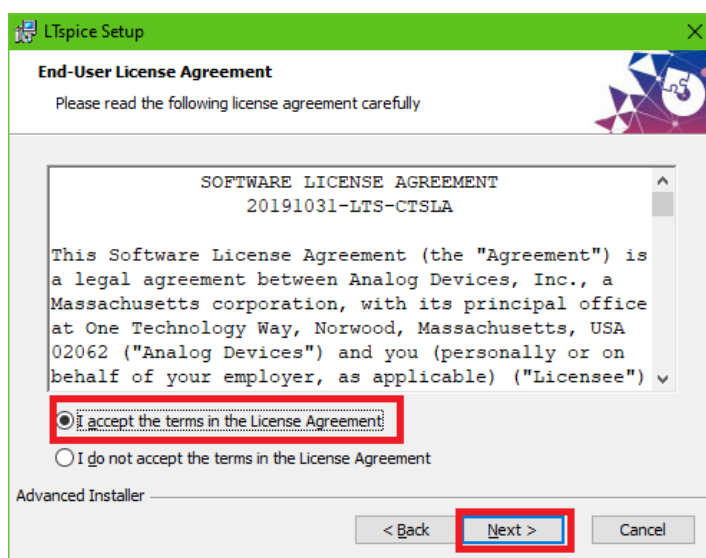


Рисунок 1.3 – Встановлення програми LTspice, крок 2

У ньому вам потрібно згодитися з ліцензійними умовами, обравши пункт “I accept the terms in the License Agreement”, попередньо ознайомившись із ними, а потім натиснути кнопку “Next >”. Після чого з’явиться наступне вікно (рис. 1.4).

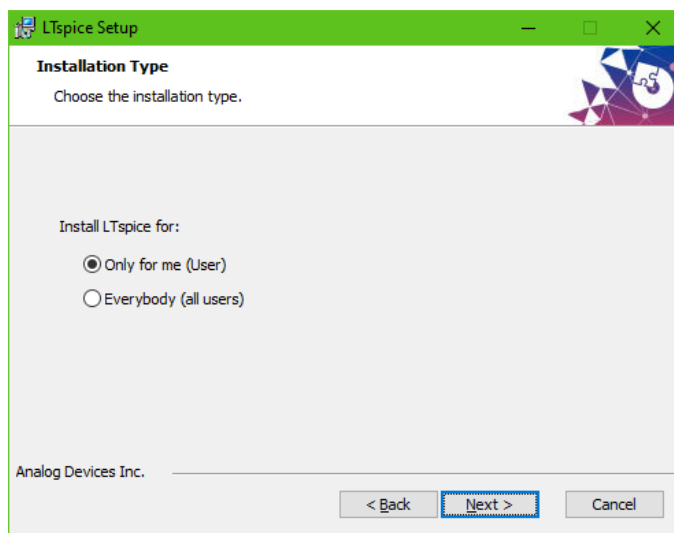


Рисунок 1.4 – Встановлення програми LTspice, крок 3

Тут вам потрібно обрати, чи будете тільки ви користуватися цією програмою на цьому комп'ютері (пункт “Only for me (<ім'я користувача>”), або вона буде доступна для всіх користувачів (пункт “Everybody (all users)”). Після чого знов натиснути на кнопку “Next >”. У наступному вікні (рис. 1.5) ви можете змінити шлях до папки, у яку буде встановлена програма LTspice.

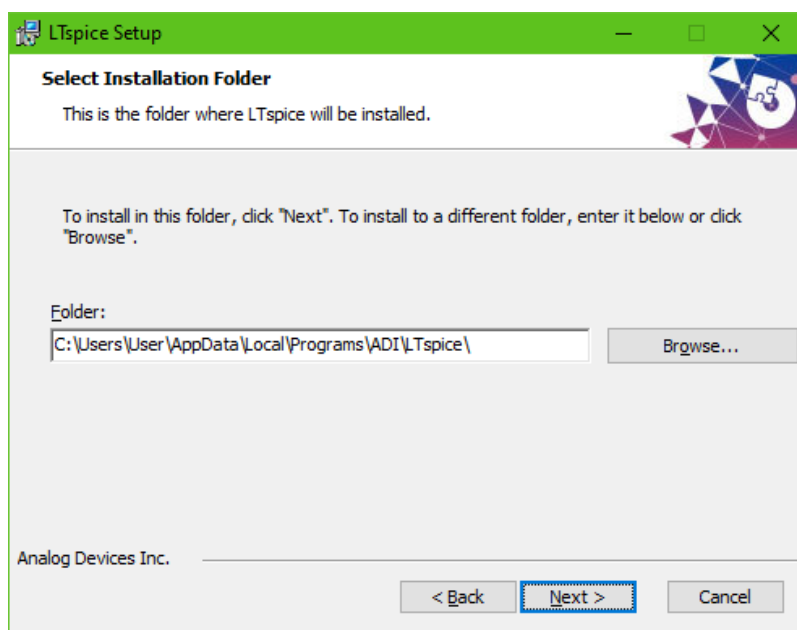


Рисунок 1.5 – Встановлення програми LTspice, крок 4

Ви можете змінити цей шлях на ваш розсуд або залишити його за замовчанням. Це майже не вплине на подальшу роботу програми. Після цього знов натиснути кнопку “Next >”. Ви побачите останній шлях перед безпосередньо встановленням програми (рис. 1.6).

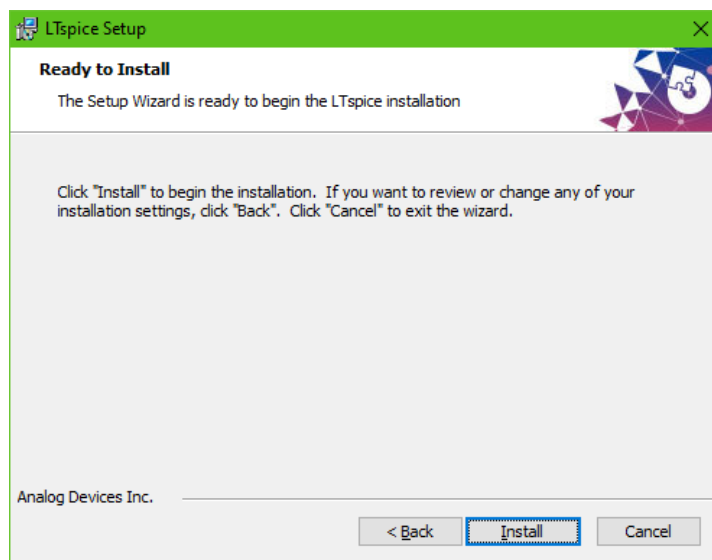


Рисунок 1.6 – Встановлення програми LTspice, крок 5

У цьому вікні вам потрібно лише натиснути кнопку "Install" та дочекатися закінчення процесу встановлення програми. На останньому екрані (рис. 1.7) ви можете обрати пункт "Launch LTspice", щоб запустити програму після завершення встановлення. Якщо ж ви плануєте запустити її пізніше, залиште цей пункт пустим.

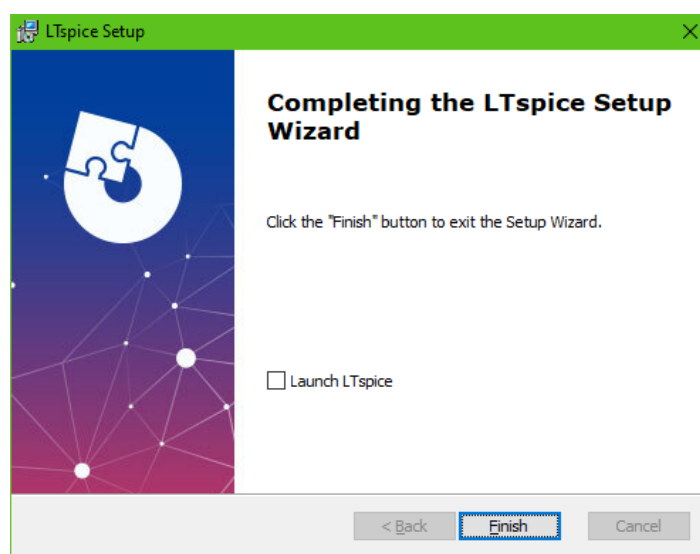



Рисунок 1.7 – Завершення встановлення програми LTspice

Після запуску програми ви побачите наступне вікно (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Головне вікно програми LTspice

1.3 Подання на екрані та основні елементи керування

Щоб розпочати роботу з програмою треба створити нову схему  чи завантажити існуючу .

Інтерфейс програми LTspice дуже лаконічний (рис. 1.9). У ньому є лише три основні елементи.

1 – головне меню програми, в якому представлені наступні пункти:

- File – містить пункти роботи з файлами, такі, як Відкрити, Створити новий, Зберегти, Роздрукувати, Закрити, та інші.
- Edit – містить пункти щодо редагування електричної схеми. Більшість пунктів цього меню збігається з кнопками на панелі інструментів (2).
- Hierarchy – дозволяє створювати та відкривати нові символи.



Рисунок 1.9 – Інтерфейс програми LTspice















- View – дозволяє налаштувати параметри перегляду: збільшити або зменшити зображення, включити сітку, включити або відключити панелі інструментів та задач та інше.

- Simulate – містить параметри настроювання та запуску симуляції електричної схеми.
- Tools – містить різні інструменти, такі як настроювання інтерфейсу, кольорової схеми, можливість перетворити схему на зображення та інші.
- Window – дозволяє упорядкувати відкриті вікна за різними схемами.
- Help – містить допомогу щодо роботи програми (англійською мовою)

2 – панель інструментів, на якій знаходяться наступні кнопки (табл. 1.1).



Таблиця 1.1 – Кнопки панелі інструментів програми LTspice









| Кнопка | Призначення |
|---|---|
|  | Налаштувати програми |
|  | Створити нову схему |
|  | Відкрити файл зі схемою |
|  | Зберегти схему у файл |
|  | Роздрукувати схему |
|  | Налаштувати симуляції схеми |
|  | Запустити симуляцію |
|  | Пауза симуляції |
|  | Зупинити симуляцію |
|  | Розмістити всі відкриті вікна поряд |
|  | Розмістити всі відкриті вікна одне над другим |
|  | Розмістити всі відкриті вікна каскадом |
|  | Наблизити зображення (графіку або схеми) |
|  | Зменшити зображення |
|  | Повернутися до початкового масштабу |
|  | Автоматичне масштабування графіка по висоті |
|  | Обрати елементи схеми, для яких треба побудувати графік |
|  | Намалювати з'єднувальний провід |
|  | Додати землю |
|  | Додати джерело напруги |
|  | Додати резистор |
|  | Додати конденсатор |
| | Додати котушку індуктивності |

| | |
|---|---|
|  | Додати діод |
|  | Додати компонент з бібліотеки |
|  | Додати мітку ланки електричного ланцюга |
|  | Добавити текст |
|  | Добавити директиву симулятора |
|  | Вирізати елемент схеми чи графік |
|  | Дублювати компонент |
|  | Перемістити компонент |
|  | Перемістити частину схеми |
|  | Повернути компонент |
|  | Дзеркально відобразити елемент |
|  | Відмінити останню дію |
|  | Вернути останню відмінену дію |
|  | Шукати компонент |

3 – робоча область, на якій, власне, і створюється електрична схема.

1.4 Основні прийоми створення та коригування схеми

Перед тим, як малювати електричну схему, треба натиснути кнопку  , щоб створити нову чисту схему, тоді замість абстрактної картинки, як на рис. 1.8. ви побачите сірий робочий фон, як на рис. 1.9. Або ж, якщо схема вже створена, можна її відкрити, натиснувши на кнопку .

Щоб помістити якийсь елемент на робоче поле, його треба обрати, або натиснувши на кнопку відповідного компонента на панелі інструментів (резистор , конденсатор , індуктивність , діод , земля ) , або обрати його з бібліотеки, натиснувши кнопку . Якщо ви просто обрали компонент на панелі інструментів, він «приліплюється» до курсору, і його можна просто перемістити на робочу область та клацнути лівою кнопкою миші, щоб помістити там. У цей час, коли компонент «приліплений» до курсору, можна натиснути кнопки  або , щоб повернути або дзеркально відобразити його, відповідно. Трохи зручніше використовувати комбінації клавіш Ctrl+R та Ctrl+E відповідно. Після того, як ви помістили компонент на робочу область, він все ще залишається «приліпленим» до курсору, тобто ви можете поміщати необмежену кількість однотипних компонентів на схему (рис. 1.10).

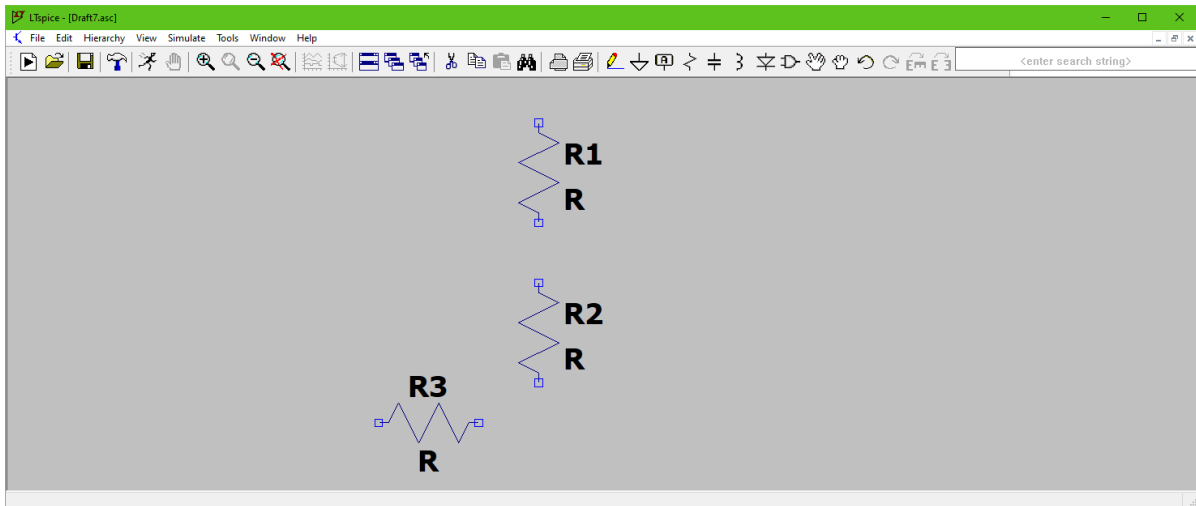



Рисунок 1.10 – Розміщення декількох резисторів на схемі

Якщо ви хочете «відліпити» компонент від курсора, просто натисніть правою кнопкою миші або на клавіатурі клавішу Esc. Тепер ви можете вибрати інший компонент і також розмістити його на робочій області.

Давайте тепер роздивимося, як добавляти компонент із бібліотеки. Для цього натиснемо кнопку , після чого відкриється вікно з усіма доступними компонентами (рис. 1.11).

Квадратними дужками позначені папки, тобто, їх можна відкрити, і всередині побачити ще велику кількість компонентів. Поки що ми це обличимо, коли до цього дійде, я розповім окремо.

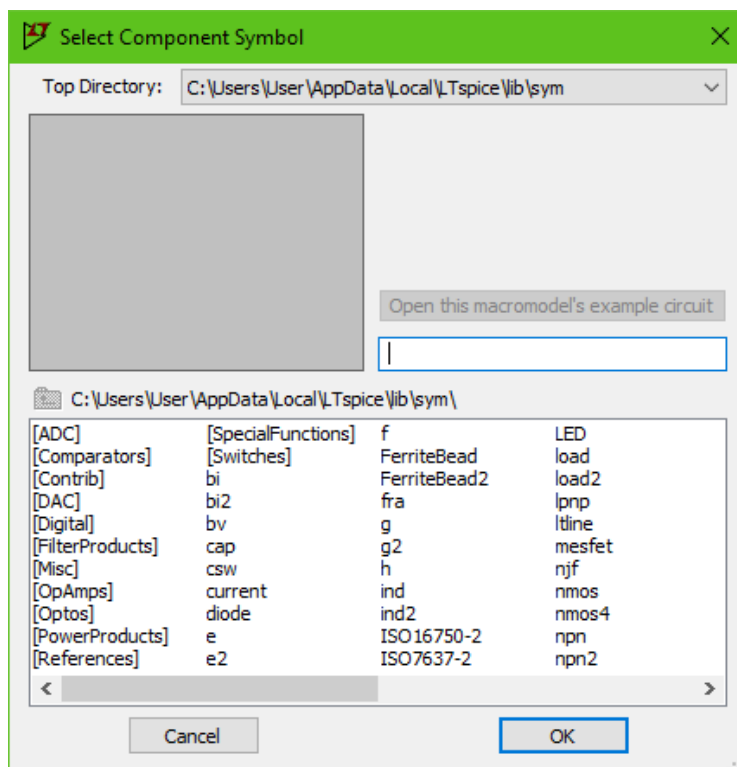


Рисунок 1.11 – Вибір компонента з бібліотеки

Серед компонентів, які нам можуть знадобитися, є:

- cap – конденсатор, який, до речі, вже є на панелі інструментів;
- diode – діод, який теж є на панелі інструментів;
- ind – котушка індуктивності, яка є на панелі інструментів;
- nmos – польовий транзистор з N-каналом;
- npn – біполярний транзистор типу NPN;
- pmos – польовий транзистор з P-каналом;
- pnp – біполярний транзистор типу PNP;
- res – постійний резистор, який є на панелі інструментів;
- voltage – джерело ЕРС;
- Zener – стабілітрон.

Щодо інших компонентів, я про них розповім, коли прийде час. Щоб додати якийсь компонент з бібліотеки, треба обрати його в списку та натиснути кнопку ОК. Давайте для прикладу додаємо джерело ЕРС (voltage), яке ми будемо додавати найчастіше (рис. 1.12).

Як ви бачите на рис. 1.12, коли ми обираємо якийсь компонент, зверху зліва з'являється його позначення на електричній схемі, а зверху справа – його опис. Тепер, коли ми натиснемо на кнопку "ОК", цей компонент «приліплюється» до курсору у той самий спосіб, що ми вже бачили раніше, і ми можемо його помістити на схему.

Після додавання джерела ЕРС наше робоче поле буде виглядати, як на рис. 1.13.

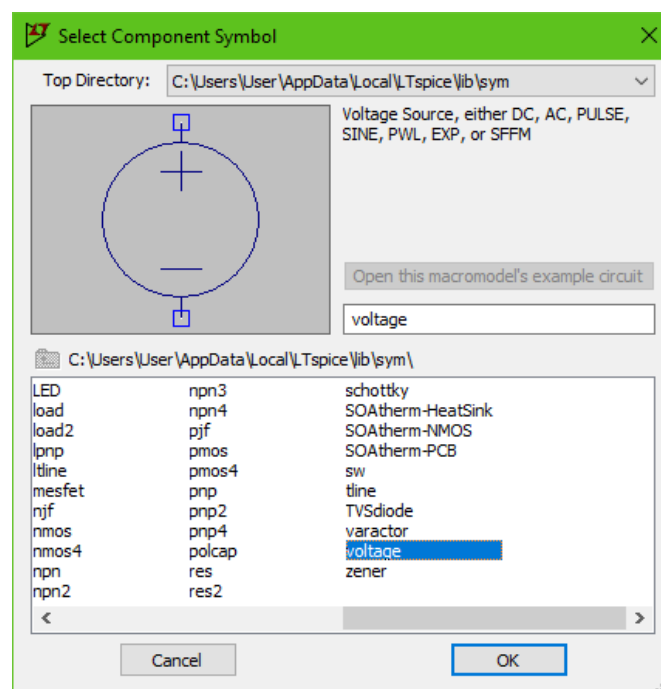



Рисунок 1.12 – Додавання джерела ЕРС

Після того, як всі компоненти добавлені, їх треба з'єднати між собою провідниками. Щоб включити режим малювання провідників, треба натиснути кнопку , після чого курсор буде виглядати, як на рис. 1.14.

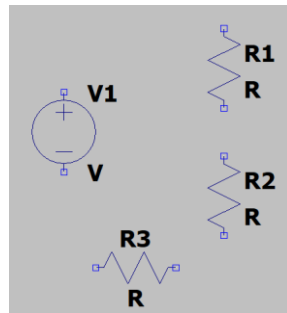


Рис. 1.13 – Робоча область після додавання джерела ЕРС

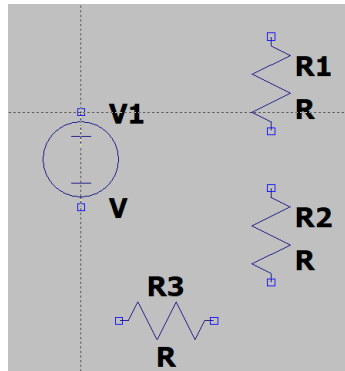


Рисунок 1.14 – Режим малювання провідників

Щоб з'єднати між собою два елемента, треба підвести перехрестя до синього квадратика, що символізує вивід елемента, натиснути ліву кнопку миші, щоб почати малювати, і відпустити, її. Тепер лінія буде рухатися за курсором, але тільки вертикально, чи горизонтально. Щоб змінити напрям лінії, треба знов натиснути ліву кнопку миші, щоб створити точку, від якої можна продовжувати вести лінію в іншому напрямку. Коли ви підведете лінію до наступного виводу (синього квадратика), лінія автоматично закінчиться, то ж ви можете починати малювати нову. Щоб вийти з режиму малювання провідників, натисніть праву кнопку миші. Після з'єднання всіх компонентів, схема буде виглядати як на рис. 1.15.

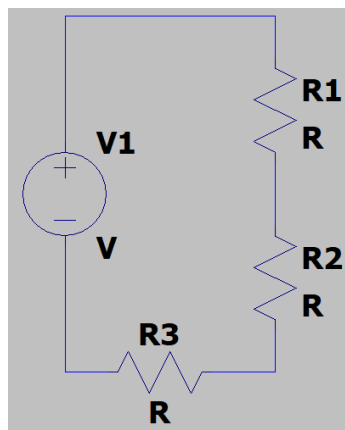


Рисунок 1.15 – З'єднана схема



Тепер наша схема майже зібрана, але в ній ще не задані параметри компонентів. Давайте задамо наступні величини $V1 = 10\text{ В}$, $R1 = 50\text{ Ом}$, $R2 = 80\text{ Ом}$, $R3 = 120\text{ Ом}$.

Щоб змінити параметри якогось компонента, треба навести на нього курсор миші, поки він не стане виглядати як рука з вказівним пальцем (рис. 1.16), і натиснути на ньому **правою** кнопкою миші. Після цього відкриється нове вікно (рис. 1.17), у якому можна задати параметри джерела ЕРС.

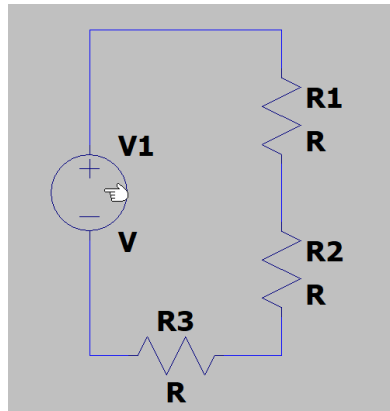


Рисунок 1.16 – Форма курсору для зміни параметрів джерела ЕРС

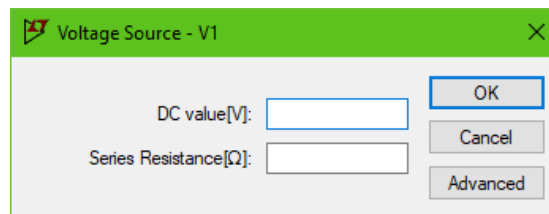


Рисунок 1.17 – Зміна параметрів джерела ЕРС

Як ви бачите, джерело ЕРС має два параметри:

- DC value [V] – величина постійної ЕРС у вольтах.
- Series Resistance[Ω] – внутрішній опір джерела ЕРС.

Для нас важлива тільки перша характеристика – величина напруги, то ж поставимо у полі DC value[V] якесь значення, наприклад, 15, після чого натиснемо кнопку “OK”.

Після цього на схемі з’явиться напруга джерела ЕРС. Тепер таким самим чином можемо змінити параметри резистора R1 (рис 1.18).

Вікно параметрів резистора трохи більше, ніж для джерела ЕРС (рис. 1.19).

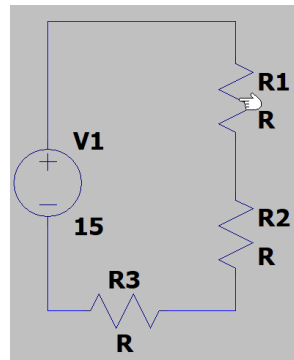


Рисунок 1.18 - Форма курсору для зміни параметрів резистора R1

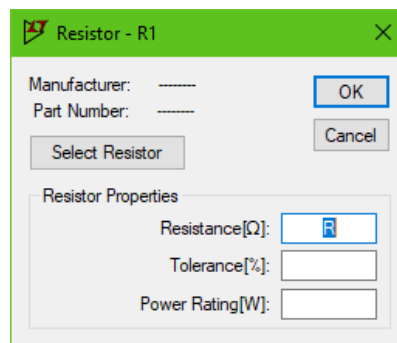


Рисунок 1.19 – Зміна параметрів резистора

У полі “Resistance[Ω]” можна задати опір резистора у Омах. У полі “Tolerance[%]” можна задати клас точності резистора, а у полі “Power Rating[W]” – максимальну потужність, що може розсіювати цей резистор. Обов’язковим параметром є тільки перший, то ж ми можемо залишити інші пустими. Також можна натиснути на кнопку “Select Resistor” та обрати резистор зі списку реальних резисторів. Давайте встановимо величину опору $R1 = 12$ Ом, після чого натиснемо “OK”.

Таким самим чином встановимо величини інших резисторів: $R2 = 8$ Ом, $R3 = 10$ Ом, після чого наша схема буде виглядати, як на рис. 1.20.

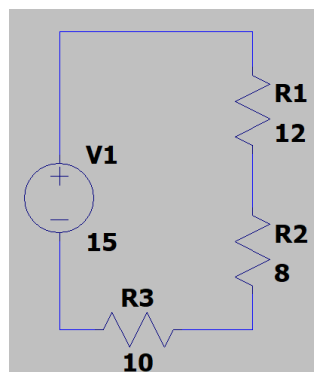



Рисунок 1.20 – Схема після задання всіх параметрів



Тепер перед початком симуляції залишився ще один маленький крок. Нам потрібно додати на схему нульову точку, щоб симулятор знав, відносно якої точки йому потрібно вимірювати потенціали. Зазвичай цю точку встановлюють там, де знаходиться «мінус» джерела живлення.

На схемі ця точка задається за допомогою елемента «Земля», або «Ground» . То ж, давайте додимо її, так під'єднаємо до лівого нижнього провідника, який як раз підключений до «мінусу» джерела ЕРС. Остаточно схема буде виглядати наступним чином (рис. 1.21).

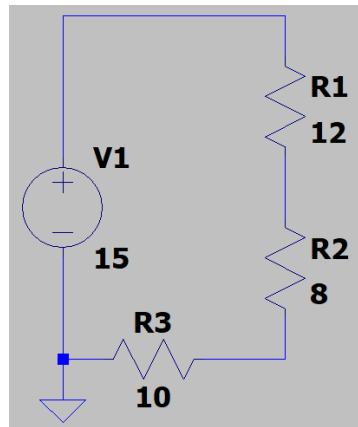



Рисунок 1.21 – Остаточний вигляд принципової електричної схеми

1.5 Запуск симуляції

Тепер можемо запускати симуляцію. Для цього нажимаємо на кнопку «Run» , після чого побачимо наступне вікно (рис. 1.22).

Це вікно відкриється лише один раз, бо ми ще не задали ніяких параметрів симуляції. Як можна побачити на рис. 1.21, цих параметрів тут дуже багато, але поки що ми не будемо їх чіпати.

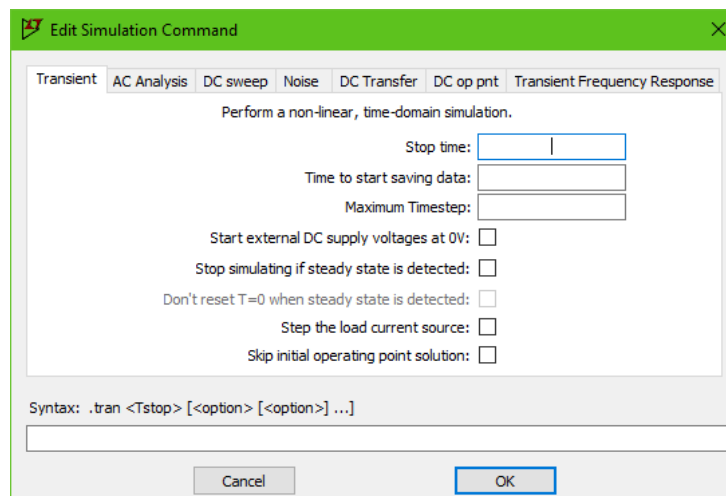


Рисунок 1.22 – Вікно налаштувань параметрів симуляції

Зараз нам потрібен лише один параметр “Stop time” що є першим у вкладці “Transient”. Цей параметр задає час симуляції схеми у секундах. Для схеми постійного струму цей час не є дуже важливим, то ж можемо задати його довільно, наприклад, 1 секунда. А ось в схемах змінного струму важливо правильно його вибрати, щоб побачити все, що потрібно, але до цього ми ще повернемося пізніше.

То ж, поки що ставимо у полі “Stop time” одиницю і натискаємо на кнопку “ОК”. Після цього віно програми розділиться на дві частини – у верхній з’явиться графік, поки що порожній, а у нижній залишиться розроблена нами схема (рис. 1.23).

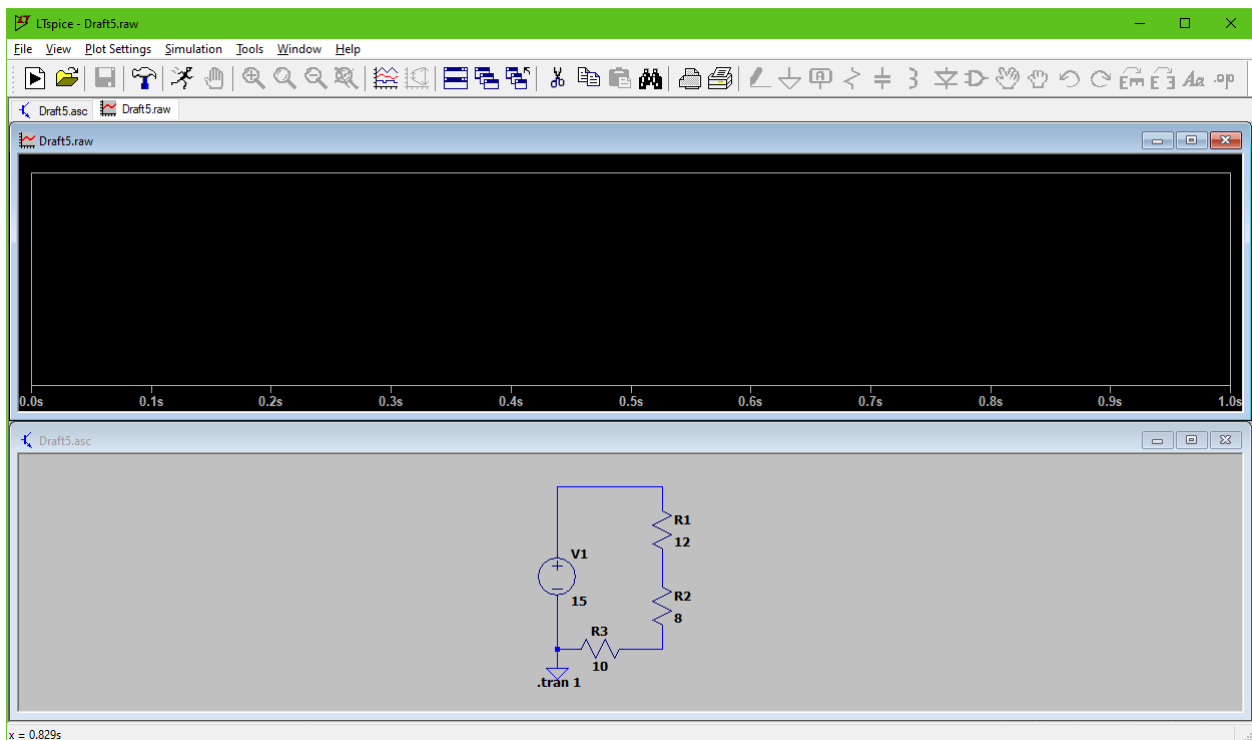


Рисунок 1.23 – Вікно програми після запуску симуляції

На графік можна вивести величини струмів та потенціалів у різних точках схеми.

Щоб додати струм, необхідно навести курсор на компонент схеми, струм через який ви хочете виміряти. При цьому курсор змінить свою форму, як на рис. 1.24.

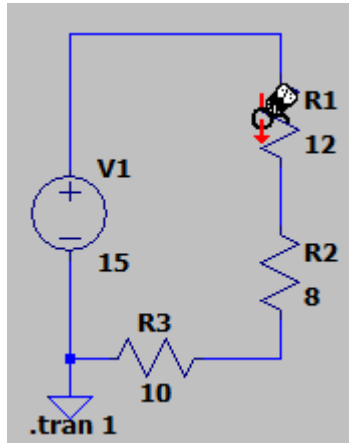


Рисунок 124 – Форма курсора для додавання струму через резистор R1 на графік

Якщо ми при цьому натиснемо лівою кнопкою миші, то вгорі з'явиться графік струму (рис. 1.25).

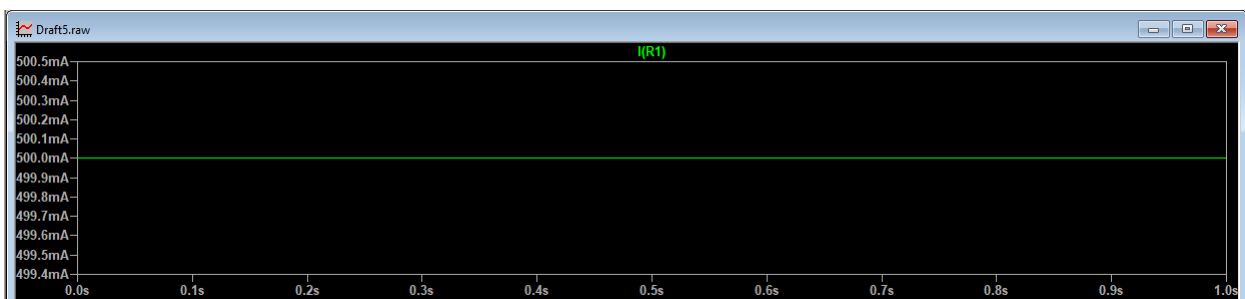


Рисунок 1.25 – Графік струму через резистор R1

Очевидно, що для постійного струму графік уявляє собою пряму лінію. Величина струму, як видно на рис. 1.24, дорівнює 500 мА. Чи це вірно? Давайте розрахуємо. Сумарний опір всіх резисторів дорівнює

$$R = R1 + R2 + R3 = 12 + 8 + 10 = 30 \text{ Ом.}$$

Величина ЕРС $U = 15 \text{ В}$, то ж за законом Ома, струм

$$I = U / R = 15 / 30 = 0,5 \text{ А, або } 500 \text{ мА. То ж поки що все вірно.}$$

Давайте тепер виміряємо падіння напруги на кожному з резисторів. Для цього на потрібно знати потенціали у точках a, b, c (рис. 1.26). Очевидно, що потенціал точки a буде дорівнювати величині ЕРС, тобто 15 В, інші ж потенціали також нескладно розрахувати, але хай це за нас зробить програма.

Щоб виміряти потенціал у будь-якій точці схеми, потрібно навести курсор на провід біля цієї точки, тоді він змінить форму, і стане схожий на щуп осцилографа чи мультиметра (рис. 1.27).

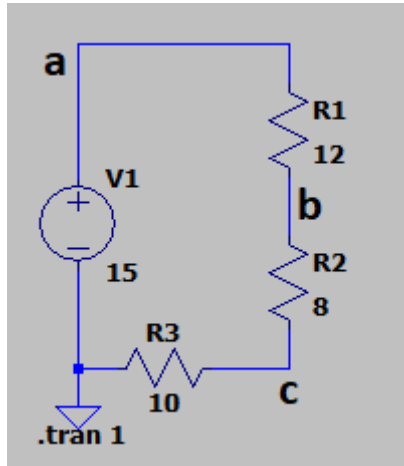


Рисунок 1.26 – Точки, у яких треба визначити потенціали

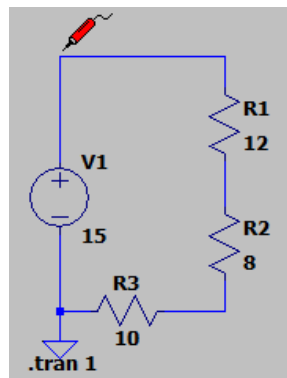


Рисунок 1.27 – Форма курсора для додавання потенціалу точки *a* на графік

Якщо ми натиснемо лівою кнопкою миші, то новий графік з'явиться у верхній частині екрану. Таким самим чином добавимо графіки потенціалів точок *b* та *c*, після чого верхнє поле буде виглядати, як на рис. 1.28.

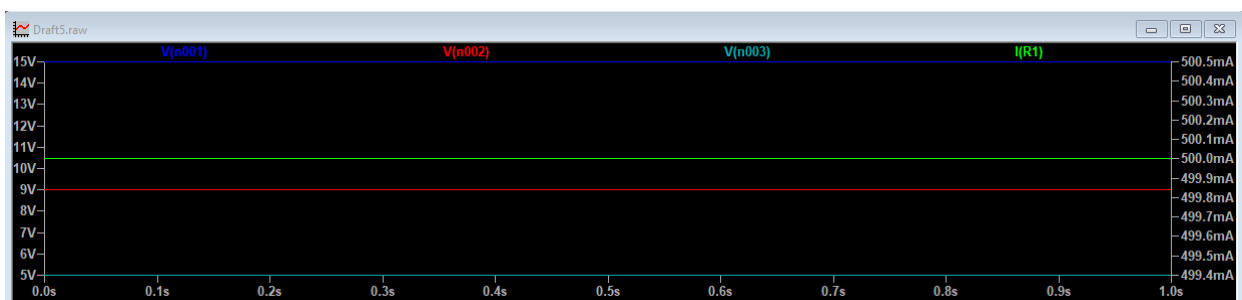


Рисунок 1.28 – Графіки всіх струмів та потенціалів у схемі

На рис. 1.28 синя лінія – це потенціал точки *a* (15 В), червона – потенціал точки *b* (9 В), а блакитна – потенціал точки *c* (5 В). Тепер, знаючи ці потенціали, можна обчислити падіння напруги на всіх резисторах:

$$U_{R1} = U_a - U_b = 15 - 9 = 6 \text{ В}$$

$$U_{R2} = U_b - U_c = 9 - 5 = 4 \text{ В}$$

$$U_{R3} = U_c - 0 = 5 - 0 = 5 \text{ В}$$


Ці самі величини можна також обчислити за законом Ома, знаючи величини струму та опорів:

$$U_{R1} = I \cdot R1 = 0,5 \cdot 12 = 6 \text{ В}$$

$$U_{R2} = I \cdot R2 = 0,5 \cdot 8 = 4 \text{ В}$$

$$U_{R3} = I \cdot R3 = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ В}$$

Як ми бачимо, результати збігаються, то ж, скоріш за все, наші розрахунки та результати симуляції вірні.

Щоб видалили непотрібні графіки, треба натиснути на кнопку , після чого курсор прийме форму ножиць. Тепер, якщо натиснути цими ножицями на назву графіка на легенді, він зникне (рис. 1.29).

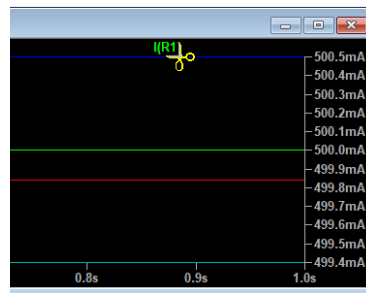


Рисунок 1.29 – Видалення графіку струму

Щоб завершити режим видалення, треба натиснути правою кнопкою миші у будь-якому місці. У такий самий спосіб можна видаляти і компоненти схеми.

1.6 Моделювання схем змінного струму

Давайте видалимо резистори R2 та R3, використовуючи інструмент «ножиці». Також треба видалити і всі провідники, що до них підходять (рис. 1.30).

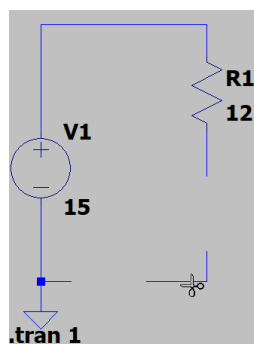


Рисунок 1.30 – видалення зайвих елементів схеми

Після цього додаємо на схему конденсатор \equiv та котушку індуктивності L на місце резисторів R2 та R3, та з'єднуємо їх провідниками. Результат представлений на рис. 1.31.

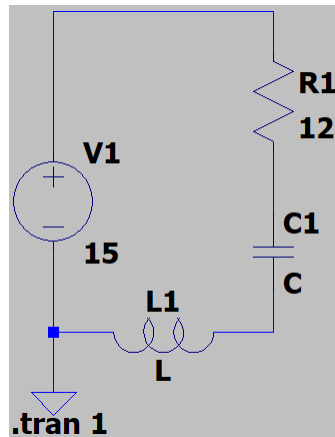


Рисунок 1.31 – Схема з конденсатором та котушкою індуктивності

Змінимо параметри конденсатора таким самим чином, як ми робили це для резистора та джерела живлення (рис. 1.32).

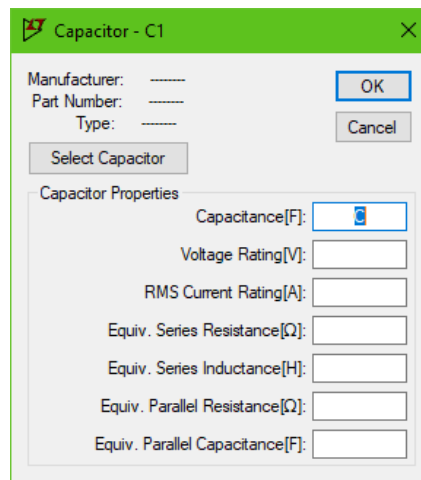


Рисунок 1.32 – Параметри конденсатора

Як ви бачите, у конденсатора набагато більше параметрів, ніж у резистора, але, як і для останнього, для нас поки що важливим є лише перший параметр "Capacitance[F]", що задає ємність конденсатора у Фарадах. Як відомо, зазвичай конденсатори мають набагато меншу ємність, ніж одна Фарада, тому часто використовують дробові величини: мікрофаради (uF), нанофаради (nF), пікофаради (pF). LTspice дозволяє використовувати ці префікси при заданні величин компонентів, тобто, якщо ємність дорівнює 100 мікрофард, можна записати 100u замість 0.0001. Давайте і запишемо це значення у поле "Capacitance[F]" та натиснемо кнопку "OK". Інші параметри ми зараз розглядати не будемо, вони використовуються,

щоб якомога більше наблизити модель конденсатора до фізичного компонента.

Тепер змінимо параметри котушки індуктивності (рис. 1.33).

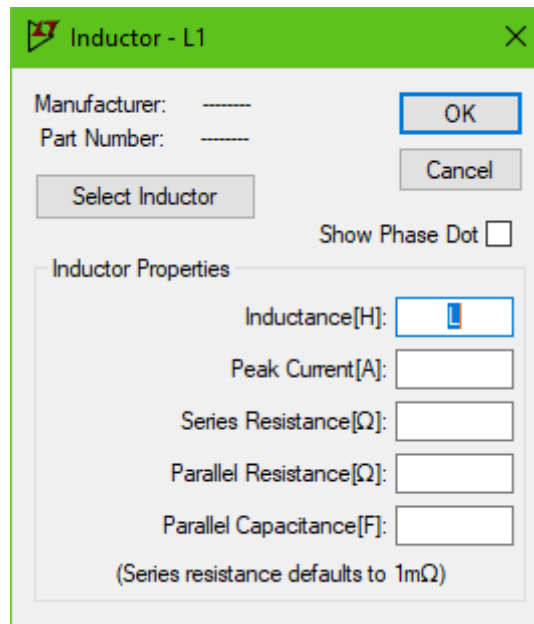


Рисунок 1.33 – Параметри котушки індуктивності

Як і для конденсатора, для нас поки що важливим є лише перший параметр “Inductance[H]”, що задає індуктивність котушки. В електроніці найбільш поширеними є такі дробові величини, як мілігенрі (mH) та мікрогенрі (μH). Давайте задамо для котушки L1 величину 50 мілігенрі (50m) та натиснемо кнопку “OK”. Інші параметри ми також поки що розглядати не будемо.

До речі, для резисторів також можна використовувати префікси для множників: кілоом (kΩ), мегаом (MΩ).

Давайте ще раз відкриємо параметри джерела ЕРС та натиснемо кнопку “Advanced”, після чого вікно параметрів стане значно більшим. У полі “Functions” у верхньому лівому куті можна задати форму сигналу, який буде генерувати джерело ЕРС:

- (none) – постійний струм.
- PULSE – періодичні імпульси прямокутної або трапецеїдальної форми.
- SINE – синусоїдальна періодична напруга.
- EXP – періодичні імпульси експоненційної форми
- SFFM – частотно-модульований сигнал.
- PWL – сигнал, форма якого задається за допомогою кусочно-лінійної апроксимації.
- PWL FILE – те ж саме, що й попереднє, але форма сигналу задається з обраного файлу.

Давайте оберемо синусоїдальний сигнал, після чого задамо його параметри, як на рис. 1.34.

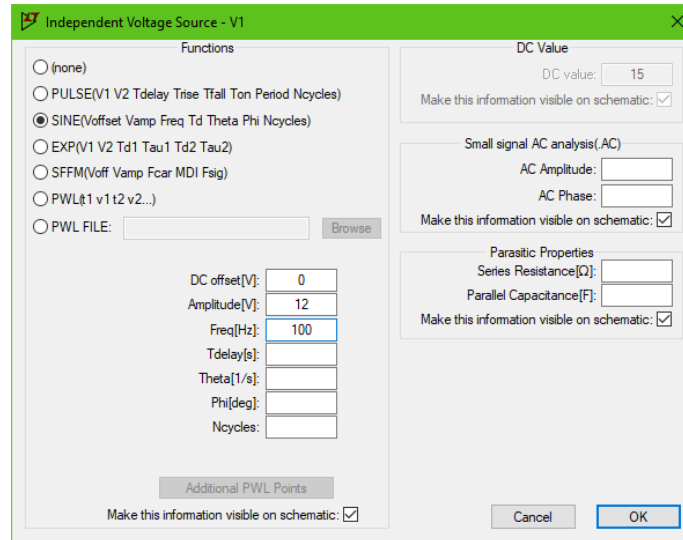


Рисунок 1.34 – Параметри джерела синусоїдальної напруги

- DC offset[V] – це постійна напруга, яка додається до синусоїдального сигналу. Якщо ми хочемо, щоб напруга була симетричною відносно нуля, цей параметр необхідно встановити рівним 0.
- Amplitude[V] – це амплітудне значення синусоїдального сигналу. Але насправді, це подвоєна амплітуда напруги, бо якщо ми задамо цей параметр, як 12, то напруга буде змінюватися від -12 до 12 В.
- Freq[Hz] – це частота зміни напруги.

Інші параметри нам поки що непотрібні, то ж ми їх пропустимо.

Після встановлення необхідних параметрів джерела змінної напруги, натискаємо кнопку “ОК”, щоб повернутися до схеми, яка тепер остаточно виглядає як на рис. 1.35.

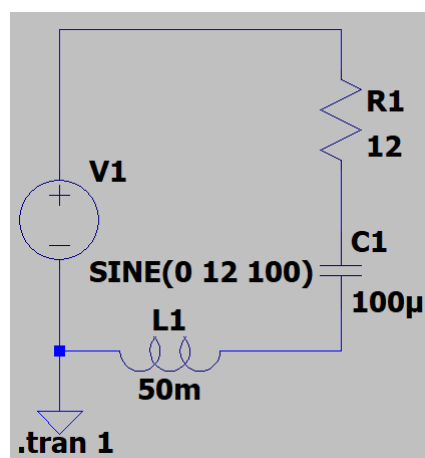



Рисунок 1.35 – Схема змінного струму з заданими параметрами

Давайте тепер знов натиснемо кнопку “Run”  та виведемо на графік струм через резистор R1 (рис. 1.36).

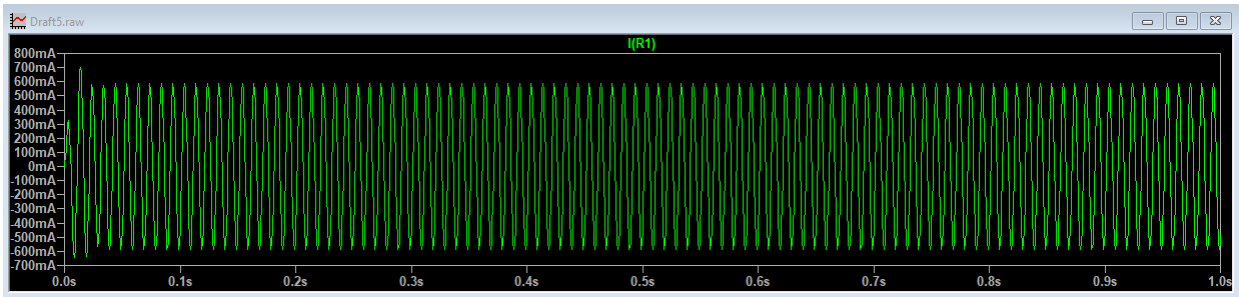



Рисунок 1.36 – Графік струму через резистор R1

Як ви бачите, хвилі синусоїди йдуть дуже щільно, то ж дуже складно роздивитися, що відбувається на графіку. Щоб наблизити якусь частину графіку, можна використати інструмент «Лупа» . Треба натиснути на ньому на панелі інструментів, а потім виділити ту частину графіка, яку ми хочемо роздивитися більш детально (рис. 1.37).

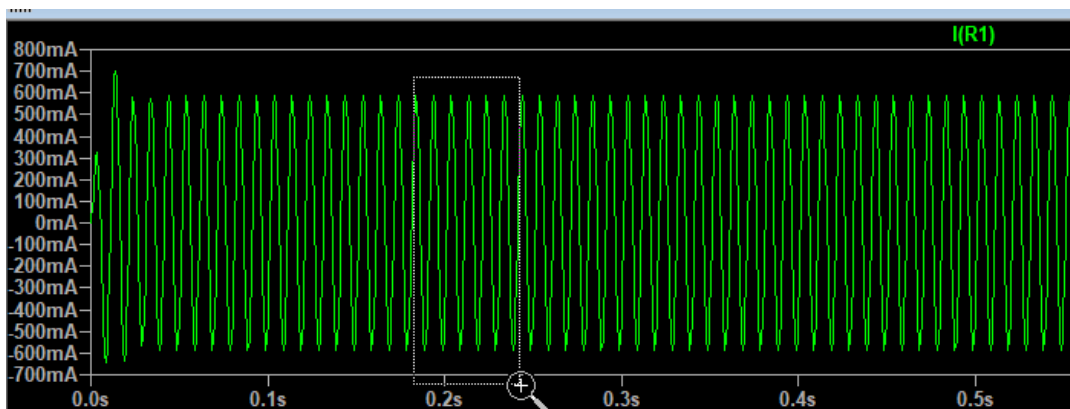


Рисунок 1.37 – Наближення частини графіку

Після цього графік буде виглядати як на рис. 1.38.

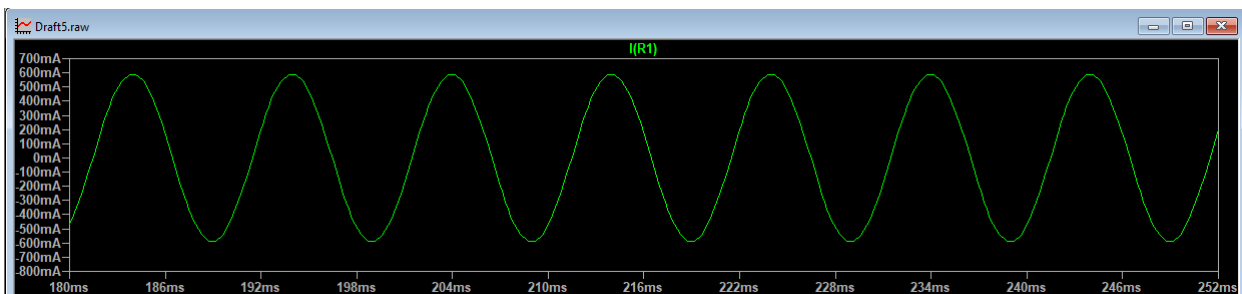


Рисунок 1.38 – Наближений графік

Тут вже набагато простіше роздивитися форму сигналу. Для того, щоб було більш зручно визначати величину струму (або напруги), можна включити лінії сітки. Для цього треба поставити галочку напроти пункту “Grid” у меню “Plot Settings” (рис. 1.39).

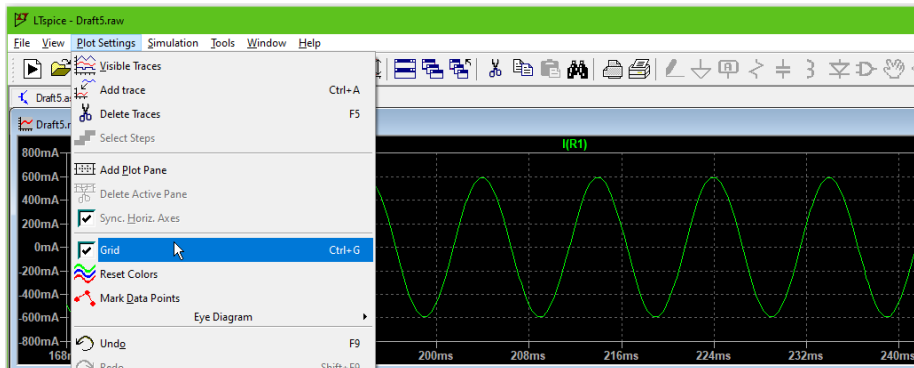


Рисунок 1.39 – Включення ліній сітки

Якщо ви хочете подивитися значення струму у будь-який час, наведіть курсор на назву графіку у легенді (курсор набуде вже знайомої вам форми руки з вказівним пальцем) та натисніть на ній лівою кнопкою миші (рис. 1.40).

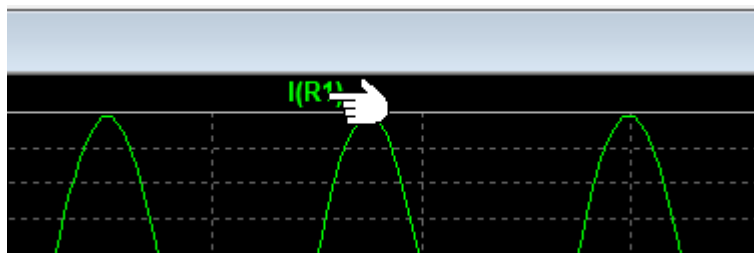


Рисунок 1.40 – Включення детальної інформації про графік

Після цього відкриється вікно, у якому буде показано значення струму у будь-який час, а на графіку з’явиться перехрестя, яке можна переміщувати, і таким чином дивитися величину струму у заданий момент часу (рис. 1.41).

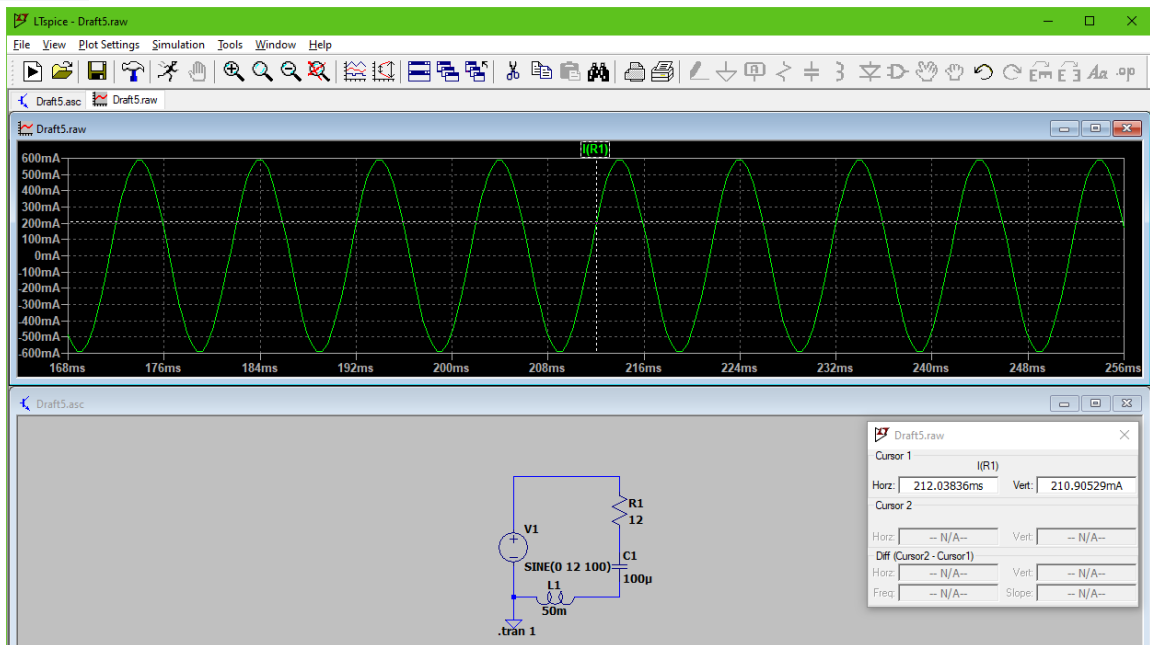


Рисунок 1.40 – Детальна інформація про графік

Давайте тепер так само додамо графіки потенціалів у тих самих точках, що й для попередньої схеми (рис. 1.41).

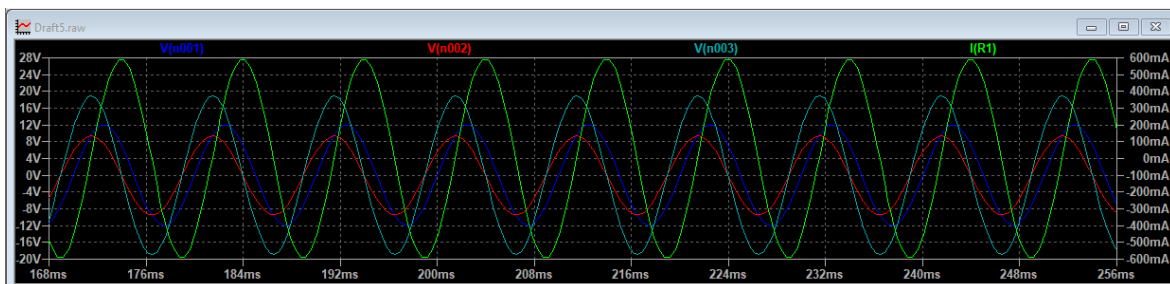


Рисунок 1.41 – Графіки струму та потенціалів у всіх точках схеми

Якщо для схеми з постійною напругою ще можна було якось обчислити падіння напруги на окремих резисторах, то для схеми зі змінною напругою було б добре мати можливість подивитися графіки саме падінь напруги на резисторі, конденсаторі, та котушці індуктивності, ніж просто потенціали в окремих точках. На щастя, LTspice має і таку можливість.

По аналогії зі схемою с постійним струмом:

$$U_{R1} = U_a - U_b = V(n001) - V(n002)$$

$$U_{C1} = U_b - U_c = V(n002) - V(n003)$$

$$U_{L1} = U_c - 0 = V(n003).$$

Тобто, щоб подивитися падіння напруги на резисторі та конденсаторі, нам треба якось обчислити різницю між потенціалами. Щоб це зробити, натискаємо правою кнопкою на поле графіку та обираємо пункт "Add Traces" (рис. 1.42).

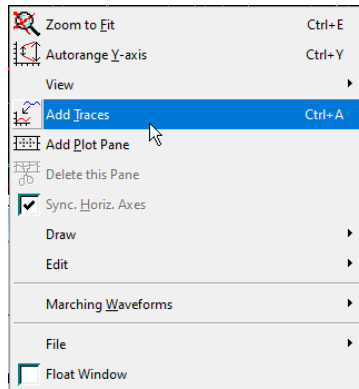


Рисунок 1.42 – Обирання пункту меню “Add Traces”

Після натискання на цьому пункті, відкриється наступне вікно (рис. 1.43).

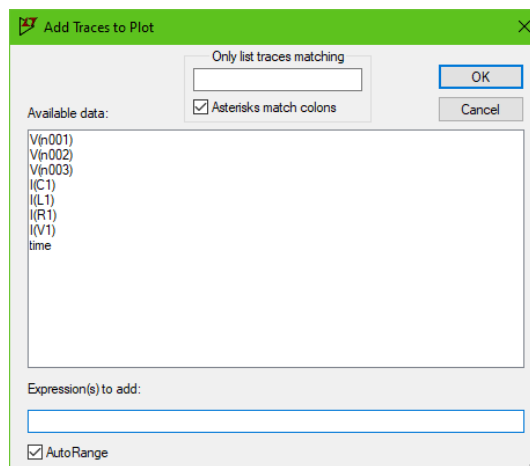


Рисунок 1.43 – Вікно додавання графіків

У полі “Available data:” присутні величини, з яких можна побудувати вираз у полі “Expression(s) to add:”. У полі “Expression(s) to add:” можна просто писати, а можна натиснути на відповідну назву у полі “Available data:”, і вона автоматично з’явиться у полі “Expression(s) to add:”.

То ж, для побудування графіку падіння напруги на резисторі нам потрібно створити вираз $V(n001) - V(n002)$. Для цього натискаємо на “V(n001)”, воно з’являється у полі “Expression(s) to add:”, після цього вручну пишемо там знак мінус, а потім клацаємо на “V(n002)”. В результаті, отримуємо такий вираз (рис. 1.44).

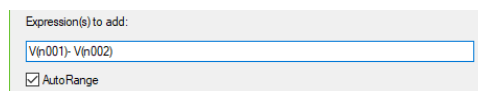


Рисунок 1.44 – Додавання графіку падіння напруги на резисторі

Після цього натискаємо кнопку “ОК”. Далі таким самим чином додаємо графік падіння напруги на конденсаторі (рис. 1.45).

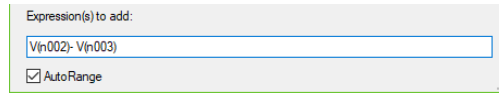


Рисунок 1.45 – Додавання графіку падіння напруги на конденсаторі

В результаті матимемо наступний графік (рис. 1.46).

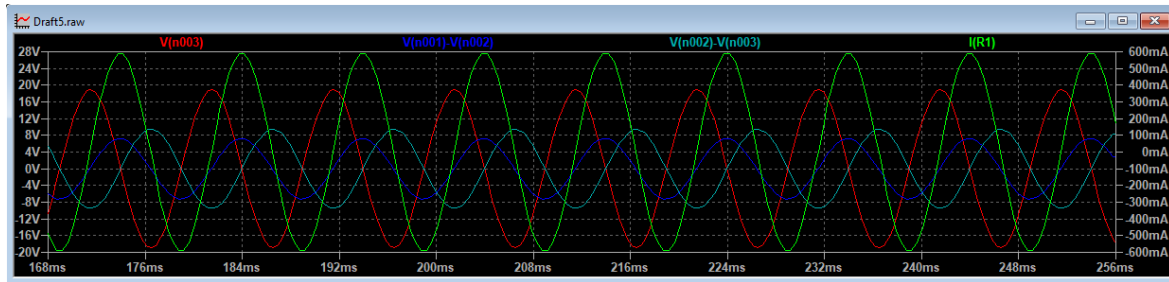


Рисунок 1.46 – Графік струму та падіння напруги на всіх компонентах

Як відомо, струм через конденсатор випереджує напругу на ньому на 90° , струм через котушку індуктивності відстає від напруги на ній на 90° , а струм через резистор співпадає по фазі з напругою. Все це ми можемо побачити на рис. 1.46.

Розрахунки цієї схеми ми не будемо робити, бо вони досить складні, і виходять за межі цього курсу.

1.7 Завдання до лабораторної роботи

1. Ознайомитись з поданням програми на екрані та інтерфейсом програми.
2. Використовуючи теоретичні та практичні відомості, наведені вище, ознайомитися з наборами елементів та їх властивостями.
3. Освоїти прийоми побудови та коригування схем, малювання провідників, зміни розташування елементів та провідників.
4. Вивчити властивості та освоїти прийоми задання параметрів елементів, що найчастіше використовуються.
5. Добре ознайомитися з вікном графіку симуляції. Навчитися налаштовувати масштаб, вимірювати амплітуди та періоди сигналів, додавати графіки виразів.
6. Розробити власну схему з використанням джерел постійної напруги та резисторів. Дослідити її роботу та виконати вимірювання.
7. Розробити власну схему з використанням резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, джерел постійного та змінного струму. Виконати вимірювання струмів та напруг на всіх компонентах схеми.



1.8 Контрольні питання та завдання

1. Призначення елементів інтерфейсу програми LTspice.
2. Додавання та налаштування електронних компонентів.
3. Симуляція електронних схем у програмі LTspice.
4. Додавання та дослідження графіків струмів та напруг.
5. Додавання та дослідження графіків виразів.

1.9 Перелік посилань

1. Моделювання електронних схем на еом з використанням програми LTspice: методичні вказівки до практичної роботи № 1 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023, 32 с.

2. LTspice XVII Tutorial : офіційний сайт. URL: <https://spiceman.net/ltspice/> (дата звернення: 19.01.2026).

3. LTspice - Getting Started in 8 Minutes : веб-сайт. URL: <https://www.circuitbread.com/tutorials/ltspice-getting-started-in-8-minutes> (дата звернення: 19.01.2026).



2 ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМЛЯЧІВ

Мета практичної роботи:

Вивчення принципу дії та схем випрямлячів постійного струму. Дослідження характеристик випрямлячів та їх залежностей від застосовуваних схем, фільтрів та опору навантаженню.

Завдання практичної роботи:

- Ознайомлення з принципом дії та принциповими електричними схемами випрямлячів.
- Вміння обрати правильний тип випрямляча для заданих умов та фільтру для нього.
- Вміння розраховувати параметри випрямлячів.

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Повна досліджувана схема однонапівперіодного випрямляча в LTspice. Опис, як проводились дослідження. Графіки вихідних напруг та струмів за пунктами завдання. Визначення теоретичних та експериментальних значень числових показників U_H , $U_{H \max}$, U_{H1} , q , $I_{\text{пр ср}}$, $I_{\text{пр макс}}$, $U_{\text{обр макс}}$. Опис, таблиця та графік залежності відповідно до завдання.
- Повна досліджувана схема мостового випрямляча в LTspice. Опис, як проводились дослідження. Графіки вихідних напруг та струмів за пунктами завдання. Визначення теоретичних та експериментальних значень числових показників: U_H , $U_{H \max}$, U_{H1} , q , $I_{\text{пр ср}}$, $I_{\text{пр макс}}$, $U_{\text{обр макс}}$. Опис, таблиця та графік залежності відповідно до завдання.
- Повна досліджувана схема трифазного випрямляча у LTspice. Опис, як проводились дослідження. Графіки вихідних напруг та струмів за пунктами завдання. Визначення теоретичних та експериментальних значень числових показників: U_H , $U_{H \max}$, U_{H1} , q , $I_{\text{пр ср}}$, $I_{\text{пр макс}}$, $U_{\text{обр макс}}$.
- Повна досліджувана схема випрямляча з множенням у LTspice. Самостійно отримані результати.
- Висновки
- Перелік посилань

2.1 Теоретичні дані

Система електропостачання в нашій країні та інших країнах засновані на використанні змінного струму. У нас застосовується змінна напруга 220 В частотою 50 Гц. Це дозволяє легко трансформувати його в напругу іншої величини. Різні споживачі безпосередньо використовують таку напругу. Це такі пристрої, як освітлювальні лампочки, нагрівачі, двигуни змінного струму та інші.

Однак крім них існує велика кількість інших пристроїв, для живлення яких потрібні джерела постійного струму. Насамперед, це безліч електронних пристроїв, що застосовуються у побуті, системах автоматизації та інших галузях промисловості. Постійний струм дають хімічні джерела струму: батареї та акумулятори. Але вони мають низьку потужність, обмежений період роботи та високу ціну.

Тому для живлення стаціонарних споживачів використовують випрямлячі постійного струму. Вони перетворюють напругу змінного струму на напругу постійного струму. На виході такого випрямляча виходить пульсуюча напруга постійного струму, яка придатна для живлення енергетичних споживачів, наприклад двигунів постійного струму. Для отримання постійної напруги без пульсацій на виході випрямляча підключають фільтри.

2.1.1 Однофазний однопівперіодний випрямляч

Схема однопівперіодного випрямляча представлена на рис. 2.1. Він випрямляє лише половину хвиль напруги змінного струму вторинної обмотки трансформатора, показаного на рис. 2.2.

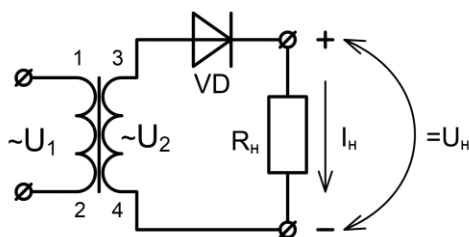


Рисунок 2.1 - Однопівперіодний випрямляч без фільтру

Під час позитивної півхвилі на виводі 3 трансформатора плюс, а на виводі 4 – мінус. Електричний струм I_n протікатиме по ланцюгу: з виводу трансформатора 3, через діод VD у прямій полярності, через навантаження R_n , на вивід трансформатора 4. Під час негативної півхвилі на виводі 3 трансформатора буде мінус, а на виводі 4 плюс. Шлях електричного струму I_n буде проходити: з виводу трансформатора 4, через навантаження R_n , через діод VD у зворотній полярності, на вивід трансформатора 3. Через те, що діод не пропускає струм у зворотній полярності, в цьому випадку струм



буде відсутній. Тому через навантаження R_H протікатиме пульсуючий струм постійної полярності.

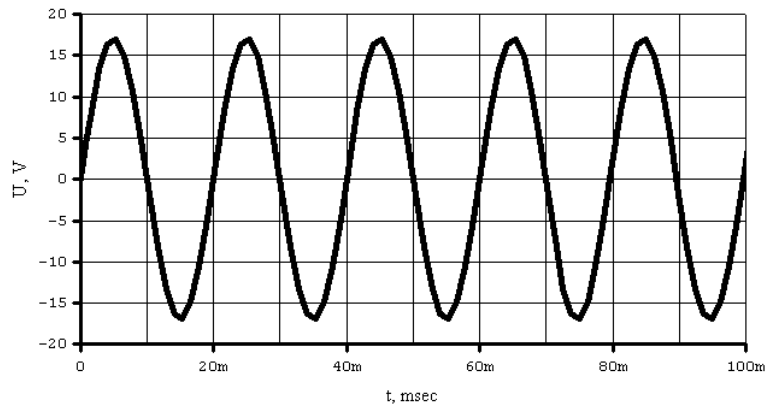


Рисунок 2.2 - Напряга на вторинній обмотці трансформатора U_2

На рисунку 2.3 показана форма пульсуючої постійної напруги на навантаженні для $U_2 = 12$ В. Зв'язок між діючою змінною напругою на виході трансформатора U_2 та середнім значенням випрямленої напруги на навантаженні U_H у нашому випадку складає $U_H \approx 5,4$ В і визначається виразом:

$$U_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega \tau d\omega \tau = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45U_2 \quad (2.1)$$

Амплітуда пульсацій дорівнює $U_{H \max} \approx 17$ В і визначається за виразом:

$$U_{H \max} = \sqrt{2}U_2 \quad (2.2)$$

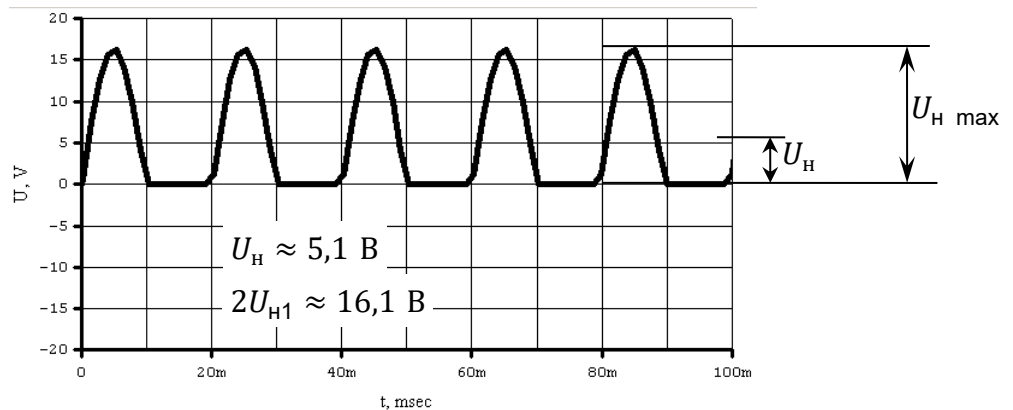


Рисунок 2.3 - Форма вихідної напруги однопівперіодного випрямляча без фільтра

Як бачимо, протягом періоду, що дорівнює 20 мсек напруга U_H збільшується від нуля до максимального значення $U_{H \max}$, а потім знову зменшується до нуля. Половину періоду вона дорівнює нулю. Крім постійної складової вона містить змінну складову частотою 50 Гц у вигляді суми гармонік, які можуть бути знайдені шляхом розкладання в ряд Фур'є кривої графіка. Для оцінки якості випрямленої напруги використовується коефіцієнт пульсацій:

$$q = \frac{U_{H1}}{U_H} \quad (2.3)$$

де U_{H1} – амплітуда 1-ої гармоніки

Для вибору типу випрямного діода VD необхідно знати середній прямий струм через діод $I_{пр\ ср}$ та максимальну зворотну напругу на діоді $U_{зв\ max}$. Для схеми (рис. 2.1) максимальна зворотна напруга на діоді дорівнює амплітуді змінної напруги на вторинній обмотці трансформатора. Названі параметри знаходяться за виразами:

$$I_{пр\ ср} = \frac{U_H}{R_H} \quad (2.4)$$

$$U_{зв\ max} = \sqrt{2}U_2 \quad (2.5)$$

Для покращення якості вихідної напруги випрямляча та згладжування пульсацій використовуються фільтри. Найчастіше в електронній техніці використовуються ємнісні фільтри, оскільки конденсатори необхідної ємності зараз мають невеликі розміри, вагу та ціну. Для цього паралельно навантаженню підключається конденсатор C_ϕ , що фільтрує (рис. 2.4). Чим більша ємність конденсатора і менше опір навантаження, тим більше згладжується форма напруги. На рис. 2.5 показано форму напруги при невеликій ємності конденсатора (5 мкФ). Протягом першої частини періоду (приблизно 5 мсек) відбувається заряд конденсатора. При помірному навантаженні ця гілка графіка практично збігається зі зростаючою частиною синусоїди U_2 . Протягом другої частини періоду (приблизно 15 мсек) конденсатор розряджається через навантаження. Ця гілка є експонентою з постійної часу $R_H C_\phi$. Наприкінці розряду напруга наближується до нуля. Проте на протязі всього періоду на навантаженні є напруга і протікає струм. Оскільки ємність конденсатора невелика, то й коефіцієнт пульсацій залишається великим. Для розрахунку коефіцієнта пульсацій q можна приблизно визначити U_{H1} за графіком (рис. 2.5). При використанні фільтра середня напруга на навантаженні та прямий струм через діод трохи зростають.

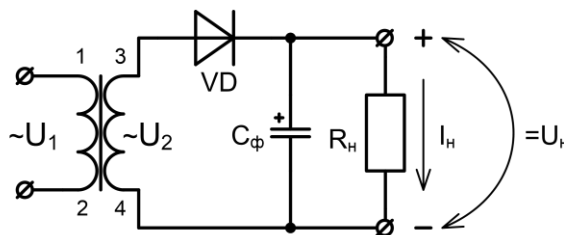


Рисунок 2.4 – Однопівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром

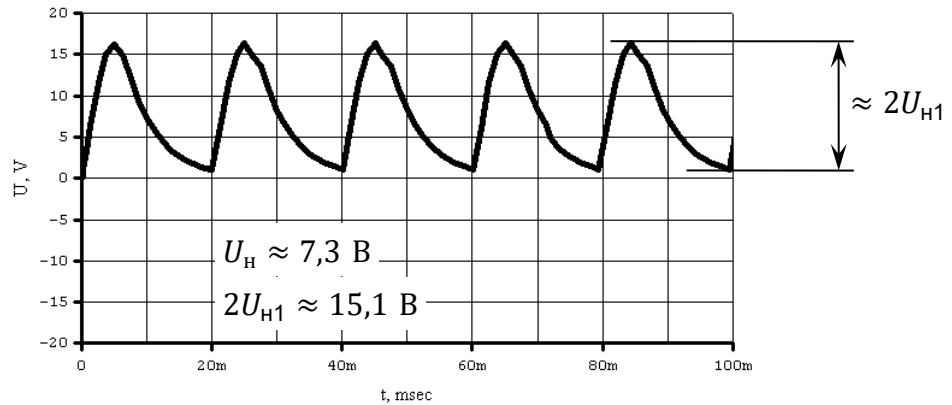


Рисунок 2.5 – Форма вихідної напруги однопівперіодного випрямляча з невеликим ємнісним фільтром

При використанні конденсатора, що фільтрує, великої ємності (200 мкФ) постійна часу зростає, розрядка конденсатора відбувається повільно і форма напруги значно покращується (рис. 2.6). При цьому коефіцієнт пульсацій прямує до нуля. Середня вихідна напруга U_H значно зростає і приблизно дорівнює $U_{H \max}$. Разом з цим зростає середній прямий струм через діод. За середньої величини ємності фільтра всі параметри мають проміжні значення.

У другій половині періоду, коли з вторинної обмотки подається напруга зворотної полярності, вона сумується з залишковою напругою на конденсаторі C_ϕ . Тому при використанні ємнісного фільтра максимальна зворотна напруга, що прикладається до діода, вдвічі більша і дорівнюватиме:

$$U_{зв \max} = 2\sqrt{2}U_2 \quad (2.6)$$

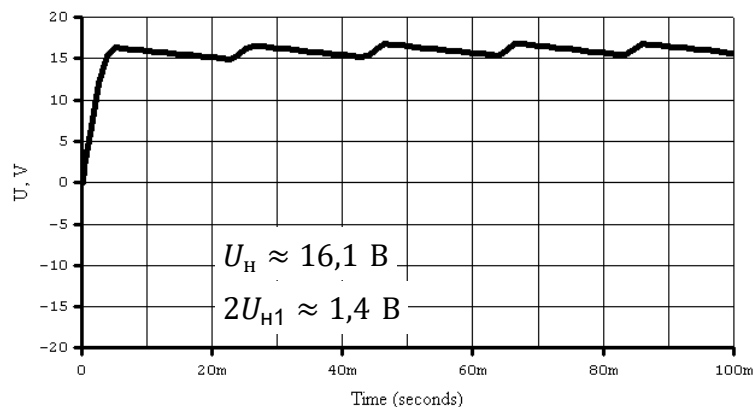


Рисунок 2.6 – Форма вихідної напруги однопівперіодного випрямляча з великим ємнісним фільтром

Слід також відзначити, що зі збільшенням частоти напруги живлення при одній і тій самій постійній часу зменшується тривалість періоду, і конденсатор не встигає розрядитися. На рис. 2.7 показано форму напруги при



використанні фільтра малої ємності та частоті напруги 400 Гц. При порівнянні рис. 2.5 і 2.7 видно, що середня напруга зросла, а амплітуда пульсацій зменшилася у кілька разів.

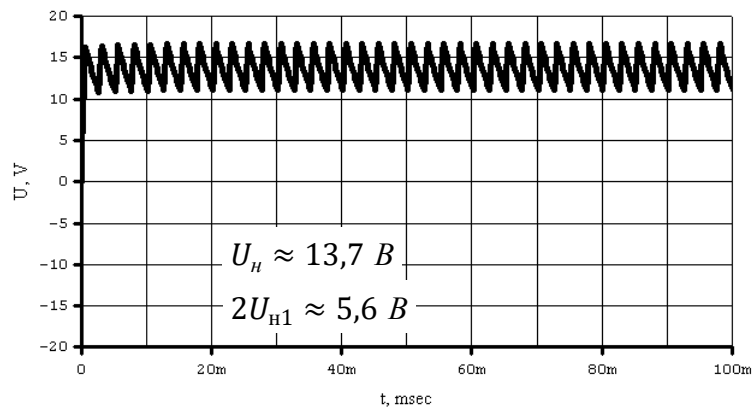


Рисунок 2.7 – Форма вихідної напруги однопівперіодного випрямляча з невеликим ємнісним фільтром при частоті 400 Гц

Оскільки при використанні однонапівперіодного випрямляча вихідну напругу хорошої якості можна отримати тільки при великому опорі навантаження і ємності фільтра, то така схема використовується при малих струмах навантаження або якщо до якості напруги живлення не висуваються вимоги. Крім того, такі випрямлячі використовуються в імпульсних блоках живлення електронних пристроїв, у яких частота становить десятки і навіть сотні кГц.

2.1.2 Однофазний двопівперіодний випрямляч з нульовим виводом

Схема двопівперіодного випрямляча представлена на рис. 2.8. Він являє собою два однопівперіодні випрямлячі включені паралельно на загальне навантаження. Кожен випрямляч живиться від окремої вторинної обмотки. Обмотки з'єднані разом загальним (нульовим) проводом, так що VD1 випрямляє позитивну півхвилю напруги вторинної обмотки, а VD2 негативну.

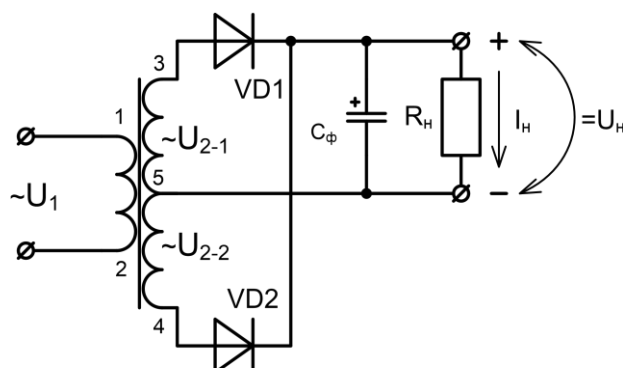


Рисунок 2.8 – Двопівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром

Під час позитивної півхвилі для обмотки U_{2-1} на виводі 3 трансформатора буде плюс, а на виводі 5 мінус. Електричний струм I_H протікатиме по ланцюгу: з виводу трансформатора 3, через діод VD1 у прямій полярності, через навантаження R_H , на вивід трансформатора 5. У той же час для обмотки U_{2-2} на виводі 5 трансформатора буде плюс, а на виводі 4 мінус. Шлях електричного струму I_H буде проходити: з виводу трансформатора 5, через навантаження R_H , через діод VD2 у зворотній полярності, на вивід трансформатора 4. Оскільки діод не пропускає струм у зворотній полярності, в цьому ланцюзі струм буде відсутній.

Під час негативної півхвилі для обмотки U_{2-1} на виводі 3 трансформатора буде мінус, а на виводі 5 – плюс. Шлях електричного струму I_H буде проходити: з виводу трансформатора 5, через навантаження R_H , через діод VD1 у зворотній полярності, на вивід трансформатора 3. Оскільки діод не пропускає струм у зворотній полярності, в цьому ланцюзі струм буде відсутній. У той же час для обмотки U_{2-2} на виводі 5 трансформатора буде мінус, а на виводі 4 – плюс. Електричний струм I_H протікатиме по ланцюгу: з виводу трансформатора 4, через діод VD2 у прямій полярності, через навантаження R_H , на вивід трансформатора 5.

Таким чином, під час позитивної півхвилі струм протікає через діод VD1, а під час негативної через діод VD2. Форма вихідної напруги без фільтру показана на рис. 2.9. Частота пульсацій становить 100 Гц і вдвічі більше ніж у однопівперіодної схеми.

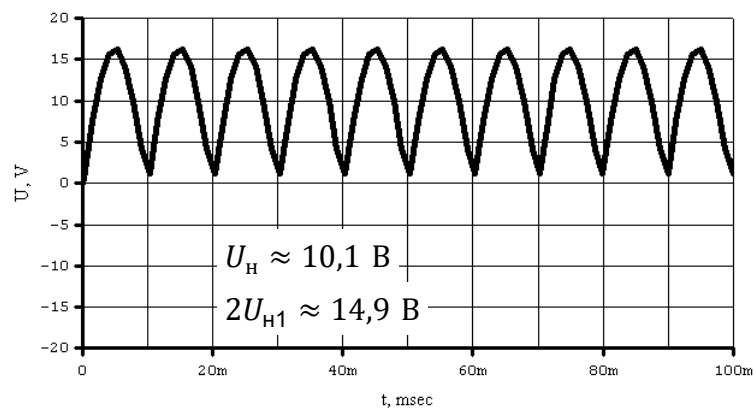


Рисунок 2.9 – Форма вихідної напруги двопівперіодного випрямляча без фільтра

Для двопівперіодного випрямляча середнє значення випрямленої напруги на навантаженні становить $U_H \approx 10,8 V$ і визначається за виразом:

$$U_H = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega \tau d\omega \tau = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9 U_2 \quad (2.7)$$

Коефіцієнт пульсацій без фільтра $q \approx 0,67$.

При використанні невеликого ємнісного фільтра отримуємо вихідну напругу у формі, представленої на рис. 2.10. У порівнянні з рис. 2.5 амплі-



туда пульсації стала меншою. Це стало можливим тому, що протягом одного періоду двічі відбувається заряд і розряд конденсатора, що фільтрує. Час розряду також скоротився приблизно вдвічі.

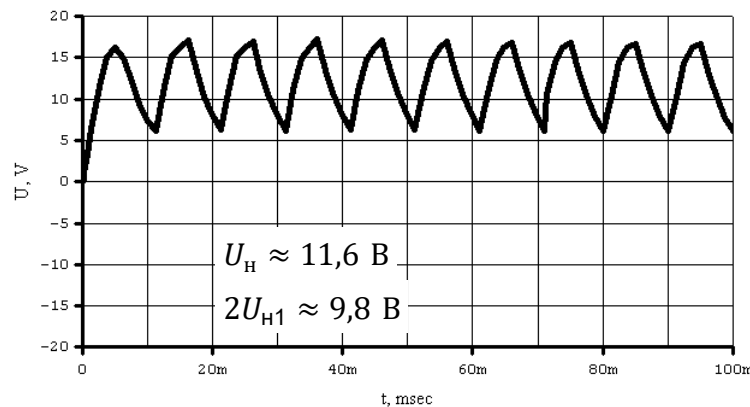


Рисунок 2.10 – Форма вихідної напруги двопівперіодного випрямляча з невеликим ємнісним фільтром

Оскільки струм навантаження по черзі протікає через діоди, то середній прямий струм через діоди за інших рівних умов буде вдвічі меншим ніж в однопівперіодній схемі і складе:

$$I_{\text{пр ср}} = \frac{U_H}{2R_H} \quad (2.8)$$

Максимальна зворотна напруга на діодах така сама, як і в однопівперіодного випрямляча, вирази (2.5) і (2.6).

За інших рівних умов двопівперіодний випрямляч забезпечує більш якісну напругу. Але для цього необхідно два діоди і складніший трансформатор, через що він зустрічається рідше, ніж мостовий випрямляч.

2.1.3 Однофазний мостовий випрямляч

Схема мостового випрямляча представлена рисунку 2.11. Для випрямлення струму у ньому використовується міст із чотирьох діодів. До однієї діагоналі моста а-в підводиться змінна напруга, з другої с-d знімається постійна напруга.

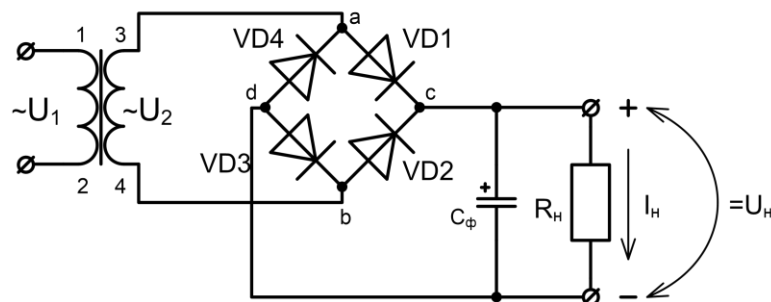


Рисунок 2.11 - Мостовий випрямляч з ємнісним фільтром

Під час позитивної півхвилі на виводі 3 трансформатора плюс, а на виводі 4 мінус. Електричний струм I_H протікатиме по ланцюгу: з виводу трансформатора 3, вузол a, через діод VD1 у прямій полярності, вузол c, через навантаження R_H , вузол d, через діод VD3 у прямій полярності, вузол b, на вивід трансформатора 4. Під час негативної півхвилі на виводі 3 трансформатора буде мінус, а на виводі 4 плюс. Електричний струм I_H протікатиме по ланцюгу: з виводу трансформатора 4, вузол b, через діод VD2 у прямій полярності, вузол c, через навантаження R_H , вузол d, через діод VD4 у прямій полярності, вузол a на вивід трансформатора 3.

Таким чином, під час позитивної півхвилі струм протікає через діоди VD1 та VD3, а під час негативної через діоди VD2 та VD4. Тому через навантаження R_H протікатиме пульсуючий струм постійної полярності. Через те, що мостовий випрямляч випрямляє обидві півхвилі напруги, форма вихідної напруги буде як у двопівперіодного випрямляча (рис. 2.12 і 2.13). Частота пульсацій становить 100 Гц і вдвічі більше, ніж у однопівперіодної схеми. Слід також врахувати, що при використанні мостового випрямляча в кожному ланцюзі проходження струму послідовно включені по два діоди, а не як у розглянутих схемах. Оскільки на кожному діоді відбувається падіння напруги 0,5 ... 1, то вихідна напруга буде трохи менше.

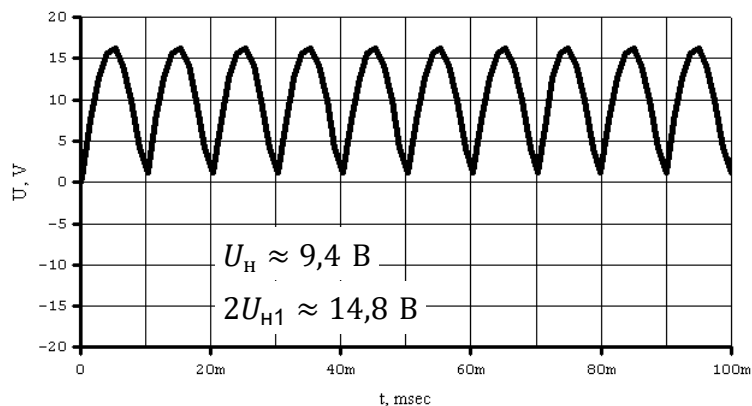


Рисунок 2.12 – Форма вихідної напруги мостового випрямляча без фільтра

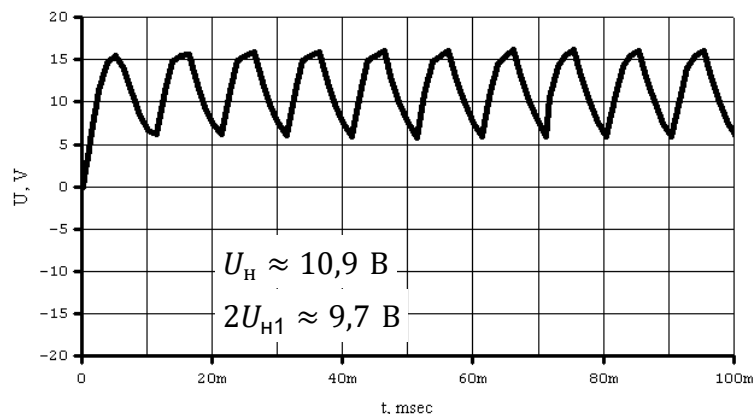


Рисунок 2.13 – Форма вихідної напруги мостового випрямляча з невеликим ємнісним фільтром



Розглянемо також форму вихідної напруги для фільтру великої ємності (рис. 2.14). Амплітуда пульсацій природно виходить менше ніж на рис. 2.6.

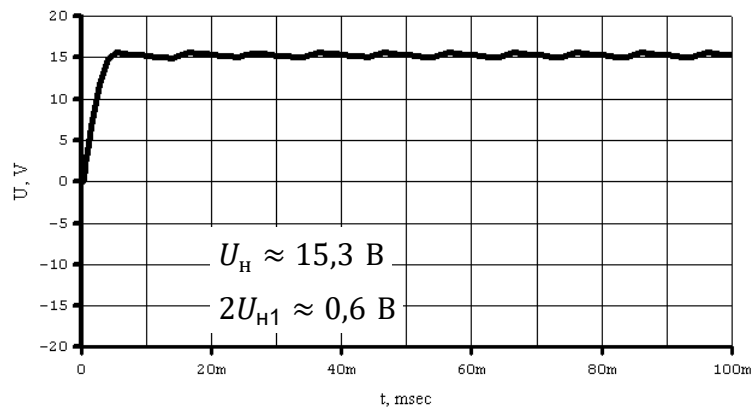


Рисунок 2.14 – Форма вихідної напруги двопівперіодного та мостового випрямляча з великим ємнісним фільтром

Для мостового випрямляча середнє значення випрямленої напруги на навантаженні та коефіцієнт пульсацій без фільтра такі ж, як у двопівперіодного випрямляча, вираз (2.7): $U_H \approx 0,9, U_2 \approx 10,8 В$ и $q \approx 0,67$.

Оскільки струм навантаження по черзі протікає через пари діодів, то середній прямий струм:

$$I_{\text{пр ср}} = \frac{U_H}{2R_H} \quad (2.9)$$

Оскільки зворотна напруга прикладається до двох послідовно з'єднаних діодів, вона розділяється між ними і буде дорівнювати:

$$U_{\text{зв max}} = \sqrt{2}U_2 \quad (2.10)$$

Це буде правильно тільки для діодів з однаковими характеристиками.

У мостових і двопівперіодних випрямлячах можуть бути також використані індуктивні фільтри (рис. 2.15). Дросель L_ϕ в них включається послідовно з навантаженням і є обмоткою з великим числом витків намотаних на магнітному сердечнику. При протіканні струму в індуктивності накопичується енергія. Коли у вихідній напрузі випрямляча утворюється провал, індуктивність виробляє ЕРС самоіндукції та підтримує протікання струму у навантаженні.

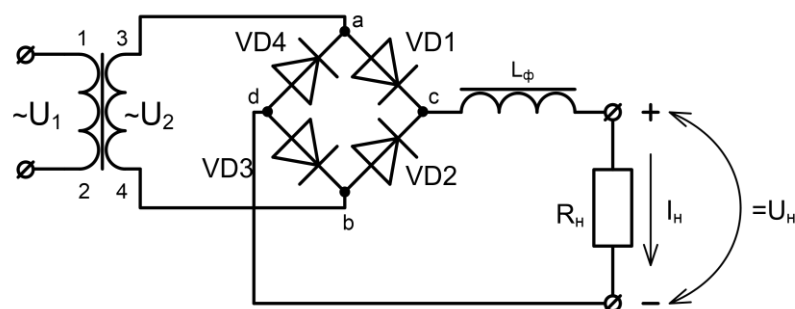


Рисунок 2.15 – Мостовий випрямляч з індуктивним фільтром



На рис. 2.16 показано форму вихідної напруги при використанні індуктивності $L_{\phi} = 2 \text{ H}$. Як бачимо, індуктивний фільтр згладжує вихідну напругу приблизно так само, як ємнісний фільтр малої ємності.

При збільшенні струму навантаження індуктивний фільтр поводить себе інакше, ніж ємнісний. Якщо при зменшенні опору навантаження і збільшенні струму ефективність ємнісного фільтра зменшується, а пульсації зростають, то ефективність індуктивного фільтра навпаки зростає. На рис. 2.17 показана форма напруги при тому ж індуктивному фільтрі та опорі навантаження менше у п'ять разів. У порівнянні з рис. 2.16 середня напруга дещо знизилася, а амплітуда першої гармоніки U_{H1} зменшилася з 4 до 1 В. Зниження середньої напруги пояснюється тим, що реальний дросель має активний опір. Урахування ЕРС самоіндукції потребує використання діодів з великою зворотною напругою.

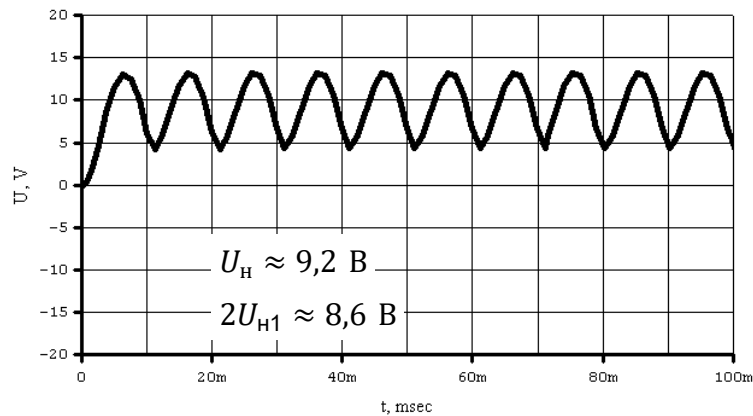


Рисунок 2.16 – Форма вихідної напруги двопівперіодного та мостового випрямляча з індуктивним фільтром

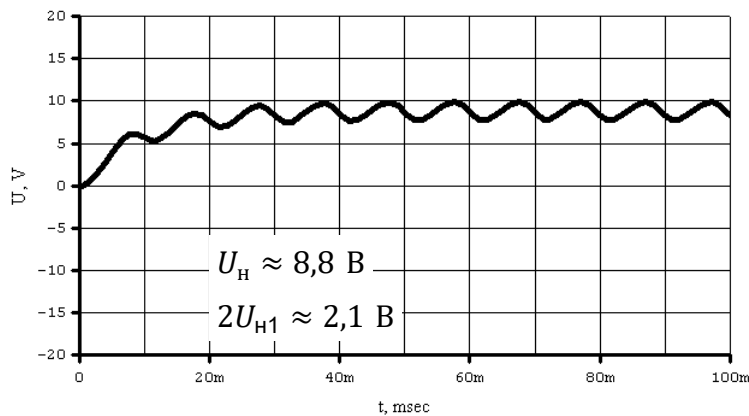


Рисунок 2.17 – Форма вихідної напруги двопівперіодного та мостового випрямляча з індуктивним фільтром та великим струмом навантаження

Оскільки дросель ефективно працює тільки при великих струмах навантаження, має значну вагу і розміри, то його застосування зустрічається рідше. Наприклад, у зварювальній апаратурі постійного струму.

2.1.4 LC и RC фільтри

Хороше згладжування пульсацій дають комбіновані фільтри LC та RC типів. У них, за тієї ж загальної ємності фільтра, пульсації менше. Вихідна характеристика крутіша. На рис. 2.18 показана схема підключення LC фільтра до мостового випрямляча. Спільне застосування двох типів фільтруючих елементів дозволяє отримати вихідну напругу хорошої форми при менших значеннях індуктивності та ємності та в широкому діапазоні струмів навантаження. Фільтруючий конденсатор, позначений пунктирною лінією, може бути відсутнім.

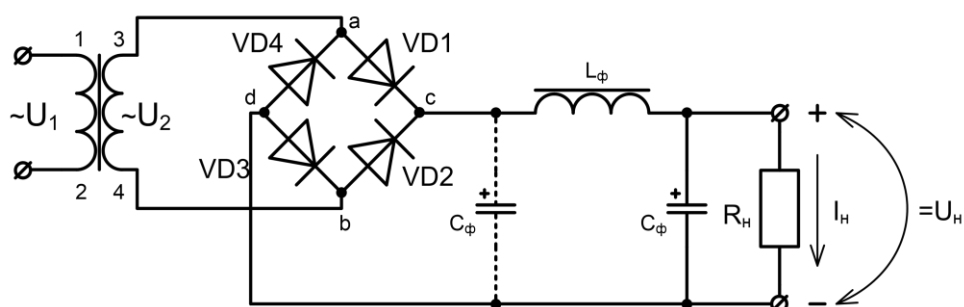


Рисунок 2.18 – Мостовий випрямляч з LC-фільтром

На рис. 2.19 показана схема підключення RC фільтра до мостового випрямляча. Таке включення опору та ємності називається інтегруючим ланцюжком і являє собою аперіодичну ланку. Воно добре згладжує різкі пульсації. Оскільки R_{ϕ} послідовно включений з навантаженням, то при збільшенні струму напруга на навантаженні падає. Тому такі фільтри використовуються для пристроїв з малими струмами або при високих напругах.

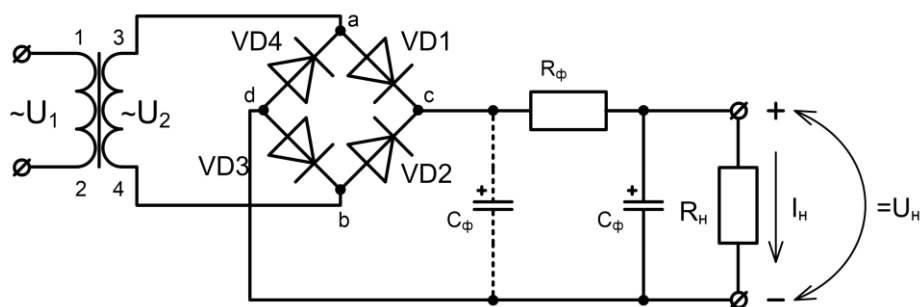


Рисунок 2.19 – Мостовий випрямляч з RC-фільтром

2.1.5 Випрямлячі з подвоєнням та множенням напруги

Ці випрямлячі дозволяють за інших рівних умов отримати вихідну напругу в два, три і більше разів вище, ніж випрямлячі інших типів. Є ціла низка різних схем таких випрямлячів. Розглянемо найпоширеніші.



На рис. 2.20 показано схему симетричного випрямляча з подвоєнням напруги. Він складається з двох однопівперіодних випрямлячів. Під час позитивної півхвилі (плюс на виводі 3 трансформатора, мінус на виводі 4) через діод $VD1$ відбувається зарядження конденсатора C_1 . Під час негативної напівхвилі (плюс на виводі 4 трансформатора, мінус на виводі 3) через діод $VD2$ відбувається зарядження конденсатора C_2 . Кожен конденсатор заряджається до напруги U_c як в однополуперіодному випрямлячі, а складаючись разом вони дають подвоєну напругу.

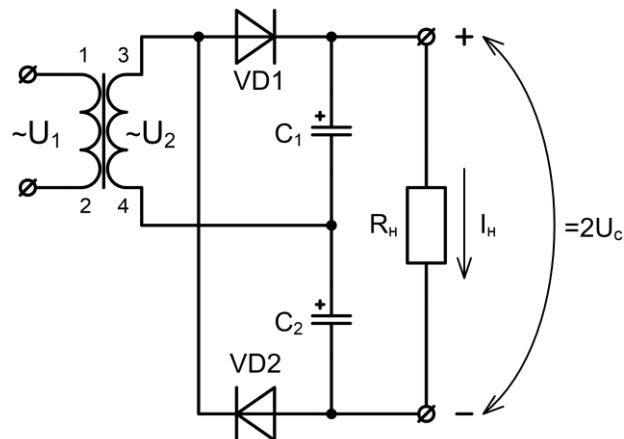


Рисунок 2.20 – Симетричний випрямляч із подвоєнням напруги

Форма напруги на навантаженні показана на рис. 2.21. На ньому видно, як при подачі напруги спочатку заряджається один конденсатор, потім другий, а потім робота поступово приходить до режиму, що встановився.

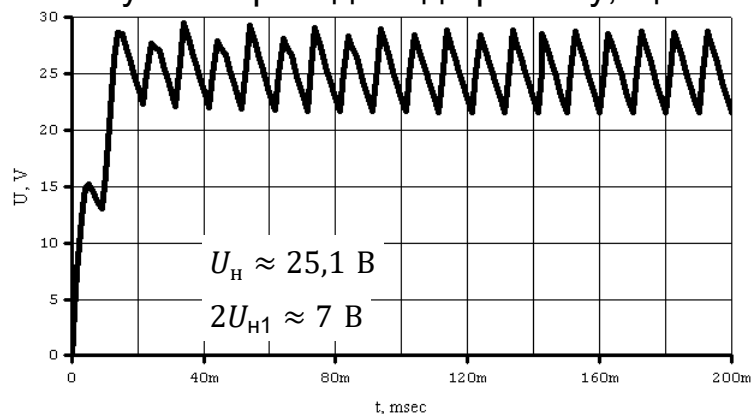


Рисунок 2.21 – Форма вихідної напруги випрямляча з подвоєнням напруги

Вимоги до діодів, такі ж, як у однопівперіодного випрямляча.

На рис. 2.22 представлена схема послідовного помножувача напруги. Такий помножувач має кілька ступенів множення, у схемі 4 ступеня. Під час першої позитивної хвилі напруги через діод $VD1$ конденсатор C_1 заряджається до напруги U_c . Під час негативної напівхвилі сума напруг $U_2 + U_{c1}$ заряджає конденсатор C_2 через діод $VD2$ до подвоєної напруги $2U_c$. Під



час наступної позитивної напівхвилі сума напруг $U_2 + U_{c2} - U_{c1}$ заряджає конденсатор C_3 через діод $VD3$ до подвоєної напруги $2U_c$. Під час наступної негативної напівхвилі сума напруг $U_2 + U_{c3} + U_{c1} - U_{c2}$ заряджають конденсатор C_4 через діод $VD4$ до подвоєної напруги $2U_c$. Потім процес повторюється. Таким чином, між виводом 4 і вузлом c встановлюється однарна напруга, а між парами вузлів ac , ce , db встановлюються подвійні напруги. Вибравши відповідні вузли, можна отримати вихідну напругу в діапазоні від одно до чотириразової величини. Якщо змінити кількість ступенів, можна отримати інші ступені множення. Наприклад, якщо залишити лише два ступені ($VD1, C_1, VD2, C_2$), то отримуємо подвійник напруги.

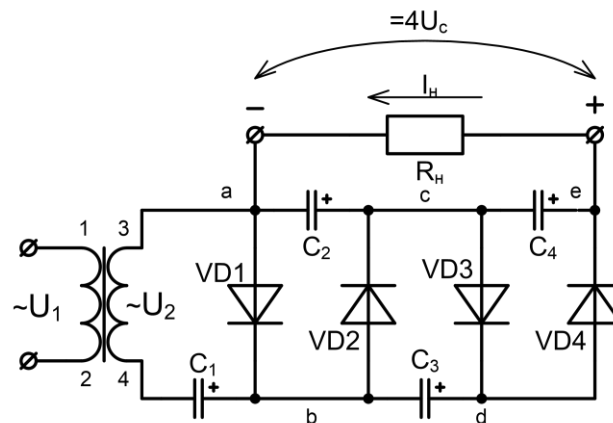


Рисунок 2.22 – Послідовний помножувач напруги

На рис. 2.23 показано форму вихідної напруги. Видно як поступово наростає напруга протягом пів секунди, а потім процес стабілізується.

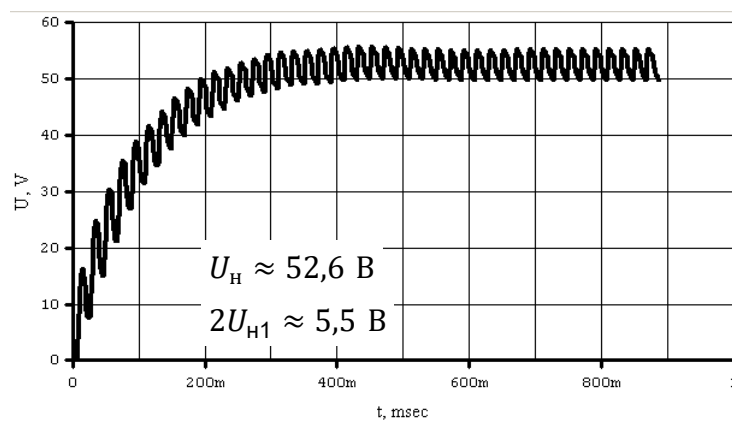


Рисунок 2.23 – Форма вихідної напруги випрямляча з подвоєнням напруги

У принципі застосування помножувачів дозволяє від однієї обмотки трансформатора отримати кілька напруг. Але на відміну від інших схем випрямлячів, зі збільшенням струму навантаження вихідна напруга помножувача сильно падає, а пульсації зростають. Тому помножувачі в основному застосовуються при малих струмах навантаження і у випадках,



коли потрібна дуже висока напруга. Наприклад, для подачі напруги 20...30 тисяч вольт на кінескопи кольорових телевізорів.

2.1.6 Трифазні випрямлячі

У трифазних системах електроживлення одночасно подаються три змінні напруги з однаковою амплітудою та частотою, але зсунутих один до одного по фазі на 120° . Залежно від схеми включення обмоток трифазного трансформатора (зірка чи трикутник) використовуються дві схеми трифазних випрямлячів.

Якщо обмотки трансформатора з'єднані у формі зірки, то використовується схема з нульовим виводом (рис. 2.24). Кожна фаза випрямляється окремим діодом. При цьому у відкритому стані перебуватиме той діод, на фазі якого напруга більша, ніж в інших фазах. Струм впливає із цієї фази, проходить через навантаження і повертається на загальний (нульовий) провід. Так як фазні напруги перекриваються, то на виході напруга ніколи не падатиме до нуля. Протягом одного періоду по черзі працюють усі діоди. При цьому кожен діод проводить струм на інтервалі часу:

$$\phi = \frac{2\pi}{3} \quad (2.11)$$

Тому частота пульсацій вихідної напруги становитиме 150 Гц, а коефіцієнт пульсацій без фільтра $q \approx 0,25$. Середнє значення випрямленої напруги:

$$U_H = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}U_2 \sin \omega \tau d\omega\tau = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \approx 1.17U_2 \quad (2.12)$$

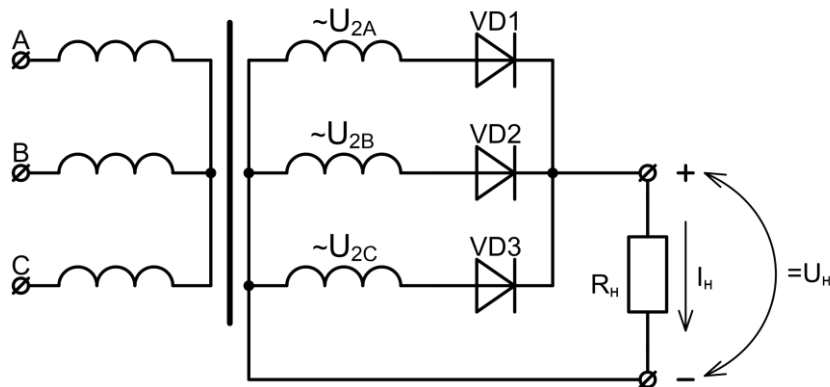


Рисунок 2.24 – Трифазний випрямляч з нульовим виводом

На рис. 2.25 показана форма вихідної напруги випрямляча та форма змінної напруги у кожній фазі. Навіть без фільтра вихідна напруга має задовільну форму.

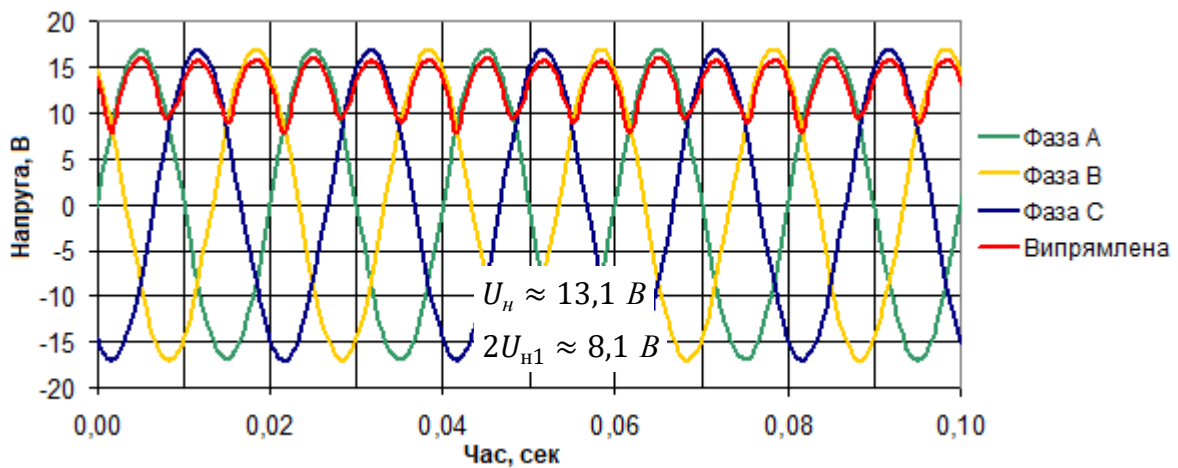


Рисунок 2.25 – Форма вихідної напруги трифазного випрямляча з нульовим виводом

Струм навантаження розподіляється між трьома діодами, тому середній прямий струм:

$$I_{\text{пр ср}} = \frac{U_H}{3R_H} \quad (2.13)$$

Максимальна зворотна напруга на діодах дорівнює амплітуді лінійної напруги, яка в $\sqrt{3}$ раз більше фазної:

$$U_{\text{зв max}} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_2 \quad (2.14)$$

Трифазний мостовий випрямляч може застосовуватися при включенні обмоток трансформатора у формі зірки і у формі трикутника (рис. 2.26). У кожний момент часу струм проходить через два діоди. Він виходить із фази, в якій є позитивна напруга найбільшої величини, проходить через відповідний діод правої (катодної) групи (VD2, VD4, VD6), потім через навантаження. Далі струм повертається у фазу, в якій на даний момент найменша (негативна) напруга через відповідний діод лівої (анодної) групи (VD1, VD3, VD5). За період 6 разів відбувається перемикання між фазами. Тому частота пульсацій вихідної напруги становитиме 300 Гц, а коефіцієнт пульсацій без фільтра $q \approx 0,057$. Середнє значення випрямленої напруги:

$$U_H = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} \sqrt{2}U_{2\text{ліні}} \sin \omega \tau d\omega \tau = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{ліні}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2.34U_2 \quad (2.15)$$

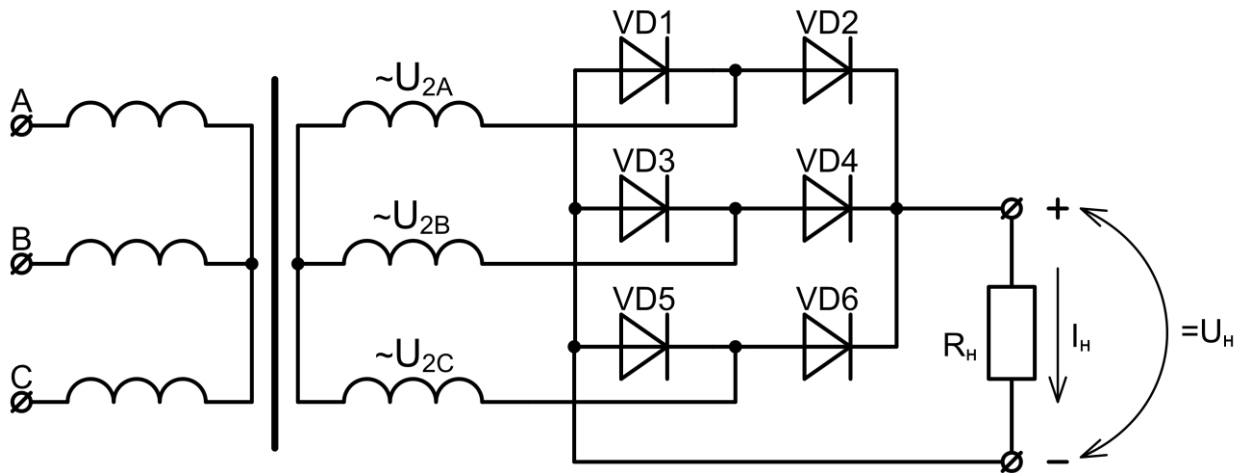


Рисунок 2.26 – Трифазний мостовий випрямляч

На рис. 2.27 показана форма вихідної напруги випрямляча та форма змінної напруги у кожній фазі. Навіть без фільтра вихідна напруга має відмінну форму, таку як в однофазних випрямлячах з фільтром. При тій же діючій напрузі на вторинній обмотці трансформатора, середня напруга випрямлена значно, майже вдвічі, перевищує вихідну напругу інших випрямлячів.

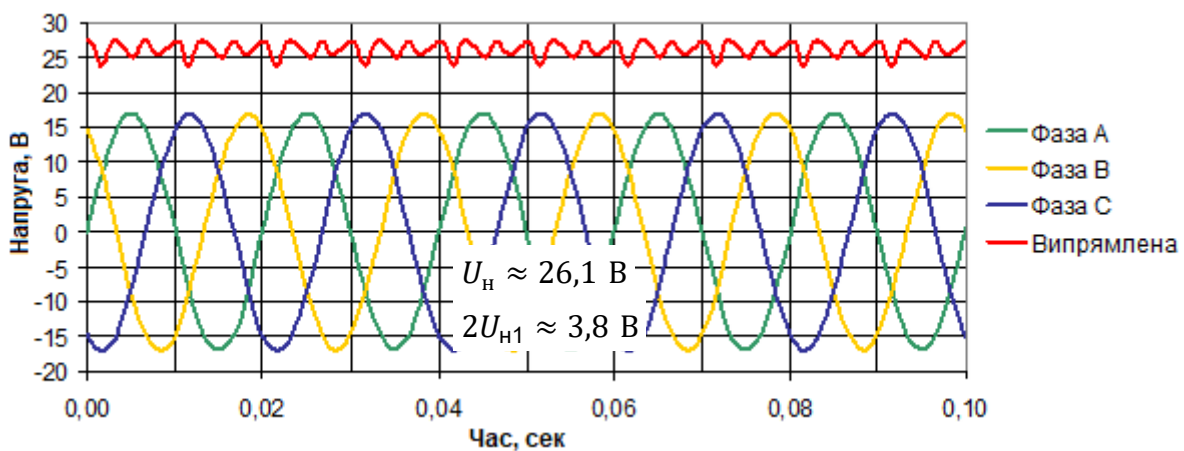


Рисунок 2.27 – Форма вихідної напруги трифазного мостового випрямляча

Струм навантаження по черзі протікає через один діод катодної та анодної групи, тому середній прями́й струм:

$$I_{\text{пр ср}} = \frac{U_H}{3R_H} \quad (2.16)$$

Максимальна зворотна напруга на діодах вдвічі менша, ніж у схемі з нульовим виводом:

$$U_{\text{зв max}} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2}}{2} U_2 \quad (2.17)$$

2.1.7 Загальні зауваження щодо роботи випрямлячів

Наведені в теоретичній частині роботи описи роботи схем, розрахункові формули та деякі числові показники є теоретичними. У реальних практичних схемах показники вихідної напруги випрямлячів, наведені на графіках, дещо відрізняється від зазначених теоретичних значень. Це зумовлюється наступними причинами.

Графіки отримані за допомогою пакета імітаційного моделювання. Дискретний характер моделювання та наближений опис елементів вносять свої похибки.

Реальний діод є нелінійним елементом. Він має прямий і зворотний опір, які нелінійно залежать від напруги. Падіння напруги на діоді, крім того, спричинене особливостями PN-переходу. Параметри діода також залежать від його моделі та температури навколишнього середовища.

Обмотки трансформаторів, від яких живляться випрямлячі, мають власну індуктивність і активний опір. Це може суттєво вплинути на форму напруги випрямляча.

Індуктивні фільтри мають активний опір, на якому відбувається падіння напруги.

2.2 Завдання до лабораторної роботи

2.2.1 Дослідження однопівперіодного випрямляча

1. Зібрати в LTspice схему однопівперіодного випрямляча відповідно до рис. 2.28.

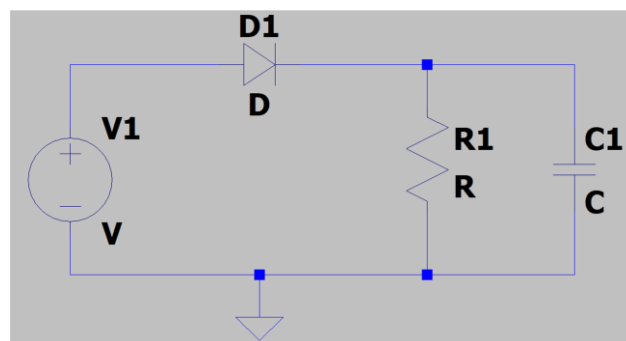


Рисунок 2.28 - Дослідження однопівперіодного випрямляча

2. Значення V1, C1 та R1 вибрати з таблиці 2.1 згідно з номером варіанта.

Джерело ЕРС V1 сконфігурувати як джерело змінної напруги з частотою 50 Гц та амплітудою згідно з таблицею 2.1. Тип діоду D1 можна обрати, якщо натиснути на ньому правою кнопкою миші, та в вікні властивостей діода натиснути кнопку "Pick New Diode" (рис. 2.29).

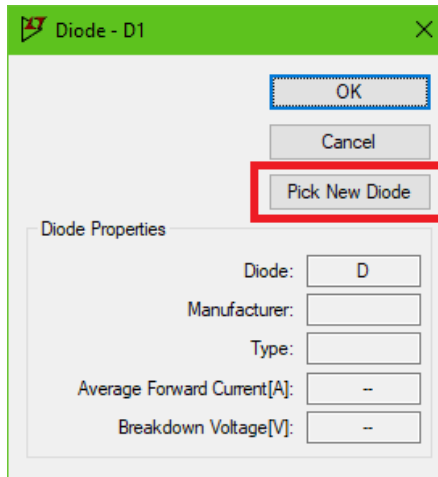


Рисунок 2.29 – Вікно властивостей діода

Далі відкриється вікно з таблицею, де представлені реально існуючі діоди з їхніми параметрами (рис. 2.30). Обирайте діоди, у яких тип (“type”) або “silicon”, або “Schottky”. Також звертайте увагу на максимальну зворотню напругу “Vbrkdn” та на максимальний прямий струм “Iave”, щоб вони не перевищували значення, які будуть у вашій схемі.

| Part No. | Mfg. | type | Vbrkdn[V] | Iave[A] | SPICE Model |
|-----------|--------|----------|-----------|---------|--|
| 1N914 | OnSemi | silicon | 75.0 | 0.20 | .model 1N914 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=.4p M=.4 tt=20n Iave=200m Vpk=75 mfg=OnSemi type=silicon) |
| 1N4148 | OnSemi | silicon | 75.0 | 0.20 | .model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=.64p M=.4 tt=5n Iave=200m Vpk=100 mfg=OnSemi type=silicon) |
| MMSD4148 | Onsemi | silicon | 100.0 | 0.20 | .model MMSD4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=.64p M=.4 tt=5n Iave=200m Vpk=100 mfg=Onsemi type=silicon) |
| 1N5817 | OnSemi | Schottky | 20.0 | 1.00 | .model 1N5817 D(Is=31.7u Rs=.051 N=1.373 Cjo=190p M=.3 Eg=.69 Xti=2 Iave=1 Vpk=20 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| 1N5818 | OnSemi | Schottky | 30.0 | 1.00 | .model 1N5818 D(Is=31.7u Rs=.051 N=1.373 Cjo=160p M=.38 Eg=.69 Xti=2 Iave=1 Vpk=30 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| 1N5819 | OnSemi | Schottky | 40.0 | 1.00 | .model 1N5819 D(Is=31.7u Rs=.051 N=1.373 Cjo=110p M=.35 Eg=.69 Xti=2 Iave=1 Vpk=40 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| BAT54 | Vishay | Schottky | 30.0 | 0.30 | .model BAT54 D(Is=.1u Rs=2.2 N=1 Cjo=12p M=.3 Eg=.69 Xti=2 Iave=300m Vpk=30 mfg=Vishay type=Schottky) |
| MBR0520L | OnSemi | Schottky | 20.0 | 0.50 | .model MBR0520L D(Is=82.5n Rs=.115 N=.7228 Cjo=180p M=.63 Eg=.69 Xti=2 Iave=.5 Vpk=20 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| MBR0530L | OnSemi | Schottky | 30.0 | 0.50 | .model MBR0530L D(Is=1.55u Rs=.0858 N=1.079 Cjo=180p M=.63 Eg=.69 Xti=2 Iave=.5 Vpk=30 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| MBRS1100 | OnSemi | Schottky | 100.0 | 1.00 | .model MBR1100 D(Is=20.6u Rs=.0079 N=2.303 Cjo=270p M=.575 Eg=.69 Xti=2 Iave=1 Vpk=100 mfg=OnSemi type=Schottky) |
| MBR05120L | OnSemi | Schottky | 30.0 | 1.00 | .model MBR05120L D(Is=.772n Rs=.0798 N=.8447 Cjo=700p M=.75n=.69 Xti=2 Iave=.1 Vpk=30 mfg=OnSemi type=Schottky) |

Рисунок 2.30 – Вибір типу діода

3. Побудувати та дослідити графіки вихідної напруги випрямляча та струму через навантаження. Визначити середню випрямлену напругу, середній та максимальний струм навантаження, амплітуду пульсацій та коефіцієнт пульсацій. Порівняти з теоретичними значеннями, розрахованими за формулами, і зробити висновки.

LTspice самостійно обчислює середнє значення, а амплітуду треба буде виміряти самостійно.

Щоб показати середнє значення величини, треба натиснути на назві графіка одночасно затиснувши кнопку “Ctrl” на клавіатурі (рис. 2.31)



Рисунок 2.31 – Назва графіка, на яку треба натиснути

Якщо ви все зробили правильно, то відкриється наступне вікно (рис. 2.32).

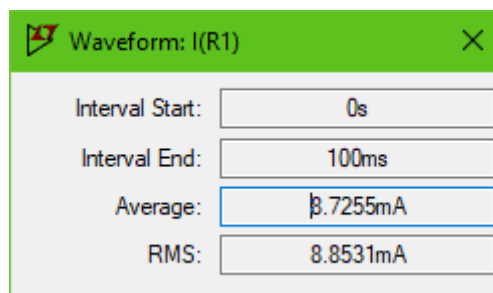


Рисунок 2.32 – Середні значення вимірюваної величини

На рис. 2.31 та 2.32 представлені форма струму навантаження та його середні величини. Так само можна додати та дослідити і графік напруги на навантаженні (за формою він буде збігатися зі струмом).

То ж, на рис. 2.32 “Interval Start” та “Interval End” – це відповідно початок та кінець інтервалу часу, на протязі якого обчислюється середнє значення. В нашому випадку він збігається з часом моделювання, яке я встановив рівним 0.1 с. “Average” – середнє арифметичне значення величини впродовж обраного інтервалу, це і є та сама величина, що нас цікавить. “RMS” – середньоквадратичне значення величини. Поки що воно нам не потрібно, але запам’ятайте, де воно знаходиться, у наступних роботах воно може нам знадобитися.

Тепер давайте визначимо максимальний струм навантаження та амплітуду пульсацій. Щоб це зробити, натиснемо лівою кнопкою миші на назві графіка (рис. 2.31). Відкриється вже знайоме з минулої практичної роботи вікно, і на графіку з’явиться перехрестя, яке можна переміщувати вздовж графіка, і дивитися значення у різних його точках. Підведемо перехрестя до найвищої точки графіку (рис. 2.33) – це і буде максимальний струм навантаження.



Рисунок 2.33 – Визначення максимального струму навантаження

У моєму випадку він дорівнює 10,699 А (величина “Vert”) у відкритому вікні.

Щоб виміряти амплітуду пульсацій, зручно використати два перехрестя, різницю між якими програма визначить автоматично. Щоб додати друге перехрестя, натискаємо правою кнопкою миші на назві графіка (рис. 2.29) та у відкритому вікні параметрів графіка змінюємо “Attached Cursor” з “1st” на “1st & 2nd”. (рис. 2.34).

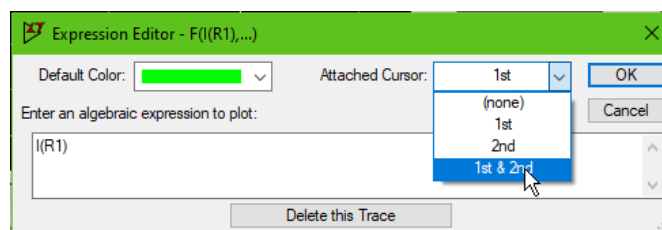


Рисунок 2.34 – Зміна параметрів графіка

Тепер можна натиснути на кнопку “OK” та побачити, що на графіку з’явилося нове перехрестя. Підведемо його до мінімального значення на графіку (рис. 2.35).

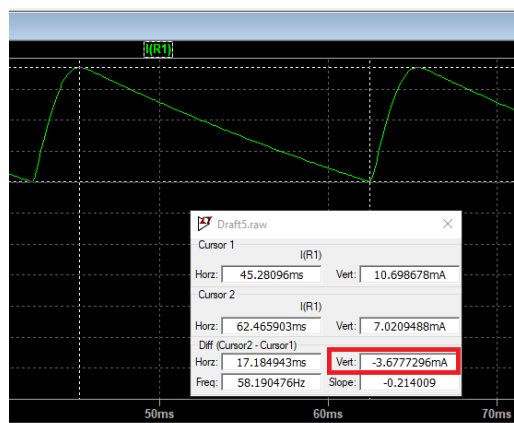


Рисунок 2.35 – Вимірювання амплітуди величини



Як можна побачити, після додавання другого перехрестя, стає активним поле “Diff (Cursor2 – Cursor1)”, яке показує різницю між значеннями обох перехресть як по горизонталі (“Horz”), так і по вертикалі (“Vert”). Величина, виділена на рис. 2.35, показує різницю між максимальним та мінімальним значенням струму, тобто подвійну величину амплітуди пульсацій $2U_{н1}$ (порівняйте рис. 2.35 з рис. 2.5).

4. Змінюючи в широких межах значення R1 та C1 визначити, як вони впливають, на середню випрямлену напругу, амплітуду пульсацій та коефіцієнт пульсацій. Відповідно до варіанту завдання (таблиця 2.1) побудувати графік навантажувальної характеристики випрямляча (залежність вихідної напруги випрямляча від струму навантаження) або графік залежності коефіцієнта пульсацій від ємності конденсатора. Зробити висновки.

5. Побудувати та дослідити графік прямого струму $I_{пр}$ через випрямний діод D1. Знайти середній струм та максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичними значеннями та зробити висновки.

6. Побудувати та дослідити графік падіння напруги на випрямному діоді D1. Знайти максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичним значенням і зробити висновок.

Щоб побудувати графік падіння напруги на діоді, треба скористатися вікном “Add traces” (див. практичну роботу №1) та обчислити падіння напруги, як різницю між напругою на аноді діода D1 та його катоді.

7. Побудувати та дослідити графіки струмів заряду та розряду конденсатора C1. Порівняти графіки струмів заряду конденсатора та прямого струму через діод. Зробити висновки.

8. Змінюючи частоту джерела змінної напруги визначити, як вона впливає на форму вихідної напруги і коефіцієнт пульсацій.

9. Видалити конденсатор C1 та дослідити однопівперіодний випрямляч без фільтра. Для цього виконати такі ж дослідження, як у пунктах 3, 5, 6. Порівняти з результатами, отриманими до видалення фільтра. Зробити висновки.

10. Використовуючи отримані знання проаналізувати схеми двопівперіодного випрямляча та симетричного випрямляча з подвоєнням напруги.

2.2.2 Дослідження мостового випрямляча

1. Зібрати у LTspice схему мостового випрямляча відповідно до рис. 2.36.

2. Значення U1, C1 та R1 вибрати з таблиці 1.

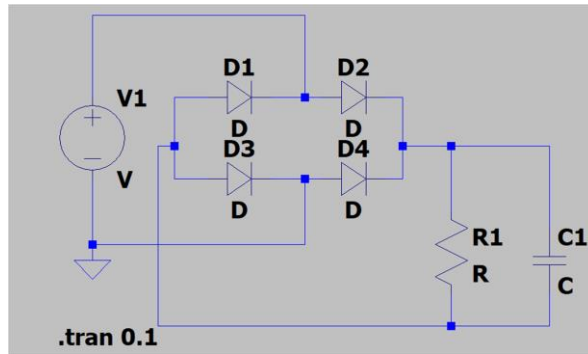


Рисунок 2.36 - Дослідження мостового випрямляча

3. Побудувати та дослідити графіки вихідної напруги випрямляча та струму через навантаження. Визначити середню випрямлену напругу, середній та максимальний струм навантаження, амплітуду пульсацій та коефіцієнт пульсацій. Порівняти з теоретичними значеннями, розрахованими за формулами, і зробити висновки.

4. Змінюючи в широких межах значення $R1$ та $C1$ визначити, як вони впливають, на середню випрямлену напругу, амплітуду пульсацій та коефіцієнт пульсацій. Відповідно до варіанту завдання (таблиця 2.1) побудувати графік навантажувальної характеристики випрямляча (залежність вихідної напруги випрямляча від струму навантаження) або графік залежності коефіцієнта пульсацій від ємності конденсатора. Зробити висновки.

5. Побудувати та дослідити графік прямого струму $I_{пр}$ через один з випрямляючих діодів. Знайти середній струм та максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичними значеннями та зробити висновки.

6. Побудувати та дослідити графік падіння напруги на одному з випрямних діодів. Знайти максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичним значенням і зробити висновок.

7. Побудувати та дослідити графіки струмів заряду та розряду конденсатора $C1$. Порівняти графіки струмів заряду конденсатора та прямого струму через діод. Зробити висновки.

8. Змінюючи частоту джерела змінної напруги визначити, як вона впливає на форму вихідної напруги і коефіцієнт пульсацій.

9. Видалити конденсатор $C1$ та дослідити мостовий випрямляч без фільтра. Для цього виконати такі ж дослідження як у пунктах 3, 5, 6. Порівняти з результатами, отриманими до видалення фільтра. Зробити висновки.

10. Дослідити мостовий випрямляч з L , LC і RC фільтром. Визначити, як впливає використання такого фільтра, на параметри та форму вихідної напруги.

2.2.3 Дослідження трифазного випрямляча

1. Зібрати у WorkBench схему трифазного випрямляча. Схему випрямляча і значення V1, V2, V3 і R1 вибрати згідно з номером варіанту з таблиці 2.1. Замість трифазного трансформатора використовувати три окремі джерела змінної напруги. У кожному джерелі встановити різні значення початкової фази (0, 120, 240).

Фаза встановлюється у вікні зміни параметрів джерела живлення та називається “Phi(Deg)” (рис. 2.37).

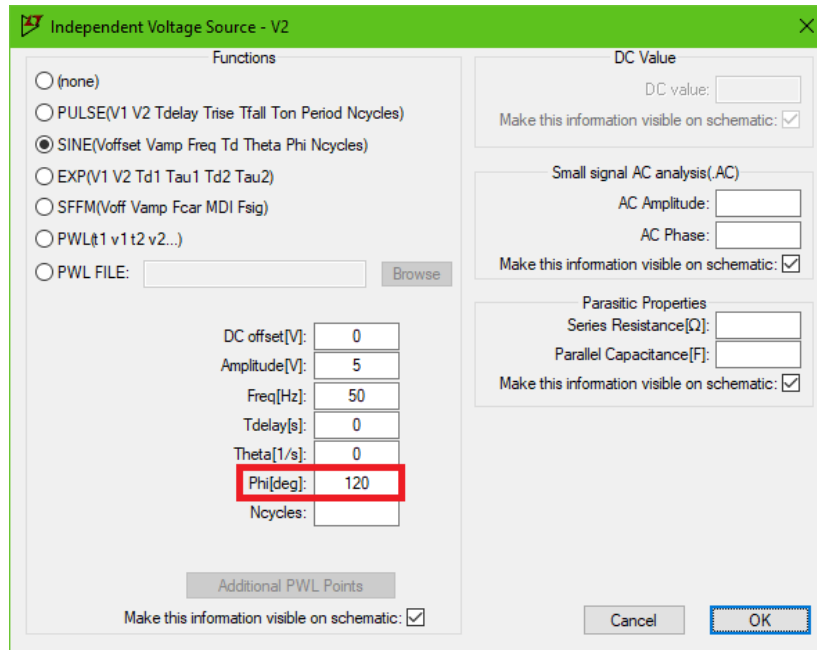


Рисунок 2.37 – Задання величини фази джерела живлення

Схема з нульовим виводом наведена на рис. 2.38, а мостова схема – на рис. 2.39. Тут для прикладу вже встановлені параметри джерел напруги, але у вас напруга буде не 5 В, а згідно з табл. 2.1.

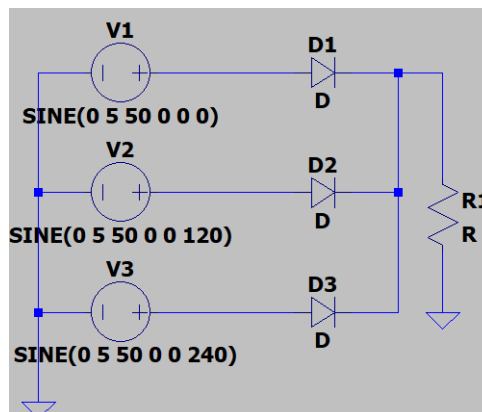


Рисунок 2.38 – Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом

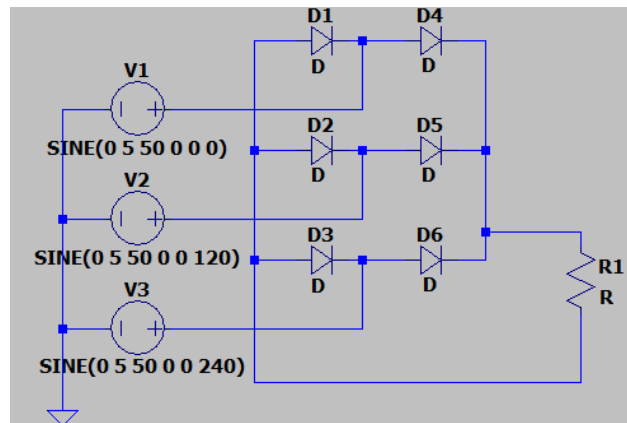


Рисунок 2.39 – Схема мостового трифазного випрямляча

2. Побудувати та дослідити графіки напруги та струмів на навантаженні. Визначити середню випрямлену напругу, середній та максимальний струм навантаження, амплітуду пульсацій та коефіцієнт пульсацій. Порівняти з теоретичними значеннями, розрахованими за формулами, і зробити висновки.

3. Побудувати та дослідити графік прямого струму $I_{пр}$ через один з випрямляючих діодів. Знайти середній струм та максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичними значеннями та зробити висновки.

4. Побудувати та дослідити графік падіння напруги на одному з випрямних діодів. Знайти максимальне амплітудне значення. Порівняти з теоретичним значенням і зробити висновок.

2.2.4 Дослідження помножувача напруги

Виконати дослідження помножувача напруги у пакеті LTspice. Для цього на власний розсуд зібрати схему з множенням напруги на 3, 4 або 5. Розібратися, як відбувається множення напруги.

Таблиця 2.1 - Варіанти завдань

| №п/п | Однопівперіодний випрямляч (Завдання 2.1) | | | | Мостовий випрямляч (Завдання 2.2) | Трифазний випрямляч (Завдання 2.3) |
|------|--|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | V1,В | C1,μФ | R1,Ом | Графік залежності (пункт 4) | Графік залежності (пункт 4) | Схема випрямляча |
| 1 | 6 | 5 | 1200 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 2 | 9 | 10 | 1000 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 3 | 12 | 20 | 700 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 4 | 15 | 40 | 500 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 5 | 20 | 50 | 300 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 6 | 24 | 5 | 1200 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 7 | 36 | 10 | 1000 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 8 | 6 | 20 | 700 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 9 | 9 | 40 | 500 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 10 | 12 | 50 | 300 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 11 | 15 | 5 | 1200 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 12 | 20 | 10 | 1000 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 13 | 24 | 20 | 700 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 14 | 36 | 40 | 500 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 15 | 6 | 50 | 300 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 16 | 9 | 5 | 1200 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 17 | 12 | 10 | 1000 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 18 | 15 | 20 | 700 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |
| 19 | 20 | 40 | 500 | навантажувальна характеристика | залежність q від C1 | з нульовим виводом |
| 20 | 24 | 50 | 300 | залежність q від C1 | навантажувальна характеристика | мостовий |



2.3 Контрольні питання та завдання

1. Принцип роботи та параметри однофазного однопівперіодного випрямляча.
2. Принцип роботи та параметри однофазного двонівперіодного випрямляча.
3. Принцип роботи та параметри однофазного мостового випрямляча.
4. Принцип роботи та параметри трифазного випрямляча з загальним виводом.
5. Принцип роботи та параметри трифазного мостового випрямляча.
6. Принцип роботи та параметри помножувача напруги.
7. Ємнісний та індуктивний фільтри. Принцип дії, вплив параметрів фільтрів на роботу схеми.
8. LC та RC фільтри. Принцип дії, вплив параметрів фільтрів на роботу схеми.

2.4 Перелік посилань

1. Випрямлячі: методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 1-2 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка» для студентів напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / укл. А. Б. Ісаєв. Маріуполь: ПДТУ, 2014. 28 с.
2. Дослідження однофазних випрямлячів: методичні вказівки до практичної роботи № 2 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІН-ВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023, 31 с.
3. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. / С. О. Квітка. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. 223 с.
4. Half-Wave Rectifier in a Power Supply : веб-сайт. URL: <https://www.circuitbread.com/tutorials/half-wave-rectifier-in-a-power-supply> (дата звернення: 19.01.2026).
5. Bridge Full-Wave Rectifier Operation : веб-сайт. URL: <https://www.circuitbread.com/tutorials/bridge-full-wave-rectifier-operation> (дата звернення: 19.01.2026).



3 ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

Мета практичної роботи:

Закріпити знання з конструкції та принципу дії тиристора, ознайомитися з принциповою схемою та роботою тиристорного регулятора напруги, дослідити режими роботи тиристора, форму та параметри вихідної напруги.

Завдання практичної роботи:

- Ознайомлення з принципом роботи тиристора.
- Ознайомлення з принциповою схемою тиристорного регулятора напруги.
- Дослідження тиристорного регулятора напруги та зняття його характеристик.

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Схема регулятора напруги у LTSpice та її короткий опис.
- Графіки напруги на навантаженні з графічними побудовами.
- Розрахунки за фази включення тиристора.
- Таблиця та графік залежності напруги на навантаженні U_H від фази включення тиристора φ .
- Розрахунки середньої $U_{сер}$ та діючої U_D напруги на навантаженні.
- Зведена таблиця напруг U_e , $U_{сер}$ і U_D .
- Висновки
- Перелік посилань

3.1 Теоретичні дані

3.1.1 Короткі теоретичні відомості про тиристори

Тиристор - напівпровідниковий прилад, що має два стійкі стани: стан низької провідності (тиристор закритий) і стан високої провідності (тиристор відкритий). Переведення тиристора із закритого стану у відкритий здійснюється зовнішнім впливом на прилад. Найбільш широко використовується спосіб подачі напруги на спеціальний керуючий електрод.

Тиристор складається з чотирьох шарів напівпровідника з провідністю, що чергується, (рис. 3.1).

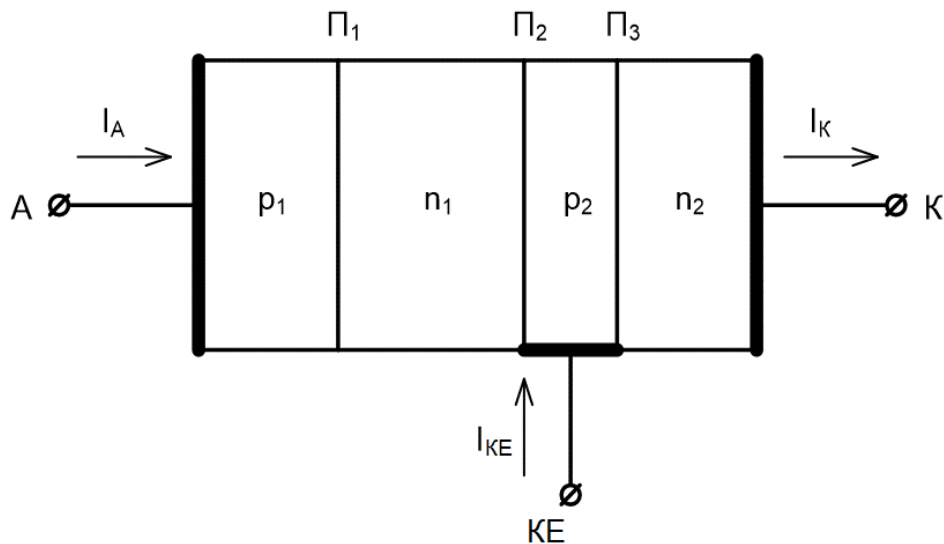


Рисунок 3.1 – Структура кристала напівпровідника тиристора

Крайні області p_1 і n_2 називаються емітерами, середні n_1 і p_2 – базами. Переходи Π_1 і Π_3 називаються емітерними переходами, а перехід Π_2 – колекторним. До областей p_1 , n_2 і p_2 підводяться металеві контакти, які називаються відповідно анодом (А), катодом (К) і керуючим електродом (КЕ).

Принцип роботи тиристорів можна пояснити за допомогою їхньої транзисторної моделі (рис. 3.2). Відповідно до цієї моделі, тиристор представляє собою таке з'єднання р-п-р і п-р-п транзисторів VT1 і VT2, що колекторний струм транзистора VT1 є базовим струмом транзистора VT2, а колекторний струм транзистора VT2 є базовим струмом транзистора VT1.

Таким чином, між базовими і колекторними струмами транзисторів існує позитивний зворотний зв'язок, який забезпечує перемикання структури за умови, якщо коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку більше одиниці. У вимкненому стані тиристора плюс джерела живлення підводиться до анода, а мінус до катода. Напруга на керуючому електроді відсутня. Центральний перехід Π_2 має зворотній зсув, а переходи Π_1 і Π_3 – прямий. Це означає, що транзистори, що складають структуру тиристора, перебувають у нормальному підсилювальному режимі, але обидва транзистори закриті.

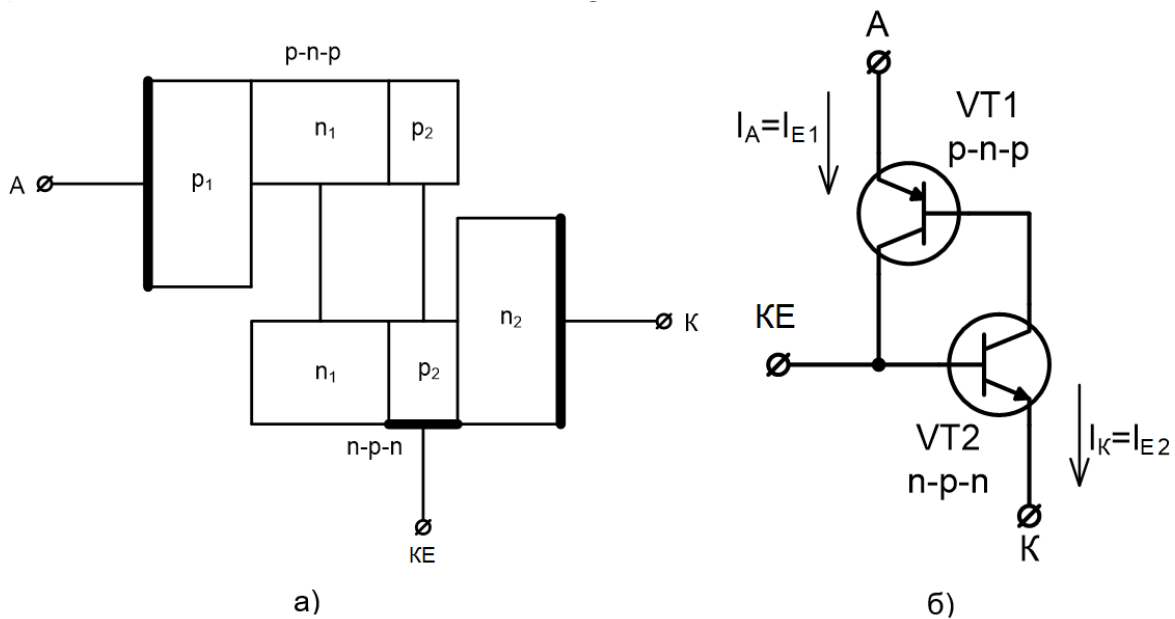


Рисунок 3.2 – Транзисторна модель тиристора

При подачі відносно катода позитивної напруги на керуючий електрод у ланцюзі база-емітер транзистора VT2 протікає струм, який призводить до його відкриття. В результаті зростає його струм колектора, який одночасно є струмом бази VT1. Внаслідок цього відкривається VT1, що у свою чергу збільшує струм бази VT2. Процес завершується повним відкриттям обох транзисторів. Відкритий стан зберігається навіть при відключенні напруги на керуючому електроді.

Аналогічний процес відбувається зі збільшенням напруги між анодом та катодом. Під дією прикладеного до переходу П₂ зворотної напруги зростає зворотний струм, який є струмом бази обох транзисторів. Після досягнення деякої величини напруги починається лавиноподібний процес відкриття транзисторів, так само, як описано вище.

Для закриття тиристора необхідно зменшити напругу між анодом і катодом і тим самим розірвати позитивний зворотний зв'язок.

На рисунку 3.3 показано сімейство вольт-амперних характеристик тиристора. На ньому можна виділити чотири основні області: область III (точка 1) – закритого стану, коли струм через тиристор визначається струмом зворотно зміщеного центрального переходу П₂; область II (точка 2) – негативного опору, коли при зменшенні напруги на тиристорі струм зростає; область I (точка 3) – включеного стану, коли струм через тиристор визначається величиною опору зовнішнього навантаження; область IV – зворотної полярності напруги.

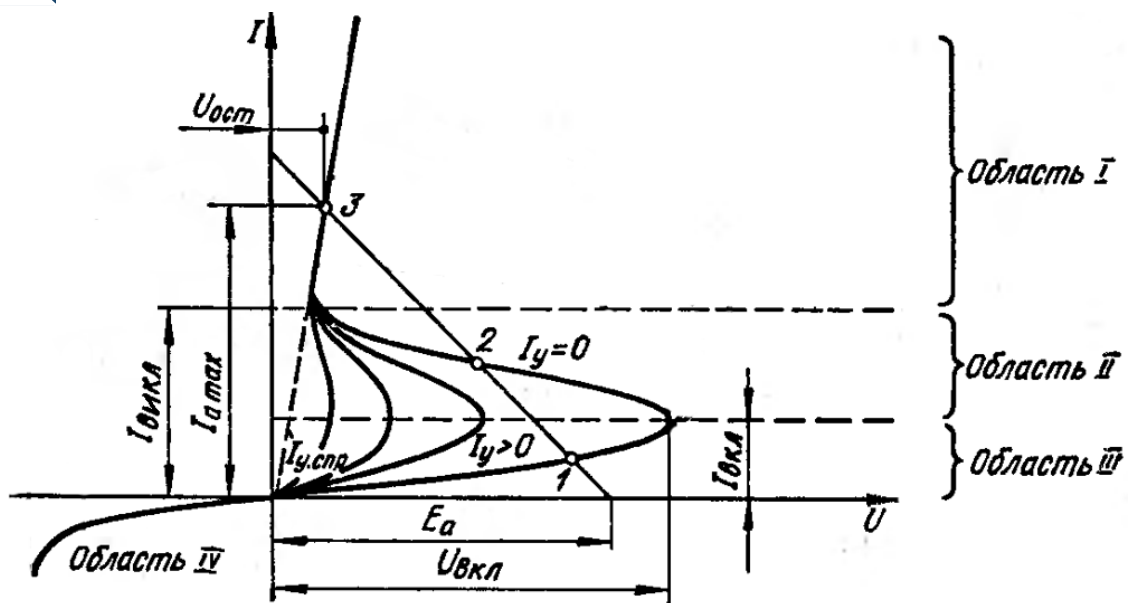


Рисунок 3.3 – Вольт-амперна характеристика тиристора

За відсутності керуючої напруги (лінія $I_y=0$) збільшення напруги U призводить до незначного збільшення прямого струму I (область III). Після досягнення напруги включення $U_{вкл}$ струм досягає величини $I_{вкл}$ достатньої для лавиноподібного відкриття тиристора. Збільшення прямого струму супроводжується зменшенням падіння напруги на тиристорі (область II). Після повного відкриття при подальшому збільшенні струму пряма напруга на тиристорі незначно зростає (область I).

Якщо на керуючий електрод подати деяку напругу (лінія $I_y > 0$), то тиристор включається при тому ж струмі $I_{вкл}$, але при меншій напрузі $U_{вкл}$. При досить великому струмі, званому струмом спрямлення $I_{у.спр}$, область II на лінії вольт-амперної характеристики відсутня (пунктирна лінія).

Для замикання тиристора, що знаходиться у відкритому стані (точка 3) необхідно прибрати керуючий струм і зменшити подану напругу, що призведе до зменшення прямого струму через тиристор. При його зменшенні до значення $I_{вкл}$ розпочнеться лавиноподібний процес закривання тиристора.

Пряма лінія, що проходить через точки 1, 2 та 3 є графіком навантажувальної характеристики. У точках 1 і 3 стан тиристора стійкий, а в точці 2 нестійкий. Точка 1 відповідає повністю закритому стану тиристора, вся напруга E_a прикладається до нього. Точка 3 відповідає повністю відкритому стану тиристора, вся напруга прикладається до навантаження, і струм максимальний $I_{а max}$. У відкритому стані на тиристорі відбувається невелике залишкове падіння напруги $U_{ост}$ приблизно 2 В.

На зворотній вітці вольт-амперної характеристики тиристор поводить приблизно як діод.

Використовується кілька різновидів тиристорів. На рис. 3.4 наведені умовні позначення типів тиристорів, що використовуються найчастіше.

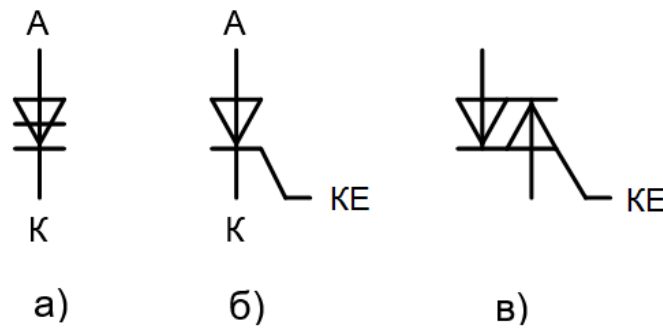


Рисунок 3.4 – Умовні позначення тиристорів

Діодні тиристори (рис. 3.4, а) характеризуються наявністю двох електродів: анода і катода. Управління діодними тиристорами здійснюється імпульсами позитивної або негативної напруги, що подається на анод або катод приладу відповідно. Вольт-амперна характеристика діодного тиристора відповідає характеристиці на рис. 3 при $I_y = 0$.

Тріодні тиристори (рис. 3.4, б) складають найбільш широкий клас багатошарових напівпровідникових приладів. Залежно від того, з якої області зроблено вивід керуючого електроду, тріодні тиристори діляться на керовані по катоду і керовані по аноду. Для перших до керуючого електроду необхідно подавати позитивний керуючий сигнал, а для других – негативний. Вольт-амперна характеристика тріодних тиристорів з керуванням по катоду показана на рис. 3.3 при $I_y > 0$.

Симетричні тиристори (симістори) (рис. 3.4, в) призначені спеціально для роботи в ланцюгах змінного струму. За своїми вольт-амперними характеристиками симістор еквівалентний двом зустрічно-паралельно включеним тріодним тиристорам, маючи при цьому габаритні розміри одного тиристора і один вхідний ланцюг. Вольт-амперна характеристика симістора симетрична відносно початку координат. Крім умовного позначення (рис. 3.4, в) можуть використовуватися і деякі інші.

Також випускаються тиристори, що замикаються, фототиристори та інші.

На рис. 3.5 приведена схема включення тиристора і прийняті наступні позначення:

I_A - струм анода (силовий струм);

U_{AK} – напруга між анодом та катодом;

I_{KE} - струм керуючого електрода (зазвичай імпульсний струм);

U_{UE} - напруга, що подається на керуючий електрод (між керуючим електродом і катодом);

$U_{ж}$ – напруга джерела живлення;

R – опір навантаження;

U_R – падіння напруги на опорі навантаження.

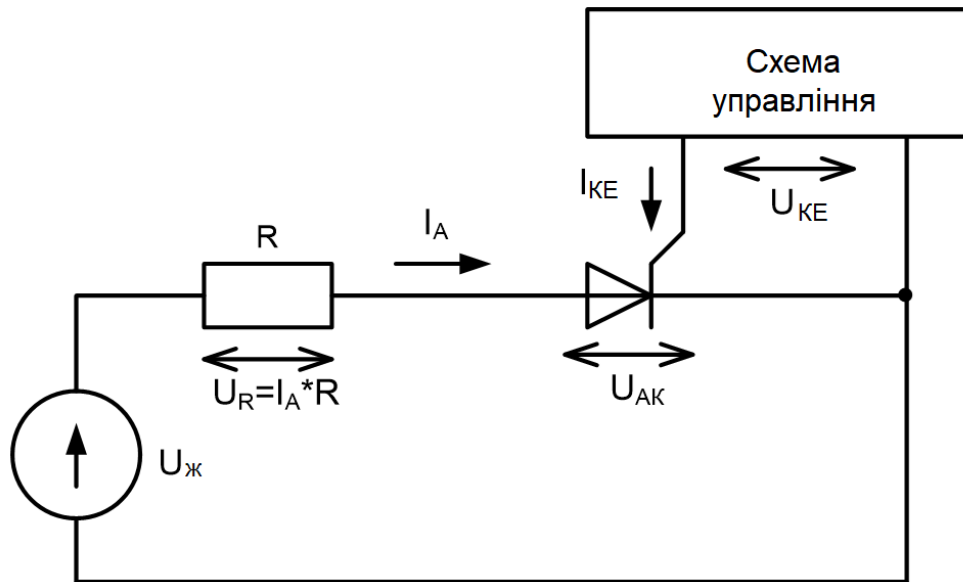


Рисунок 3.5 – Схема включення тиристора

Якщо напруга живлення менше напруги включення ($U_{ж} < U_{вкл}$) і керуючий імпульс не подавався, то тиристор перебуватиме в закритому (вимкненому) стані. При цьому р-п-переходи Π_1 і Π_3 будуть зміщені в прямому напрямку, а перехід Π_2 - у зворотному напрямку (рис. 3.1), тому струм тиристора буде малим і виконуватимуться співвідношення $U_{АК} \approx U_{ж}$, $U_R \approx 0$ (рис. 3.3 точка 1), тобто навантаження відключено від джерела живлення.

Якщо припустити, що виконується співвідношення $U_{ж} > U_{вкл}$ або що після підключення джерела живлення (навіть при $U_{ж} < U_{вкл}$) був поданий імпульс керування достатньої величини, то тиристор перебуватиме у відкритому (включеному) стані. При цьому будуть виконуватися співвідношення $U_{АК} \approx 2В$, $I_A = (U_{ж} - U_{АК}) / R \approx U_{ж} / R$, $U_R = U_{ж} - U_{АК} \approx U_{ж}$ (рис. 3.3 точка 3). Навантаження підключено до джерела живлення.

3.1.2 Опис принципової електричної схеми тиристорного регулятора напруги

На рис. 3.6 наведено принципову електричну схему регулятора напруги. Принцип дії регулятора є наступним. Середнє значення напруги на навантаженні (як навантаження використана лампа розжарювання ЛН) регулюється шляхом зміни фазового кута відкривання силового тиристора VD7. Тиристор можна уявити як ключ, що пропускає струм протягом деякої частини періоду синусоїдальної напруги. Вводячи затримку на відкривання цього ключа, ми тим самим змінюємо середнє значення струму, що протікає через навантаження. Оскільки тиристор несиметричний, він може працювати лише у ланцюзі постійного струму. Тому він включений у діагональ моста між точками "+" та "-". На вхід моста подається змінна напруга, а через тиристор протікає постійний струм.

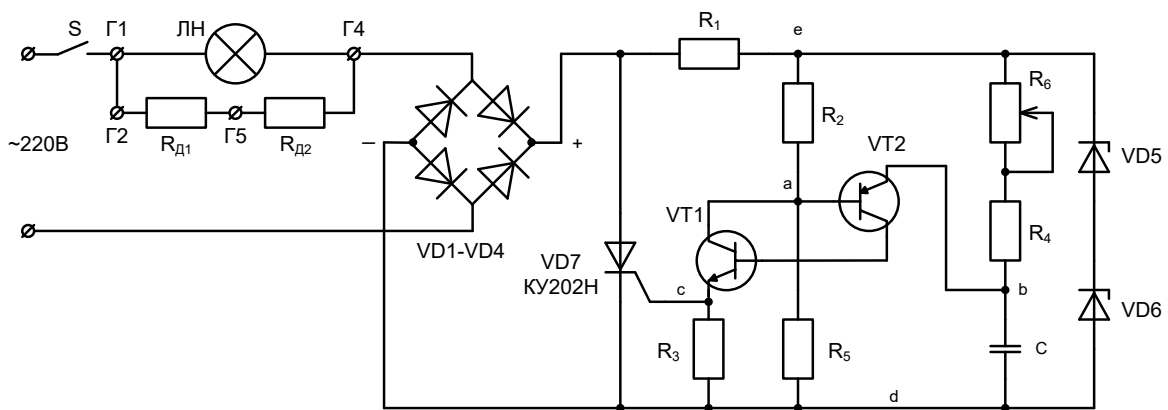


Рисунок 3.6 – Схема тиристорного регулятора напруги

Регулятор підключається до мережі змінного струму. На вхідних клеммах напруга має форму синусоїди (рис. 3.7, а). Так як діюче значення напруги в мережі 220 В, то його амплітудне значення буде близько 311 В. Частота напруги в мережі 50 Гц, тому період коливань становить 20 мс, а півперіода 10 мс. На виході мостового випрямляча, побудованого на напівпровідникових діодах VD1 - VD4, маємо постійну пульсуючу напругу.

На рис. 3.7, б показано її форму між точками "+" і "-". З урахуванням того, що на кожному з двох діодів, що входять у ланцюг випрямлення, падіння напруги буде близько 1 В, амплітуда її пульсацій складе приблизно 309 В.

На резисторі R1 і стабілітронах VD5 і VD6 зібраний обмежувач напруги для роботи керуючої транзисторної схеми регулятора. Графік обмеженої напруги між точками "e" і "d" має форму трапеції і показаний на рис. 3.7, в жирною лінією. Величина напруги визначається напругою стабілізації стабілітронів VD5 та VD6 і може становити приблизно 10..20 В.

На транзисторах VT1, VT2 зібраний аналог тиристора (рис. 3.2, б), який керує роботою силового тиристора VD7. На базу транзистора VT2 (точка "a") з дільника напруги, утвореного опорами R2 і R5, подається напруга, що закриває тиристор. Його форма для однієї половини періоду коливань мережевої напруги показана лінією 1 на рисунку 3.8. Величина напруги залишається практично постійною протягом всього півперіоду.

Елементи R4, R6 і C утворюють фазозсувний ланцюг. На початку півперіоду напруга на конденсаторі C (точка "b") приблизно дорівнює нулю. У цей час напруга між базою та емітером транзистора VT2 (точки "a" та "b") має таку полярність, що плюс додається до бази, а мінус до емітера. Так як транзистор VT2 має провідність р-п-р типу, така напруга є замикаючою і транзистор буде закритий.

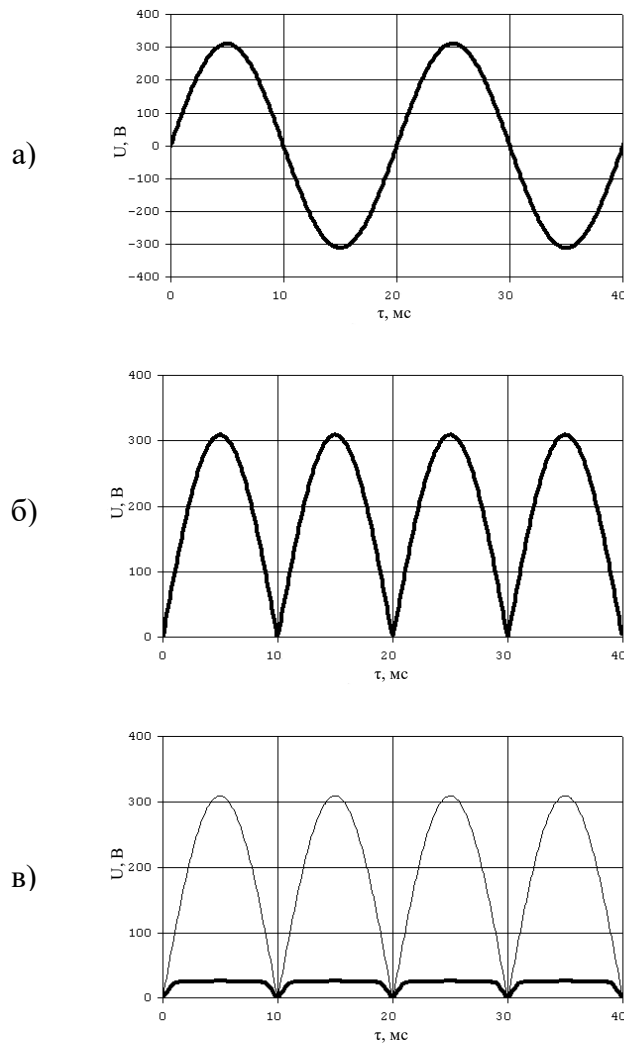


Рисунок 3.7 – Графіки напруги живлення у схемі регулятора

Протягом півперіоду конденсатор C буде заряджатися струмом, що протікає через резистори $R4$ і $R6$. Графік заряду матиме форму експоненти (лінія 2) на рис. 3.8. Кут нахилу графіка залежатиме від постійної часу ланцюга $(R4+R6)C$. Після того, як напруги на базі та емітері транзистора $VT2$ зрівняються (точка перетину ліній 1 і 2 на рис. 3.8), далі полярність напруги між базою та емітером змінить знак, так що мінус буде прикладений до бази, а плюс до емітера. Внаслідок цього транзистор $VT2$ почне відкриватися і в ланцюзі його колектору потече струм, який надійде на базу транзистора $VT1$. В результаті транзистор $VT1$ теж почне відкриватися і в ланцюзі його колектору також потече струм, який поступить на базу $VT2$. Цей замкнутий процес матиме лавиноподібний характер і в результаті обидва транзистори відкриються. Через них потече струм на керуючий електрод тиристора $VD7$ (точка "с") і тиристор миттєво відкриється.

Змінюючи опір резистора $R6$, можна змінювати час заряду конденсатора C до значення замикаючої напруги і тим самим регулювати затримку



включення тиристора VD7. Якщо опір R6 буде великим, то конденсатор С буде заряджатися повільно і момент відкриття транзисторів буде в кінці півперіоду (рис. 3.8, а). Струм через навантаження кожен півперіод буде протікати короткий момент часу (рис. 3.9, а). Більшість синусоїди буде відсікатися, напруга на навантаженні буде маленькою і лампа буде світитися слабо. Прийнемо один півперіод за 360 град або 2π радіан. Тоді фаза включення тиристора на рис. 3.9, а становитиме приблизно $360 \cdot 8 / 10 = 288$ град чи $2\pi \cdot 8 / 10$ рад. Так як напруга включення тиристора VD7 моделі КУ202Н становить 400 В, то при відсутності керуючого сигналу він не відкривається навіть при амплітудній напрузі 309 В.

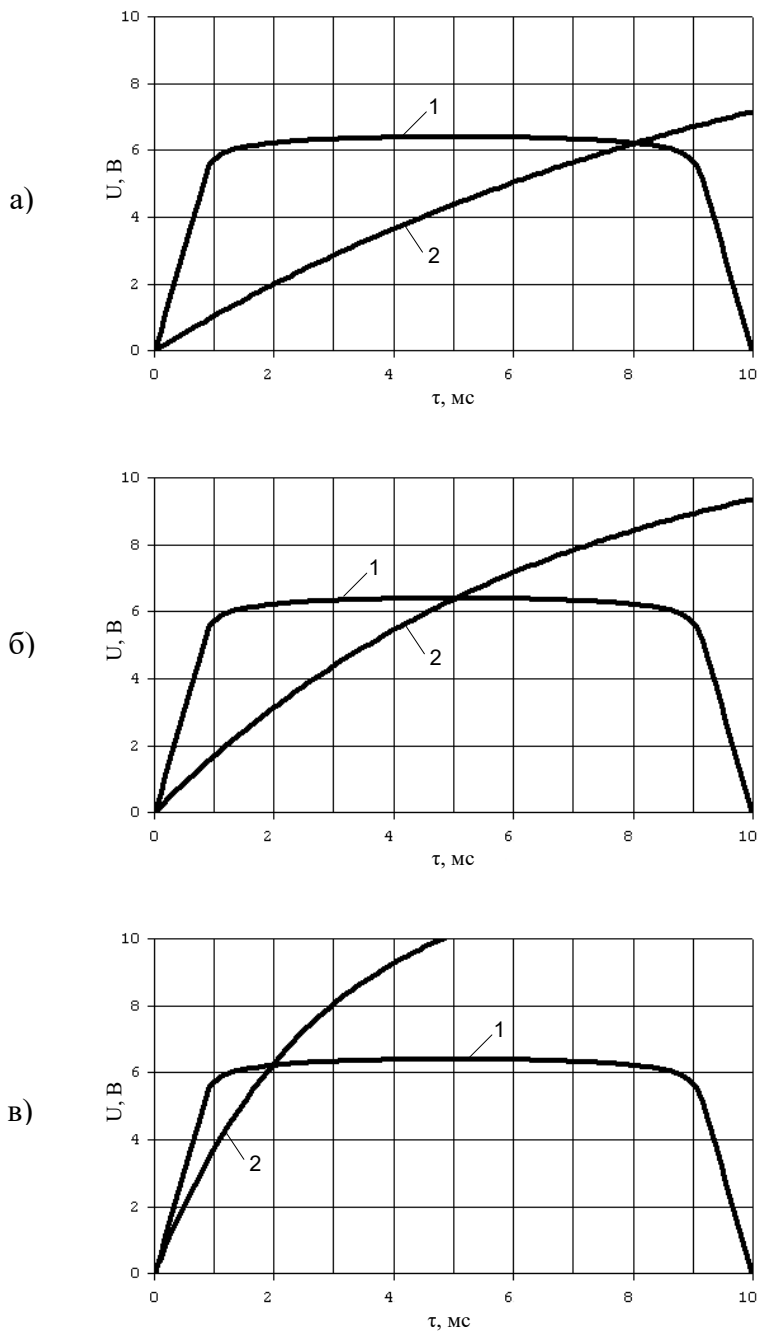


Рисунок 3.8 – Графіки напруг на базі та емітері транзистора VT2

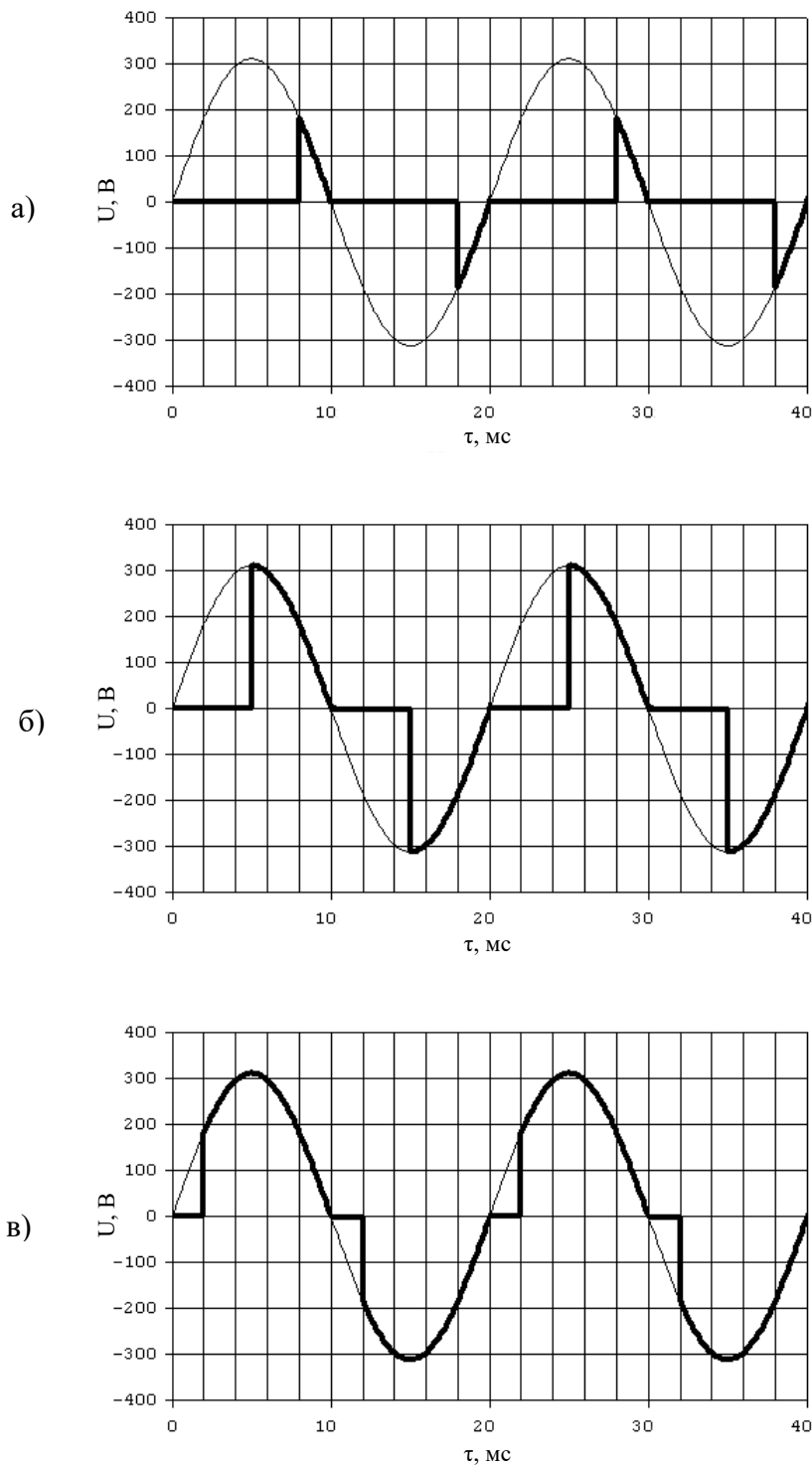


Рисунок 3.9 – Графіки напруги на навантаженні

Якщо опір R_6 буде середнім, то момент відкриття транзисторів буде в середині півперіоду (рис. 3.8, б). Струм через навантаження протікатиме приблизно половину півперіоду (рис. 3.9, б). Половина синусоїди відсікатиметься, напруга на навантаженні буде середньою, і лампа світлитиметься в половину розжарення. Фаза включення тиристора на рис. 3.9, б складатиме приблизно $360 / 2 = 180$ град або $\pi/2$ рад.



Якщо опір R6 буде маленьким, то момент відкриття транзисторів буде на початку півперіоду (рис. 3.8, в). Струм через навантаження протікатиме велику частину півперіоду (рис. 3.9, в). Тільки мала частина синусоїди буде відсікатися, напруга на навантаженні буде великою і лампа світитиметься майже повним розжаренням. Фаза включення тиристора на рис. 3.9, в складатиме приблизно $360 \cdot 2 / 10 = 72$ град або $2\pi \cdot 2 / 10$ рад.

Таким чином регулюється потужність у навантаженні. Плавно змінюючи опір R6, можна встановити будь-яку потужність і середню напругу на ній. Максимальна амплітуда напруги на навантаженні залежить від фази включення.

Тиристор VD7 моделі КУ202Н закривається кожен півперіод. Це відбувається при проходженні синусоїдальної напруги (рис. 3.7, а) через нуль. Напруга на виході випрямляючого мосту (рис. 3.7, б) і на аноді VD7 стає рівною нулю. Струм, що протікає через тиристор, стає менше струму виключення $I_{\text{вкл}}$ і тиристор закривається. У цей момент часу також розряджається і конденсатор С. При використанні тиристорних регуляторів напруги слід мати на увазі, що якщо замість лампи використовувати індуктивне навантаження, то робота регулятора може порушитися. Це відбувається через те, що в індуктивному навантаженні виникає ЕРС самоіндукції, яка перешкоджає припиненню струму через тиристор.

3.2 Завдання до лабораторної роботи

Побудувати принципову електричну схему тиристорного регулятора напруги у програмі LTspice (рис. 3.10).

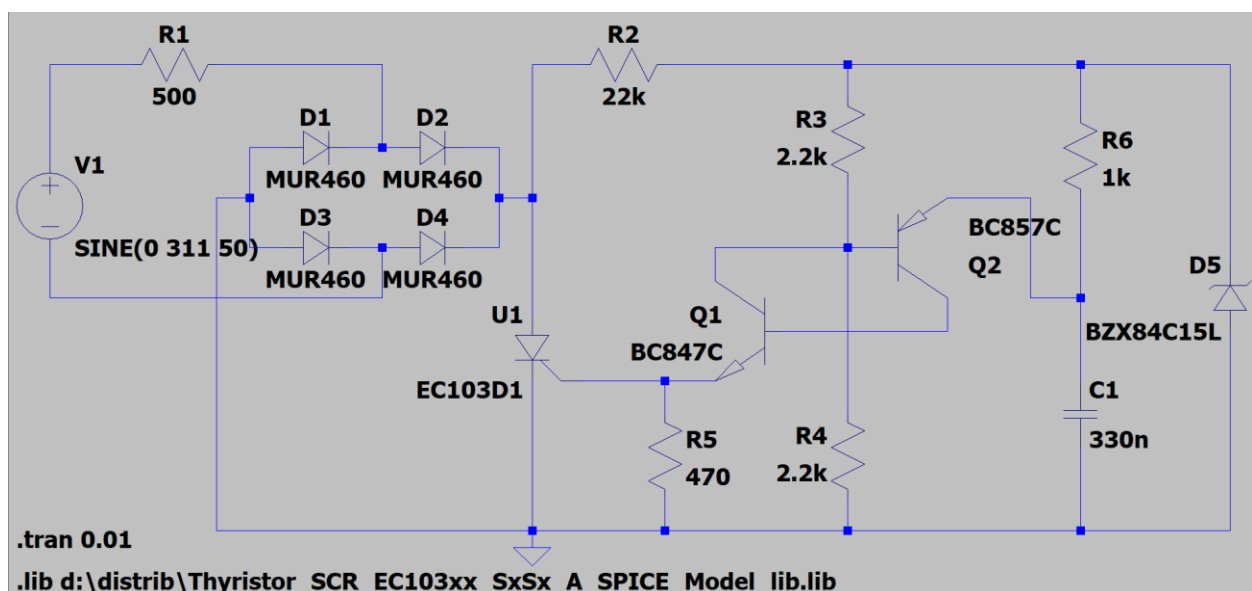


Рисунок 3.10 – Схема тиристорного регулятора напруги у LTspice

Як можна побачити, ця схема дуже схожа на рис. 3.6, з незначними

відмінностями. Джерело ЕРС V1 виконує роль мережевої напруги величиною 220 В та частотою 50 Гц. Через те, що 220 В є діючою напругою, треба встановити амплітудне значення в $\sqrt{2}$ разів більше, тобто $\sqrt{2} \cdot 220 \approx 311\text{В}$.

В якості навантаження у цій схемі використовується резистор R1 з опором 500 Ом замість лампи розжарювання. Діоди D1-D4, що утворюють мостовий випрямляч, повинні бути розраховані на зворотну напругу не менше, ніж 311 В, а краще ніж 350-400 В та прямий струм не менший $311 / 500 = 0,622$ А. Транзистор Q1 типу n-p-n та транзистор Q2 типу p-n-p можуть бути будь-якого типу, бо до них не висувається жорстких умов. Резистори R2-R6 та конденсатор C1 повинні мати такі значення, як показані на рис. 3.10, щоб забезпечити правильні режими роботи схеми.

В схемі присутні два нових елементи, що ще не зустрічалися нам – стабілітрон D5 та тиристор U1.

Стабілітрон знаходиться у загальній бібліотеці компонентів і називається "zener" за ім'ям його винахідника (рис. 3.11). Зверніть увагу, що тут він позначається дещо інакше, ніж прийнято у нас.

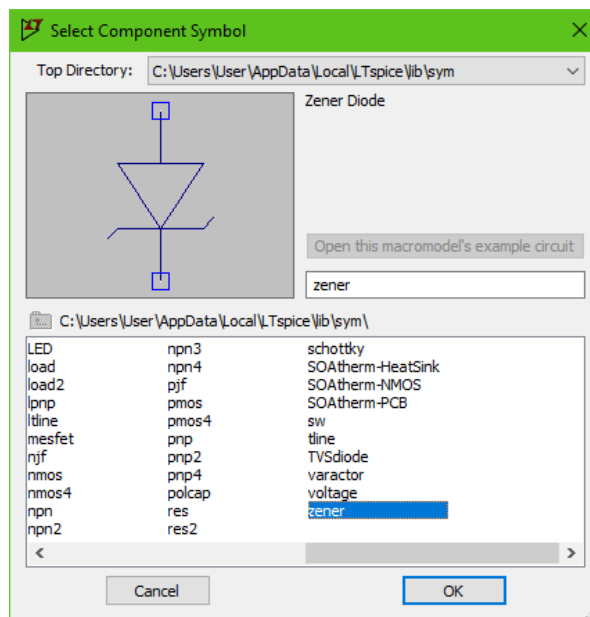


Рисунок 3.11 – Знаходження стабілітрону у бібліотеці компонентів

Що стосується тиристора, з ним все трохи складніше. У LTspice присутній такий компонент, але відсутня модель для його симуляції, то ж буде потрібно її завантажити та підключити. Щоб знайти символ тиристора у бібліотеці компонентів, треба перейти у папку "Misc", де знаходяться рідковживані символи (рис. 13.2).

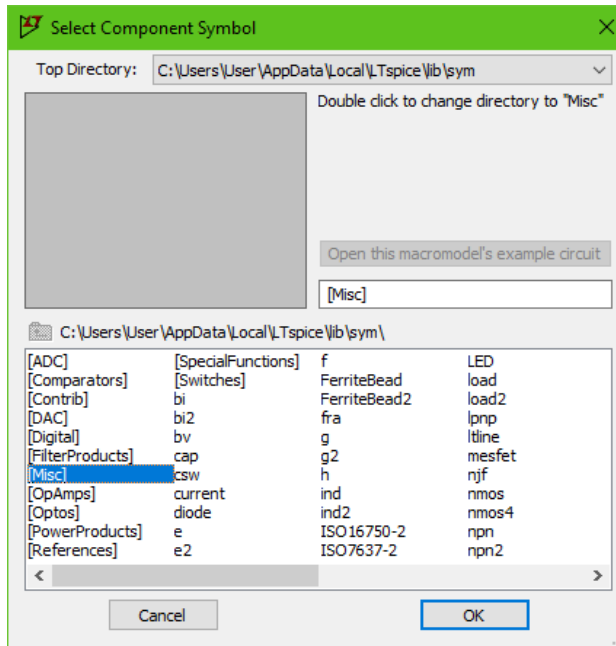


Рисунок 3.12 – Папка “Misc”

Далі у цій папці треба знайти елемент з назвою SCR (silicone controlled rectifier – керований кремнієвий випрямляч) (рис. 3.13).

В описі компоненту сказано, що це лише символ, а модель треба надати самостійно.

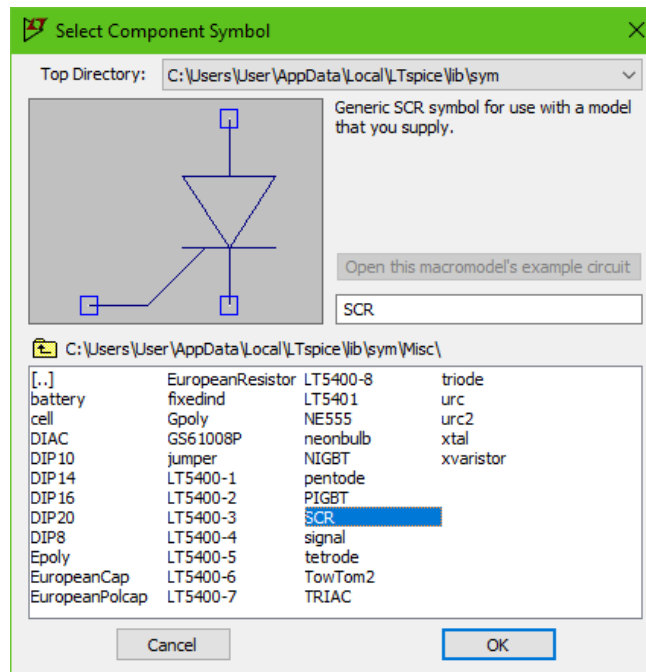


Рисунок 3.13 - Знаходження тиристора у бібліотеці компонентів

То ж ми повинні завантажити бібліотеку моделей тиристорів. Бібліотеки потрібно шукати на сайті виробника чи в інтернеті. Наприклад, раніше за цим посиланням https://www.littelfuse.com/technical-resources_old/spice-

<models/thyristor-spice-models.aspx> можна було знайти бібліотеку тиристорів типу EC103xx-SxSx_A, які підходять нам за параметрами. З цієї сторінки треба завантажити файл “[SPICE Littelfuse SCR-EC103xx-SxSx_A.lib](#)” та помістити його у відоме місце (рис. 3.14). У даний момент це посилання не працює, тому бібліотеку додано у клас поряд з методичними вказівками.

Thyristor SPICE Models

Application Designs ▾

POWR-GARD Technical Center ▾

Spice Models ▲

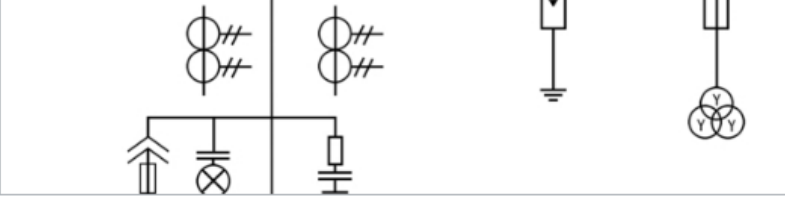
LED Protectors SPICE Models

PulseGuard SPICE Models

SIDACTor® SPICE Models

Thyristor SPICE Models

TVS Diode Arrays SPICE Models




Using SPICE Models is the industry standard way to simulate circuit performance prior to the prototype stage as an additional step of testing to ensure that your circuit works properly before investing in prototype development.

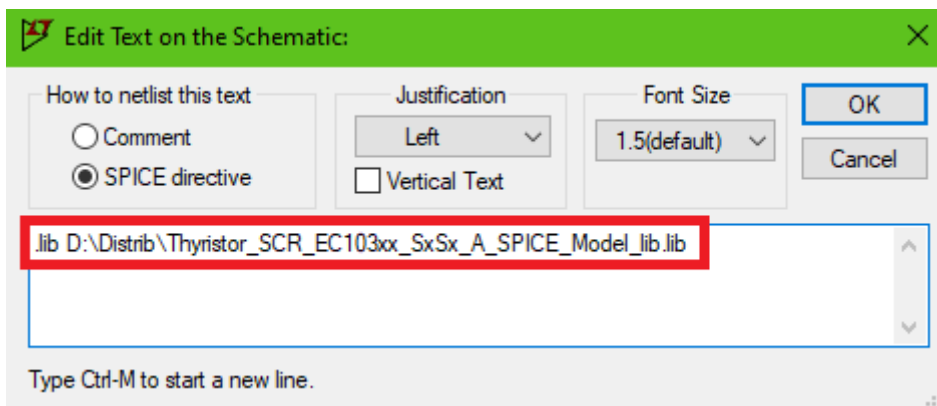
The models provided here were developed (or revised) using WinSpice, a port of Berkeley Spice3F4 to Win32, and should be compatible with most SPICE2 or SPICE3-based circuit simulators (such as PSpICE).

SCR EC103xx-SxSx_A SPICE Model file

[SPICE_Littelfuse_SCR-EC103xx-SxSx_A.lib](#)

Рисунок 3.14 – Посилання на завантаження бібліотеки моделей тиристорів

Тепер ми повинні вказати програмі LTspice, щоб вона додала цю бібліотеку до схеми. Щоб це зробити, треба натиснути на кнопку “SPICE directive”  на панелі інструментів. У вікні, що відкриється треба задати повне ім'я файлу “SPICE_Littelfuse_SCR-EC103xx-SxSx_A.lib” з його повним шляхом, використовуючи директиву “.lib” (рис. 3.15).



Edit Text on the Schematic: [X]

How to netlist this text

Comment

SPICE directive

Justification

Left ▾

Vertical Text

Font Size

1.5(default) ▾

OK

Cancel

.lib D:\Distrib\Thyristor_SCR_EC103xx_SxSx_A_SPICE_Model_lib.lib

Type Ctrl-M to start a new line.

Рисунок 3.15 – Додавання бібліотеки за допомогою директиви “.lib”

Я зберіг файл “SPICE_Littelfuse_SCR-EC103xx-SxSx_A.lib” у папку

“D:\Distrib”, ви повинні вказати замість неї папку, куди ви зберегли цей файл. Після натискання кнопки “OK” цей текст буде розміщений на схемі (рис. 3.10).

Тепер треба натиснути правою кнопкою на тиристорі U1 та у вікні, що відкрилося, змінити його параметр “Value” на “EC103D1” (рис. 3.16).

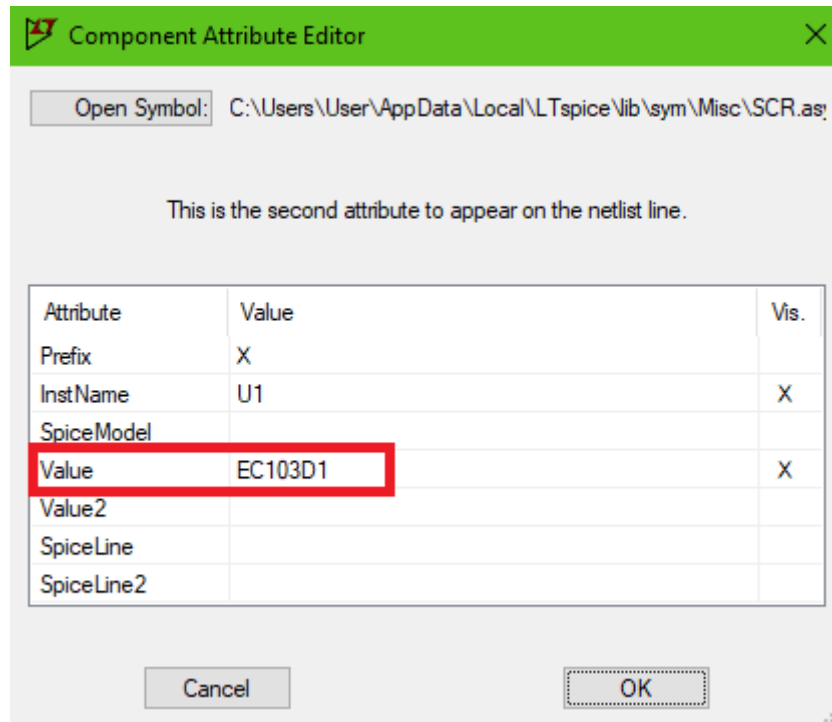


Рисунок 3.16 – Встановлення типу тиристора

Після цього треба з'єднати всі компоненти, як показано на рис. 3.10, і все буде готове до моделювання.

Змінюючи величину резистора R6, а, відповідно, і фазу включення тиристора, зняти залежності середньої та діючої напруг на навантаженні R1 від величини фази: $U_{сер}(\alpha)$ та $U_d(\alpha)$.

Запускаємо симуляцію схеми з періодом 0.01 секунди. Такий час повинен бути встановлений з таких міркувань. Частота мережевої напруги 50 Гц, то ж період одного коливання становить $1 / 50 = 0,02$ с. Оскільки нам буде потрібно вимірювати середнє значення напруги, треба встановити час симуляції, що дорівнює половині періоду, бо за повний період середнє значення буде близьке до 0. Саме через це ми й встановлюємо період симуляції “Stop time” рівним 0.01.

Падіння напруги на резисторі знаходимо як різницю потенціалів між точками, що вказані на рис. 3.17.

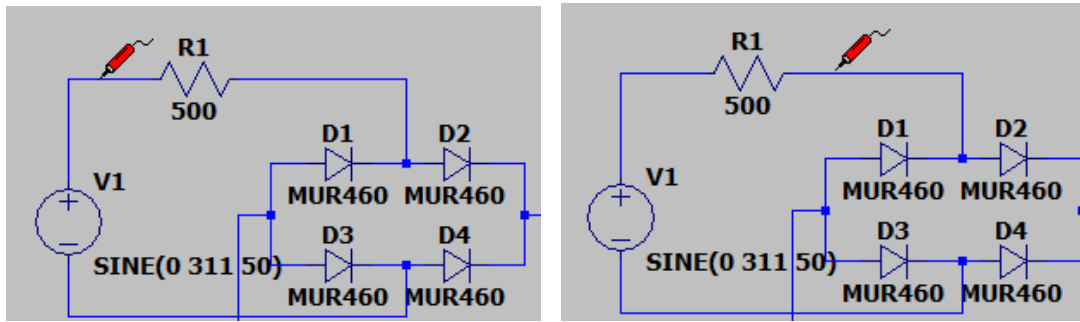


Рисунок 3.17 – Точки, між якими потрібно виміряти напругу

В моєму випадку це точки V(n001) та V(n002), то ж потрібно побудувати графік величини V(n001)-V(n002). Можна також додати графік вхідної напруги (точка на рис. 3.17 зліва), щоб бачити, яка частина синусоїди відсікається.

Встановити значення резистору $R6 = 100k$ та перезапустити симуляцію (рис. 3.18).

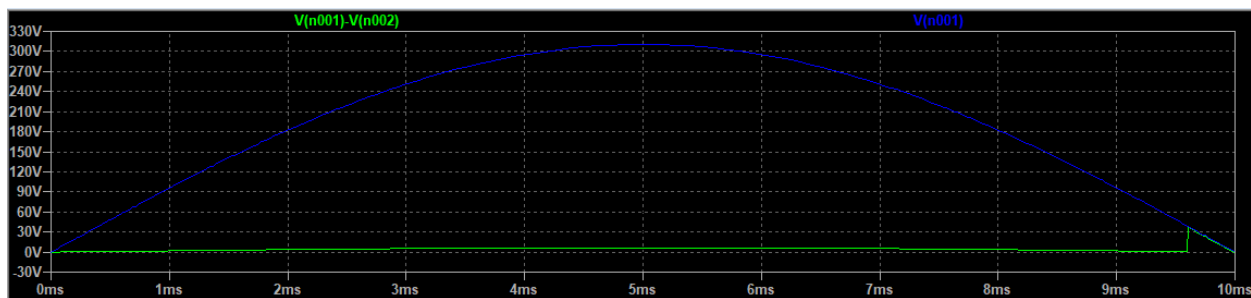


Рисунок 3.18 – Симуляція регулятора напруги при $R6 = 100k$

Як видно з рис. 3.18, тиристор відкривається лише наприкінці півперіоду, і в такому випадку середнє (і діюче) значення напруги на навантаженні буде дуже мале.

Натиснувши лівою кнопкою миші на назві графіку V(n001)-V(n002), одночасно затискаючи клавішу "Ctrl" на клавіатурі, можемо побачити ці напруги (рис. 3.19).

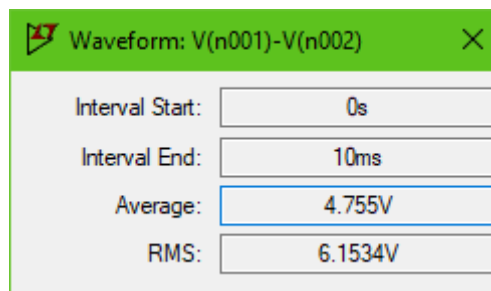


Рисунок 3.19 – Середнє (Average) та діюче (RMS) значення напруги на навантаженні



Заносимо ці значення в Excel, щоб потім побудувати графіки $U_{\text{сеп}}(\alpha)$ та $U_{\text{д}}(\alpha)$.

Тепер треба знайти фазу включення тиристора. Для цього треба натиснути лівою кнопкою миші на назві графіку V(n001)-V(n002). Тепер нам доступний курсор, перехрестя якого треба поставити на момент відкриття тиристором (рис. 3.20)

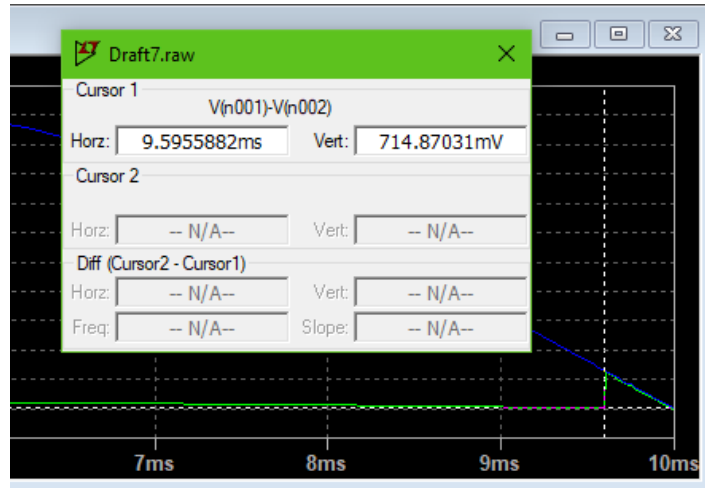


Рисунок 3.20 – Вимірювання фази включення тиристора

З рис. 3.20 видно, то тиристор відкривається у момент часу, що дорівнює ≈ 9.6 мс. Фазу визначимо, як було показано раніше. Прийmemo півперіод синусоїди за 360° , то ж фаза становитиме:

$$\alpha = 9,6 / 10 \cdot 360 = 345,6^\circ.$$

Провести такі самі вимірювання для наступних значень опору резистору R6: 100k, 50k, 30k, 25k, 20k, 15k, 12k, 8k, 3k, 1k, 300. За результатами розрахунків побудувати графіки $U_{\text{сеп}}(\alpha)$ та $U_{\text{д}}(\alpha)$. Вони мають бути схожими на рис. 3.21.

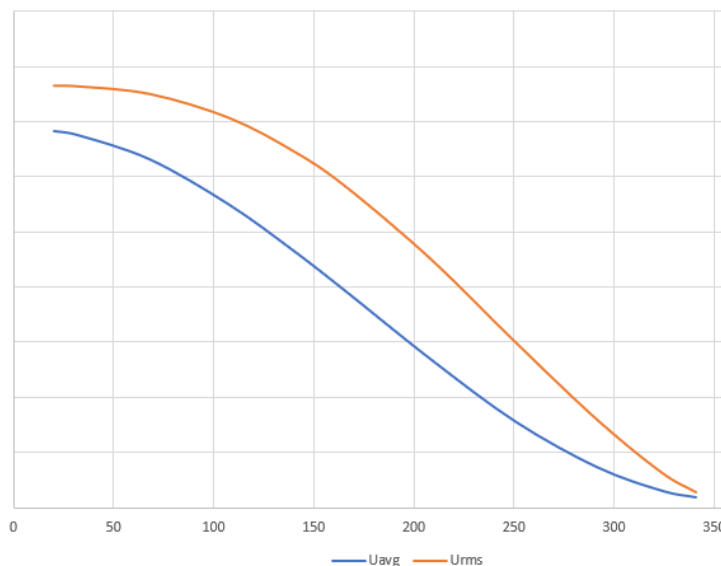


Рисунок 3.21 - Графіки $U_{\text{сеп}}(\alpha)$ та $U_{\text{д}}(\alpha)$

Переконайтеся, що залежність середньої випрямленої напруги на навантаженні $U_{\text{сер}}$ від кута α називається має вигляд косинусоїди, зміщеної на величину $U_{\text{сер max}}/2$, тобто

$$U_{\text{сер max}}(\alpha) = \frac{U_{\text{сер max}}}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \quad (3.1)$$

де $U_{\text{сер max}}$ – максимальна середня напруга при повністю відкритому тиристорі.

Додати до попереднього графіку ще графік $U_{\text{сер теор}}(\alpha)$, знайдений по формули (3.1). Переконайтеся, що експериментальний та теоретичний графіки співпадають. Не забувайте, що у Excel тригонометричні функції приймають аргумент у радіанах, то ж треба перевести фазу α з градусів у радіани. α ми поділяємо навпіл через те, що фазу включення тиристора ми розраховували, приймаючи половину періоду за 360° , тоді як насправді там лише 180° .

Фінальний результат повинен бути схожий на рис. 3.22.

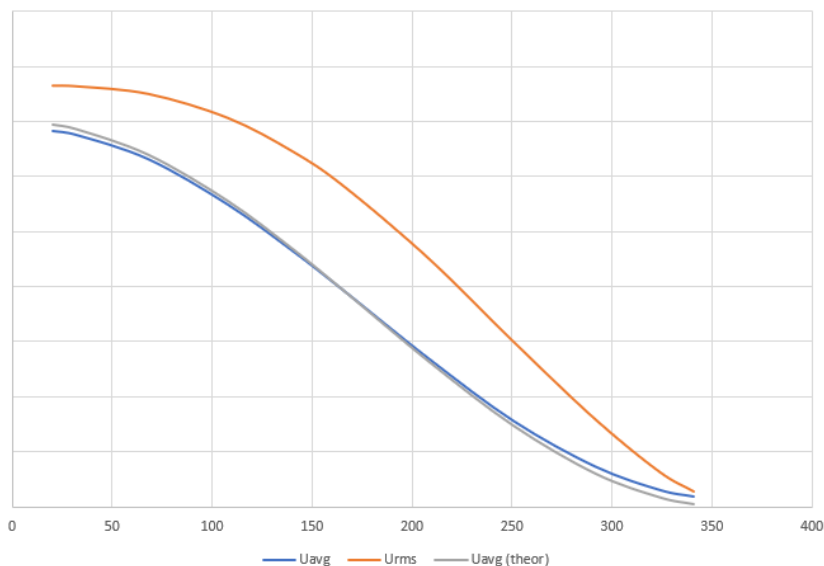


Рисунок 3.22 - Графіки $U_{\text{сер}}(\alpha)$, $U_{\text{д}}(\alpha)$ та $U_{\text{сер теор}}(\alpha)$

3.3 Контрольні питання та завдання

1. Що таке тиристор?
2. Будова та принцип роботи тиристора.
3. Сфери застосування тиристорів.
4. Принцип роботи регулятора напруги.
5. Як розрахувати напругу на навантаженні.

3.4 Перелік посилань

1. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 1–4 “Дослідження тиристорного регулювальника напруги” по дисципліні “ Електроніка і мікропроцесорна техніка” для студентів напряму підготовки 6.050202 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”, форма навчання денна/заочна/прискорена / укл. А. Б. Ісаєв. Маріуполь: ПДТУ, 2014.–15с.

2. Дослідження тиристорного регулювальника напруги: методичні вказівки до практичної роботи № 4 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023, 23 с.

3. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. / С. О. Квітка. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. 223 с.

4. Thyristors : веб-сайт. URL:

<https://www.circuitbread.com/textbooks/lessons-in-electric-circuits-volume-iii-semiconductors/solid-state-device-theory/thyristors> (дата звернення: 19.01.2026).

The Silicon-Controlled Rectifier (SCR) : веб-сайт. URL:

<https://www.circuitbread.com/textbooks/lessons-in-electric-circuits-volume-iii-semiconductors/thyristors/the-silicon-controlled-rectifier-scr> (дата звернення: 19.01.2026).



4 ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

Мета практичної роботи:

Вивчення принципу роботи операційного підсилювача, дослідження різних схем на базі операційного підсилювача (ОП).

Завдання практичної роботи:

- Дослідження роботи інвертувального підсилювача на базі ОП.
- Дослідження роботи неінвертувального підсилювача на базі ОП.
- Дослідження роботи суматорів на базі ОП.
- Дослідження роботи інтегратора та диференціатора на базі ОП.

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Принципові електричні схеми для всіх завдань, результати вимірювання у вигляді таблиць та графіків, необхідні розрахунки
- Висновки
- Перелік посилань

4.1 Теоретичні дані

4.1.1 Загальні відомості

Операційний підсилювач (ОП) – це ППС, який має високий коефіцієнт підсилення, два входи (так званий диференціальний вхід) і один вихід.

Зазвичай, ОП будують як ППС з безпосередніми зв'язками між каскадами, з диференціальним входом і біполярним відносно амплітуди підсилюваного сигналу виходом. Це забезпечує нульові потенціали на вході і виході ОП за відсутності вхідного сигналу. Тому такі підсилювачі легко з'єднувати послідовно, а також охоплювати зворотними зв'язками.

За своєю структурою ОП бувають три- або двокаскадні. За трикаскадною схемою будувались ОП в інтегральному виконанні першого покоління. Перший диференціальний каскад у них працює в режимі мікрострумів, забезпечуючи тим самим високий вхідний опір. Другий диференціальний каскад забезпечує підсилення напруги. Третій каскад, вихідний, виконується як двотактний з СК і забезпечує підсилення потужності, а також низький вихідний опір.

ОП другого покоління будуються за двокаскадною схемою. Це стало можливим із зростанням рівня інтегральної технології. При цьому, перший каскад забезпечує і високий вхідний опір і великий коефіцієнт підсилення напруги. Другий каскад є підсилювачем потужності.



Свою назву ці підсилювачі одержали у зв'язку з тим, що спочатку вони використовувались для моделювання математичних операцій (множення, додавання, віднімання, диференціювання, інтегрування та ін.) в аналогових обчислювальних машинах (АОМ).

Із розвитком інтегральної техніки області використання ОП значно розширились. Нині вони використовуються в основному як високоякісні підсилювачі напруги при побудові будь-яких електронних пристроїв. А АОМ тим часом були витіснені цифровими обчислювальними машинами.

Поширеному застосуванню ОП сприяють їхні високі параметри. Це великий коефіцієнт підсилення за напругою, що становить $K_U = (10^4 - 10^6)$; високий вхідний опір кожного з входів – $R_{вх} > 400$ кОм; низький вихідний опір $R_{вих} < 100$ Ом; досить широкий частотний діапазон – від нуля до одиниць мегагерц.

За ними ОП для багатьох застосувань наближаються до ідеального підсилювача, що має:

- 1) $K_U \rightarrow \infty$;
- 2) два симетричних входи з $R_{вх} \rightarrow \infty$;
- 3) $R_{вих} \rightarrow 0$;
- 4) нескінченний діапазон частот підсилюваного сигналу.

При цьому зазначимо, що як лінійні підсилювачі із K_U у сотні тисяч разів реальні ОП не застосовують, бо їхній коефіцієнт підсилення (як і інші параметри) – величина вкрай нестабільна (наприклад, під дією температури).

Умовне позначення ОП наведено на рис. 4.1.

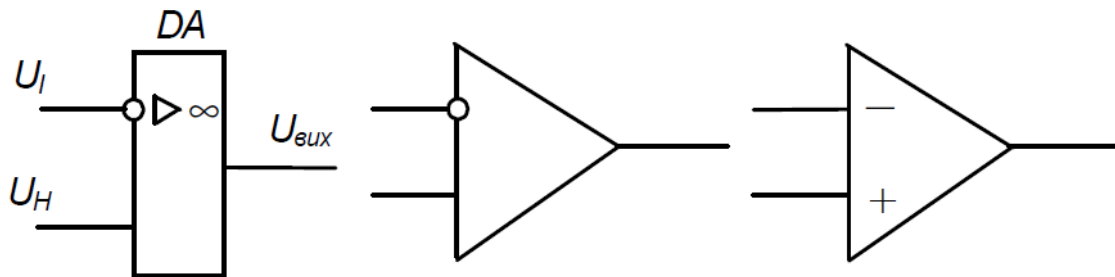


Рисунок 4.1 – Умовне позначення ОП

4.1.2 Інвертувальний підсилювач

Інвертувальний підсилювач (необхідно розрізняти поняття «операційний підсилювач» і «підсилювач, виконаний на операційному підсилювачі»), схему якого зображено на рис. 4.2, змінює знак вихідного сигналу відносно вхідного. Він створюється введенням паралельного НЗЗ за допомогою резистора $R_{ЗЗ}$ на інвертувальний вхід ОП – на цей вхід подається частина вихідного сигналу з дільника $R_{ЗЗ}, R_1$.

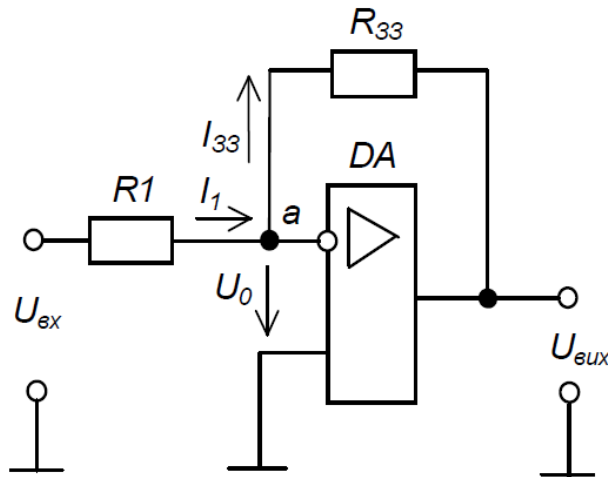


Рисунок 4.2 – Схема інвертувального підсилювача

Неінвертувальний вхід з'єднується із спільною точкою схеми (точкою з нульовим потенціалом). Вхідний сигнал через резистор $R1$ подається на інвертувальний вхід ОП. Кола живлення і ланцюги корекції тут і надалі не показано.

Виходячи з наведеного вище, а саме: вважаючи ОП за ідеальний, при аналізі схем з ОП слід виходити з таких положень:

- 1) коефіцієнт підсилення ОП нескінченний;
- 2) входи ОП струму не споживають ($R_{вхОП} = \infty$);
- 3) у вихідних колах ОП падіння напруги відсутнє ($R_{вихОП} = 0$);
- 4) якщо ОП охоплено НЗЗ і він працює у лінійному режимі (у режимі підсилення, а не насичення), різниця потенціалів між його входами $U_{вхОП} = U_0 = 0$.

Доведемо останнє положення.

$$U_{вихОП} = K_{УОП} U_{вхОП};$$

$$U_{вхОП} = \frac{U_{вихОП}}{K_{УОП}}.$$

Якщо $K_{УОП} \rightarrow \infty$, то $U_{вхОП} \rightarrow 0$.

Реально $U_{вхОП} = U_0$ нулю не дорівнює. Але це настільки незначна величина, що для більшості схем на ОП нею можна знехтувати. Дійсно, якщо, наприклад, $U_{вихОП} = 10$ В (це майже відповідає насиченню), а $K_{УОП} = 100000$, то $U_0 = 100$ мкВ!

Оскільки на неінвертувальний вхід подана напруга $U_H = 0$ (він з'єднаний з нульовою точкою), а $U_0 = 0$, то і потенціал інвертувального входу також дорівнює нулю (віртуальний нуль). У результаті джерелом вхідного сигналу пристрій сприймається як $R1$ – вхідний опір підсилювача дорівнює опору резистора $R1$.

За першим законом Кірхгофа для вузла a маємо

$$I_1 = I_{33}; \tag{4.1}$$

Тобто

$$\frac{U_{вх}}{R1} = -\frac{U_{вих}}{R_{33}}. \tag{4.2}$$

ОП, забезпечуючи рівність $U_0=0$, створює на виході таку напругу, щоб відвести струм I_1 через резистор R_{33} .

Тоді

$$K_{U_{33}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (4.3)$$

Отже, $K_{U_{33}}$ залежить лише від співвідношення опорів резисторів діляника НЗЗ. Знак «-» вказує на інверсію вхідного сигналу.

Вхідний опір схеми дорівнює опорі резистора R_1 .

Якщо $R_{33} > R_1$, то $U_{\text{вих}} = -\frac{R_{33}}{R_1} U_{\text{вх}}$ - маємо інвертувальний масштабний підсилювач (з масштабним коефіцієнтом $K_{U_{33}} = -\frac{R_{33}}{R_1}$).

При $R_{33} = R_1$, $K_{U_{33}} = -1$ - схема набуває властивостей інвертувального повторювача вхідної напруги (інвертор полярності).

4.1.3 Неінвертувальний підсилювач

Неінвертувальний підсилювач, схему якого зображено на рис. 4.3, можна одержати, якщо ввести послідовний НЗЗ за напругою наінвертувальний вхід, а вхідний сигнал подати на неінвертувальний вхід ОП.

Тут $U_n = U_{\text{вх}}$, а вхідний струм $I_{\text{вх}} = 0$, бо $R_{\text{вхОП}} = \infty$.

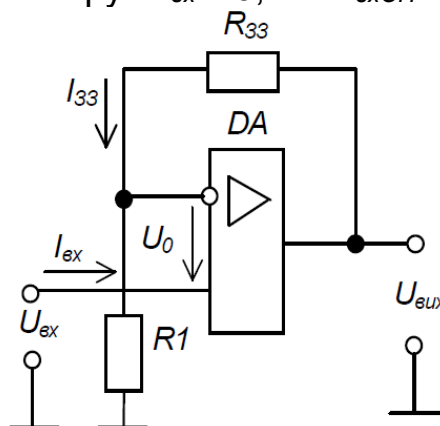


Рисунок 4.3 – Схема неінвертувального підсилювача

Оскільки $U_0=0$ (див. інвертувальний підсилювач), то $U_{R1}=U_{\text{вх}}$, а $\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = I_{33}$.

З іншого боку $I_{33} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_1+R_{33}}$. Отже, $\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_1+R_{33}}$, звідки

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right) \quad (4.4)$$

Тоді коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача

$$K_{U_{33}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (4.5)$$

Якщо $R_{33}=0$, а $R_1 \rightarrow \infty$, одержимо неінвертувальний повторювач, схему якого зображено на рис. 4.4.

Неінвертувальний та інвертувальний підсилювачі широко використовуються як високостабільні підсилювачі різного призначення. Причому, неінвертувальний має великий вхідний опір (теоретично – нескінченний) і



використовується для підсилення сигналів джерел з високим вихідним опором.

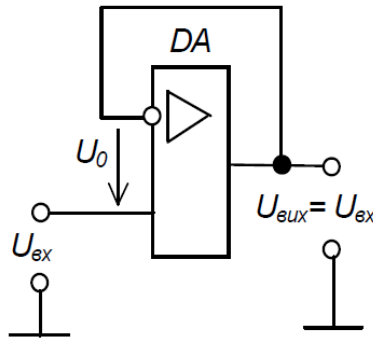


Рисунок 4.4 – Схема неінвертувального повторювача

4.1.4 Інвертувальний суматор

Схема **інвертувального суматора** зображена на рис. 4.5. Він виконаний за типом інвертувального підсилювача з кількістю паралельних гілок на вході, що дорівнює числу сигналів. Якщо опори усіх резисторів схеми однакові

$$R_{33} = R_1 = R_2 = \dots = R_n \ll R_{\text{вхОП}},$$

то при $I_{\text{вхОП}} = 0$ маємо

$$I_{33} = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (4.6)$$

або

$$U_{\text{вих}} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (4.7)$$

Останнє співвідношення відбиває рівноправну вагову участь доданків у їх сумі. Підсумовування може виконуватись також з різними ваговими коефіцієнтами для кожного з доданків.

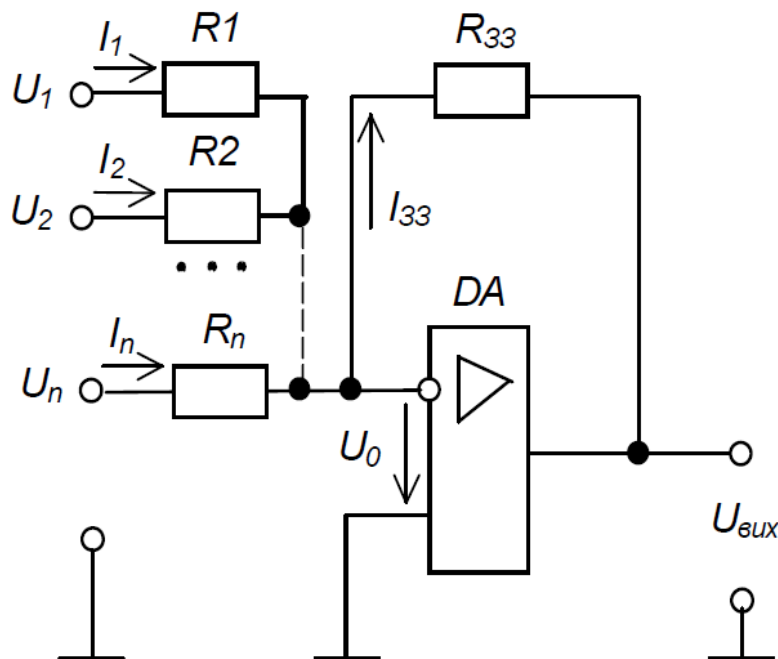


Рисунок 4.5 – Схема інвертувального суматора



Досягається це використанням різних значень опорів резисторів у вхідних гілках:

$$U_{\text{вих}} = -\left(\frac{R_{33}}{R_1} U_1 + \frac{R_{33}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{33}}{R_n} U_n\right). \quad (4.8)$$

Тим, що з'єднання резисторів має нульовий потенціал («віртуальний нуль»), виключається взаємний вплив джерел вхідних напруг.

4.1.5 Неінвертувальний суматор

Неінвертувальний суматор можна отримати шляхом послідовного з'єднання суматора і інвертора. Але на основі неінвертувального підсилювача його можна створити значно простіше – як це показано на рис. 4.6.

При $U_0=0$ напруга на обох входах ОП однакова і складає

$$U_H = \frac{U_{\text{вих}} R_1}{R_1 + R_{33}} \quad (4.9)$$

Оскільки струм неінвертувального входу дорівнює нулю (тому що $R_{\text{вхОП}} \rightarrow \infty$), маємо

$$\frac{U_1 - U_H}{R} + \frac{U_2 - U_H}{R} + \dots + \frac{U_n - U_H}{R} = 0 \quad (4.10)$$

або

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = n \frac{R_1}{R_1 + R_{33}} U_{\text{вих}} \quad (4.11)$$

Звідки

$$U_{\text{вих}} = \frac{R_1 + R_{33}}{n R_1} (U_1 + U_2 + \dots + U_n) \quad (4.12)$$

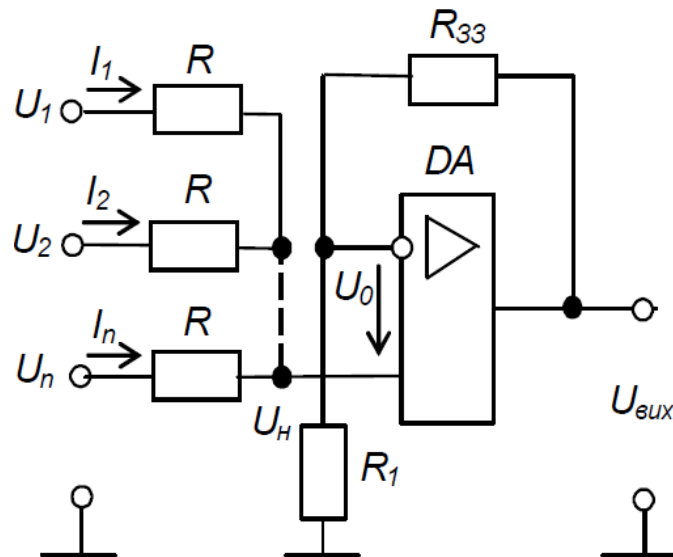


Рисунок 4.6 – Схема неінвертувального суматора

Задамо $\frac{R_1 + R_{33}}{n R_1} = 1$, і тоді

$$U_{\text{вих}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (4.13)$$

Але взаємний вплив джерел вхідних напруг тут не виключається, як це було у інвертувального підсилювача. Тому джерела повинні мати якомога менші опори (будуватись на ОП), або їх треба враховувати при розрахунку.

Якщо поєднати схеми обох суматорів (використати пристрій одночасно як інвертувальний і неінвертувальний суматор), то отримуємо **суматор-віднімач**. Напряга на його виході дорівнює різниці результатів підсумовування напруг, поданих на неінвертувальний і на інвертувальний входи ОП.

4.1.6 Інтегровальний підсилювач (інтегратор)

Схему інтегратора зображено на рис. 4.7. Вона створюється заміною в схемі інвертувального підсилювача резистора зворотного зв'язку $R_{зз}$ конденсатором C .

Оскільки $R_{вхОП} = \infty$, то з урахуванням пояснень, наведених для інвертувального підсилювача, маємо

$$I_R = I_C \text{ і } \frac{U_{вх}}{R} = -C \frac{du_{вих}}{dt}, \text{ або} \quad U_{вих} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt + U_{вих0}. \quad (4.14)$$

Як правило, при $t = 0$ $U_C = U_{вих0} = 0$, тому

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt. \quad (4.15)$$

$RC = \tau$ – стала часу. Реальному масштабу часу відповідає $\tau = 1$ с.

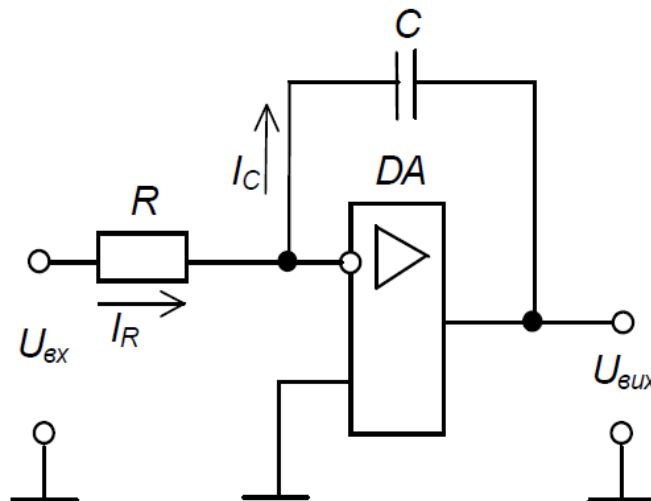


Рисунок 4.7 – Схема інтегратора

При подачі на вхід постійної за значенням напруги, струм, що заряджає конденсатор, має постійне значення $U_{вх}/R$ (не залежить від ступеню заряду конденсатора) і конденсатор заряджається рівномірно, а вихідна напруга зростає лінійно

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} U_{вх} t. \quad (4.16)$$



Тому інтегратор часто застосовують як основу генераторів лінійних напруг.

На рис. 4.8 зображено часові діаграми роботи інтегратора при подачі на його вхід постійної напруги.

При τ_2 параметри схеми вибрані неправильно, бо не забезпечується виконання інтегрування за весь час дії вхідного сигналу (ОП входить у режим насичення).

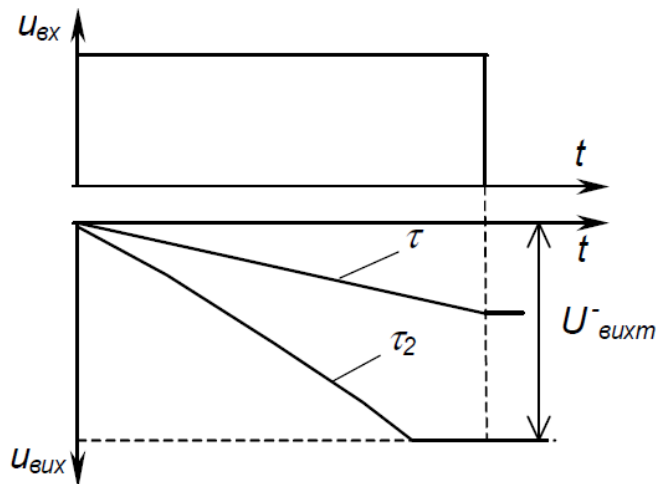


Рисунок 4.8 – Часові діаграми роботи інтегратора

4.1.7 Диференціувальний підсилювач (диференціатор)

Схему диференціатора наведено на рис. 4.9. Від схеми інтегратора вона відрізняється заміною місцями резистора і конденсатора. Тут

$$I_C = I_{33}; I_C = C \frac{du_{\text{вх}}}{dt}; I_{33} = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_{33}}; C \frac{du_{\text{вх}}}{dt} = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_{33}},$$

$$U_{\text{вих}} = -CR_{33} \frac{du_{\text{вх}}}{dt}; \quad (4.17)$$

$$CR_{33} = \tau; U_{\text{вих}} = -\tau \frac{du_{\text{вх}}}{dt}; \quad (4.18)$$

Сталу часу τ необхідно вибирати так, щоб у процесі диференціювання дотримувалась нерівність $U_{\text{вих}} < U_{\text{вихт}}$.

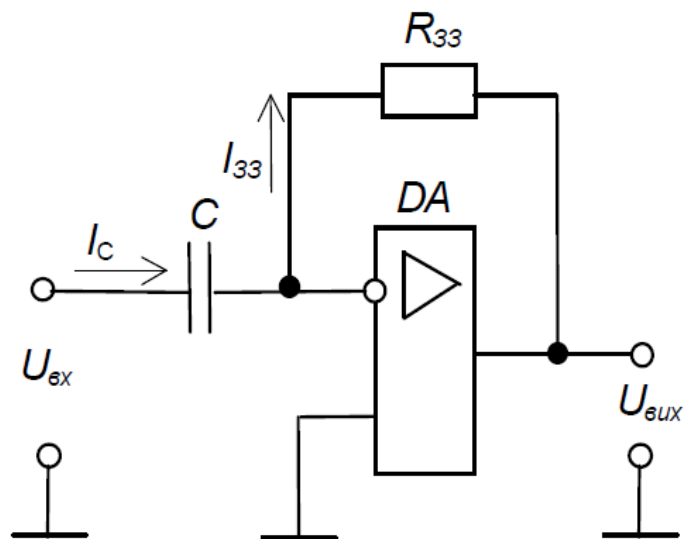


Рисунок 4.9 – Схема диференціатора

4.2 Завдання до лабораторної роботи

4.2.1 Завдання 1: Дослідження інвертувального підсилювача

1. У LTspice зібрати схему інвертувального підсилювача без зворотного зв'язку (рис. 4.10)

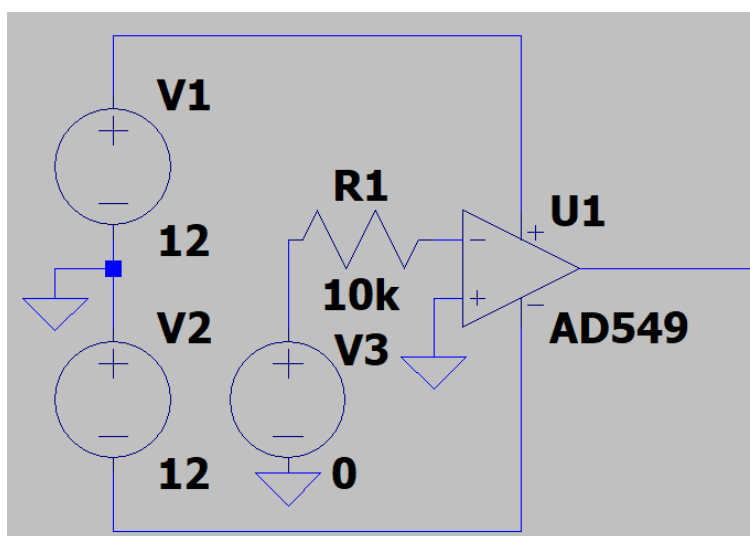


Рисунок 4.10 – Схема інвертувального підсилювача без зворотного зв'язку

Операційний підсилювач можна знайти в папці “OpAmps” бібліотеки компонентів (рис. 4.11).

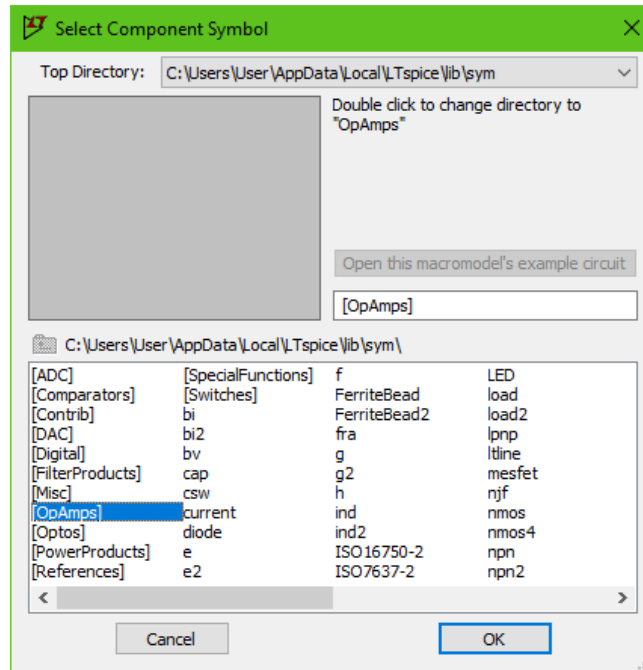


Рисунок 4.11 – Папка “OpAmps”

Всередині цієї папки знаходиться велика кількість реально існуючих ОП, серед яких можна обрати будь-який, але для спрощення краще обрати такий, що не має додаткових виводів для корекції або включення, тобто, такий, який має вид як на рис. 4.12.

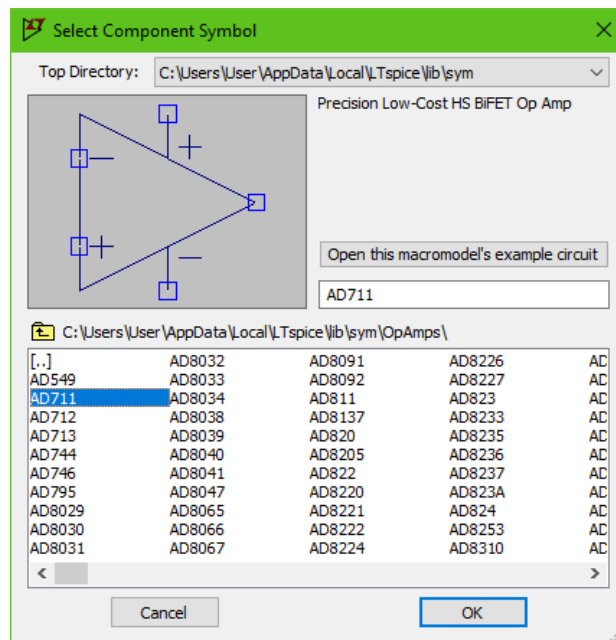


Рисунок 4.12 – ОП без додаткових виводів

Виводи, що знаходяться на верхній та нижній частинах ОП призначені для його живлення. Для правильної роботи ОП (в нашому випадку), його треба живити двополярною напругою. Для того, щоб її отримати, треба

використати два однакових джерела ЕРС ($V1$ та $V2$ на рис. 4.10), що з'єднані послідовно, а точка їх з'єднання підключена до заземлення.

Джерело ЕРС $V3$ – це джерело вхідного сигналу, що подається на інвертувальний вхід ОП через резистор $R1$. Для схеми без зворотного зв'язку цей резистор можна не ставити, але він буде потрібен для наступної схеми. Його величина повинна бути в діапазоні $10\text{ кОм} - 100\text{ кОм}$.

2. Отримати і побудувати статичну характеристику підсилювача без зворотного зв'язку. Для цього змінювати вхідну напругу підсилювача ($V3$) у діапазоні від -12 В до 12 В з такого ряду: -12 В , -5 В , -1 В , -500 мВ , -100 мВ , -10 мВ , -1 мВ , 0 В , 1 мВ , 10 мВ , 100 мВ , 500 мВ , 1 В , 5 В , 12 В та вимірювати вихідну напругу ОП. Визначити коефіцієнт підсилення ОП для похилої ділянки графіку. Переконалися, що коли на вході сигнал позитивної полярності, то на виході негативної і навпаки.

3. Отримати і побудувати залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного сигналу (аналог статичної характеристики) для вхідного сигналу синусоїдальної форми амплітудою від 0 до 2 В і частотою 100 Гц . Визначити коефіцієнт посилення операційного підсилювача для лінійної частини залежності. Навести графіки вихідного сигналу для різних величин вхідної напруги. Вхідні напруги взяти з такого ряду: 0 В , 1 мВ , 5 мВ , 10 мВ , 50 мВ , 100 мВ , 500 мВ , 1 В , $1,5\text{ В}$, 2 В .

4. Отримати та побудувати логарифмічну амплітудно-частотну характеристику для вхідного сигналу синусоїдальної форми за зміни частоти від 100 Гц до 100 кГц з наступного ряду: 100 Гц , 200 Гц , 500 Гц , 1 кГц , 2 кГц , 5 кГц , 10 кГц , 20 кГц , 50 кГц , 100 кГц . Вибрати таку амплітуду вхідного сигналу, при якій амплітуда, вихідного сигналу на частоті 100 Гц становитиме приблизно $6..8\text{ В}$. Визначити наскільки менший коефіцієнт посилення напруги на високих частотах порівняно з низькими частотами.

5. Додати до схеми інвертувального підсилювача резистор зворотного зв'язку так, щоб коефіцієнт підсилення був $3..5$ (рис. 4.13)

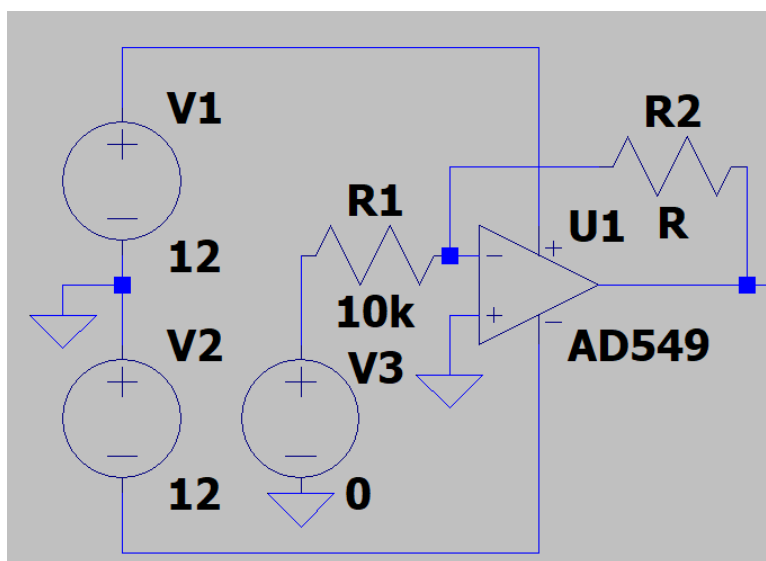


Рисунок 4.13 – Схема інвертувального підсилювача



6. Виконати такі самі дії, що і в пунктах 2-4, але стосовно підсилювача зі зворотним зв'язком. Переконайтеся, що розрахунковий коефіцієнт підсилення співпадає з отриманим, а АЧХ стала більш стабільною.

7. Зібрати схему інвертувального повторювача. Переконайтеся, що у виході напруга має таку величину, як у вході, але протилежної полярності у всьому діапазоні значень.

4.2.2 Завдання 2: Дослідження неінвертувального підсилювача

Виконати такі самі дослідження, як і для інвертувального підсилювача. Схему неінвертувального підсилювача скласти самостійно відповідно до рис. 4.3.

4.2.3 Завдання 3: Дослідження суматорів

Використовуючи схеми інвертувального (рис. 4.5) та неінвертувального (рис. 4.6) суматорів, виконати 5..6 раз підсумовування кількох пар сигналів: різної величини позитивних, різної величини негативних, різної величини різних знаків, однакової величини різних знаків, один сигнал дорівнює нулю другий – різні значення. Результати представити у вигляді таблиці з розрахунковими та експериментальними даними.

4.2.4 Завдання 4: Дослідження інтегратора

1. Зібрати схему інтегратора (рис. 4.7). Ємність конденсатора C повинна бути у діапазоні 10 нФ...100 мкФ.

2. На вхід інтегратора подати сигнали різної форми та відомої частоти та амплітуди. За допомогою аналізатора сигналів подивитися та замалювати форму вихідних сигналів. Проаналізувати та пояснити отримані результати.

3. Для вхідного сигналу прямокутної форми виміряти амплітуду вихідних коливань. Використовуючи аналітичну формулу інтегратора (4.16), розрахувати теоретичну амплітуду сигналу. Порівняти результати.

Для того, щоб отримати сигнали різної форми, треба у джерелі живлення обрати тип "PULSE", а потім задати такі параметри (рис. 4.14).

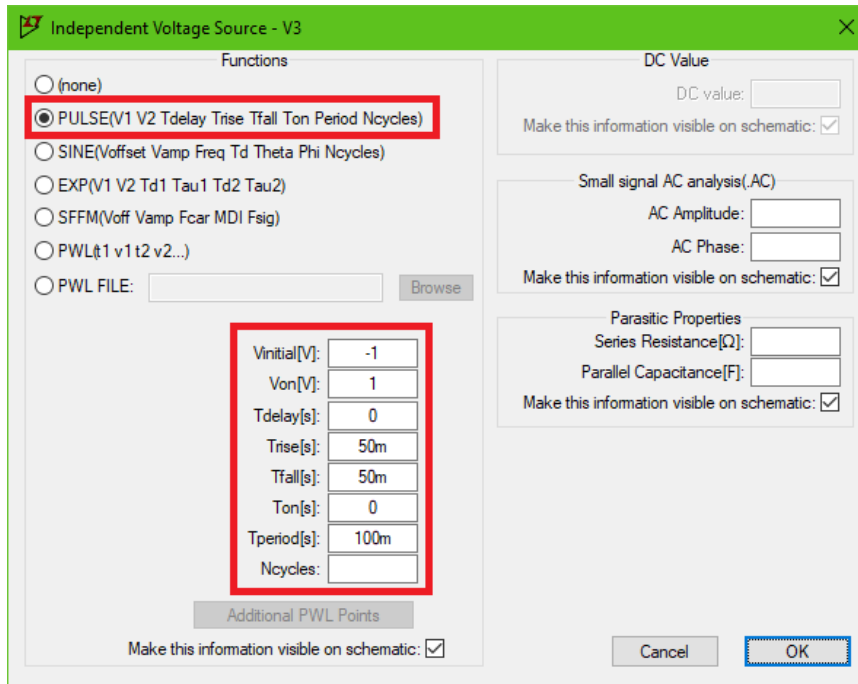


Рисунок 4.14 – Завдання сигналів різної форми

- $V_{initial}(V)$ – мінімальне значення напруги сигналу (В).
- $V_{on}(V)$ – максимальне значення напруги сигналу (В).
- $T_{delay}(s)$ – затримка початку імпульсів відносно початку симуляції (с).
- $T_{rise}(s)$ – час наростання сигналу від мінімального до максимального (с).
- $T_{fall}(s)$ – час спадання сигналу від максимального до мінімального (с).
- $T_{on}(s)$ – час утримання максимальної напруги сигналу (с).
- $T_{period}(s)$ – період слідування імпульсів (с).
- N_{cycles} - кількість періодів сигналу – якщо цей параметр не задавати, то імпульси будуть тривати безкінечно.

На рис. 4.14 представлені параметри для формування симетричного відносно осі абсцис трикутного сигналу з періодом 100 мс та амплітудою 1 В (рис. 4.15).

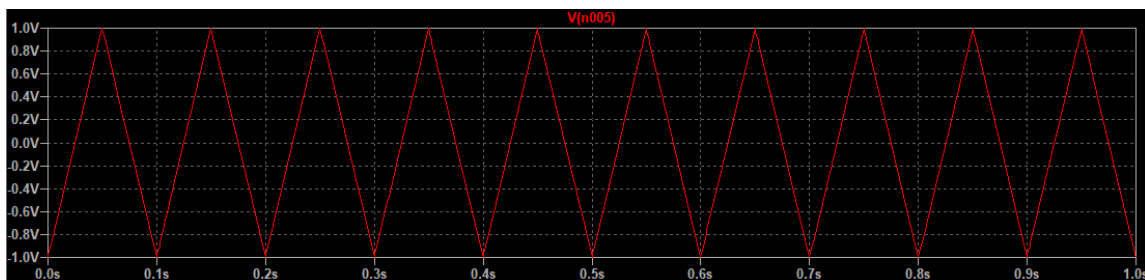


Рисунок 4.15 – Формування трикутного сигналу



Для отримання прямокутного сигналу з періодом 100 мс та амплітудою 1 В (рис. 4.16) треба задати наступні параметри (рис. 4.17).

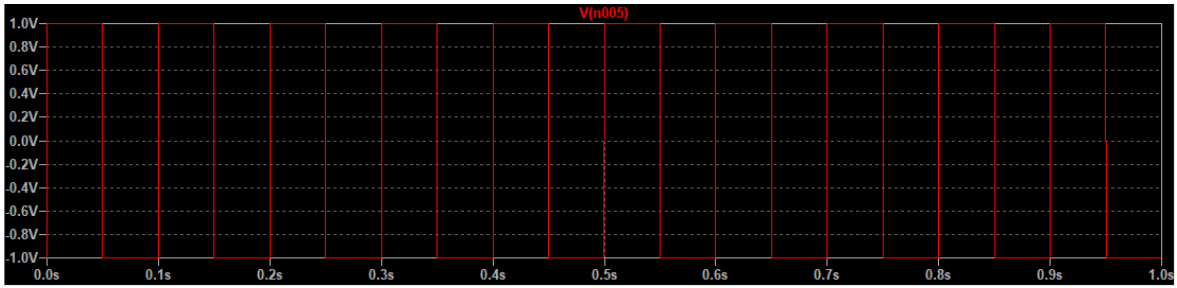


Рисунок 4.16 – Формування прямокутного сигналу

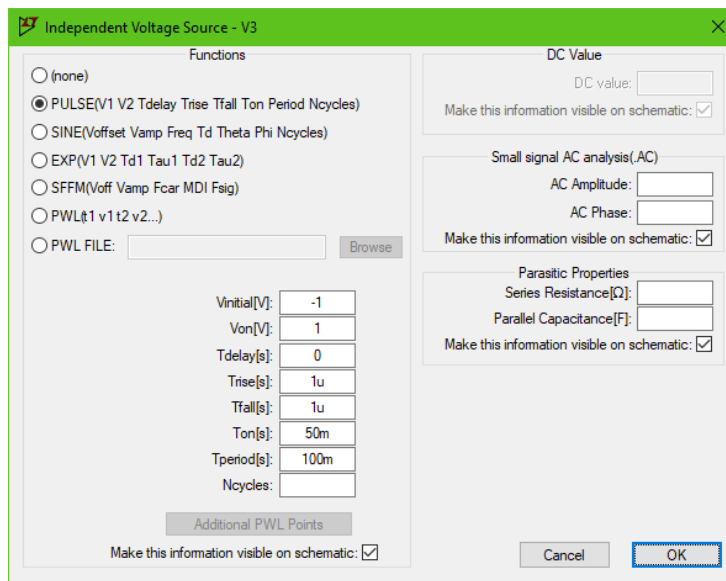


Рисунок 4.17 – Параметри джерела ЕРС для формування прямокутного сигналу

Для отримання пилкоподібного сигналу з періодом 100 мс та амплітудою 1 В (рис. 4.18) треба задати наступні параметри (рис. 4.19).

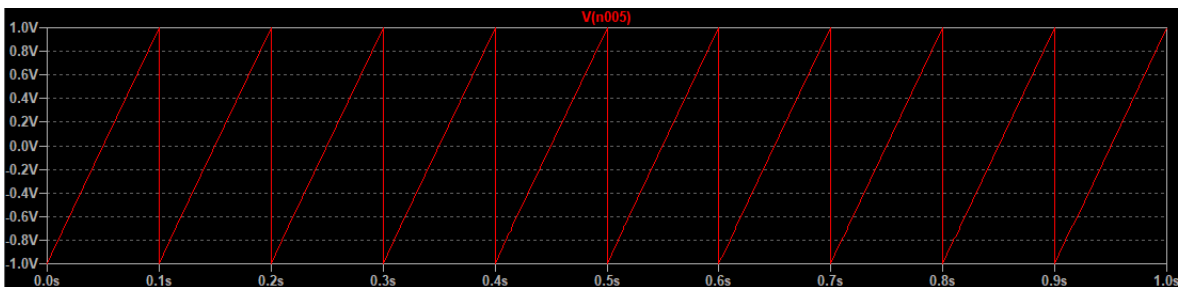


Рисунок 4.18 – Формування пилкоподібного сигналу

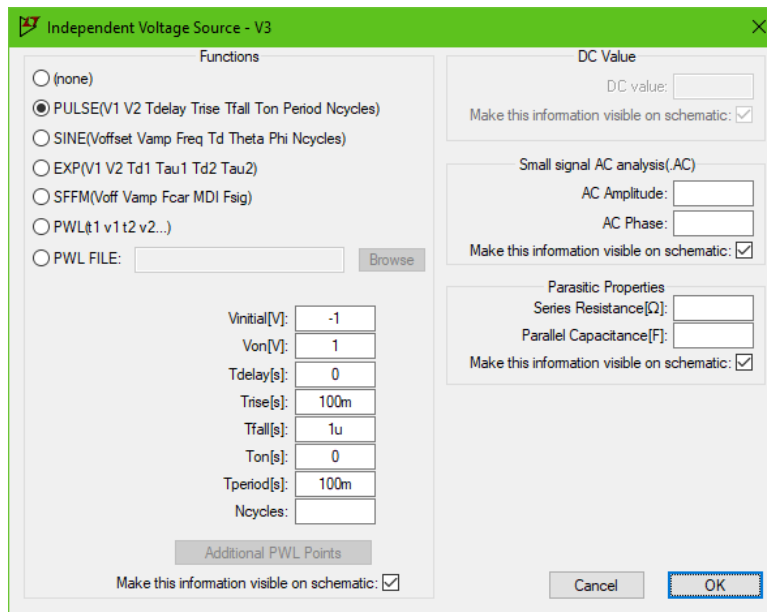


Рисунок 4.19 – Параметри джерела ЕРС для формування пилкоподібного сигналу

4.2.5 Завдання 5: Дослідження диференціатора

1. Зібрати схему інтегратора (рис. 4.9). Ємність конденсатора C повинна бути у діапазоні 10 нФ...100 мкФ.
 2. На вхід інтегратора подати сигнали різної форми та відомої частоти та амплітуди. За допомогою аналізатора сигналів подивитися та замалювати форму вихідних сигналів. Проаналізувати та пояснити отримані результати.
 3. Для вхідного сигналу трикутної форми виміряти амплітуду вихідних коливань. Використовуючи аналітичну формулу інтегратора (4.18), розрахувати теоретичну амплітуду сигналу. Порівняти результати.
- Через недоліки апроксимації сигналу від джерела напруги, диференціатор має дуже великі високочастотні коливання вихідного сигналу, які ускладнюють аналіз схеми (рис. 4.20).

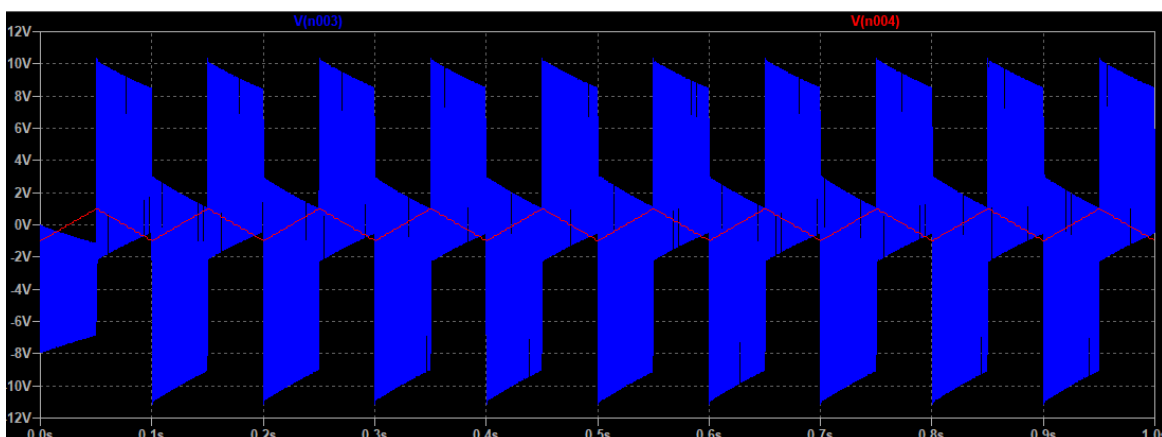


Рисунок 4.20 – Високочастотні коливання на виході інтегратора



Для того, щоб їх прибрати, треба на між джерелом сигналу та входом ОП включити невеликий RC-фільтр для усунення високочастотних гармонік (рис. 4.21).

Фільтр утворений резистором R1 та конденсатором C2. Їхні величини повинні бути невеликими: опір резистора R1 – 1...50 Ом, а ємність конденсатора C2 – 1...20 пФ.

Після додавання фільтру форма сигналу значно покращується (рис. 4.22), і тепер над ним можна проводити дослідження.

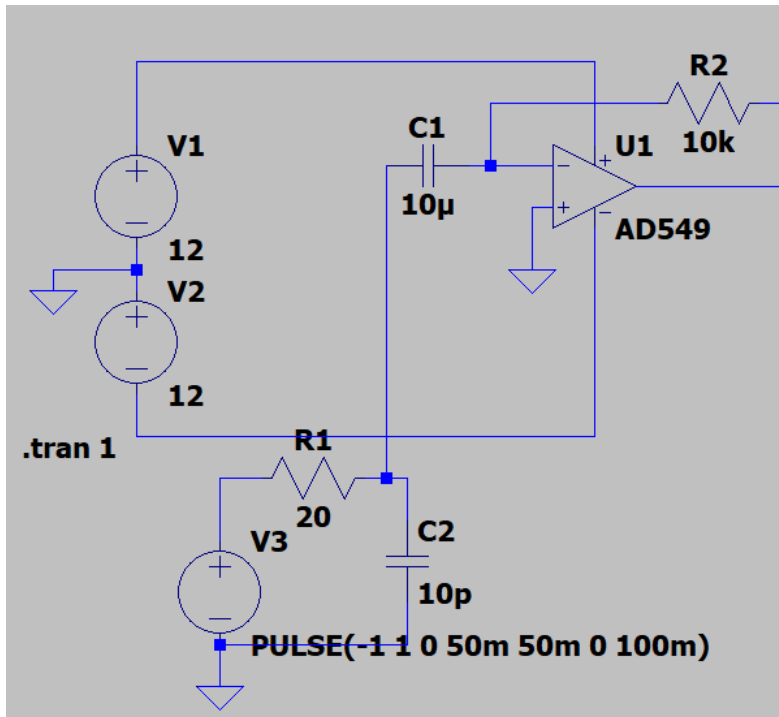


Рисунок 4.21 – Підключення джерела сигналу до входу диференціатора

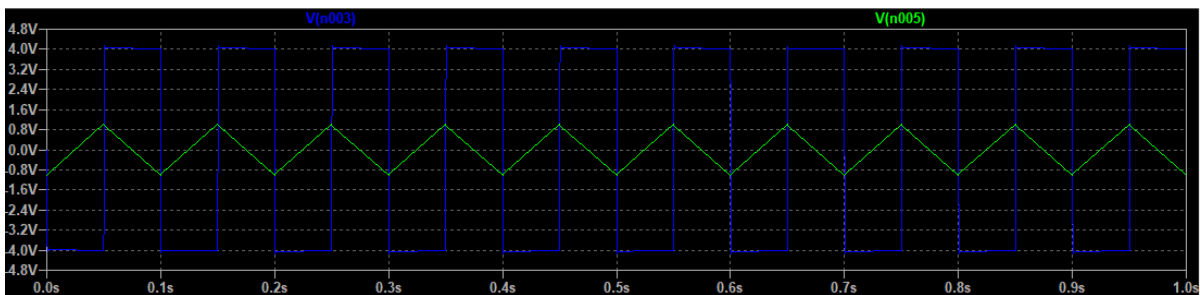


Рисунок 4.22 – Форма вхідного та вихідного сигналів диференціатора після додавання вхідного фільтру



4.3 Контрольні питання та завдання

1. Що уявляє собою ОП?
2. Які параметри має ідеальний ОП?
3. Чому дорівнює коефіцієнт підсилення інвертувального підсилювача на базі ОП?
4. Чому дорівнює коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача на базі ОП?
5. Як впливає на частотні параметри підсилювача введення негативного зворотного зв'язку?
6. Як працює інтегрувальний підсилювач на базі ОП?
7. Як працює диференціальний підсилювач на базі ОП?

4.4 Перелік посилань

1. Операційні підсилювачі: методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 1-3 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка» для студентів напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / укл. А. Б. Ісаєв. Маріуполь: ПДТУ, 2014. 14 с.

2. Дослідження схем на операційному підсилювачі: методичні вказівки до практичної роботи № 6 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕНТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023, 22 с.

3. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. / С. О. Квітка. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. 223 с.

4. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: підручник. / За ред. А.Г. Соскова. К. : Каравела, 2015. 536 с.



5 ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 ДОСЛІДЖЕННЯ І СИНТЕЗ КОМБІНАТОРНИХ СХЕМ

Мета практичної роботи:

Вивчення методів спрощення логічних функцій та побудов логічних комбінаторних схем.

Завдання практичної роботи:

– Навчитися спрощувати логічні функції за допомогою карт Карно та вручну.

– Навчитися складати електричні схеми комбінаторних пристроїв по їх рівнянням.

– Навчитися симулювати складені схеми у програмі SimulIDE.

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Початкова таблиця істинності, рівняння логічної функції у ДДНФ.
- Процес та кінцевий результат спрощення логічної функції вручну.
- Карта Карно (діаграма Вейча) для початкової логічної функції.
- Рівняння логічної функції за картою Карно.
- Функціональні схеми за первинним та спрощеним рівняннями.
- Результати симуляції обох схем з часовими діаграмами та таблицями істинності.
- Висновки
- Перелік посилань

5.1 Теоретичні дані

5.1.1 Досконала диз'юнктивна нормальна форма запису булевих виразів

Булеві вирази простих логічних функцій можна записати за їх словесним описом. У загальному випадку для одержання аналітичної форми використовують таблиці істинності.

Припустимо, логічну функцію трьох змінних задано таблицею істинності (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Логічна функція трьох змінних

| Номер набору | С | В | А | F |
|--------------|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Ця функція має чотири конституенти одиниці K_1, K_4, K_5 і K_6 (конституенти одиниці – це одиничне значення ПФ на одному з наборів). Усього для ПФ трьох змінних може бути вісім конститuent, якщо функція приймає одиничне значення на усіх наборах.

Для нашого прикладу:

$$K_1 = \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A; K_4 = C \cdot \bar{B} \cdot \bar{A}; K_5 = C \cdot \bar{B} \cdot A; K_6 = C \cdot B \cdot \bar{A}$$

Булевий вираз ПФ у досконалій диз'юнктивній нормальній формі (ДДНФ) є сумою конститuent одиниць

$$F = \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A + C \cdot \bar{B} \cdot \bar{A} + C \cdot \bar{B} \cdot A + C \cdot B \cdot \bar{A} \quad (5.1)$$

Оскільки конституенти одиниць записуються у вигляді кон'юнкцій, то ДДНФ є сумою кон'юнкцій, кожна з яких містить усі змінні в прямому або інверсному вигляді не більш одного разу. Очевидно, що логічна функція має єдиний булевий вираз у ДДНФ, що впливає з методики його одержання.

ДДНФ зветься диз'юнктивною (включає суму кон'юнкцій), досконалою (усі кон'юнкції містять кожен змінну у прямому або інверсному вигляді) та нормальною (дворівневою) – її реалізація потребує ЛЕ двох видів: кон'юнкторів і диз'юнкторів, при цьому вважається, що вхідні змінні задаються у прямому та інверсному вигляді.

5.1.2 Мінімізація логічних функцій

Мінімізацією називають процедуру спрощення (логічних) ПФ, спрямовану на те, щоб булевий вираз ПФ містив мінімальну кількість членів із мінімальною кількістю змінних.

Способи мінімізації:

- алгебраїчний;
- за допомогою діаграм Вейча (карт Карно).

Алгебраїчний спосіб мінімізації ПФ

У деяких простих випадках можна здійснити мінімізацію булевого виразу ПФ, використовуючи тотожності і теореми булевої алгебри.

Приклад 1. Початковий булевий вираз:

$$F = \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A + C \cdot \bar{B} \cdot \bar{A} + C \cdot \bar{B} \cdot A + C \cdot B \cdot \bar{A}$$

Використовуючи теорему склеювання, отримаємо булевий вираз

$$F = (C \cdot \bar{B} \cdot \bar{A} + C \cdot B \cdot \bar{A}) + (\bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A + C \cdot \bar{B} \cdot A) = C \cdot \bar{A}(\bar{B} + B) + \bar{B} \cdot A(\bar{C} + C) \\ = C \cdot \bar{A} + \bar{B} \cdot A$$

який еквівалентний початковому, але значно простіше його.

Мінімізація ПФ із використанням діаграм Вейча

Діаграми Вейча (карти Карно) побудовані так, що їхні сусідні клітини відображають члени початкової ПФ, які відрізняються значенням однієї змінної: один член містить цю змінну в прямій формі, а інший – у інверсній. Завдяки цьому виникає наочне уявлення про різноманітні варіанти склеювання суміжних членів.

Початковим продуктом для застосування діаграм Вейча є представлення ПФ таблицею істинності, в якій можливі набори змінних упорядковано за зростанням або за зменшенням їхніх десяткових еквівалентів. Вигляд діаграм Вейча залежить від кількості змінних ПФ – N і від того, як упорядковані набори змінних у таблиці. Якщо набори упорядковані за зростанням їхніх десяткових еквівалентів, то діаграми Вейча для $N = 2, 3, 4$ мають вигляд, який наведено на рис. 5.1.

Кількість клітин діаграми дорівнює кількості наборів змінних

$$N_{\text{кл}} = N_{\text{НАБ}} = 2^N.$$

Наприклад, якщо $N = 2$, то $N_{\text{кл}} = 2^2 = 4$ (рис. 5.1,а); $N = 3$, $N_{\text{кл}} = 8$ (рис. 5.1,б); $N = 4$, $N_{\text{кл}} = 16$ (рис. 5.1,в).

Кожна клітина відповідає окремому набору змінних і має номер, однаковий із номером набору.

Рядки і стовпці діаграми, що помічено рисою з написом імені змінної, визначають набори, у які ці змінні входять у прямій формі (набувають одиничне значення). Набори, що відповідають іншим рядкам і стовпцям, містять ті ж змінні в інверсній формі (набувають нульове значення). Наприклад, для $N = 3$ (рис. 5.1,б) двом лівим стовпцям відповідає значення змінної B у прямій формі (B), а двом правим – у інверсній (\bar{B}).

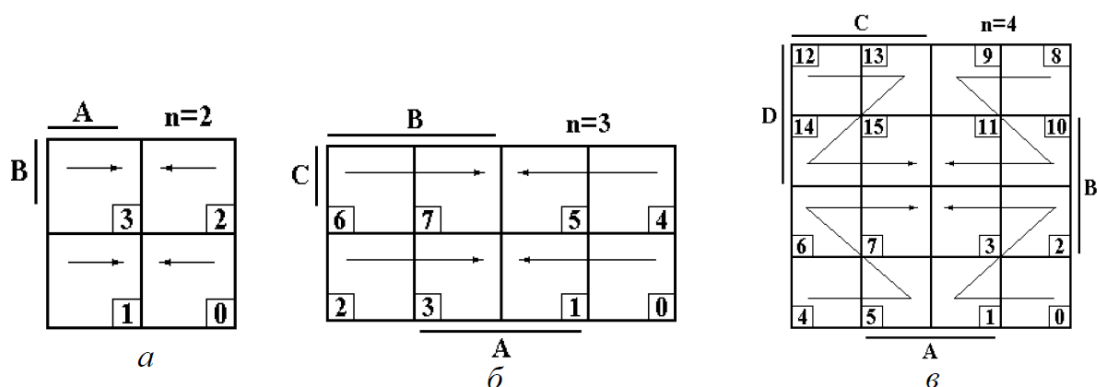


Рисунок 5.1 – Приклад діаграм Вейча



У клітини записуються значення ПФ на відповідному наборі (нульове або одиничне). Якщо на якомусь наборі функція не визначена, то в клітині діаграми ставиться риска.

ПФ вважається невизначеною, якщо:

– відповідний набір змінних у реальному логічному пристрої неможливий;

– значення функції на даному наборі байдуже.

Після заповнення діаграми можна приступити безпосередньо до мінімізації, що роблять за одиницями або нулями.

У першому випадку результатом мінімізації буде булевий вираз у ДНФ, а в другому – у КНФ.

Загальне правило мінімізації

1. Суміжні одиниці (нулі) діаграми умовно охоплюють (накривають) прямокутними контурами. Кожний контур може містити 1, 2, 4, 8, 16, ... одиниць (нулів).

2. Одним контуром (накриттям) необхідно об'єднати максимальну кількість суміжних клітин, що містять одиниці (нулі).

3. Необхідно, щоб кожна основна одиниця (нуль) накривалася хоча б один раз.

4. Та сама одиниця (нуль) може охоплюватися декілька разів різними контурами.

5. Верхній і нижній рядки діаграми вважаються суміжними – їх можна вважати такими, якщо умовно згорнути діаграму в горизонтальний циліндр.

6. Лівий і правий стовпці також вважаються суміжними – діаграму можна умовно згорнути у вертикальний циліндр.

7. Куткові клітини також вважаються суміжними – діаграму можна умовно згорнути в тор.

8. У клітини, що містять прочерки (на даних наборах ПФ невизначена), можна записувати додаткові одиниці (нулі), що сприяє одержанню більш простого кінцевого булевого виразу. У цьому разі варто пам'ятати, що хоча б один раз необхідно накрити лише основні одиниці (нулі). Додаткові одиниці (нулі) можуть збільшувати сумарну кількість одиниць (нулів), що входять у накриття, а отже, зменшувати кількість змінних у результуючих кон'юнкціях (диз'юнкціях).

9. Результатом мінімізації є булевий вираз у ДНФ у разі мінімізації за одиницями) або КНФ (у разі мінімізації за нулями). Кількість кон'юнкцій у ДНФ (диз'юнкцій у КНФ) відповідає кількості контурів (накриттів).

10. У кожну кон'юнкцію (диз'юнкцію) увійдуть тільки ті змінні, значення яких у межах контуру не змінюється (змінна входить у накриття тільки в прямій або інверсній формі).



У разі мінімізації за одиницями у результуючі кон'юнкції змінні входять у прямій формі, якщо відповідні їм рядки і стовпці діаграми помічені рисою. Змінні, пов'язані з рядками і стовпцями не поміченими рисою, входять у кон'юнкції в інверсній формі.

У разі мінімізації за нулями у результуючі диз'юнкції змінні входять у прямій формі, якщо відповідні їм рядки і стовпці не помічені рисою, у протилежному випадку диз'юнкції містять змінні в інверсному вигляді.

Метою мінімізації є одержання мінімальної ДНФ або КНФ, що містить мінімум членів, які мають мінімальну кількість змінних. Для цього необхідно меншою кількістю контурів охопити хоча б один раз кожен основну одиницю (нуль). У цьому разі необхідно намагатися, щоб у кожне накриття входило як найбільше суміжних одиниць (нулів).

Мінімізація ПФ за допомогою карт Карно

У картах Карно кожний рядок і стовпець позначаються значенням конкретної змінної або комбінацією змінних. На рис. 5.2 показано приклад карти Карно для ПФ чотирьох змінних.

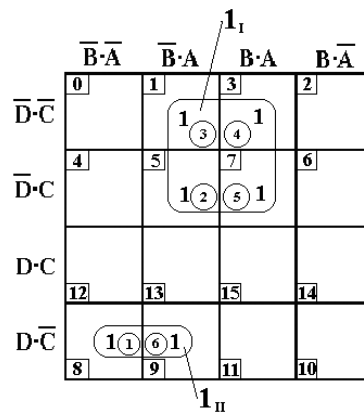


Рисунок 5.2 – Приклад карти Карно для 4-х змінних

Карти Карно зручно використовувати, якщо ПФ задано у вигляді булевого виразу у ДДНФ.

Наприклад,

$$F = D \cdot \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot \bar{A} + \bar{D} \cdot C \cdot \bar{B} \cdot A + \bar{D} \cdot \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A + \bar{D} \cdot \bar{C} \cdot B \cdot A + \bar{D} \cdot C \cdot B \cdot A + D \cdot \bar{C} \cdot \bar{B} \cdot A \quad (5.2)$$

Правила мінімізації за допомогою карт Карно загалом аналогічні правилам, викладеним під час розгляду діаграм Вейча. Відмінність складається в заповненні карти Карно одиницями. Якщо діаграма Вейча заповнюється одиницями відповідно до номерів наборів, на яких початкова ПФ приймає одиничне значення, то в карті Карно одиниці ставлять у клітини,



що лежать на перетині рядків і стовпців карти, помічених комбінаціями змінних, які під час їхнього перемножування дають запис відповідної константи одиниці (кон'юнкції). На рис. показано приклад заповнення карти Карно за виразом (5.2), що містить шість конститuent одиниць.

Булевий вираз мінімізованої ПФ має вигляд

$$F = \overline{D} \cdot A + \overbrace{D \cdot \overline{C} \cdot \overline{B}}^{I_{II}}$$

5.2 Завдання до практичної роботи

1. За номером варіанту по журналу (i) обрати логічну функцію F_i з таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Варіанти завдань

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| A | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| F ₁ | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₂ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| F ₃ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| F ₄ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| F ₅ | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| F ₆ | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| F ₇ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₈ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| F ₉ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| F ₁₀ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| F ₁₁ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₁₂ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| F ₁₃ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| F ₁₄ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| F ₁₅ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F ₁₆ | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₁₇ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₁₈ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| F ₁₉ | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| F ₂₀ | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |



2. Скласти рівняння функції F_i у ДДНФ.
3. Намалювати функціональну схему, що реалізує функцію F_i , у логічному базисі І, АБО, НЕ.
4. Відтворити цю схему у програмі SimulIDE, виконати симуляцію схеми (як робили в попередній роботі), замалювати часові діаграми вхідних і вихідного сигналів, скласти на їх основі таблицю істинності, переконалися, що вона співпадає з початковою.
5. Спростити рівняння функції F_i алгебраїчним способом та за допомогою діаграми Вейча (карти Карно), порівняти результати.
6. Повторити п.п. 3, 4 для спрощеної функції (у разі, якщо у п. 5 результати не співпадають, взяти функцію, отриману за допомогою карти Карно).

5.3 Контрольні питання та завдання

1. Що таке ДДНФ?
2. Що таке ДКНФ?
3. Якими методами можна спростити логічну функцію?
4. У чому полягає метод діаграм Вейча?
5. У чому полягає метод карт Карно?

5.4 Перелік посилань

1. Дослідження і синтез комбінаторних схем: методичні вказівки до практичної роботи № 8 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕНТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023, 12 с.
2. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. / С. О. Квітка. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. 223 с.
3. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: підручник. / За ред. А.Г. Соскова. К. : Каравела, 2015. 536 с.



6 ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ І СИНТЕЗ ТРИГЕРІВ

Мета практичної роботи:

Вивчення принципів роботи тригерів різних типів.

Завдання практичної роботи:

- Експериментально дослідити роботу RS-, D- та T-тригерів.
- Навчитися перетворювати тригери з одного в інший.

Зміст звіту з практичної роботи:

- Титульний лист.
- Тема та мета роботи.
- Схема реалізації асинхронного RS-тригера на базі елементів І-НЕ і результати його дослідження у вигляді таблиці.
- Схема реалізації RS-тригера із статичною синхронізацією і результати його дослідження у вигляді таблиці.
- Схема реалізації D-тригера із статичною синхронізацією і результати його дослідження у вигляді таблиці.
- Схема реалізації RS-тригера з динамічною синхронізацією і результати його дослідження у вигляді таблиці.
- Схема реалізації D-тригера з динамічною синхронізацією і результати дослідження у вигляді таблиці.
- Схема реалізації T-тригера на базі D-тригера та результати його дослідження у вигляді графіку.
- Висновки
- Перелік посилань

6.1 Теоретичні дані

6.1.1 Асинхронні RS-тригери

Асинхронні RS-тригери можуть бути виконані на ЛЕ базисів АБО–НЕ і І–НЕ (рисунок).

Нижче показано принципову схему (рис. 6.1, а), позначення на електричних схемах (рис. 6.1, б), і таблицю істинності (табл. 6.1) асинхронного RS-тригера на ЛЕ АБО–НЕ.

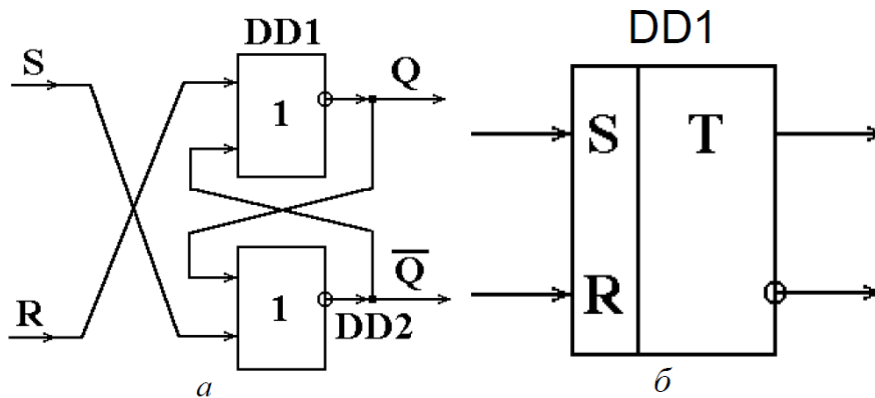


Рисунок 6.1 – Принципова схема (а) та позначення на електричних схемах (б) асинхронного RS-тригера на ЛЕ АБО-НЕ

Таблиця 6.1 – Таблиця істинності асинхронного RS-тригера

| Номер | S | R | Q^{t+1} |
|-------|-----|-----|--------------|
| 0 | 0 | 0 | Q^t |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | Не визначене |

У таблиці прийнято такі позначення: R і S – сигнали на керувальних входах тригера; Q^t – вихідний сигнал тригера до надходження вхідних керувальних сигналів; Q^{t+1} – вихідний сигнал після впливу керувальних сигналів.

Тригер називається асинхронним, тому що він переходить у новий стан негайно після зміни комбінації вхідних керувальних сигналів. Входи S і R названі за першими буквами англійських слів set – встановлення і reset – попереднє встановлення (скидання).

Тригер встановлюється в одиницю ($Q = 1$; $\bar{Q} = 0$) під час комбінації вхідних сигналів $S = 1$, $R = 0$. Скидання в нуль ($Q = 0$; $\bar{Q} = 1$) відбувається за $S = 0$, $R = 1$. Якщо $S = R = 0$, то стан схеми не змінюється ($Q^{t+1} = Q^t$). Комбінація $S = R = 1$ заборонена, тому що становище тригера в цьому випадку не визначене. У схемі виконується умова виникнення стрибків: баланс фаз (тригер містить ДЗЗ) і баланс амплітуд (сумарне підсилення схеми більше сумарного згасання, внесеного пасивними елементами). Тому під час зміни вхідних керувальних сигналів тригер швидко (лавиноподібно) змінює свій стан. Під час вмикання живлення і пасивного значення керувальних сигналів $R = S = 0$ схема займає довільний стан (нульовий $Q = 0$; $\bar{Q} = 1$ або одиничний – $Q = 1$; $\bar{Q} = 0$), що залежить від початкової асиметрії схеми.

Для проектування RS-тригера можуть бути використані також ЛЕ базису І–НЕ. Нижче показано: принципову схему (рис. 6.2, а), позначення на



електричних схемах (рис. 6.2, б), і таблицю істинності (табл. 6.2) асинхронного *RS*-тригера на ЛЕ І-НЕ. Відмінність цього тригера від попереднього складається в тому, що активним значенням керувальних сигналів є логічний нуль, а пасивним – логічна одиниця.

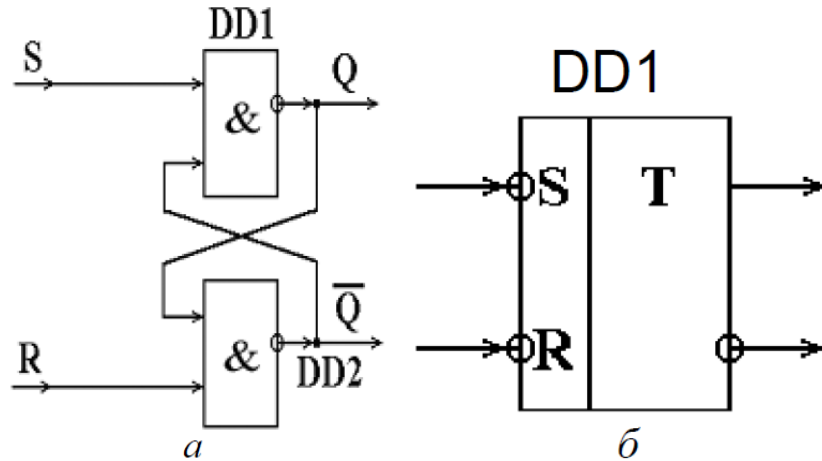


Рисунок 6.2 – Принципова схема (а) та позначення на електричних схемах (б) асинхронного *RS*-тригера на ЛЕ І-НЕ

Таблиця 6.2 – Таблиця істинності асинхронного *RS*-тригера

| Номер | <i>S</i> | <i>R</i> | Q^{t+1} |
|-------|----------|----------|--------------|
| 0 | 0 | 0 | Не визначене |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | Q^t |

6.1.2 Синхронні *RS*-тригери

У результаті явища «змагань» («перегонів») на входах асинхронного *RS*-тригера тимчасово можуть з'являтися помилкові комбінації, що викликають помилкові спрацьовування (переключення) схеми і будуть помилково зафіксовані логічним пристроєм опрацювання вихідних сигналів тригера. Для усунення цієї похибки використовують синхронні *RS*-тригери, що містять додатковий тактовий (синхро) вхід.

Синхронні *RS*-тригери поділяються на:

- одноступінчаті (однотактні);
- двоступінчаті (двотактні).

Нижче показано: позначення на електричних схемах (рис. 6.3, а) і функціональні схеми (рис. 6.3, б, в) однотактного синхронного *RS*-тригера.

Однотактний синхронний *RS*-тригер (рис. 6.3, б, в) включає асинхронний *RS*-тригер DD3 і два додаткових ЛЕ – DD1, DD2: І (рис. 6.3, б) або І-



НЕ (рис. 6.3, в). Більш кращою є друга схема (рис. 3, 6.3, в), тому що вона містить елементи одного базису І–НЕ.

Однотактний (одноступінчатий) синхронний *RS*-тригер тактується (синхронізується) потенціалом або одиничним імпульсом на вході *C*.

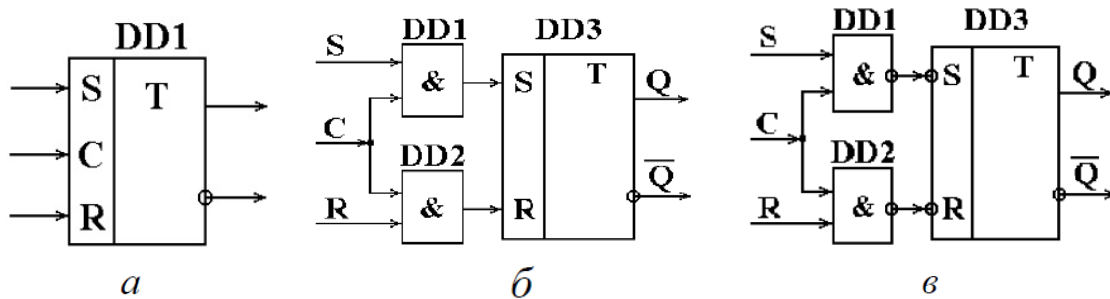


Рисунок 6.3 - Позначення на електричних схемах (а) і функціональні схеми (б, в) однотактного синхронного *RS*-тригера.

Часто потрібно здійснювати переключення тригера переходом потенціалу на його синхровході *C* із одиниці в нуль або з нуля в одиницю (зрізом або фронтом вхідного імпульсу). Синхронний *RS*-тригер, що має таку спроможність, називається двоступінчатим (двотактним).

Нижче показано: позначення на електричних схемах (рис. 6.4, а) і функціональну схему (рис. 6.4, б) двотактного синхронного *RS*-тригера, що переключається переходом із одиниці в нуль на динамічному тактовому (синхро) вході.

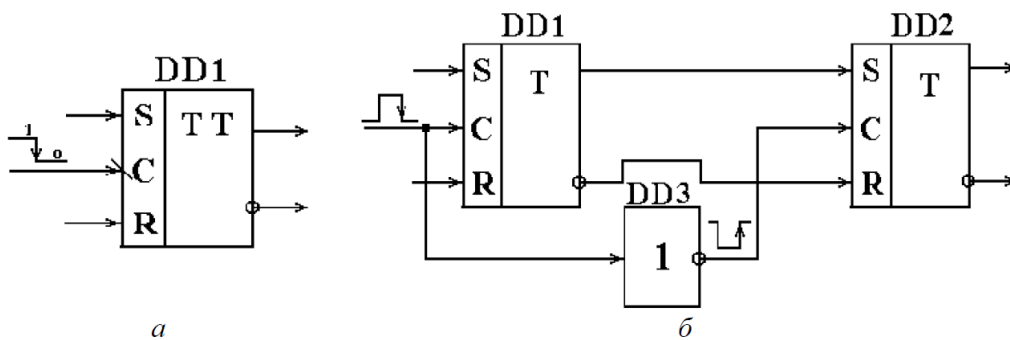


Рисунок 6.4 - Позначення на електричних схемах (а) і функціональна схема (рис. б) двотактного синхронного *RS*-тригера

Тригер виконано на двох однотактних синхронних *RS*-тригерах, розглянутих вище, і інверторі DD3. Вхід *C* (рис. 6.4, а) називається динамічним, тому що активним сигналом на ньому є перехід із одиниці в нуль. Переключення тригера відбувається за два такти: у першому такті вхідна інформація записується в перший тригер DD1, а стан другого тригера DD2 не змінюється, тому що на його синхровхід з виходу інвертора подається нульовий імпульс. У другому такті в момент закінчення одиничного імпульсу на вході (у разі переходу з одиниці в нуль) з виходу інвертора на си-



нхровхід тригера DD2 починає надходити одиничний потенціал і інформація з першого тригера DD1 переписується в другий DD2. У такий спосіб стан виходу змінюється лише в момент переходу з одиниці в нуль вхідного синхросигналу.

Нижче показано: позначення на електричних схемах (рис. 6.5, а) і функціональну схему (рис. 6.5, б) двотактного синхронного *RS*-тригера, що переключується переходом з нуля в одиницю на динамічному синхровході.

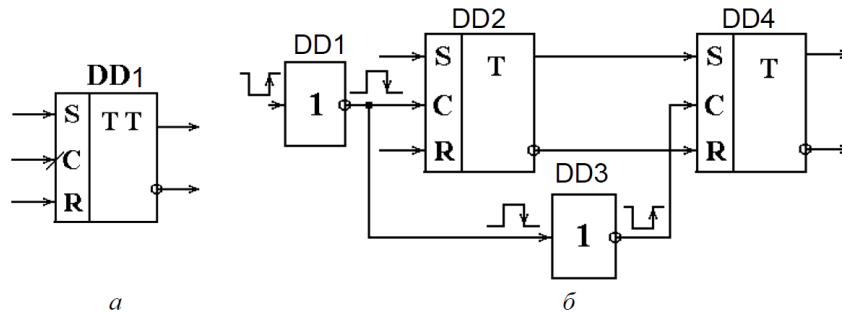


Рисунок 6.5 - Позначення на електричних схемах (а) і функціональна схема (рис. б) двотактного синхронного *RS*-тригера

6.1.3 Т-тригер (тригер з рахунковим входом)

Такий тригер містить лічильний (рахунковий) вхід, що позначається буквою *T*, і переключується кожним імпульсом на *T*-вході. Нижче показано: позначення на електричних схемах (рис. 6.6, а, б) і функціональну схему (рис. 6.6, в) *T*-тригера, що переключується переходом із одиниці в нуль кожного вхідного імпульсу.

Тригер виконано на основі синхронного двоступінчатого *RSC*-тригера з динамічним синхровходом, охопленого двома *ЗЗ*.

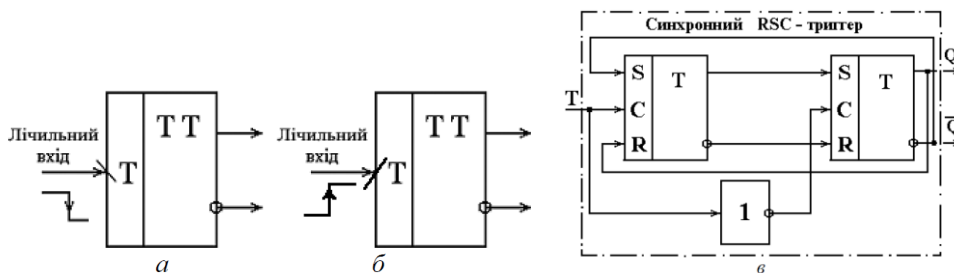


Рисунок 6.6 - Позначення на електричних схемах (а, б) і функціональна схема (рис. в) *T*-тригера

У момент зрізу рахункових вхідних імпульсів тригер переключується в протилежний стан $Q^{t+1} = \overline{Q}^t$. На рис. 6.7 наведено часові діаграми, що пояснюють роботу *T*-тригера. Початковий стан схеми – одиничний ($U_Q =$



1). Зрізом кожного рахункового імпульсу вихідний сигнал змінює своє значення на протилежне. Період вихідних імпульсів $T_{\text{ВИХ}} = 2T_{\text{ВХ}}$, а частота $f_{\text{ВИХ}} = f_{\text{ВХ}/2}$, тобто T -тригер ділить вхідну частоту на 2.

На рис. 6.6, б наведено позначення на електричних схемах T -тригера, що переключається переходом з нуля в одиницю на рахунковому вході.

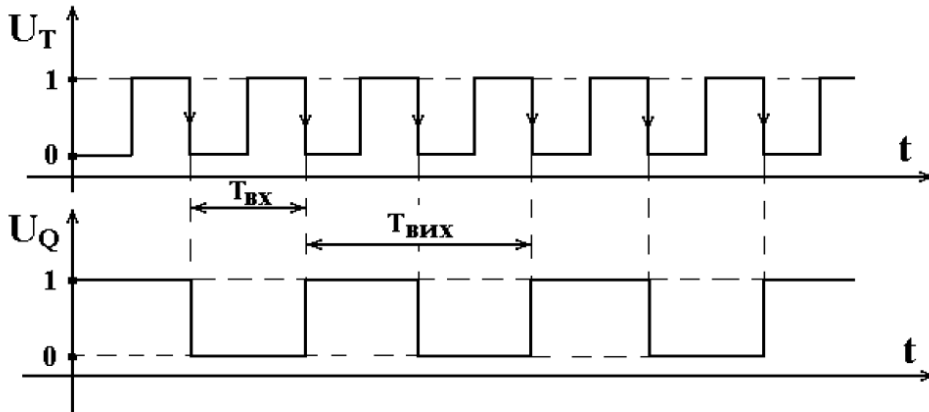


Рисунок 6.7 - Часові діаграми, що пояснюють роботу T -тригера

6.1.4 D-тригер (тригер затримки)

D -тригери (тригери затримки) містять інформаційний вхід (D) і тактовий (синхро) вхід (рисунк 6.8).

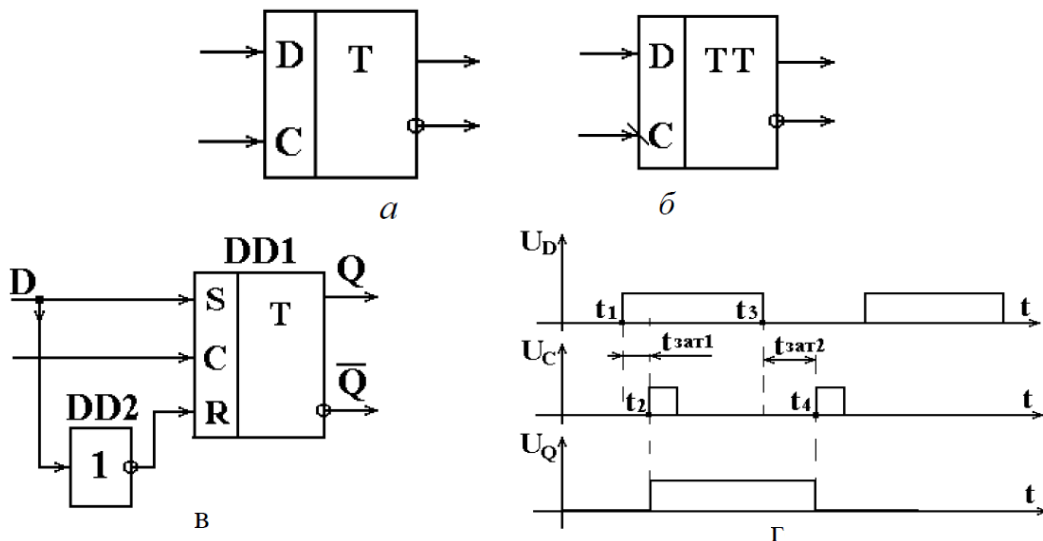


Рисунок 6.8 – Умовні позначення (а, б), схема реалізації (в), та часові діаграми роботи (г) D -тригера

Існують одноктакні D -тригери, що переключаються потенціалом, або імпульсом на тактовому вході (рис. 6.8, а), і двотактні D -тригери, що переключаються динамічним синхросигналом (переходом), наприклад, з одиниці в нуль (рис. 6.8, б).

Нижче показано: функціональну схему (рис. 6.8, в) і часові діаграми роботи (рис. 6.8, з) однотактного D -тригера, виконаного на однотактному синхронному RS -тригері (RSC -тригері) – DD1 і ЛЕ (інвертори) – DD2.

У момент надходження тактового імпульсу D -тригер переключається у стан, обумовлений сигналом на інформаційному вході D , тобто схема запам'ятовує сигнал на вході D у момент надходження синхроімпульсу ($Q^{t+1} = D$) і зберігає його до наступного тактового імпульсу. Затримка дорівнює інтервалу часу між моментами приходу інформаційного сигналу на D -вхід і надходженням синхросигналу на C -вхід: $t_{зат1} = t_2 - t_1$; $t_{зат2} = t_4 - t_3$ (рис. 6.8, з). D -тригери широко застосовуються як елементи пам'яті, які спроможні зберігати 1 біт інформації.

Нижче показано: позначення на електричних схемах (рис. 6.9, а) і функціональну схему (рис. 6.9, б) двотактного D -тригера, що переключається переходом з одиниці в нуль на динамічному синхровході C .

Тригер виконано на основі двох однотактних RSC -тригерів (DD1, DD2) і двох інверторів (DD3, DD4).

D -тригер можна використовувати як тригер з рахунковим входом (T -тригера), якщо з'єднати його виводи як показано на рис. 6.9, в.

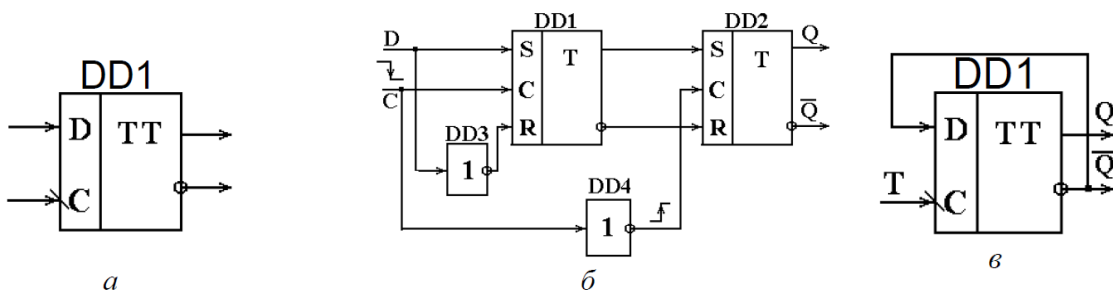


Рисунок 6.9 - Позначення на електричних схемах (а) і функціональна схема (б) двотактного D -тригера, та схема перетворення D -тригера на T -тригер (в)

6.2 Завдання до практичної роботи

1. Створити асинхронний RS -тригер у програмі SimulIDE на базі елементів I-HE (рис. 2а). Результат повинен бути схожим на рис. 6.10. Рисунок а) зі звичайним відображенням схеми. Рисунок б) з увімкнутим налаштуванням "Animate". В режимі анімації сигналів дроти синього кольору у динаміці показують де сигнал нуль, а дроти червоного кольору показують де сигнал одиниця. Вмикання "Animate" виконується на сторінці налаштувань "Circuit" рис. 6.11. В залежності від версії SimulIDE можливо анімація буде відбуватися трохи по різному.

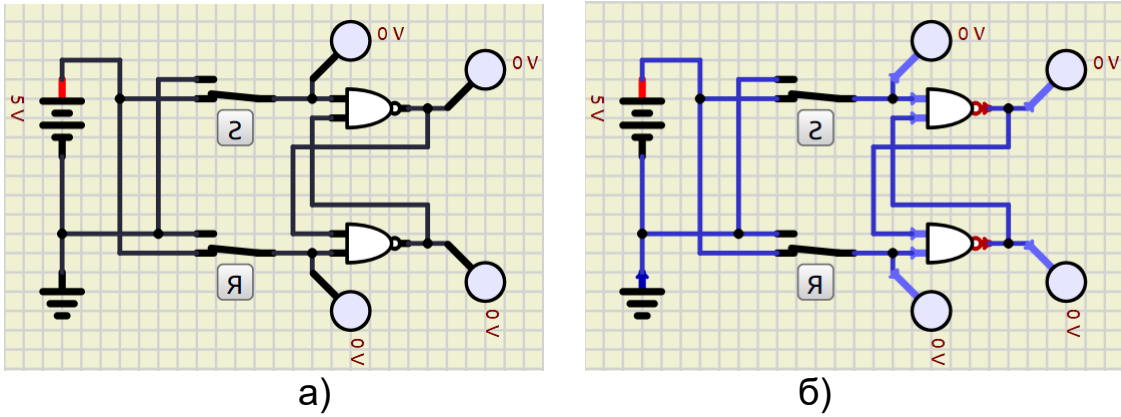


Рисунок 6.10 – Асинхронний RS-тригер на базі елементів І-НЕ

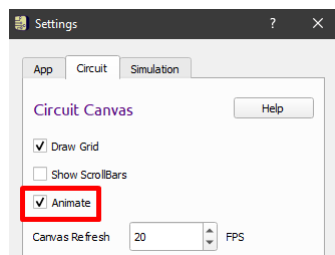


Рисунок 6.11 – Налаштування анімації сигналів

Додайте індикатори “Probe” до важливих точок схеми, щоб закцентувати увагу на сигналах в них. На рисунку 6.10 індикатори додані до входів і виходів тригеру. В інших схемах наведено рекомендовану кількість індикаторів для основних сигналів. Можете додати чи видалити індикатори за потреби. Зверніть увагу, що під час анімації вхідний контакт індикатору “Probe” може завжди відобразитися синім чи чорним кольором не залежно від вхідного сигналу.

Так як тригер з логічних елементів І-НЕ керується нульовими рівнями сигналів, то потрібні нормально-замкнуті перемикачі. Налаштування перемикачів показано на рис. 6.12а. Налаштування інверсії логічних елементів І-НЕ показано на рис. 6.12б.

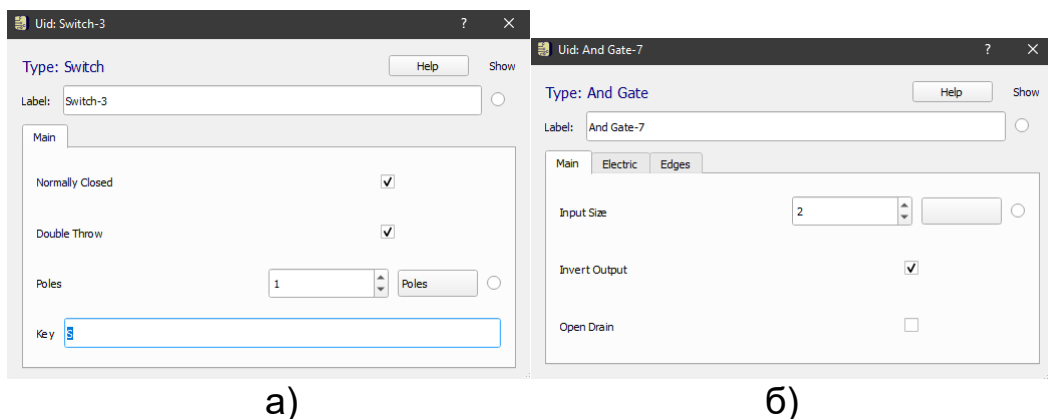


Рисунок 6.12 – Налаштування елементів схеми



Відразу після увімкнення тригер потрапляє у стан зберігання рис. 6.13а. Але у програмі моделювання відбувається конфлікт і тригер не може визначити який стан необхідно зберігати. Індикатори і дроти блимають. Необхідно його вивести із цього стану перемкнувши один із перемикачів.

У відповідності до режимів роботи тригера перемикачі перемикачі та дослідити усі режими роботи: зберігання рис. 6.13а, встановлення рис 6.13б, скидання рис. 6.13в, невизначений стан рис. 6.13г. Скласти таблицю логічних станів (4 рядки). Звернути увагу, що у режимі зберігання на виході можуть бути різні комбінації сигналів в залежності від попереднього стану.

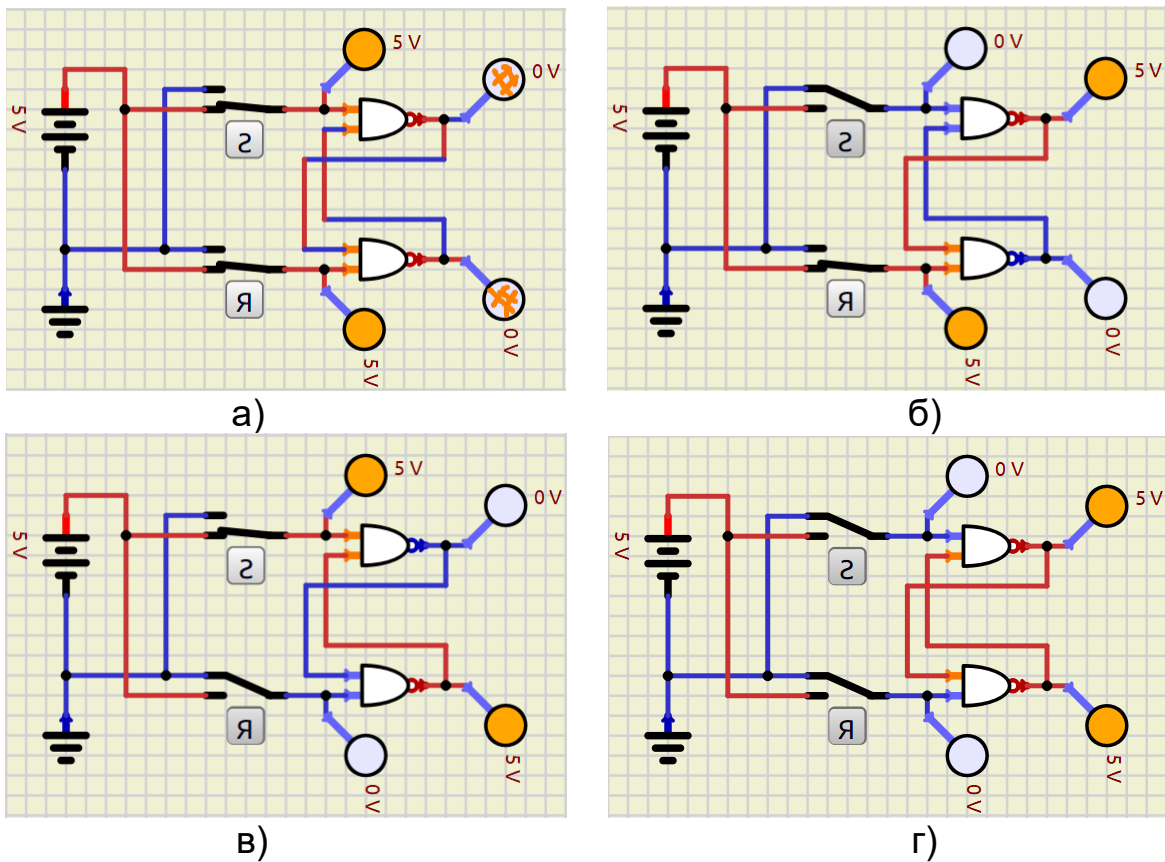


Рисунок 6.13 – Результати моделювання асинхронного RS-тригера

2. Побудувати RS-тригер із статичною синхронізацією на базі елементів І-НЕ, як показано на рис. 6.3. Результат повинен бути схожим на рис. 6.14.

Так як RS-тригер із статичною синхронізацією керується одиничними рівнями сигналів, то потрібні нормально-розімкнуті перемикачі.

Дослідити тригер. Скласти таблицю станів (8 рядків). Звернути увагу, що у режимі зберігання на виході можуть бути різні комбінації сигналів в залежності від попереднього стану.

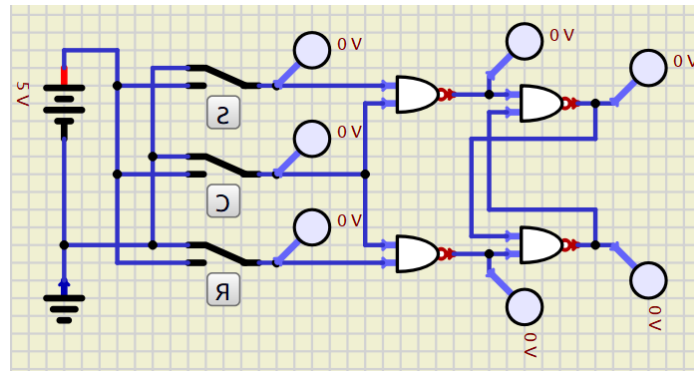


Рисунок 6.14 – RS-тригер із статичною синхронізацією

3. Побудувати D-тригер з статичною синхронізацією на базі RS-тригера із статичною синхронізацією, як показано на рис. 6.15. Скласти таблицю станів (4 рядки).

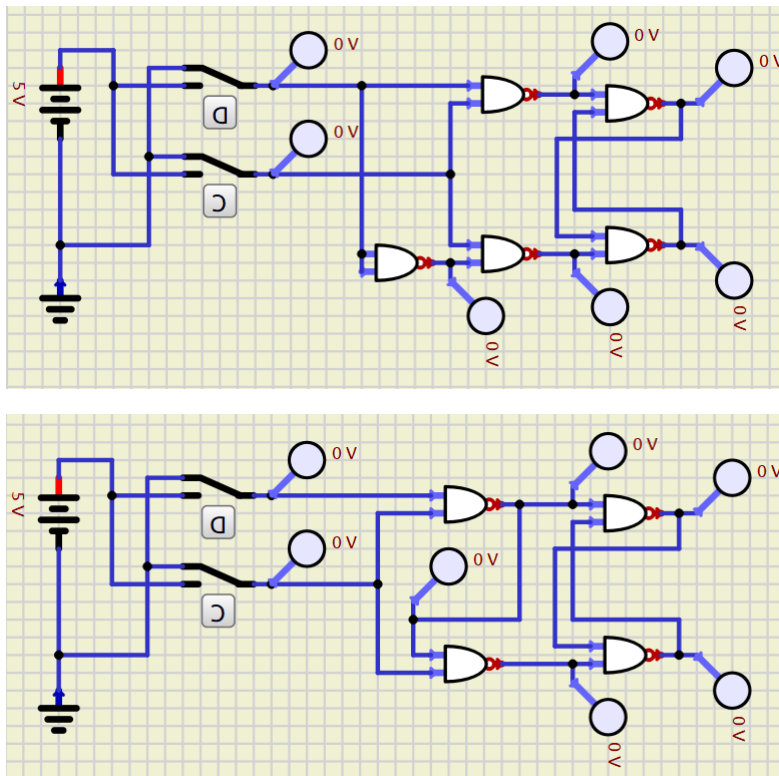


Рисунок 6.15 – D-тригер із статичною синхронізацією

4. Побудувати і дослідити роботу двотактного RS-тригера з динамічною синхронізацією рис. 6.16. Скласти таблицю станів (8 рядків). Звернути увагу, що кінцеве спрацювання цього тригера відбувається по спаду сигналу синхронізації С (з 1 до 0).

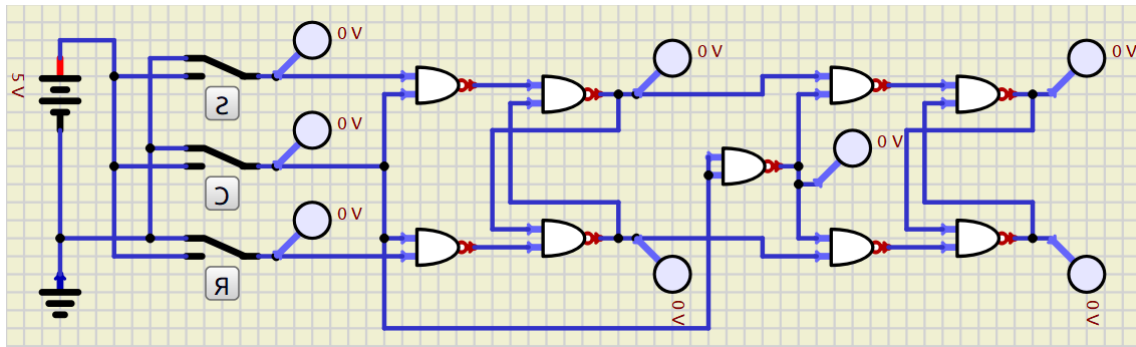


Рисунок 6.16 – RS-тригер з динамічною синхронізацією

4. Побудувати і дослідити роботу динамічного D-тригера з динамічною синхронізацією рис. 6.17. Скласти таблицю станів (4 рядка). Звернути увагу, що кінцеве спрацювання цього тригера відбувається по спаду сигналу синхронізації С (з 1 до 0).

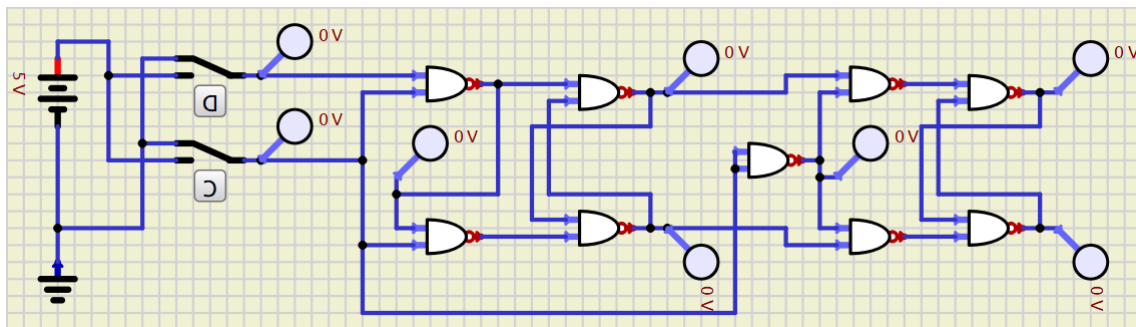


Рисунок 6.17 D-тригер з динамічною синхронізацією

5. Побудувати і дослідити роботу Т-тригера побудованого на основі D-тригера з динамічною синхронізацією рис. 6.18. RC ланцюг виконує функцію початкового встановлення тригера і допомагає вивести тригер із конфліктного стану. Після запуску він на кілька секунд примусово переводить лівий верхній логічний елемент 3І-НЕ у стабільний стан. Постійна часу RC ланцюга складає 1 секунда. По результатам дослідження роботи побудувати графіки вхідного сигналу і вихідного сигналу у часі.

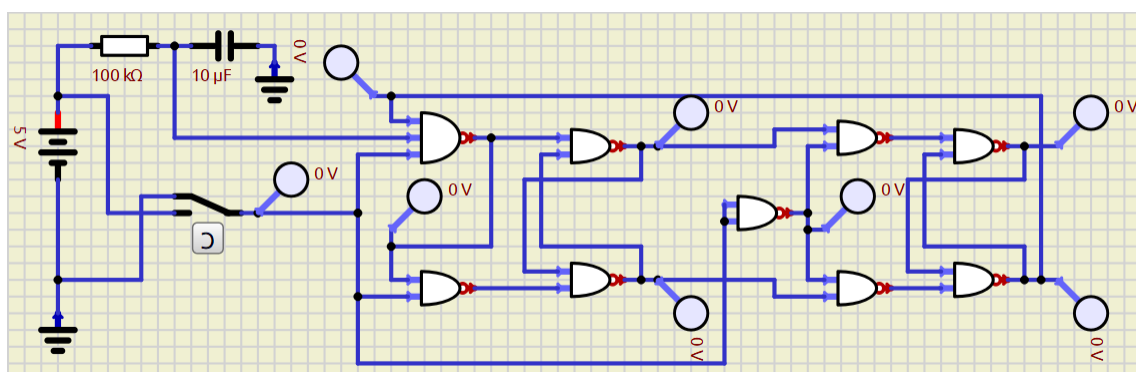


Рисунок 6.18 Т-тригер



6.3 Контрольні питання та завдання

1. Що таке тригер?
2. Чим відрізняються синхронний та асинхронний тригери?
3. Чим відрізняються статичний та динамічний тригери?
4. У чому особливості RS, D, T та JK-тригерів?
5. Як перетворити різні види тригерів один в інший?

6.4 Перелік посилань

1. Дослідження і синтез тригерів : методичні вказівки до практичної роботи № 9 за курсом «Електроніка та мікропроцесорна техніка»/ укл. С. П. Сокол. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2023, 17 с.

2. Квітка С. О. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2019. 223 с.

3. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка : підручник / за ред. А.Г. Соскова. Київ : Каравела, 2015. 536 с.



Навчально-методичне видання

Ісаєв Андрій Борисович

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

методичні вказівки
до виконання практичних робіт

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції