

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет
«Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії "Electronics
Workbench" з дисциплін
" Напівпровідникові компоненти пристроїв сигової електроніки ",
для студентів спеціальності: 171 "Пристрої систем сигової електро-
ніки та перетворювальної техніки" всіх форм навчання

2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії "Electronics Workbench" з дисципліни «Напівпровідникові компоненти пристроїв силової електроніки» для студентів спеціальності: 171 "Пристрої систем силової електроніки та перетворювальної техніки" всіх форм навчання. /Укл.: С.М. Тиховод, П.Д. Андрієнко – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2024. – 67 с.

Укладачі: С.М. Тиховод, професор, д.т.н.,
П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.,

Рецензент: М.Л. Антонов доцент, к.т.н.,

Відповідальний за випуск: П.Д. Андрієнко професор, д.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри ЕЕА
Протокол № 5 від
09.11.23

Затверджено
на засіданні навчально-
методичної ради ЕТФ
Протокол № 3 від
23.11.23

ЗМІСТ

Передмова	4
РОЗДІЛ 1 Правила використання віртуальної комп'ютерної лабораторії на основі системи ELECTRONICS WORKBENCH	5
1.1. Панель компонентів	6
1.2. Базові компоненти	7
1.3. Прилади для проведення вимірювань	11
1.4. Моделювання схем	20
РОЗДІЛ 2 Лабораторні роботи	24
2.1. Лабораторна робота №1. Дослідження півпровідникових діодів за допомогою програмного комплексу EWB	24
2.2. Лабораторна робота №2. Дослідження біполярного транзистора	32
2.3. Лабораторна робота №3. Дослідження тиристорів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.	34
2.4. Лабораторна робота №4. Дослідження польового транзистора	38
2.5. Лабораторна робота №5. Дослідження стабілітронів	42
2.6. Лабораторна робота №6. Однофазні випрямлячі	47
2.7. Лабораторна робота №7. Моделювання некерованого трифазного мостового випрямляча	57
2.8. Лабораторна робота №8. Моделювання керованого трифазного мостового випрямляча	60
ЛІТЕРАТУРА	66
Додаток А Зразок титульного аркуша	67

ПЕРЕДМОВА

Під час виконання лабораторних робіт студенти повинні оволодіти основами практичного використання постійного та змінного струму, вимірювання електричних величин, навчитися аналізувати електричні схеми при зміні їх параметрів.

Виконання лабораторних робіт у віртуальній комп'ютерній лабораторії допомагає закріплювати та поглиблювати вивчення фізичних законів, закріплювати засвоєння теоретичної частини навчального курсу «Напівпровідникові компоненти пристроїв силової електроніки», здобувати навички практичної роботи з електричними та електронними колами.

У методичних вказівках подаються правила використання віртуальної комп'ютерної лабораторії на основі системи Electronics Workbench. Даються не тільки короткі рекомендації, але й визначено порядок виконання лабораторних робіт та оформлення звіту, подані необхідні теоретичні пояснення та формули для розрахунків.

РОЗДІЛ 1

ПРАВИЛА ВИКОРИСТОВУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ELECTRONICS WORKBENCH

Система схемотехнічного моделювання *Electronics Workbench* (EWB) призначена для моделювання й аналізу електричних схем.

Electronics Workbench може проводити аналіз схем на постійному й змінному струмах в електричних та електронних колах.

В Electronics Workbench можна досліджувати перехідні процеси при впливі на схеми вхідних сигналів різної форми. Широкий набір приладів дозволяє робити вимірювання різних величин, задавати вхідні параметри, будувати графіки. Усі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто й зручно.

Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їхньої подальшої обробки.

Electronics Workbench дозволяє розмістити схему таким чином, щоб були чітко видно всі з'єднання елементів і одночасно вся схема цілком.

Програма використовує стандартний інтерфейс Windows, що значно полегшує її використання.

У програмі використовується великий набір приладів для проведення вимірювань: амперметр, вольтметр, осцилограф, мультиметр, Бодє-Плоттер (графобудівник частотних характеристик схем), функціональний генератор, генератор слів, логічний аналізатор і логічний перетворювач.

Electronics Workbench дозволяє будувати схеми різного ступеня складності за допомогою наступних операцій:

- вибір елементів і приладів з бібліотек;
- переміщення елементів і схем у будь-яке місце робочого поля;
- поворот елементів і груп елементів на кути, кратні 90°;

- копіювання, вставка або видалення елементів, груп елементів, фрагментів схем і цілих схем;
- зміна кольору провідників;
- виділення кольором контурів схем для більш зручного сприйняття;
- одночасне підключення декількох вимірювальних приладів і спостереження їх показів на екрані монітора;
- присвоєння елементу умовної позначки;
- зміна параметрів елементів у широкому діапазоні тощо.

Усі операції проводяться за допомогою миші й клавіатури. Керування тільки із клавіатури неможливо.

Шляхом настроювання приладів можна:

- змінювати шкали приладів залежно від діапазону вимірів;
- задавати режим роботи приладу;
- задавати вид вхідних параметрів на схему (постійні й гармонійні струми й напруги, трикутні й прямокутні імпульси).

Графічні можливості програми дозволяють:

- одночасно спостерігати кілька кривих на графіку;
- відображати криві на графіках різними кольорами;
- вимірювати координати точок на графіку;
- імпортувати дані в графічний редактор, що дозволяє зробити необхідні перетворення рисунка й виведення його на принтер.

Electronics Workbench дозволяє використовувати результати, отримані в програмах PSpice, PCB, а також передавати результати на Electronics Workbench у ці програми. Можна вставити схему або її фрагмент у текстовий редактор і надрукувати в ньому пояснення або зауваження по роботі схеми.

1.1 Панель компонентів

Для операцій з компонентами на загальному полі EWB виділено дві області: панель компонентів і поле компонентів.

Панель компонентів (рис. 1.1) складається з піктограм полів компонентів, поле компонентів – з умовних зображень компонентів.

У бібліотеки елементів програми EWB входять аналогові, цифрові й цифро-аналогові компоненти.

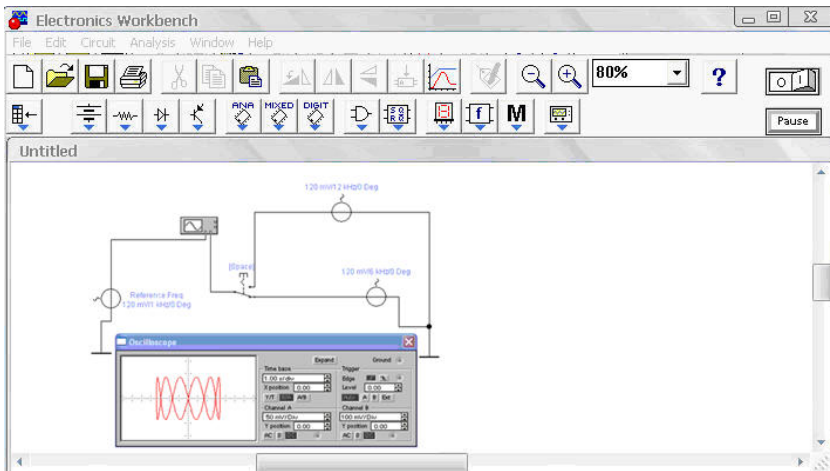


Рисунок 1.1- Панель компонентів

Усі компоненти можна умовно розбити на наступні групи:

- базові компоненти;
- джерела;
- лінійні компоненти;
- ключі;
- нелінійні компоненти;
- індикатори;
- логічні компоненти;
- вузли комбінаційного типу;
- вузли послідовного типу;
- гібридні компоненти.

1.2 Базові компоненти

З'єднуючий вузол застосовується для з'єднання провідників і створення контрольних точок. До кожного вузла може приєднуватись не більш чотирьох провідників.

Заземлення.



Не всі схеми потребують заземлення для моделювання, однак будь-яка схема, що містить: операційний підсилювач; трансформатор; кероване джерело; осцилограф, повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть робити вимірювань або їх покази виявляться неправильними.

Джерела. Усі джерела в EWB ідеальні.

Некеровані джерела.

Джерело постійної напруги.



ЕРС джерела постійної напруги або батареї вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Батарея в EWB має внутрішній опір, рівний нулю, тому, якщо необхідно використовувати дві паралельно підключені батареї, слід включити послідовно між ними невеликий опір (наприклад, в 1 Ом).

Джерело постійного струму.



Струм джерела постійного струму (direct current) вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

Джерело змінної напруги.



Діюче значення напруги джерела вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Є можливість установки частоти й початкової фази.

Діюче значення напруги V_{RMS} , що виробляється джерелом змінної синусоїдальної напруги, пов'язане з його амплітудним значенням V_{PEAK} наступним співвідношенням :

$$V_{RMS} = \frac{V_{PEAK}}{\sqrt{2}}$$

Джерело змінного струму.



Діюче значення струму джерела вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

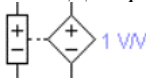
Генератор тактових імпульсів



виробляє послідовність прямокутних імпульсів. Відлік амплітуди імпульсів генератора проводиться від виводу, протилежного виводу «+».

Керовані джерела

Джерело напруги, кероване напругою.

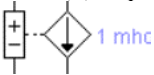


Відношення вихідної напруги до вхідної визначається коефіцієнтом пропорційності E , який задається у мВ/В, і

$$E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \text{ кВ/В:}$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; V_{IN} – вхідна напруга джерела.

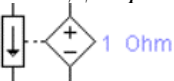
Джерело струму, кероване напругою.



Відношення вихідного струму до керуючої напруги – коефіцієнт G , вимірюється в одиницях провідності (1/Ом або Си-менс): $G = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}}$

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; V_{IN} – напруга, прикладена до керуючих затискачів джерела.

Джерело струму, кероване струмом.

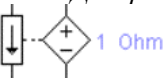


Вхідний і вихідний струми зв'язані коефіцієнтом пропорційності F , який визначає відношення вихідного струму до струму і задається в мА/А,

$$F = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}},$$

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Джерело напруги, кероване струмом.



Передаючий опір H має розмірність опору й задається в мОм, Ом і кОм:

$$H = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}},$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Лінійні елементи.

Резистор.



Опір резистора вимірюється в Ом і задається похідними величинами (від Ом до Мом).

Змінний резистор.



Положення повзунка змінного резистора встановлюється за допомогою спеціального елемента – стрілки-регулятора. У діалоговому вікні можна встановити опір, початкове положення (у відсотках) і крок збільшення (також у відсотках). Є можливість змінювати положення повзунка за допомогою клавіш-ключів.

Використовувані клавіші-ключі:

- букви від А до Z;
- цифри від 0 до 9;
- клавіша Enter на клавіатурі;
- клавіша «пробіл».

Конденсатор.



Ємність конденсатора вимірюється у Фарадах і задається похідними величинами (від пФ до Ф).

Змінний конденсатор.



Величину ємності встановлюють, використовуючи її початкове значення й значення коефіцієнта пропорційності.

Значення ємності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Котушка індуктивності.



Індуктивність котушки (дроселя) вимірюється в Генрі й задається похідними величинами (від мкГн до Гн).

Котушка зі змінною індуктивністю.



Величину індуктивності цієї котушки встановлюють, використовуючи початкове значення її індуктивності й коефіцієнта пропорційності. Значення індуктивності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Трансформатор





може бути виконаний з відводом середньої точки.

1.3 Прилади для проведення вимірювань

Найпростішими приладами в EWB є вольтметр і амперметр, розташовані в полі індикаторів (Indicators), яке на панелі компонентів



зображується значком . Вони не вимагають настроювання, автоматично змінюючи діапазон вимірювань. В одній схемі можна застосовувати кілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних вузлах і напруги на різних елементах.

Вольтметр  використовується для вимірювання змінної й постійної напруги. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, **відповідає негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра: виду вимірюваного напруги, величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваної напруги (опція Mode) вибирається зі списку.

При вимірюванні змінної синусоїдальної напруги (AC) вольтметр буде показувати діюче значення напруги U_d , обумовлене по формулі


$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

де U_m – амплітудне значення напруги.

Внутрішній опір вольтметра 1 Мом, встановлений за замовчуванням, у більшості випадків становить дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання вольтметра з дуже високим внутрішнім опором у схемах з низьким вихідним

імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості вольтметра можна використовувати мультиметр.

Амперметр  використовується для вимірювання змінного й постійного струму. Виділена **товстою** лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає **негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів амперметра: виду вимірюваного струму, величини внутрішнього опору.

Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваного струму (опція Mode) вибирається зі списку. При вимірюванні змінного синусоїдального струму (AC) амперметр буде показувати його діюче значення I_d :

$$I_d = \frac{I_M}{\sqrt{2}},$$

де I_M – амплітудне значення струму.

Внутрішній опір 1 мОм, установлений за замовчуванням, у більшості випадків виявляє дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання амперметра з дуже маленьким внутрішнім опором у схемах з високим вихідним імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості амперметра можна використовувати мультиметр.

Крім описаних амперметра й вольтметра в EWB є сім приладів, із численними режимами роботи, кожний з яких можна використовувати в схемі тільки один раз. Ці прилади розташовані на панелі приладів.

Ліворуч на панелі розташовані прилади для формування й спостереження аналогових величин: мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер:



Рисунок 1.2 - Мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер

Праворуч розташовані прилади для формування й спостереження логічних величин: генератор слів, логічний аналізатор, логічний перетворювач:

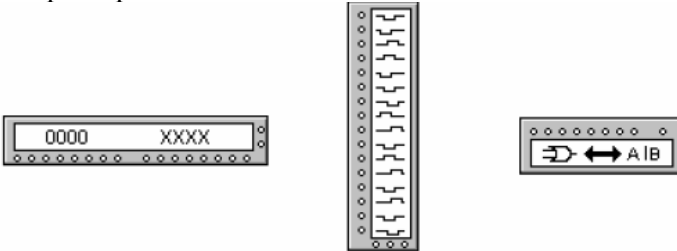


Рисунок 1.3 - прилади для логічних величин

Мультиметр використовується для вимірювання: напруги (постійної й змінної), струму (постійного й змінного), опору, рівня напруги в децибелах.



Рисунок 1.4 - Мультиметр

Для налаштування мультиметра потрібно подвійним клацанням миші на його зменшеному зображенні відкрити його збільшене зображення. На збільшеному зображенні натисканням лівої кнопки миші вибирається: вимірювана величина по одиницях вимірювання – A , V , Ω або db ; вид вимірюваного сигналу – змінний або постійний; режим установки параметрів мультиметра.

Установка виду вимірюваної величини проводиться натисканням відповідної кнопки на збільшеному зображенні мультиметра. Натискання кнопки із символом «~» встановлює мультиметр для вимірювання діючого значення змінного струму й напруги, постійна складова сигналу при вимірі не враховується. Для вимірювання пос-

тійних напруги й струму потрібно на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку із символом « \leftrightarrow ».

Для того, щоб використовувати мультиметр для вимірювань напруги, струму, опору або рівня напруги в децибелах, потрібно натиснути кнопку на збільшеному зображенні мультиметра: A , V , Ω або dB відповідно.

У якості амперметра й вольтметра мультиметр використовується так само, як і стандартні прилади.

Мультиметр – єдиний в EWB стандартний прилад, призначений для вимірювання опору. Для використання мультиметра в якості омметра його слід приєднати паралельно ділянці кола, опір якого потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку Ω і кнопку із символом « \leftrightarrow » перемикавання в режим виміру постійного струму. Включити схему. На табло мультиметра при цьому з'явиться виміряне значення опору.

Щоб уникнути помилкових показів, схема повинна мати з'єднання із землею й не мати контакту із джерелами живлення, які повинні бути виключені зі схеми, причому ідеальне джерело струму повинне бути замінене розривом кола, а ідеальне джерело напруги – короткозамкненою ділянкою.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра слід натиснути кнопку dB .

Мультиметр підключається одним з виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом – до точки, щодо якої проводиться вимір. При вимірюванні рівня змінної напруги вимірюється рівень діючого значення.

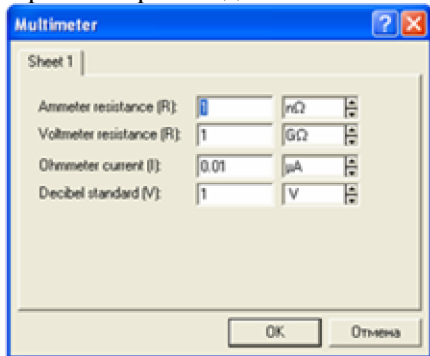


Рисунок 1.5 - Настроювання мультиметра


Після включення схеми на табло мультиметра з'явиться вимірне значення рівня напруги. Рівень напруги в децибелах підраховується в такий спосіб:

$$dB = 201g \frac{|U_{вх}|}{U_{оп}}$$

де $U_{вх}$ – напруга, прикладена до виводів мультиметра; $U_{оп}$ – опорна напруга, стосовно якої вимірюється рівень напруги.

За замовчуванням опорна напруга встановлена рівною 1 В.

Клавішу *SETTINGS* слід використовувати для настроювання вхідного опору вольтметра, послідовного опору амперметра, вимірювального струму омметра, опорної напруги для відліку в децибелах.

Осцилограф,  в програмі EWB, являє собою аналог дво-променевого запам'ятовувального осцилографа й має дві модифікації: просту й розширену.

На схему виводиться зменшене зображення осцилографа, загальне для обох модифікацій. На цьому зображенні є чотири вхідних затискача. Верхній правий затискач називають загальним, так як потенціал на цьому виводі є спільною точкою щодо якої осцилограф вимірює напругу. Зазвичай цей вивід заземлюють, щоб осцилограф вимірював напругу щодо нуля. Тому на панелі осцилографа цей вивід позначений "ground". Затискач, що нижче, – вхід синхронізації. Лівий і правий нижні затискачі є відповідно вхід каналу А (channel A) і вхід каналу В (channel B).

Розширена модифікація по своїх можливостях наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження з простою моделлю, а для докладного дослідження процесів – використовувати розширену модель.

Осцилограф можна підключити до вже включеної схеми або під час роботи схеми переставити виводи до інших точок – зображення на екрані осцилографа зміниться автоматично.

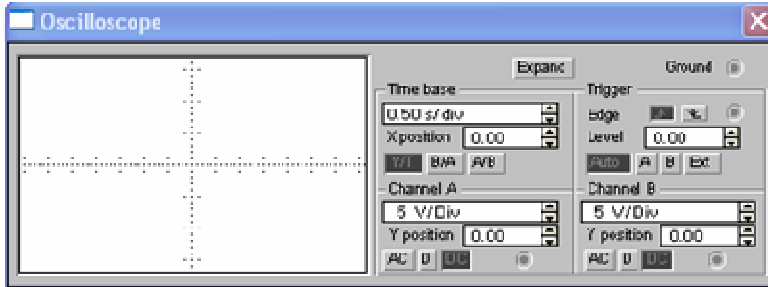


Рисунок 1.6 - Осцилограф

Подвійним клацанням миші по зменшеному зображенню відкривається зображення передньої панелі простої моделі осцилографа із кнопками керування, інформаційними полями й екраном.

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно настроїти, для чого слід задати:

- 1) розташування осей, по яких відкладається сигнал;
- 2) потрібний масштаб розгорнення по осях;
- 3) зсув початку координат по осях;
- 4) режим роботи із входу: закритий або відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Настроювання осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування.

Панель керування має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (*Time base*);
- 2) синхронізацією (*Trigger*);
- 3) каналом *A*;
- 4) каналом *B*.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для завдання масштабу горизонтальної осі осцилографа при спостереженні напруги на входах каналів *A* і *B* залежно від часу. Часовий масштаб задається в: (s/div, ms/div, μ s/div, ns/div відповідно). Величина однієї поділки може бути встановлена від 0,1 нс до 1 с.

Масштаб може дискретно зменшуватися на один крок при клацанні мишею на кнопці праворуч від поля й збільшуватися при клацанні на

кнопці .

За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка *X POS*, можна дискретно зсувати початок осцилограми по горизонтальній осі. У цім же полі розташовано три кнопки: *Y/T*, *A/B*, *B/A*, що дозволяють задавати вигляд залежності відображуваних сигналів. При натисканні на кнопку *Y/T* по вертикальній осі відкладається напруга, по горизонтальній осі – час, при натисканні на кнопки *A/Y* по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу *A*, по горизонтальній осі – каналу *B* і при натисканні на кнопку *B/A* навпаки. При цьому масштаб осей визначається установками відповідних каналів. У режимах *A/Y* і *B/A* можна спостерігати частотні й фазові зрушення (фігури Ліссажу), петлі гістерезису, вольт-амперні характеристики і т. д.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів *A* і *B* відповідно. Верхнє вікно в поле дозволяє управляти масштабом осі відображуваної напруги по вертикальній або горизонтальній осі. Ціна поділок може дискретно встановлюватися від 10 mV/div до 5 kV/div. Масштаб для кожної осі встановлюється окремо. Щоб одержати зручне для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту, слід установити масштаб, відповідний до очікуваної напруги.

Нижче розташоване поле, яке дозволяє дискретно посувати вісь *X* вгору або вниз. Для того, щоб розвести зображення від каналів *A* і *B*, слід скористатися зсувом по осі *Y* (*Y POS*) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи входу осцилографа по входам. Режим роботи осцилографа із закритим входом установлюється натисканням на кнопку *AC*. У цьому режимі на вхід не пропускається постійна складова сигналу. При натисканні на кнопку *DC* осцилограф переходить у режим з відкритим входом. У цьому режимі на вхід осцилографа пропускається як постійна, так і змінна складова сигналу. При натисканні на кнопку *0* вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дозволяє визначити положення нульової оцінки по осі *Y*.

Верхнє праве поле керування *TRIGGER* визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа. Кнопки в рядку *EDGE* задають момент запуску осцилограми по фронту або по зрізу імпульсу на вході синхронізації. Поле *LEVEL* дозволяє задавати

рівень, при перевищенні якого відбувається запуск осцилограми. Значення рівня можна зсунути на три поділкі вниз або нагору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації.

1. Автоматичний режим (*AUTO*) – запуск осцилограми проводиться автоматично при підключенні осцилографа до схеми або при її включенні. Коли «промінь» доходить до кінця екрана, осцилограма знову прописується з початку екрана (новий екран).
2. Режими запуску по входу *A* або *B*, у яких сигналом, що запускає, є сигнал, що надходить на відповідний вхід.
3. Режим «Зовнішній запуск» (*EXT – external*). У цьому випадку сигналом запуску є сигнал, що подавався на вхід синхронізації.

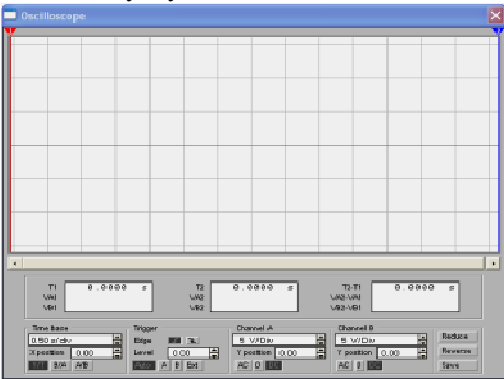



Рисунок 1.7 - Вікно розширеної моделі осцилографа.

Натискання клавіші *Expand* на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа.

Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними таблицями, на які виводяться результати вимірювань. Крім того, безпосередньо під екраном перебуває лінійка прокручування, що дозволяє спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту вимикання схеми. По суті, розширена модель осцилографа -- це зовсім інший прилад, що дозволяє набагато зручніше й більш точно проводити числовий аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовано два курсори, позначені *1* і *2*, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруги у будь-якій точці осцилограми. Для цього слід просто перетягнути

мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсору з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсору – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами першого й другого курсорів. Результати вимірювань, отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл. Для цього слід натиснути кнопку *Save* (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файлу. Щоб повернутися до колишнього зображення осцилографа, слід натиснути клавішу *REDUCE*, розташовану в правому нижньому куті.

Функціональний генератор  є ідеальним джерелом напруги, що виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми.

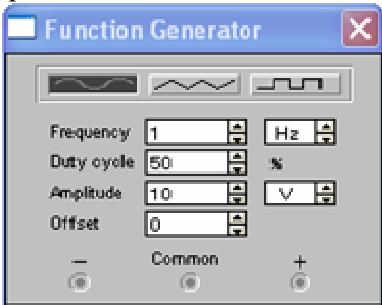


Рисунок 1.8 - Функціональний генератор

Середній вивід генератора при підключенні до схеми забезпечує загальну точку для вимірювання амплітуди змінної напруги. Для вимірювання напруги щодо нуля загальний вивід заземлюють.

Крайні правий і лівий виводи служать для подачі змінної напруги на схему. Напряга на правому виводі змінюється в позитивному напрямку щодо загального виводу, напруга на лівому виводі – у негативному. При подвійному клацанні мишею по зменшеному зображенню функціонального генератора відкривається його збільшене зображення.

а) Установка форми сигналу.

Вибрати необхідну форму вихідного сигналу й натиснути на кнопку з відповідним зображенням. Форму трикутного й прямокутного сигналів можна змінити, зменшуючи або збільшуючи значення в полі

DUTY CYCLE . Цей параметр визначається для сигналів трикутної й прямокутної форми. Для трикутної форми напруги він задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом наростання напруги й інтервалом спаду. Установивши, наприклад, значення 20, можна одержати тривалість інтервалу наростання 20 % від періоду, а тривалість інтервалу спаду – 80 % . Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалостями позитивної й негативної частини періоду.

б) *Установка частоти сигналу.*

Частота генератора може регулюватися від 1 Hz до 999 MHz. Значення частоти встановлюється в рядку *FREQUENCY* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц відповідно).

в) *Установка амплітуди вихідної напруги.*

Амплітуда вихідної напруги може регулюватися від 0 мВ до 999 кВ. Значення амплітуди встановлюється в рядку *AMPLITUDE* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця виміру (μ V, mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ відповідно).

г) *Установка постійної складової вихідної напруги.*

Постійна складова змінного сигналу встановлюється в рядку *OFFSET* за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками. Вона може мати як позитивне, так і негативне значення. Це дозволяє одержати, наприклад, послідовність однополярних імпульсів.

1.4 Моделювання схем

EWB дозволяє будувати аналогові, цифрові й цифро-аналогові схеми різного ступеня складності. Досліджувана схема збирається на робочому полі при одночасному використанні миші й клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. При побудові й редагуванні схем виконуються наступні операції:


- а) вибір компонента з бібліотеки компонентів;
- б) виділення об'єкта;
- в) переміщення об'єкта;

- г) копіювання об'єктів;
- д) видалення об'єктів;
- е) з'єднання компонентів схеми провідниками;
- ж) установка значень компонентів;
- з) підключення приладів.


Якщо схема не поміщається на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих праворуч і під робочим полем. Після побудови схеми й підключення приладів аналіз її роботи починається після натискання вимикача в правому верхньому куті вікна програми.

Зробити паузу при роботі схеми можна натисканням кнопки *Pause* під вимикачем. Відновити процес можна повторним натисканням кнопки *Pause*. Повторне натискання вимикача в правому верхньому куті припиняє роботу схеми.

Вибір потрібного компонента проводиться з поля компонентів; потрібне поле компонентів вибирається натисканням лівої кнопки миші на одній з піктограм панелі компонентів. При цьому в поле компонентів з'являються зображення відповідних компонентів. Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою миші переміщається на робоче поле.

Виділення об'єкта здійснюється за допомогою миші (під об'єктом мається на увазі як один компонент, так і група компонентів). При виборі компонента потрібно встановити покажчик миші на потрібний компонент (при цьому зображення покажчика зміниться на  й клацнути лівою кнопкою миші. Для вибору групи компонентів потрібно встановити покажчик миші в один з кутів прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку миші, розтягнути рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний. Зняти виділення можна клацанням миші в будь-якій точці робочого поля.

Об'єкт можна повертати на кут, кратний 90° . Для цього об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім вибрати команду *Rotate* з меню *Circuit*, натиснете *Ctrl + R* або на робочій панелі натиснути кноп-

ку . При цьому об'єкт повернеться на 90° за годинниковою стрілкою. При повороті групи компонентів на 90° повертається кожний компонент, а не вся група цілком.

Копіювання об'єктів здійснюється за допомогою команди з меню *Edit*, натисканням *Ctrl + C* або на робочій панелі натиснути кнопку



. Перед копіюванням об'єкт потрібно виділити. Після виконання команди виділений об'єкт копіюється в буфер. Для вставки вмісту буфера на робоче поле потрібно вибрати команду *Paste* з меню *Edit*,



натиснути *Ctrl + V* або на робочій панелі натиснути кнопку . Після виконання команди вміст буфера з'явиться на робочому полі й буде виділено кольором.

Видалення об'єкта здійснюється командами *Cut* (на робочій панелі



кнопка) і *Delete*. Відмінність полягає в тому, що при виконанні команди *Cut* об'єкт вставляється в буфер і може бути потім вставлений назад на робоче поле, а при виконанні команди *Delete* об'єкт видаляється зовсім. Перед видаленням об'єкт також повинен бути виділений.

Для з'єднання компонентів провідниками потрібно підвести курсор миші до виводу компонента. При цьому на виводі компонента з'явиться більша чорна точка (див. рис.1.9). Натиснувши ліву кнопку миші, перемістять її курсор до виводу компонента, з яким потрібно з'єднатися, і відпустять кнопку миші. Виводи компонентів з'єднуються провідником.

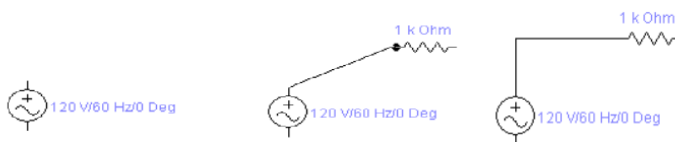


Рисунок 1.9 - З'єднання компонентів

Усі провідники в EWB за замовчуванням чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього потрібно подвійним клацанням на зображенні провідника відкрити вікно, наведене на рисунку, і у вікні мишею вибрати необхідний колір.

Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники відображалися прямими лініями.

Після того, як схема побудована, можна вставити в неї додаткові компоненти. Для цього потрібно мишею перемістити компонент у необхідну точку схеми і, помістивши його над провідником, відпустити кнопку миші. Компонент автоматично вставиться в коло, як показано нижче на рис. 1.10.

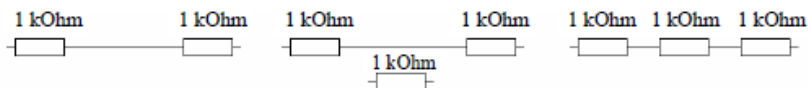


Рисунок 1.10 - З'єднання компонентів

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно до початку занять:

- прочитати опис чергової лабораторної роботи, повторити необхідні розділи теоретичного курсу по конспекту лекцій, даним методичним вказівкам і рекомендованій літературі, підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

- підготувати бланк звіту, що повинен містити титульний аркуш (зразок наведено у додатку А), мету роботи, схеми та таблиці з розділу "Робоче завдання", виконано розрахунок завдання з розділу "Підготовча робота". Креслення повинні виконуватись із застосуванням креслярського приладдя у відповідності з вимогами Держстандарту України.

Під час лабораторної роботи необхідно:

- одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи.
- ознайомитися з робочим місцем, вимірювальними приладами, джерелами енергії, вимикачами та ін.

- скласти електричне коло. Провести необхідні виміри, результати вимірювань показати викладачеві. Лабораторна робота вважається виконаю після того, як викладач зробив помітку у журнал.

- оформити роботу, захистити та здати викладачеві.

РОЗДІЛ 2 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

2.1 Лабораторна робота №1. Дослідження півпровідникових діодів за допомогою програмного комплексу EWB

Мета роботи:





- а) вивчення напруги та струму діода при прямому та зворотному зміщенні $p-n$ переходу;
- б) побудова та дослідження вольтамперної характеристики (ВАХ) для напівпровідникового діода;
- в) вимірювання напруги вигину вольтамперної характеристики.

2.1.1 Теоретичні відомості

Розділ “Diodes” (рис. 2.1) містить напівпровідникові діоди, стабілітрони, світлодіоди, тиристори або диністори, симетричний диністор, симетричний триністор, випрямляючий міст.



Рисунок 2.1 - Панель Diodes

- | | |
|---|----------------------------|
|  | - Напівпровідникові діоди; |
|  | - Стабілітрони; |
|  | - Світлодіоди; |
|  | - Випрямний міст; |

Розглянемо властивості діода, які задаються користувачем, для цього потрібно двічі натиснути лівою кнопкою мишки на діоді і в діалоговому вікні “Diode Properties” вибрати потрібний діод на закладці “Models”. Якщо потрібно змінити параметри, натисніть кнопку “Edit”. У діалоговому вікні, яке складається з двох однакових на зовнішній вигляд закладок (перша з них показана на рис. 2.2, друга показана на рис. 2.3), за допомогою яких задати наступні параметри:

- N – коефіцієнт інжекції;

- EG – ширина забороненої зони;
- FC – коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямо зміщеного переходу;

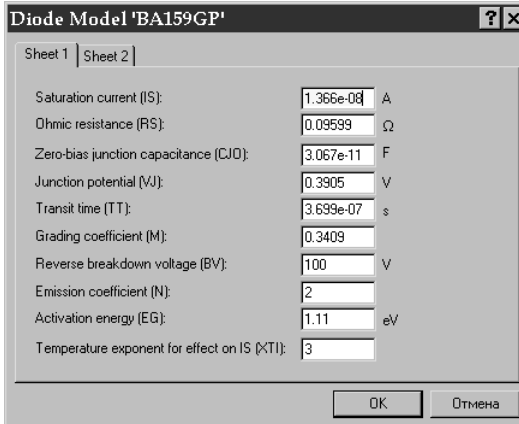


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд меню встановлення параметрів діода.

- BV - напруга пробою, В; для стабілітронів замість цього параметра використовується параметр VZT - напруга стабілізації;
- IBV –початковий струм пробою при напрузі BV, А; для стабілітронів замість цього параметра використовується параметр IZT – початковий струм стабілізації;
- XTI – температурний коефіцієнт струму насичення;
- KF – коефіцієнт фліккер-шуму;
- AF – показник ступеня у формулі для фліккер-шуму;
- TNOM – температура діода, 0С.

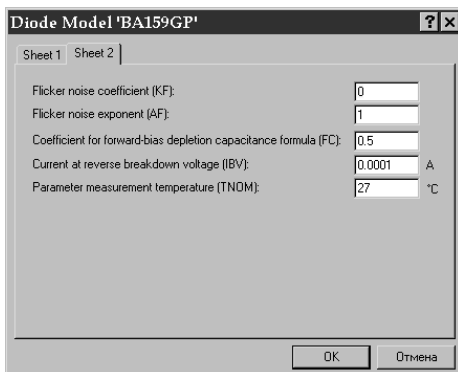


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд меню для встановлення додаткових параметрів діода.

Дослідження прямої гілки ВАХ діода може бути проведене за допомогою схеми рис. 2.4. Вона складається з джерела струму I , амперметра A (можна обійтися без нього, оскільки струм в амперметрі точно рівний заданому), досліджуваного діода VD і вольтметра V для вимірювання напруги на діоді.

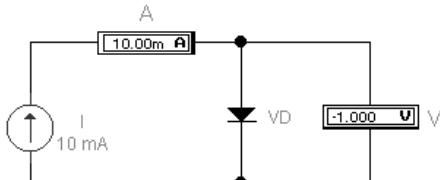


Рисунок 2.4 - Дослідження прямої гілки ВАХ діода.

Для вивчення зворотної гілки ВАХ діода використовується схема на рис. 2.5. У ній замість джерела струму використовується джерело напруги U_i .

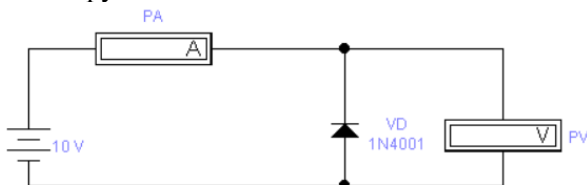


Рисунок 2.5 - Дослідження зворотної гілки ВАХ діода.

Для обчислення струму діода використовують формулу за законом Ома:

$$I_{np} = (E - U_{np})/R, \quad (2.1)$$

де I_{np} - струм діода у прямому напрямку,

E - напруга джерела живлення,

U_{np} – напруга на діоді у прямому напрямку.

Змінивши полярність включення діода у тій самій схемі рис. 2.4, можна зняти ВАХ діода за тією ж методикою та у зворотному напрямку

$$I_{zv} = (E - U_{zv})/R_r, \quad (2.2),$$

де I_{zv} - струм діода у зворотному напрямку,

U_{zv} – напруга на діоді у зворотному напрямку.

2.1.2 Порядок виконання роботи

1. Запустіть програму EWB.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Під час підготовки файлу збережіть його на жорсткому диску під своїм прізвищем.

Завдання 1. Дослідження прямої гілки ВАХ

1. Розгляньте схему на рис. 2.4.

2. У новому файлі програми EWB складіть схему на рис. 2.4. Для цього:- вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний вам елемент, потім перенесіть його на робочу:

- з'єднайте контакти елементів та розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно клацнути по одному з контактів лівою кнопкою миші та, не відпускаючи клавішу, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження);

- при натисканні на елемент правою кнопкою миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положен-

ням елемента, таким як обертання (rotate), розворот (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste);

- поставте необхідні номінали та властивості кожному елементу двічі, натиснувши лівою кнопкою миші на зображенні елемента.

3. Коли схема зібрана та готова до запуску, натисніть кнопку живлення на панелі інструментів. У разі серйозної помилки у схемі (коротке замикання елемента живлення, відсутність нульового потенціалу у схемі) буде видано попередження.

4. Зніміть показання напруги на діоді U_{np} під час прямого зміщення з вольтметра. У разі потреби можна користуватися кнопкою Pause. Отримані дані занесіть до табл. 2.1.

5. Переверніть діод і знову запустіть схему (рис. 2.4). Тепер вольтметр покаже напругу на діоді U_{zv} при зворотному усуненні. Отримані дані занесіть до табл. 2.1.

6. Обчисліть струм діода при прямому I_{np} та зворотному I_{zv} зміщенні. Отримані дані занесіть до табл. 2.1.

7.

Таблиця 2.1

Результати досліджень

Параметри	Отримані дані	
	Перевірка 1	Перевірка 2
U_{np}		-
U_{zv}		-
I_{np}		
I_{zv}		

Завдання 2. Отримання ВАХ на екрані осцилографа:

- побудуйте схему згідно з рис. 2.6;
- клацнете на вільному полі правою кнопкою. Оберіть Schematic Options .

У панелі рис. 2.7 оберіть Show nodes. На схемі з'являться номери вузлів. Вузол 2 з'єднайте з входом каналу А осцилографа, вузол 4 – з каналом В. Клацнете клавішу «Пуск» на короткий час. Канал А дає розгортку по висі Х, а канал В – по У.

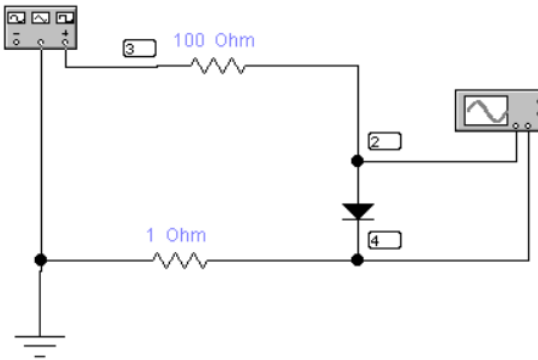
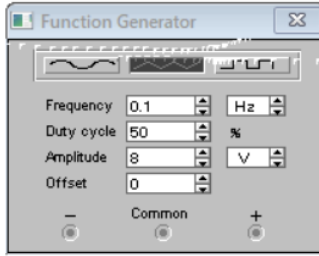


Рисунок 2.6 - Схема для побудови ВАХ діода

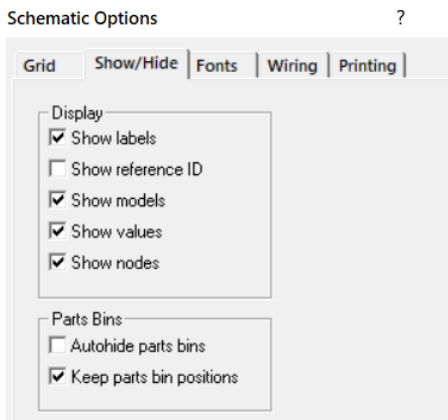


Рисунок 2.7 – Панель властивостей схеми

На екрані отримаємо ось таку картину.

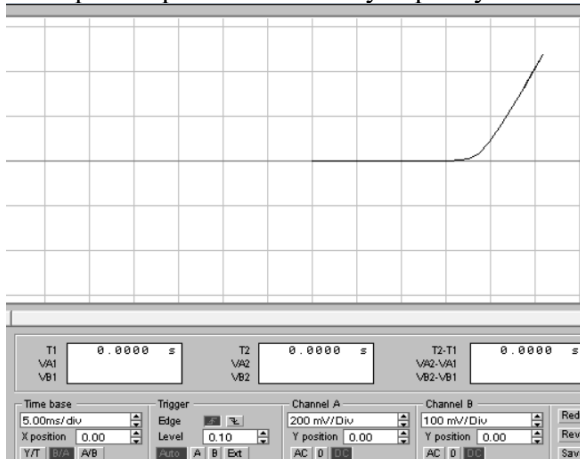


Рисунок 2.8 – розгортка осцилографа

Це вольт-ампера характеристика діода. На ВАХ, що з'явилася на екрані осцилографа, горизонтальною осі зчитується напруга на діоді в мілівольтах (канал А), а по вертикальній - струм в міліамперах (канал В, 1 мВ відповідає 1 мА). Виміряйте та запишіть величину напруги вигину.

Завдання 3. Дослідження осцилограми напруги діода. Створить схему на рис. 2.9. Виконати пункти а)-д).

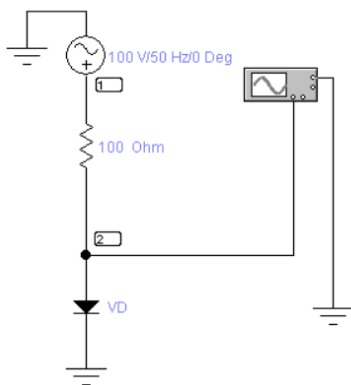


Рисунок 2.9 - Схема для отримання осцилограми напруги діода

- а) Встановіть параметри генератора функцій (рис. 2.10).
 б) Увімкніть схему.
 в) На екрані осцилографа, з'явиться залежність напруги на діоді від часу.

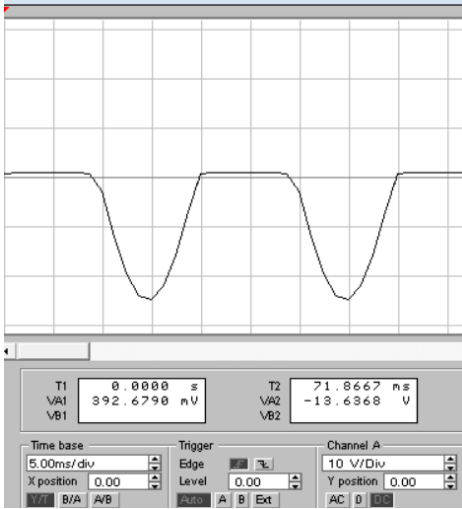


Рисунок 2.10 - Залежність напруги на діоді від часу.

- г) Зробіть висновки щодо зробленої роботи.
 д) Підготуйте звіт про виконання лабораторної роботи та дайте відповідь на контрольні питання.

Контрольні питання

- Порівняйте напруги на діоді при прямому та зворотному зміщенні по порядку величин. Чому вони різні?
- Чи можна порівняти вимірювані значення струму при прямому зміщенні з обчисленими значеннями?
- Чи можна порівняти вимірювані значення струму при зворотному зміщенні з обчисленими значеннями?
- Порівняйте струми через діод при прямому та зворотному зміщенні по порядку величин. Чому вони різні?
- Що таке струм насичення діода?

2.2 Лабораторна робота №2. Дослідження біполярного транзистора

Мета роботи: Дослідження біполярного транзистора

2.2.1 Створить схему на рис. 2.11. Зняти вхідні характеристики заданого викладачем біполярного транзистора $I_b(U_{be})$ при $U_{ke} = 0$ і заданій напрузі $U_{ke} = [\text{Номер у журналі}]$, змінюючи струм бази I_b від 0 до 100 мА. Результати вимірів записати у табл. 2.2. Замалювати сімейство вхідних ВАХ у зошиті.

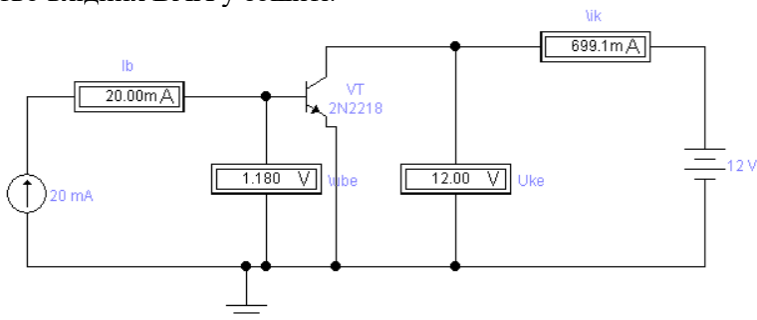


Рисунок 2.11 - Зняття ВАХ транзистора

Таблиця 2.2 Результати досліджень

$U_{ce}, \text{В}$		0	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10
$I_b, \text{А}$ при	$I_b = 20 \text{ мА}$							
	$I_b = 40 \text{ мА}$							
	$I_b = 60 \text{ мА}$							
	$I_b = 80 \text{ мА}$							
	$I_b = 100 \text{ мА}$							

Таблиця 2.3 Результати досліджень

$I_b, \text{мА}$		0	20	40	60	80	100
$U_{be}, \text{мВ}$ при	$U_{ce} = 0$						
	$U_{ce} = \dots$						

2.2.2 Визначити h -параметри: $h_{11} = U_{бe} / I_б$ при заданій напрузі $U_{ке}$ та заданому струмі $I_б = [\text{Номер у журналі}] \text{ мА}$;

$h_{12} = U_{бe} / U_{ке}$ при заданому струмі $I_б$. Порівняти результати розрахунку для різних транзисторів.

2.2.3 Зняти вихідні характеристики заданого біполярного транзистора $I_k(U_{кз})$ за зміни струму $I_б$ від 0 до 100 мА. Результати вимірів записати у табл. 2.2. Замалювати сімейство вихідних ВАХ у зошиті.

2.2.4 Визначити h -параметри: $h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_б$ при заданому напрузі $U_{ке}$; $h_{22} = I_k / U_{ке}$ при заданому струмі $I_б$. Перевірити отримане значення h_{21} за паспортними даними. Порівняти результати розрахунку різних транзисторів.

Контрольні питання

- Як утворюється np -перехід та які його властивості?
- Який пристрій біполярного транзистора та принцип його роботи у схемі із загальною базою та із загальним емітером?
- Як зображають на схемах транзистори npn та pnp -типів?
- Яка полярність напруги між електродами транзисторів npn і pnp типів?
- Які функції виконує емітер та колектор?
- Поясніть характер вхідних та вихідних характеристик біполярного транзистора.
- Чому забороняється відключати виведення бази за наявності напруги на емітері та колекторі?
- Що є зворотним струмом колекторного переходу?
- Поясніть фізичний зміст h -параметрів транзисторів і як вони визначаються за вхідними та вихідними характеристиками?
- Чому коефіцієнт посилення струму не залишається постійним при зміні струму емітера?

2.3 Лабораторна робота №3. Дослідження тиристорів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench

Тема. Дослідження роботи тиристорів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципу дії та властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням тиристорів.

2.3.1 Теоретичні відомості

Перемикальні діоди із *p-n-p-n*- чи *n-p-n-p*-структурами — це тиристори. Тиристори, що мають виводи від крайніх електродів, називають диністорами, а прилади з додатковим третім виводом (від одного із середніх електродів) — триністорами. Крім того, до класу тиристорів відносяться симетричні диністори (діаки), симетричні триністори (тріаки) і досить рідкий тип диністора — діод Шоклі, у якому структура *p-n-p-n* організована за рахунок наявності в *p-n*-переході пасток, формованих шляхом легування. На рис. 2.12 приведені позначення перемикальних діодів, моделі яких є в програмі EW





діод Шоклі;	
тиристори або диністори;	
симетричний диністор або діак;	
симетричний триністор або тріак	

Рисунок 2.12 - Перемикальні діоди

Для перемикальних діодів можна задати значення таких параметрів (для EWB 5.0 їхні позначення вказуються в квадратних дужках):

IS - зворотний струм диністора, А;

VS - напруга, при якій диністор перемикається у відкритий стан, В;
 CJO - бар'єрна ємність диністора при нульовій напрузі на переході, Ф.

Перераховані параметри можна задати за допомогою діалогових вікон, аналогічних приведеним на рис.2.13 для триністора.

IDRM - зворотний струм триністора, А;

VDRM - напруга, при якій триністор перемикається у відкритий стан, при нульовій напрузі на керувальному електроді, В;

VTM - спад напруги у відкритому стані, В;

ITM - струм у відкритому стані, А;

TG - час перемикаання в закритий стан, с;

DV/DT - допустима швидкість зміни напруги на аноді триністора, при якому він продовжує залишатися в закритому стані (при більшій швидкості триністор відкривається), В/мкс;

IH - мінімальний струм у відкритому стані (якщо він менше встановленого, то прилад переходить у закритий стан), А;

VGT - напруга на керувальному електроді відкритого триністора, В;

IGT - струм керувального електрода, А;

VD - напруга, що відмикає, на керувальному електроді, В.

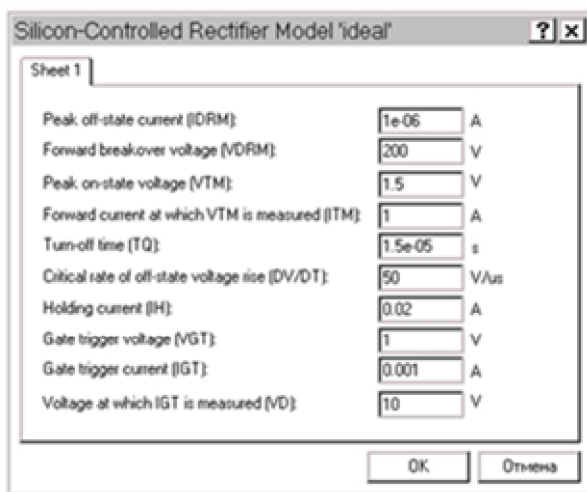


Рисунок 2.13 - Діалогове вікно установки параметрів тиристора

Дослідження прямої гілки ВАХ тиристора можна проводити з використанням схеми на рис. 2.14, на якому показані джерела вхідної напруги U_i і напруги керування U_y із захисними резисторами R_{zt} , R_{zy} .

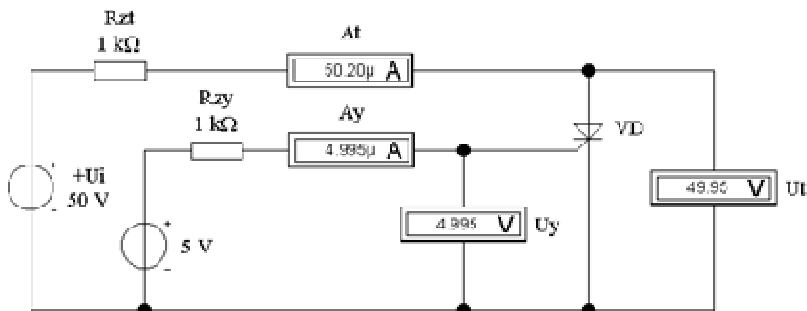


Рисунок 2.14 - Схема дослідження прямої гілки ВАХ тиристора

Вимірювання ВАХ здійснюється при зміні U_i від нуля до $U_{drm} + 50$ при фіксованому значенні U_y , наприклад, у трьох точках 0,5 Vd, Vd і 1,5 Vd. При дослідженні зворотної гілки ВАХ міняється тільки полярність U_i .

Слід відзначити, що зняття ВАХ перемикальних діодів може бути здійснене в режимі фіксованих струмів у силовому і керувальному колах, тобто за допомогою схем приведених на рис. 2.15 і 2.16.

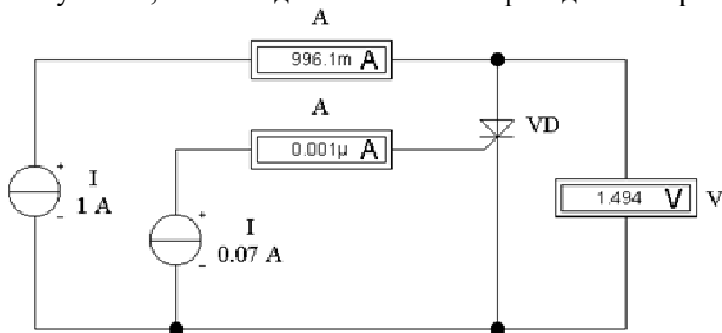


Рисунок 2.15 - Схема для побудови прямої гілки ВАХ тиристора в режимі фіксованих струмів анода

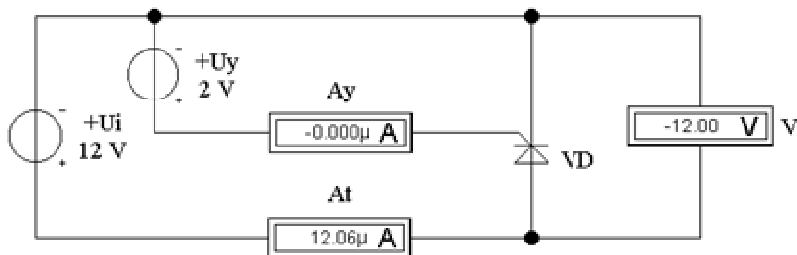


Рисунок 2.16 - Схема для побудови прямої гілки ВАХ тиристора в режимі фіксованих струмів керувального електрода

2.3.2 Порядок виконання роботи:

- а) розгляньте схему на рис. 2.17 і виконайте її моделювання;
- б) запустіть EWB;
- в) підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as буде необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема;
- г) перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область EWB. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), у якому знаходиться потрібний вам елемент, потім перенести його на робочу область;

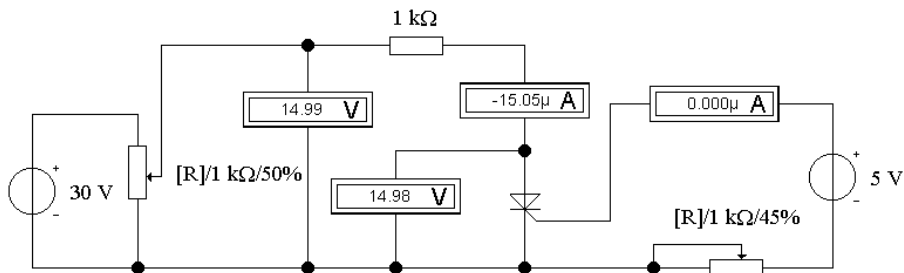


Рисунок 2.17 - Схема для лабораторного дослідження тиристора

- д) з'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для одержання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох

контактів необхідно клацнути на один з контактів лівою кнопкою миші і, не відпускаючи клавішу, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Натисканням на елементі правою кнопкою миші можна одержати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елементу, таким як обертання (rotate), розворот (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste);

е) проставите необхідні номінали і властивості кожному елементу. Для цього потрібно двічі виконати подвійне натискування лівою кнопкою миші на зображенні елементу;

ж) коли схема зібрана і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (замикання елементу живлення на коротко, відсутність нульового потенціалу в схемі) буде видано попередження;

з) зробіть аналіз схеми, використовуючи інструменти індикації. Виклик терміналу здійснюється подвійним натисканням клавіші миші на елементі. У випадку потреби можна скористатися кнопкою Pause;

і) при необхідності зробіть доступні аналізи в розділі меню Analysis;

к) занесіть пояснення щодо створення схем у звіт;

л) зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Тиристори, будова, принципи дії.
2. ВАХ тиристорів.
3. Типи тиристорів, їх особливості.
4. Характеристичні параметри.

2.4. Лабораторна робота №4. Дослідження польового транзистора

Осцилографічний спосіб зняття ВАХ польового (уніполярного) транзистора (див. рис. 2.18). Після запуску на осцилографі будуються вихідні характеристики польового транзистора, при цьому напруга U_{zi} змінюється при натисканні клавіш 1 і 2.

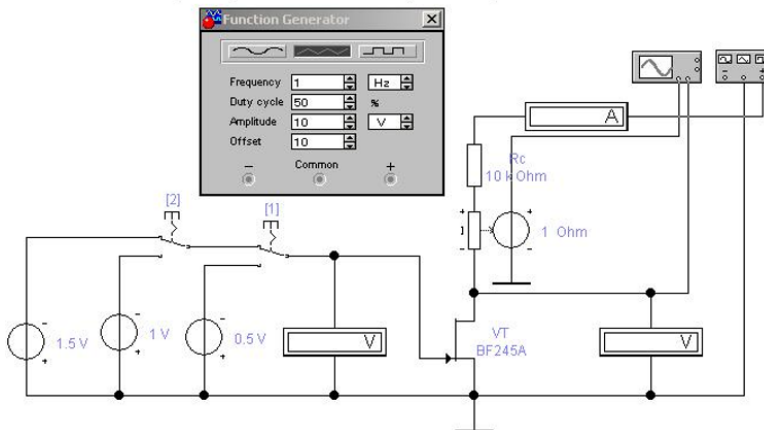


Рисунок 2.18 - Осцилографічний спосіб зняття ВАХ польового транзистора

У результаті на осцилографі (див. рис. 2.19) будується сімейство вихідних характеристик транзистора при $U_{зи} = -0,5; -1; -1,5$ В

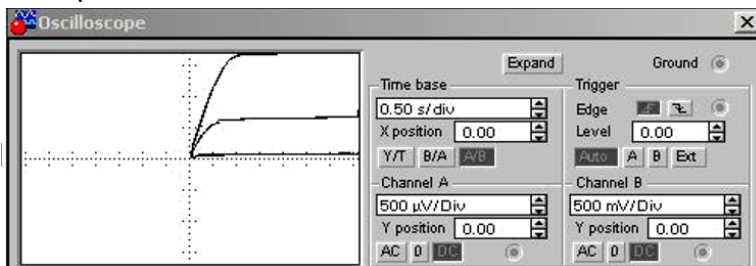


Рисунок 2.19 - Вихідні характеристики транзистора

1. Ознайомитись зі словником термінів у EWB.
2. Зняти передатні (стоко-затворні) характеристики заданого викладачем польового транзистора $I_c(U_{zi})$ при $U_{ci} = 30$ В та заданій напрузі $U_{ci} = [\text{Номер у журналі}]$ В . Результати вимірів записати у табл. 2.3. Сфотографувати сімейство передавальних ВАХ у зошиті.

Таблиця 2.3 Зняття характеристик польового транзистора.

$U_{зи}, В$		-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5
I_c, mA при	$U_{си} = 30$							
	$U_{си} = \dots$							

Виконати пункти а)-г).

а) Визначити напругу замикання транзистора, порівняти з паспортними даними (Threshold – поріг). Визначити крутість характеристики $S = I_c / U_{зи}$ при заданій напрузі $U_{си}$. Порівняти результати розрахунку різних транзисторів.

б) Зняти вихідні (стокові) характеристики заданого польового транзистора $I_c(U_{си})$ при зміні напруги $U_{зи}$. Результати вимірів записати у табл. 2.4. Замалювати сімейство вихідних ВАХ у зошиті.

Визначити вихідний (стоковий) опір $R_c = U_{си} / I_c$ при напрузі $U_{зи} = 0$. Порівняти результати розрахунку для різних транзисторів.

в) Визначити коефіцієнт посилення за напругою $= R_c S$.

Порівняти результати розрахунку різних варіантів.

г) Замінити транзистор МДП-транзистором із вбудованим каналом (Depletion N-MOSFET), потім МДП-транзистором з індукційним каналом (Enhancement N-MOSFET). Визначити напрямлення замикання транзисторів, порівняти з паспортними даними (Threshold).

Таблиця 2.4 Зняття характеристик польового транзистора

$U_{си}, В$		0	0,5	1	5	10	20	30
I_c, mA при	$U_{зи} = 1$							
	$U_{зи} = 0,5$							
	$U_{зи} = 0$							
	$U_{зи} = -0,5$							
	$U_{зи} = -1$							

Контрольні питання

- Які конструкції польових транзисторів з n-p-переходом та із ізольованим затвором?
- Принцип дії польових транзисторів, їх основні характеристики та параметри.
- Що таке напруга відсікання польового транзистора, як воно визначається?
- Що таке струм насичення транзистора та як він визначається?
- Які переваги польових транзисторів перед біполярними

Словник термінів в EWB

FET (*Field Effect Transistor*) – польовий транзистор;

JFET (*Junction Field Effect Transistor*) – польовий транзистор с *p-n*-переходом;

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) – польовий транзистор с МОП (метал-оксид-напівпровідник) структурою затвора;

Depletion (виснаження) **N-MOSFET** – транзистор збідненого типу з каналом n-типу;

Enhancement (збагачення) **N-MOSFET** – транзистор збагаченого типу з каналом n-типу;

Source – витік;

Drain – стік;

Gate – затвор;

Slope – крутизна характеристики;

Threshold – поріг;

Voltage gain – коефіцієнт посилення напруги.

Лабораторна робота №5. Дослідження стабілітронів

Стабілітрони відрізняються від випрямних діодів тим, що їх зворотна гілка вольтамперної характеристики має ділянку 2-3 електричного пробою (рис. 2.20). На цій частки струм змінюється у великих межах, а напруга змінюється у малих. Це і використовують для стабілізації напруги постійного струму. Стабілітрони включаються завжди у зворотному напрямку. Прямая гілка стабілітронів така ж, як і у діодів, що випрямляють. Основними параметрами стабілітронів є мінімальна напруга стабілізації $U_{CT\ min}$; максимальна напруга стабілізації $U_{CT\ max}$, мінімальний $I_{CT\ min}$ і максимальний $I_{CT\ max}$ струми стабілізації та динамічний опір стабілітрону.

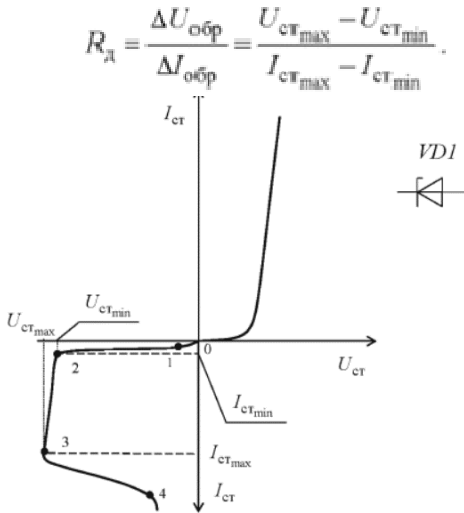


Рисунок 2.20 - Вольт-ампера характеристика напівпровідникового стабілітрона та його умовне графічне позначення

Порядок виконання роботи при дослідженні стабілітрону:

а) зібрати схему рис. 2.21 для дослідження прямої вітки вольтамперної характеристики стабілітрона;

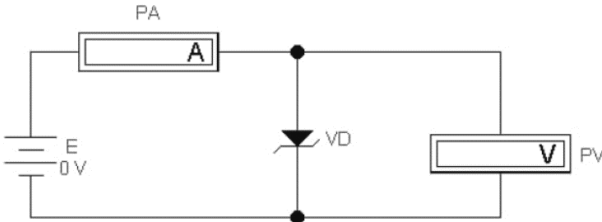


Рисунок 2.21 - Схема для дослідження прямої гілки вольтамперної характеристики стабілітрону

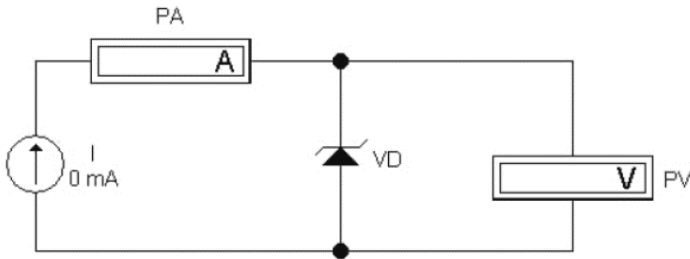


Рисунок 2.22 - Схема дослідження зворотної гілки вольтамперної характеристики стабілітрону

б) задати значення параметрів елементів схеми, що моделюється наступним чином:

1) подвійним клацанням лівої кнопки миші за зображенням стабілітрона викликати діалогове вікно його властивостей (Zener Diode Properties), вибрати бібліотеку *motor In i* в ній відповідний табл. 2.5 тип стабілітрону. Натиснути клавішу-ОК;

Таблиця 2.5 Тип стабілітрону

№ бригади	1	2	3	4	5
Тип стабілітрону	D1N3611GP	D1N3612GP	D1N3613GP	D1N3614GP	D1N3957GP
№ бригади	6	1	8	9	10
Тип стабілітрону	D1N4001GP	D1N4002GP	D1N4003GP	D1N4004GP	D1N4005GP

2) встановити такі параметри вимірювальних приладів: рід струму – постійний (DC): внутрішній опір амперметра – 1 МОм, вольтметра – 10 МОм;

в) дослідити пряму гілку вольтамперної характеристики стабілітрона, змінюючи значення джерела напруги від 0 до 1,2 В. Результати вимірювань занести до табл. 2.6;

Таблиця 2.6 Результати вимірювань

U, В	0	0,2	0,4	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
I_{np} , мА										
r_{np} , Ом										

г) зібрати схему на дослідження зворотної гілки вольтамперної характеристики стабілітрона (рис. 2.22);

д) дослідити зворотну гілку вольтамперної характеристики стабілітрону, змінюючи значення джерела струму від 0 до 100 мА. Результати вимірювань занести до табл. 2.7;

е) побудувати графік вольтамперної характеристики стабілітрону (пряму та зворотну гілки);

Таблиця 2.7

$I_{зв}$, мА	0	0,5	1	2	5	10	20	40	80	100
$U_{зв}$, В										

ж) по зворотній гілці вольтамперної характеристики визначити:

- мінімальний $I_{CT\ min}$ та максимальний $U_{CT\ max}$ струми стабілізації;
- мінімальне $U_{CT\ min}$ та максимальне $U_{CT\ max}$ напруги стабілізації.

з) розрахувати:

- середнє значення струму стабілізації

$$I_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{стmax}} + I_{\text{стmin}}}{2};$$

- середнє значення напруги стабілізації

$$U_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{стmax}} + U_{\text{стmin}}}{2};$$

- динамічний опір стабілітрону в середині ділянки стабілізації

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}},$$

де $\Delta U_{\text{зб}}$ та $\Delta I_{\text{зб}}$ - збільшення напруги і струму в середині робочої ділянки стабілітрона.

За експериментальними даними розрахувати і занести в табл. 2.6 значення прямого динамічного опору стабілітрону

$$r_{\text{д}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}},$$

де $\Delta U_{\text{пр}}$, $\Delta I_{\text{пр}}$ - збільшення струму та напруги, визначені за вольтамперною характеристикою;

і) після закінчення модельного експерименту закрити створений файл з збереження внесених змін та закрити програму EWB.

Зміст звіту:

- мета та програма роботи;
- схеми віртуальних установок, виконані за російськими стандартами;
- таблиці та вольт-амперні характеристики діода та стабілітрона, побудовані за наслідками експериментів;
- розрахунок основних параметрів діода та стабілітрона;
- короткі висновки щодо роботи.

Контрольні питання

При допуску до віртуальних досліджень студент повинен знати.

- а) Яка мета та програма роботи?
 - б) Які ви знаєте напівпровідникові матеріали?
 - в) Чим відрізняються напівпровідники n -і p -типів?
 - г) Що є основними носіями у підлозі про водниках n -типу?
 - д) Що є основними носіями у підлозі провідників p -типу?
 - е) Що є неосновними носіями у напівпровідниках n -типу?
 - ж) Що є неосновними носіями у напівпровідниках p -типу?
 - з) Що являє собою pn -перехід?
 9. З яких статей провідників складаються діоди та стабілітрони?
 - і) Які призначення та сфери застосування підлоги провідникових випрямних діодів?
 - к) Які призначення та сфери застосування підлоги провідникових стабілітронів?
 - л) Що таке вольтамперна характеристика підлоги провідникового діода (стабілітрона)?
 - м) Як позначаються підлозі провідникові діоди та стабілізації трони на важливих електричних схемах?
 - н) Яка гілка вольтамперної характеристики є робочою для стабілітрона, а яка для випрямного діода?
- При захисті результатів роботи необхідно знати відповіді на всі перелічені вище питання і, крім того, необхідно вміти:
- Пояснити пристрій та принцип дії напівпровідникового діода та стабілітрону.
 - Пояснити поведінку вольтамперної характеристики статі - провідникового діода та стабілітрону.
 - Намалювати принципові електричні схеми установок зі зняттям вольтамперних характеристик діода і стабілітрона.
 - Визначити з вольтамперних характеристик діода та стабілітрону їх основні параметри.

2.6 Лабораторна робота №6. Однофазні випрямлячі

2.6.1 Теоретичні відомості

Випрямлячами називають пристрої, що забезпечують перетворення змінного струму в постійний. Випрямлячі бувають керованими та некерованими. У пристроях першого типу є можливість зміни вихідної напруги, а в пристроях другого типу такої можливості немає.

У загальному випадку некерований випрямляч може містити:

- однофазний або трифазний трансформатор для величини напруги на навантаженні випрямляча (або необхідної величини струму в навантаженні);
- діодну (вентильну) групу елементів, що здійснюють власне випрямлення змінного струму;
- згладжуючий фільтр для покращення якості випрямленої напруги. До виходу фільтра підключається навантаження.

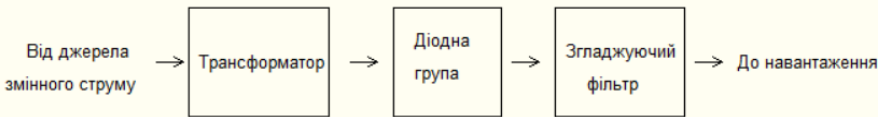


Рисунок 2.23 - Структурна схема некерованого випрямляча

Напругу на навантаженні можна представити у вигляді постійної складової U_n випрямленої напруги на навантаженні (корисна складова) та суми гармонік з частотами, кратними частоті мережі f_c (пульсації випрямленої напруги - шкідлива складова):

$$u_n(t) = U_n + \sum_{i=1}^{\infty} U_{m_i} \sin(2\pi f_c i + \varphi_i),$$

U_{m_i} – амплітуда, φ_i – фаза гармоніки

Найбільш важко піддається фільтрації перша гармоніка, тому за її рівнем прийнято оцінювати практично якість випрямленої напруги. Як числову оцінку використовують коефіцієнт пульсацій

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_{m_i}^2}}{U_{\Pi}} 100 \% \approx \frac{U_m}{U_{\Pi}} 100 \%.$$

Ппульсації напруги на навантаженні можна істотно зменшити, якщо використовувати фільтри, що згладжують, С-,L-, LC і RC-типів. При струмах навантаження до 30...50 А використовують переважно С-фільтри. При струмах навантаження понад 50 А віддають перевагу L-фільтрам. LC-фільтри застосовують при напругах на навантаженні понад 50 В і струмах навантаження до 10...20 А. Масогабаритні показники фільтрів при такому підході виходять мінімальними.

Якість фільтрації прийнято оцінювати коефіцієнтом згладжування

$$S_{\text{СП}} = \frac{K_{\Pi}^{\text{ВХ}}}{K_{\Pi}^{\text{ВЫХ}}},$$

де $K_{\Pi}^{\text{ВХ}}$, $K_{\Pi}^{\text{ВЫХ}}$ - коефіцієнти пульсацій на вході і на виході фільтра, що згладжує, відповідно.

2.6.2. Однофазний однопівперіодний випрямляч

Схема однофазного однопівперіодного випрямляча наведена на рис. 2.23, а часові діаграми, що пояснюють його роботу, на рис. 2.24.

Без фільтра, що згладжує ($C_{\phi} = 0$) робота випрямляча полягає в наступному. При позитивній півхвилі входної напруги u_a діод VD1 відкривається, так як на його аноді виходить позитивне відносно катода миттєве значення напруги. Напруга на навантаженні u_n повторює форму входної напруги u_a . Через навантаження протікає позитивна півхвиля струму.

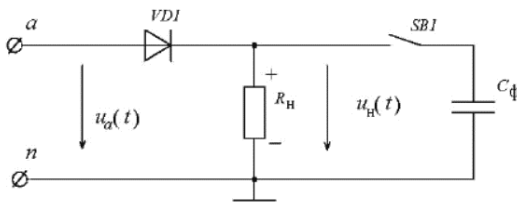


Рисунок 2.24 - Схема однофазного однопівперіодного випрямляча

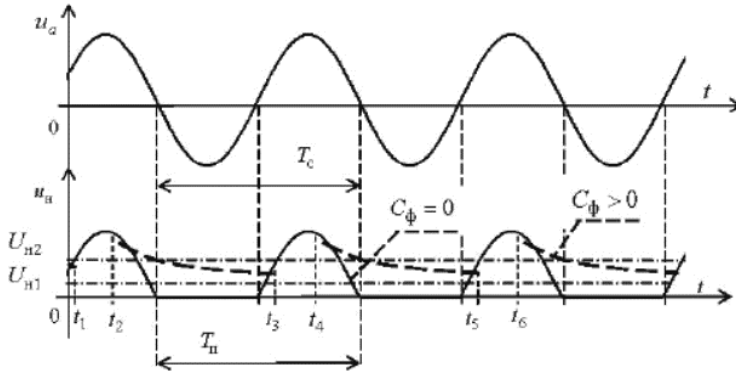


Рисунок 2.25 - Часові діаграми в однофазному однопівперіодному випрямлячі: u_a та u_n - миттєві значення напруг на вході та навантаженні; U_{n1} ; і U_{n2} - середні значення напруги на навантаженні при $C_\phi = 0$ і при $C_\phi > 0$, відповідно.

При негативній півхвилі напруги u_a діод VD1 закривається, струм через навантаження не протікає і напруга на навантаженні дорівнює нулю ($U_n = 0$).

Далі всі процеси періодично повторюються і в результаті навантаження формується пульсуюча напруга з частотою пульсацій

$$f_n = \frac{1}{T_n} = f_c = \frac{1}{T_c}.$$

При підключенні С-фільтра на інтервалах часу t_1-t_2 , t_3-t_4 , t_5-t_6 відбувається швидкий заряд конденсатора C_ϕ -фільтра через малий опір відкритого діода (шлях заряду: фаза а - відкритий діод VD1- C_ϕ - нульовий провід n). Наприкінці зазначених інтервалів, тобто. в моменти t_2 , t_4 , t_6 т. д. миттєве значення вхідної напруги u_a стає менше, ніж напруга на конденсаторі і діод закривається. Конденсатор C_ϕ починає досить повільно розряджатися через навантаження R_n (шлях розряду: C_ϕ - R_n). Чим більша постійна часу кола розряду тим менше падає напруга на конденсаторі в інтервалах часів. У результаті зменшуються пульсації вихідної напруги і збільшується середнє значення напруги на навантаженні. Чим більше величина конденсатора фільтра, тим більше вираш за постійного опору навантаження R_n .

Роботу С-фільтра можна пояснити іншим чином. При підключенні С-фільтра основна частина змінної складової вихідного струму протікає через конденсатор C_{ϕ} , який має значно менший опір, ніж R_n . Постійна складова струму протікає лише через R_n . У результаті зменшується амплітуда змінної складової вихідної напруги на навантаженні та зменшується коефіцієнт пульсацій. Виграш тим більший, чим більша величина ємності конденсатора фільтра.

2.6.3 Однофазний однопівперіодний керований випрямляч

Схема однофазного однопівперіодного керованого випрямляча аналогічна схемі, що наведена на рис.2.23, тільки замість діода ставлять тиристор.

Тиристор працює як логічний ключ.

Тиристор відкривається (ключ замикається) за наступних умов:

- $u_D \geq 0$ - Напруга на тиристорі позитивна;

- на керуючий електрод подано сигнал керування.

Тиристор закривається (ключ розмикається), коли:

- $i_T \leq 0$ – анодний струм тиристора переходить через нуль у негативному напрямку.

2.6.4 Однофазний мостовий випрямляч

Схема однофазного некерованого мостового випрямляча наведена на рис. 2.26, а часові діаграми, що пояснюють його роботу, на рис. 2.26.

Для згладжування пульсацій вихідної напруги паралельно навантаженню R_n може підключатися ємнісний фільтр C_{ϕ} .

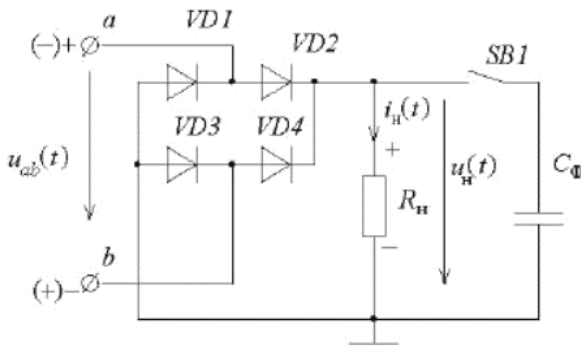


Рисунок 2.26 - Схема однофазного мостового випрямляча

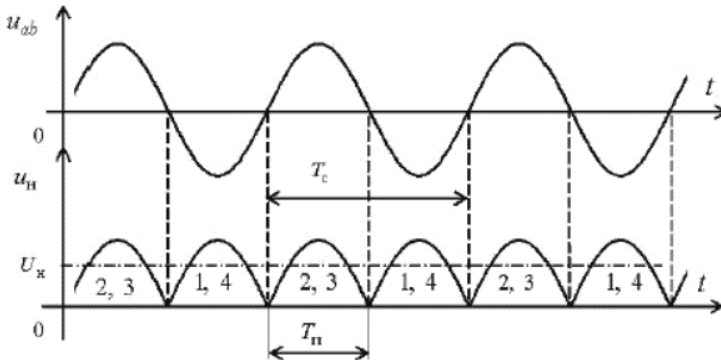


Рисунок 2.27 - Часові діаграми в однофазному мостовому випрямлячі:

u_{ab} u_n - миттєві значення вхідної лінійної напруги, напруги на навантаженні; U_n - середнє значення напруги на навантаженні при $C = 0$ (цифри 1, 2, 3 і 4 позначають номери відкритих діодів VD1, VD2, VD3 і VD4)

В однофазному мостовому випрямлячі завжди відкрита пара діодів.

При позитивній півхвилі напруги $u_{ab}(t)$ (на рис. 2.26 показано без дужок) відкриті діоди VD2 і VD3, оскільки напруга на анодах більше, ніж на їх катодах. Діоди VD1 і VD4 в цей час закриті, тому що напруга на їх анодах менша, ніж на їх катодах, в результаті струм протікає по колі: фази a - VD2 - $R_n C$ - VD3 - фази b

При негативній півхвилі напруги $u_{ab}(t)$ (На рис. 2.27 показано у дужках) відкриті діоди VD1 та VD4, оскільки напруга з їхньої анода більше, ніж з їхньої катода. Діоди VD2 і VD3 у цей час закриті, оскільки напруга з їхньої анода менше, ніж з їхньої катода. У результаті струм протікає колом: фаза b-VD4-R_nC -VD1

- фаза a. Важливо, що напрями протікання струмів через навантаження при позитивному і негативному півхвилі вхідної напруги збігаються. У результаті виходить подвоєння величини напруги на навантаженні та подвоєння частоти пульсацій (порівняно з однофазним однопівперіодним випрямлячем). Частота пульсацій виходить рівною:

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{T_{\text{п}}} = \frac{2}{T_{\text{с}}} = 2f_{\text{с}}.$$

Включення С-фільтра, що згладжує, зменшує амплітуду пульсацій і покращує якість випрямленої напруги.

2.6.5 Віртуальний експеримент

Мета роботи:

- а) в схеми та принцип дії однофазних випрямлячів;
- б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в однофазних випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;
- в) навчитися експериментально визначати основні параметри однофазних випрямлячів.

Програма роботи:

- а) ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;
- б) вивчити принцип дії випрямляча за схемою рис. 2.6;
- в) виконати дослідження однофазного мостового віртуального випрямляча;
- г) експериментально визначити вплив конденсатора фільтра на величину постійної складової випрямленої напруги на навантаженні і форму вихідної напруги в мостовому випрямлячі;
- д) скласти звіт про виконану роботу.

2.6.6 Віртуальні установки

Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного однопівперіодного випрямляча наведена на рис. 2.28.

Порядок виконання роботи:

- а) відповісти на контрольні питання та отримати дозвіл, розпочати роботу;
- б) увімкнути комп'ютер та запустити програму EWB;
- в) з програми EWB скласти схему однофазного однопівперіодного випрямляча (рис. 2.28) ;
- г) зберегти відкритий файл під назвою Лб комп'ютери в папці (File Save M. .. -> вдрукувати ім'я файлу, що зберігається, наприклад W6_Ivanov.ewb натиснути кнопку «Зберегти» за допомогою лівої клав миші;
- д) здійснити підготовку осцилографа до роботи:
 - подвійним клацанням миші на зображення осцилографа відкрити вікно осцилографа;
 - збільшити вікно осцилографа натисканням кнопки Expand;
 - встановити тривалість розгортки промені каналу А 5мс справ (Time base = 5.00 ms/div) ;
 - встановити чутливість відхилення промені по вертикалі каналу А 10 В/діл (Channel A = 10 V/div) ;
 - для візуалізації постійної складової напруги навантаженні у секції Channel A натиснути кнопку DC (постійний).
- е) Провести дослідження однофазного мостового випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра (0 мкФ. 120 мкФ та 200 мкФ):

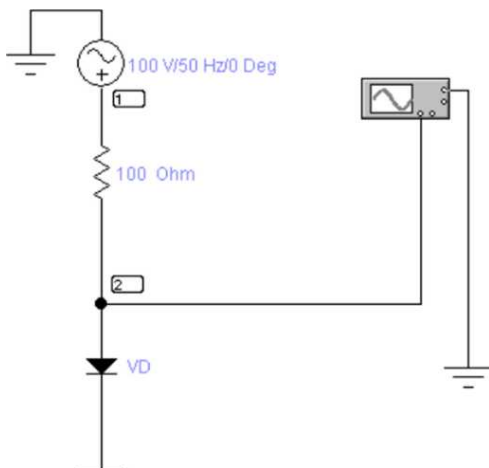


Рисунок 2.28 - Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного однопівперіодного випрямляча

1) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми (У верхньому правому куті робочого вікна програми EWB). Виміряти при $C=0$ мкФ, $C = 120$ мкФ, $C=200$ мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра PA DC, середнє значення напруги U_n на навантаженні (за допомогою вольтметра PV DC і значення змінної складової вихідної напруги U_{\sim} (за допомогою вольтметра PV AC). Результати вимірювань занести до табл. 2.28;

2) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при $C=0$ мкФ, 120мкФ та 200 мкФ;

3) за допомогою осцилографа виміряти:

- період вхідної (мережевої) напруги T_c ;
- період пульсації T_n ; Ввести дані вимірів у табл. 2.8.

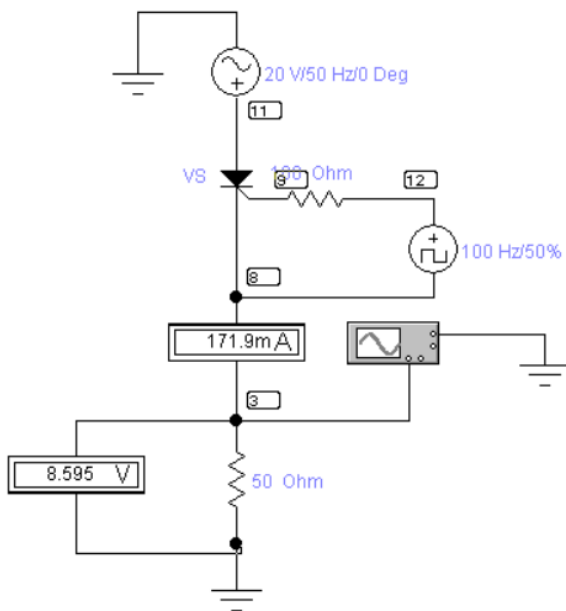


Рисунок 2.29 - Схема однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

ж) провести дослідження однофазного мостового випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра (0 мкФ, 120 мкФ та 200 мкФ);

1) зібрати електричну схему однофазного мостового випрямляча (рис. 2.30) та пред'явити її для перевірки інженеру;

2) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми. Виміряти за 0 мкФ, 120 мкФ, 200 мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра $P_A=$, середні значення напруги на навантаженні (за допомогою вольтметра $P_V=$) та діюче значення змінної складової вихідної напруги U_{\sim} (за допомогою вольтметра $P_V\sim$). Результати вимірювань занести в табл. 2.8;

- 3) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при $C=0, 120$ та 200 мкФ;
- 4) за допомогою осцилографа виміряти:
 - період вхідного (мережевий) напруги T_c ;
 - період пульсації T_{Π} . ввести дані виміру в табл. 2.8;
- 5) розрахувати та ввести дані розрахунку в табл. 2.8:
 - еквівалентна кількість фаз випрямлення

$$m = \frac{T_c}{T_{\Pi}};$$

експериментальне значення коефіцієнта пульсацій

$$K_{\Pi}^{\text{експ}} = \sqrt{2} \frac{U_{\Pi}}{U_{\text{H}}};$$

теоретичне значення коефіцієнта пульсації

$$K_{\Pi}^{\text{теор}} = \frac{2}{m^2 - 1}.$$

- б) розрахувати максимальні значення di/dt вентилів.

2.7 Лабораторна робота № 7. Моделювання некерованого трифазного мостового випрямляча

Мета:

- а) вивчити схеми та принцип дії трифазного мостового випрямляча;
- б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;
- в) навчитися експериментально визначати основні параметри трифазного мостового випрямляча

Програма роботи:

- а) ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;

б) вивчити принцип дії випрямлячів за схемою рис. 2.26, 2.31;

в) виконати дослідження трифазного мостового випрямляча:

1) зібрати електричну схему трифазного мостового випрямляча (рис. 2.31) та пред'явити її для перевірки інженеру;

2) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми. Виміряти за 0 мкФ, 120 мкФ, 200 мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра $PA=$, середнє значення напруги на навантаженні (за допомогою вольтметра $PV=$) та діюче значення змінної складової вихідної напруги U_{\sim} (за допомогою вольтметра PV_{\sim} . Результати вимірювань занести в табл. 2.8, у якій вставите колонку «трифазний мостовий»;

3) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні

4) за допомогою осцилографа виміряти:

- період вхідного (мережевий) напруги T_c ;

- період пульсації T_p

ввести дані виміру в табл. 2.8;

5) розрахувати та ввести дані розрахунку в табл. 2.8:

- еквівалентна кількість фаз випрямлення

$$m = \frac{T_c}{T_p};$$

експериментальне значення коефіцієнта пульсацій

$$K_p^{\text{експ}} = \sqrt{2} \frac{U_p}{U_n};$$

теоретичне значення коефіцієнта пульсації

$$K_p^{\text{теор}} = \frac{2}{m^2 - 1}.$$

б) розрахувати максимальні значення di/dt вентилів;

д) скласти звіт про виконану роботу.

2.7.2 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері й повинен містити:

- назву, тему й ціль роботи;
- досліджувані моделі відповідно до рис. 2.31;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів при зміні параметрів навантаження й діодів (значення змінених параметрів повинні бути зазначені);
- висновки повинні пояснювати результати експериментів.

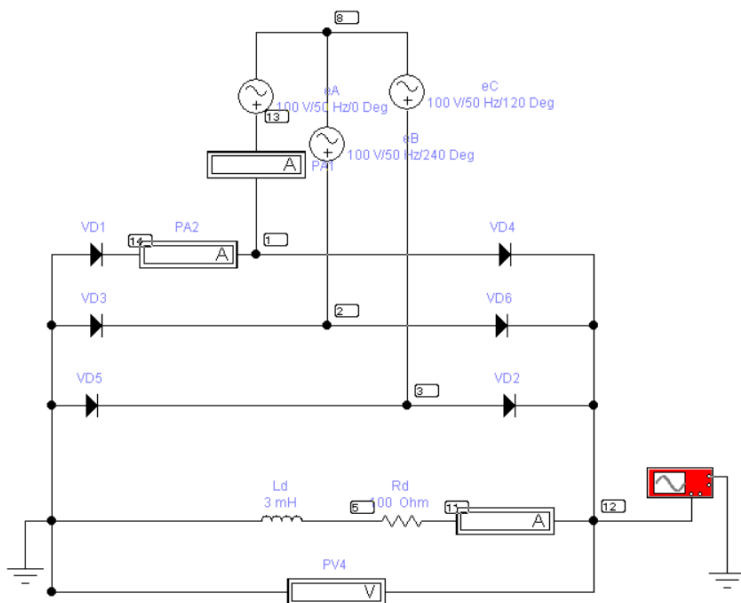



Рисунок 2.31 - EWB-модель трифазного некерованого мостового випрямляча


2.8 Лабораторна робота №8. Моделювання керованого трифазного мостового випрямляча

Мета: дослідження електромагнітних процесів керованого трифазного мостового випрямляча

2.8.1 Модель

Скласти модель відповідно до рис. 2.33.

На схемі живлення застосуємо від трьох джерел синусоїдальної напруги  100 V/50 Hz/0 Deg, які зсунуті по фазі на 120°. Усі три джерела синхронізовані та мають початкові фази 0°, 120° і 240°. відповідно.

Сигнали керування тиристорами здійснюємо за допомогою генератора Clock  50 Hz/50%. Генератор Clock видає прямокутні сигнали заданої частоти, заданої щільності у відсотках. Причому, ненульові значення сигналу даються у кінці періоду. Щоб задати позитивний імпульс керування тиристором заданого зсуву використаємо по 2 генератора, які включаються послідовно зустрічно. Сигнали керування подаються згідно діаграмі, що наведена на рис. 2.32.

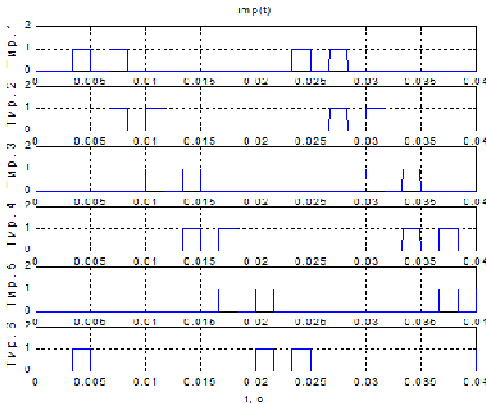


Рисунок 2.32 - Діаграма подачі керуючих імпульсів на тиристори.

Задається довжина імпульсу `dimp_grd` і зсув його початку від нуля ЕРС фази А у градусах `alf`. Для розрахунку параметрів генераторів Clock застосуємо програму на мові Octave:

```
% Формування індикатора подачі широких управл. імпульсів
% на всіх тиристорах в поточний момент часу t
% dimp_grd - ширина управл імпульсів в градусах
% alf - кут управління тиристорів в градусах
clear
clc
T=0.02;%
alf=35;          % зсув у градусах
dimp_grd=25;%   % ширина імп у градусах
alft=alf*T/360.0; % зсув у часі
dimp=dimp_grd*T/360.0; % ширина імп у часі
% зсув початка імпульсів + у часі
tsdv(1)=T/12.0+alft;      % ОСНОВНІ ІМП
tsdv(2)=3.0*T/12.0+alft;
tsdv(3)=5.0*T/12.0+alft;
tsdv(4)=7.0*T/12.0+alft;
tsdv(5)=9.0*T/12.0+alft;
tsdv(6)=11.0*T/12.0+alft-T;
% зсув кінця імпульсів - у часі
tsdv_(1)=T/12.0+alft+dimp; % ОСНОВНІ ІМП
tsdv_(2)=3.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(3)=5.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(4)=7.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(5)=9.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(6)=11.0*T/12.0+alft+dimp-T;

tsdvd(1)=T/12.0+alft+T/6.0; % ДУБЛЮЮЧИ ІМП
tsdvd(2)=3.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(3)=5.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(4)=7.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(5)=9.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(6)=11.0*T/12.0+alft+T/6.0;
%
% зсув кінця імпульсів - по часу
```

```

tsdvd_(1)=T/12.0+alft+dimp;      % дублюючи імп
tsdvd_(2)=3.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(3)=5.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(4)=7.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(5)=9.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(6)=11.0*T/12.0+alft+dimp;
for k=1:6
    % зсув початка імпульсів + у відсотках
    impo_p_prc(k)=(T-tsdv(k))*100/T; % +
    % зсув кінця імпульсів - у відсотках
    impo_m_prc(k)=(T-tsdv_(k))*100/T;% -
end
disp(' ОСНОВНІ ІМП + ')
disp(tsdv);%
disp(' ОСНОВНІ ІМП - ')
disp(tsdv_);% -
disp(' ОСНОВНІ ІМП + %')
disp(impo_p_prc);%
disp(' ОСНОВНІ ІМП - %')
disp(impo_m_prc);% -

```

При $\text{alf}=35^\circ$; $\text{dimp_grd}=25$ розрахунок дає відсотки щільності для генераторів Clock тиристорів з номером:

Джерела Clock, що включені позитивно:

№ 1	2	3	4	5	6
0.0036	0.0069	0.0103	0.0136	0.0169	0.0003

Джерела, що включені негативно:

№ 1	2	3	4	5	6
0.0050	0.0083	0.0117	0.0150	0.0183	0.0017

ОСНОВНІ ІМП + %

81.9444	65.2778	48.6111	31.9444	15.2778	98.6111
---------	---------	---------	---------	---------	---------

ОСНОВНІ ІМП - %

75.0000	58.3333	41.6667	25.0000	8.3333	91.6667
---------	---------	---------	---------	--------	---------

2.8.2 Завдання до досліджень

Складіть схему трифазного керованого мостового випрямляча рис. 2.33.

2.8.3 Процес симуляції.

Запустіть процес симуляції. Для цього натисніть кнопку Analysis /Transient . Відкриється вікно рис. 2.34 . Задіймо час симуляції 0,03 с. Будемо аналізувати напругу вузла 18. Тиснемо Simulate й отримаємо епюру рис. 2.35. Для того, щоб аналізувати напругу на іншому вузлу, треба перенести заземлювач на протилежний вузол, задавши номер потрібного вузла й провести симуляцію.

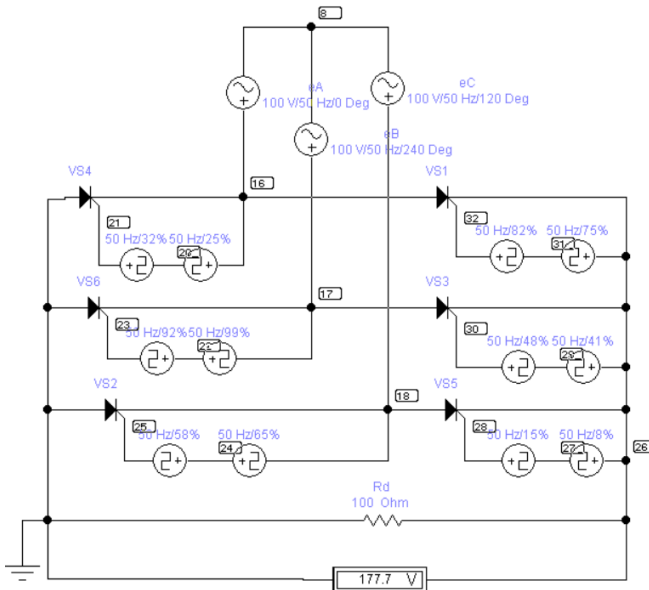


Рисунок 2.33 - Схема трифазного керованого мостового випрямляча

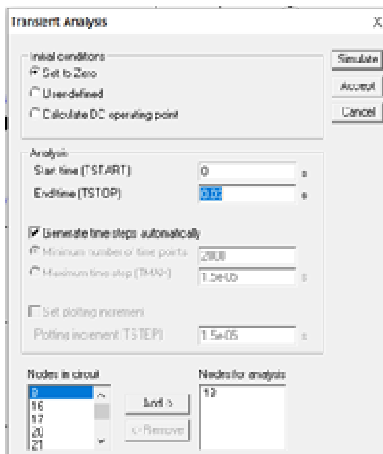


Рисунок 2.34 - Вікно параметрів симуляції.

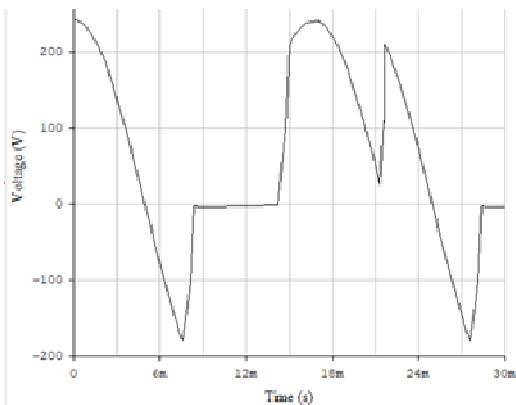


Рисунок 2.35 - Осцилограма напруги вузла 18.

Проаналізуйте результати симуляції. Одержите осцилограми напруг на періоді напруги мережі.

Розрахуйте й установите параметри навантаження таким чином, щоб процес установився за заданий час симуляції 0.06 с і струм навантаження залишався як умово згладженим.

2.8.4 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері й повинен містити:

- назву, тему й мету роботи;
- досліджувані моделі відповідно до рис. 2.33;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів при зміні параметрів навантаження (значення змінених параметрів повинні бути зазначені);
- висновки повинні пояснювати результати експериментів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрієнко, П. Д. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Оптимізація інженерних та проектних рішень обладнання енергоємних виробництв»/ Коцур, М. І. Андрієнко, П. Д. Безверхня, Ю. С. –Запоріжжя: ЗНТУ 2018.-39 с.
2. Алієв І.І. Віртуальна електротехніка. Комп'ютерні технології в електротехніці й електроніці. М.: Радіософт, 2003. 112 с
3. Лачин В.І., Савелов Н.С. Електроніка. Ростов Н/Д.: Феника, 2000. 448 с.
4. Исаков Ю.А., Платонов А.П., Руденко В.С., Сенько В.Й., Трифонюк В.В., Юдин Э.Э. Основы промышленной электроники.- К.:Техніка,1978 .
5. Довідник з перетворювальної техніки. Під ред. Чиженко І.М.- К.: Техніка, 1978 .
6. Карлащук В.І. Електронна лабораторія на IBM PC. Лабораторний практикум на базі Electronics Workbench і MATLAB. М.: Солон-Р, 2004. 799 с.
7. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
8. Тиховод С. М. Спектральний метод прискореного моделювання електричних кіл що містять тиристори / С.М. Тиховод, Т.Е. Дивчук, Т. П. Солодовнікова.- Електротехніка та електроенергетика. – 2023. – № 2. – С. 11-15.
9. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.– Київ: КПІ, 2020. – 266 с
10. Тиховод С. М. Методичні вказівки до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії з дисципліни "Основи електротехніки та електромеханіки" для студентів спеціальності: 144 «Теплоенергетика» денної та заочної форм навчання (частина 1): Методичні вказівки / С.М. Тиховод, В.В. Козлов, О.В. Набокова, С.О. Лапкіна. – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2023. – 66 с, 2023. – 66 с.
11. Руденко В.С., Сенько В., Чиженко І.М. Основы преобразовательной техники.- М.: ВШ, 1980 .

ДОДАТОК А

Зразок титульного аркуша

Міністерство освіти та науки України
Національний університет
«Запорізька політехніка»

Кафедра ЕЕА

Лабораторна робота №1
Дослідження півпровідникових діодів за допомогою програмного
комплексу EWB

Допустив доцент Іванов В.В.

Виконав ст. гр. Е-414 Бережна А.М.

Прийняв доцент Іванов В.В.

м. Запоріжжя, 2024 р.