

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

# ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітніми програмами «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи», «Інформаційна та ко-  
мунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»  
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Укладачі: В. О. Піддубний, І. О. Товкач, Т. В. Романенко

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2023

Рецензент

*Черняк М. Г.*, канд. техн. наук, доц. кафедри систем керування літальними апаратами інституту аерокосмічних технологій, Національний технічний університет КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор

*Жук С. Я.*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 6 від 30.03.2023 р.)  
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету  
(протокол № 03/2023 від 27.02.2023 р.)*

В навчальному посібнику наводяться рекомендації до виконання лабораторних робіт з кредитного модуля «Електроживлення радіоелектронної апаратури» (дисципліна за вибором студентів), який викладається студентам радіотехнічного факультету, що навчаються за освітніми програмами «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи», «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Викладено матеріал необхідний для проведення лабораторних робіт як на фізичному макеті (режим offline) так і віртуально (режим online). Може бути також корисним для споріднених спеціальностей.

Реєстр. № НП 22/23-561. Обсяг 1,4 авт. арк.

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ РОБІТ .....	7
1.1. Правила виконання робіт в лабораторії .....	9
1.2. Інструкція з техніки безпеки .....	10
1.3. Опис робочого місця .....	12
2. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ВИПРЯМЛЯЧІВ .....	15
2.1. Мета та зміст роботи.....	15
2.2. Завдання для самостійної підготовки.....	15
2.3. Порядок виконання роботи.....	16
2.4. Контрольні питання.....	24
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГЛАДЖУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ.....	25
3.1. Мета та зміст роботи.....	25
3.2. Завдання для самостійної підготовки.....	25
3.3. Порядок виконання роботи.....	25
3.5. Контрольні питання.....	36
4. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ.....	37
4.1. Мета та зміст роботи.....	37
4.2. Завдання для самостійної підготовки.....	37
4.3. Порядок виконання роботи.....	38
4.4. Контрольні питання.....	41
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ.....	42
5.1. Мета і зміст роботи .....	42
5.2. Завдання для самостійної підготовки.....	42
5.3. Порядок виконання роботи.....	43
5.4. Контрольні запитання.....	48

6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	49
6.1. Мета і зміст роботи .....	49
6.2. Опис лабораторного макету.....	49
6.3. Завдання для самостійної підготовки .....	50
6.4. Порядок виконання лабораторної роботи.....	51
6.5. Контрольні питання.....	51
7. ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРА ТА ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ.....	52
7.1. Мета і зміст роботи.....	52
7.2. Короткі теоретичні відомості .....	52
7.3. Порядок виконання роботи.....	54
7.4. Контрольні питання.....	58
8. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	59

## Перелік умовних позначень та скорочень

БТВ	без трансформаторний вхід
БЖПЧ	блок живлення з перетворенням частоти
В	вольтметр
ВБ	вентильний блок
ДБЖ	джерело безперебійного живлення
ДОН	джерело опорної напруги
ЗЗ	зворотній зв'язок
КЗ	коротке замикання
ККД	коефіцієнт корисної дії
ЛАТР	лабораторний автотрансформатор
ЛМ	лабораторний макет
ЛР	лабораторна робота
Осц.	Осцилограф
ПБКТ	правий блок контрольних точок
ПСН	параметричний стабілізатор напруги
РЕА	радіоелектронна апаратура
СП	сонячна панель
ШІМ	широтноімпульсна модуляція

## ВСТУП

Основна мета методичних вказівок це допомогти студентам в виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури», сформувані у студентів навички проведення експериментальних досліджень джерел живлення та закріпити отримані на лекціях теоретичні знання.

Навчальний посібник підготовлено в відповідності до робочої навчальної програми (силабусу) дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури». Він містить матеріал, який дозволяє застосовувати набуті під час лекцій знання для розуміння процесів, що протікають в традиційних та імпульсних джерелах живлення. В посібнику наводяться рекомендації для дослідження різних типів джерел на фізичному та віртуальному макетах.

Змістом даного видання є методичні рекомендації до виконання та опис лабораторних робіт кредитного модуля «Електроживлення радіоелектронної апаратури»».

Перед виконанням лабораторних робіт студенти повинні самостійно вивчити відповідні розділи дисципліни за рекомендованою літературою і конспектом лекцій, зміст лабораторної роботи, порядок її виконання, ознайомитися з математичним, програмним забезпеченням, методикою підготовки приладів до роботи та проведення вимірювань за їх допомогою. Лабораторні роботи можуть проводитися як на фізичному макеті в лабораторії так і дистанційно в віртуальній лабораторії Electronics Workbench Multisim.

# 1. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ РОБІТ

Як правило перед початком виконання в лабораторії кожної роботи студенти проходять перевірку, на якій повинні показати розуміння мети і змісту роботи. Результати виконання лабораторної роботи у вигляді графіків, осцилограм та інше надають для ознайомлення викладачу а при дистанційному виконанні роботи формують окремий файл та для перевірки відправляють його викладачу на дистанційну платформу навчання Moodle МікроТік (<http://iot.kpi.ua/lms/course/view.php?id=32>).

## Зміст та оформлення звіту

У звіті необхідно відобразити:

- мету роботи;
- стислі теоретичні відомості;
- принципові електричні схеми експериментів;
- результати експерименту та розрахунків;
- осцилограми, графіки;
- аналіз отриманих результатів та висновки.

Звіти з лабораторних робіт виконуються кожним студентом індивідуально. Схеми зображаються у відповідності стандартам ЕСКД. Усі обчислення і результати розрахунків треба виконуються в одиницях міжнародної системи (СІ). Особливу увагу потрібно приділяти викладенню результатів аналізу отриманих даних та формулюванню висновків про роботу.

Для дистанційного онлайн навчання використовується платформа – Moodle, яка дозволяє проводити дистанційно заняття та контроль їх виконання. Вступне заняття перед лабораторною роботою проводиться на платформі Zoom. Оперативний зв'язок зі студентами відбувається в відповідній групі Телеграм.

При виконанні робіт в режимі online на передодні занять нагадується тема лабораторної роботи, особливості виконання, терміни виконання та даються вказівки, які матеріали треба розглянути для підготовки (здійснюється це в групі Телеграм або за допомогою групової електронної пошти), наводиться перелік

контрольних питань.

Титульний лист звіту виконують наступним чином:

Національний технічний університет України  
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
Радіотехнічний факультет  
Кафедра радіотехнічних систем

ЗВІТ

про лабораторну роботу №\_\_\_\_  
з дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури»

---

(назва роботи)

студента другого курсу, групи \_\_\_\_\_

---

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Викладачі: П.І.Б.

Дата \_\_\_\_\_

2023 р.

Під час занять студенти повинні:

- змоделювати в симуляторі електронних схем функціональний вузол, який вивчається в даній лабораторній роботі;
- провести дослідження режимів роботи вузла за постійним та змінним струмом, розглянути та зафіксувати отримані в процесі досліджень осцилограми;
- оформити протокол проведення досліджень відповідно до вимог, що висуваються державними стандартами до технічної документації, сформувати файл протоколу (не більше 1 МБт) та надіслати його на платформу Moodle Мі-



кроТік (<http://iot.kpi.ua/lms/course/view.php?id=32>);

- отримати оцінку, відповідь та при необхідності скорегувати протокол відповідно до зауважень.

Перед початком виконання кожної роботи в режимі відеоконференції в Zoom студенти проходять перевірку, на якій повинні показати розуміння мети і змісту роботи. Приступати до виконання лабораторної роботи можна тільки з дозволу викладача. Протоколи виконання лабораторної роботи у вигляді окремого файлу надсилаються викладачу для контролю.

### **1.1. Правила виконання робіт в лабораторії**

(Режим offline)

1. Перед початком занять у лабораторії кожна група поділяється на бригади з 2...3 осіб.

2. При підготовці до роботи студенти повинні:

а) ознайомитися з програмою досліджень за рекомендаціями до виконання лабораторної роботи;

б) вивчити схему лабораторного макета;

в) скласти схему досліджень, яка дозволяє виконати всі пункти завдань;

г) визначити порядок виконання лабораторної роботи.

3. Виконанню кожної лабораторної роботи передуює перевірка готовності студента до роботи в лабораторії, яка виконується викладачем перед початком занять. При цьому кожен студент повинен подати заготовлену форму звіту по роботі, що включає в собі: титульний лист, схему досліджень за п. 2 та необхідні розрахунки, якщо вони включені в завдання роботи.

Викладач задає кожному студенту контрольні запитання по темі роботи.

До виконання роботи студенти допускаються при умові подання оформлених звітів з попередніх робіт, при задовільних відповідях на контрольні запитання і наявності заготовленої форми звіту з виконуваної роботи.

4. При виконанні досліджень необхідно керуватися інструкцією з техніки безпеки, ознайомлення з якою повинно бути підтверджено підписом студента в журналі інструктажів з техніки безпеки.

5. Ввімкнення макету проводиться тільки після перевірки зібраної схеми досліджень і з дозволу викладача.

6. При вивченні експериментальних залежностей спочатку потрібно вивчити характерні точки кривих, а потім знімати залежність, змінюючи аргумент нерівномірно, частіше поблизу характерних (екстремальних) точок і рідше на ділянках, де досліджувальна функція монотонна. Для правильного вибору масштабів координатних осей, в яких будуть приведені експериментальні залежності, необхідно спочатку візуально продивитися характер залежності і визначити мінімальні і максимальні значення досліджуваних величин.

7. Розрахунки, зв'язані з обробкою експериментальних даних, виконуються у лабораторії в процесі дослідження. Всі графіки, які потрібні для досліджень, також виконуються в процесі роботи.

8. Робота вважається закінченою після ознайомлення викладача та затвердження одержаних матеріалів. Кінцева оцінка за виконання лабораторної роботи виставляється на підставі результатів попереднього опитування з врахуванням якості роботи і бесіди викладача із студентом за результатами досліджень.

## **1.2. Інструкція з техніки безпеки**

(Режим offline)

1. Всі студенти, які виконують лабораторні роботи, повинні ознайомитися з даною інструкцією.

2. Студенти, не ознайомлені з технікою безпеки та з лабораторним макетом, до роботи у лабораторії не допускаються.

3. До всіх електрощитів підведена змінна напруга 380 та 220 вольт, вона небезпечна для життя. За нормальних умов роботи, для людини вважається безпечною напруга 40 вольт, а у вологих приміщеннях до 12 вольт. Ступінь небезпеки напруги змінюється в залежності від її частоти. Найбільш небезпечна є змінна напруга з частотою у межах 40...60 Гц. Тому всім, хто виконує роботи, необхідно суворо дотримуватись правил безпеки і вимагати від інших додер-

жання цих правил. Враження струмом може статися при безпосередньому доторканні до металевих провідників, що знаходяться під напругою.

4. Під час роботи необхідно бути уважними, не торкатися руками до елементів схеми лабораторного макета та іншого обладнання в лабораторії, що знаходяться під напругою.

5. Студенти не повинні загромождувати робочі місця предметами, які не відносяться до виконання лабораторної роботи.

6. Перед складанням схеми досліджень і до перевірки її учбовим майстром чи викладачем вмикати щитові вимикачі та під'єднувати прилади до розетки не дозволяється.

7. Подавати напругу живлення на пристрій і користуватися ручками та перемикачами лабораторного макету можна тільки з дозволу викладача і згідно з порядком виконання відповідної лабораторної роботи.

8. Вмикаючи напругу попередьте про це інших учасників роботи.

9. Забороняється залишати схему досліджень під напругою без нагляду. При виконанні робіт на робочому місці повинно бути не менше двох чоловік.

10. Забороняється відволікати увагу тих, хто працює з приладами і схемами, що знаходяться під напругою.

11. Забороняється виймати прилади з корпусу та проводити їх ремонт під час роботи.

12. При виявленні неполадок у приладах та порушень техніки безпеки негайно вимкніть живлення і запросіть учбового майстра.

13. Після закінчення роботи в лабораторії необхідно вимкнути джерела живлення і вимірювальні прилади з мережі, розібрати схему досліджень і здати робоче місце інженеру.

14. Студенти, що не виконують положень, які передбачені цією інструкцією, від роботи в лабораторії відсторонюються.

### 1.3. Опис робочого місця

При виконанні завдань дисципліни «Електроживлення радіоелектронної апаратури» передбачено наступні лабораторні роботи:

1. Дослідження схем випрямлячів.
2. Дослідження згладжуючих фільтрів.
3. Дослідження стабілізаторів напруги.
4. Дослідження джерел живлення з перетворенням частоти.
5. Дослідження ефективності роботи сонячних панелей.
6. Дослідження тиристора та тиристорного регулятора напруги.

Для лабораторних робіт (ЛР) на робочих місцях використовуються прилади:

1. Лабораторні макети (ЛМ1, ЛМ2).
2. Осцилограф (Осц).
3. Лабораторний автотрансформатор (ЛАТР).
4. Вольтметр для вимірювання змінної напруги (В).
5. Сонячна панель (СП).

У відповідності до ЛР робочі місця облаштовуються наступними приладами:

- дослідження схем випрямлячів – ЛМ1, Осц, В;
- дослідження згладжуючих фільтрів та джерел живлення з перетворенням частоти – ЛМ1, Осц;
- дослідження стабілізаторів напруги – ЛАТР, ЛМ1, Осц;
- дослідження ефективності роботи сонячних панелей – СП, ЛМ2, Осц, В;
- дослідження тиристора та тиристорного регулятора напруги – персональний комп'ютер.

При виконанні робіт в віртуальному режимі використовується персональний комп'ютер з установленим на ньому пакетом прикладних програм Electronics Workbench Multisim (версія 12).

Розташування органів управління на фізичному макеті, що знаходяться на передній панелі, приведено на рис.1.1, а схема – на рис.1.2.

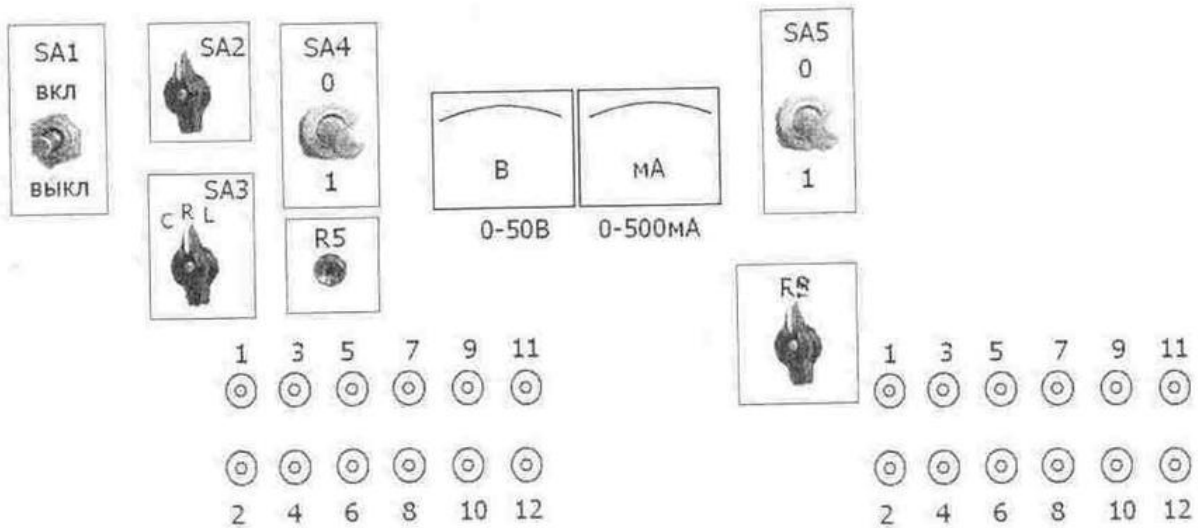


Рисунок 1.1– Розташування органів управління на передній панелі макета

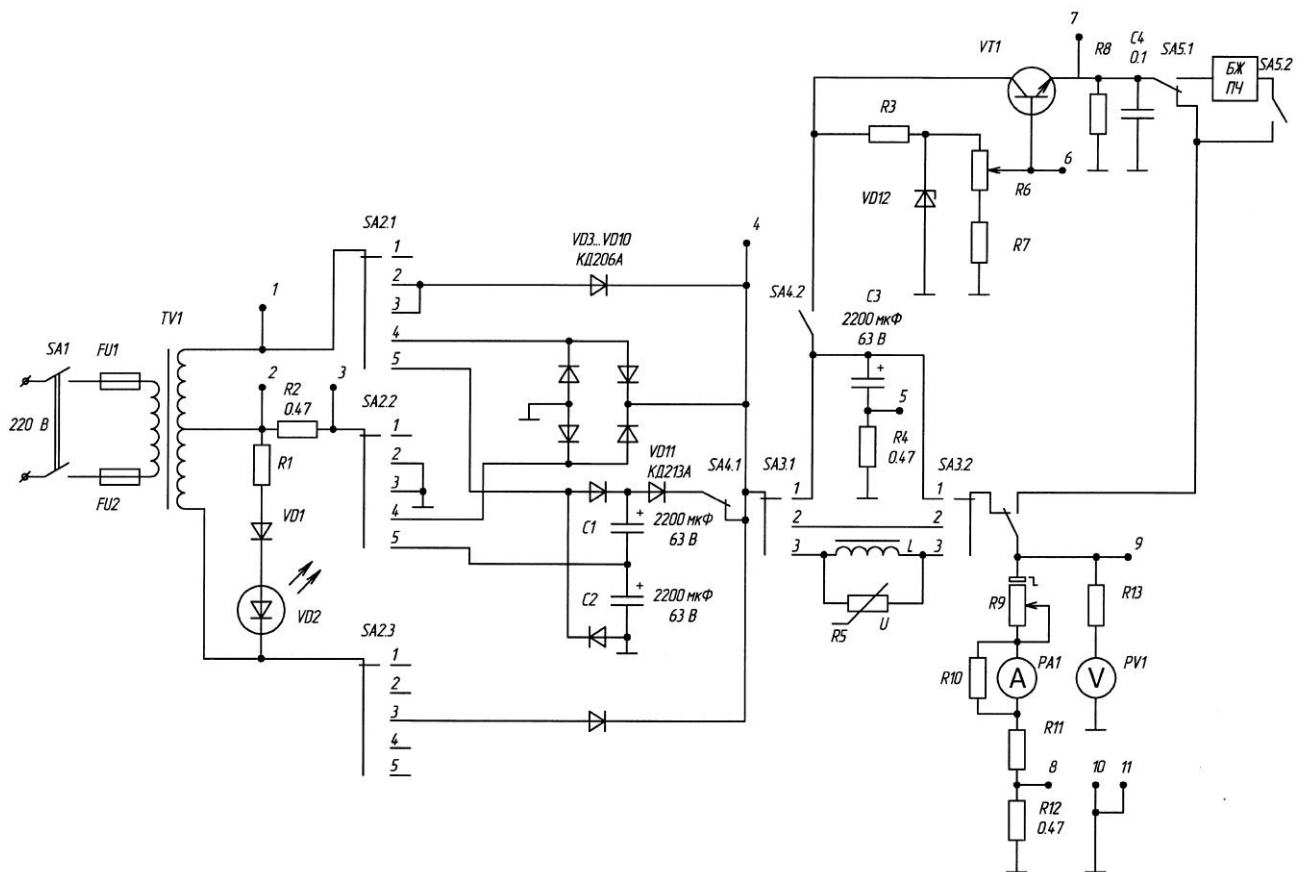


Рисунок 1.2 – Електрична схема лабораторного макета

Вимикач SA1 підключає первинну обмотку силового знижуючого трансформатора TV1 до мережі електроживлення напругою 220 В та частотою 50 Гц. До двох послідовно з'єднаних вторинних обмоток за допомогою перемикача

SA2 можна підключити чотири схеми випрямлячів:

1. Однофазна однокатна – SA2.2
2. Двофазна однокатна – SA2.3
3. Однофазна двокатна (мостова або схема Греца) – SA2.4
4. Подвоєння напруги (схема Латура) - SA2.5.

До кожної з приведених схем випрямлячів за допомогою перемикача SA3 можна підключити різні види навантаження:

1. Активне – SA3.2
2. Ємнісно-активне – SA3.1
3. Індуктивно-активне – SA3.3.

Величина активного навантаження змінюється за допомогою резистора R9. При цьому напруга та струм контролюються за допомогою вольтметра PV1 (шкала 50 В) та амперметра PA1 (шкала 500 мА).

До схем випрямлячів з ємнісним фільтром (крім схеми Латура) за допомогою перемикача SA4 підключається компенсаційний стабілізатор, вихідну напругу якого можна змінювати за допомогою резистора R6.

Блок живлення з перетворенням напруги вмикається перемикачем SA5. Схема та пояснення роботи цього блока приведено в описі лабораторної роботи «Дослідження джерел живлення з перетворенням частоти».

Точки схеми, між якими необхідно проводити вимірювання та спостереження форми напруги пронумеровані і виведені на відповідні контрольні гнізда на передній панелі ЛМ1.

Величини струмів, що протікають в різних колах схеми вимірюються за допомогою осцилографа за падінням напруги на відповідних резисторах з малим опором.

Такий метод вимірювання дозволяє одночасно з вимірюванням величини спостерігати і форму струмів.

## 2. Лабораторна робота

### ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ВИПРЯМЛЯЧІВ

#### 2.1. Мета і зміст роботи

**Мета:** ознайомитися із схемами випрямлячів та їх роботою.

**Зміст роботи:** дослідити залежність напруги на діодах та струмів через діоди і вторинну обмотку трансформатора від схеми випрямляча та виду навантаження; зняти зовнішні характеристики випрямлячів з ємнісно-активним навантаженням.

#### 2.2. Завдання для самостійної підготовки

1. Ознайомитися зі схемою лабораторного макета. Тип досліджуваного випрямляча визначається положенням перемикача SA2. Розібратися в якому положенні потрібно ввімкнути перемикач, щоб отримати потрібну схему.

2. Зобразити схеми випрямлячів з трансформатором, вказавши положення перемикача SA2.

3. Визначити, між якими контрольними точками схеми можна виміряти напругу на вторинній обмотці трансформатора, напругу на діодах, струми через діоди та вторинну обмотку трансформатора і вказати ці точки на кожній схемі.

4. Накреслити одну з чотирьох схем випрямлячів з підключеним активним, ємнісно-активним та індуктивно-активним навантаженнями, вказавши положення перемикача SA3. Опір навантаження та вимірювальні прилади зобразити в спрощеному вигляді.

5. Розробити методику зняття зовнішніх характеристик випрямлячів з ємнісно-активним навантаженням (максимальне значення вимірюваної напруги вольтметром PV1 становить 50 В, а максимальне значення вимірюваного струму амперметром PA1 – 500 мА).

6. В віртуальній лабораторії Multisim почергово зібрати схеми необхідні для дослідження випрямлячів.

### 2.3. Порядок виконання роботи

1. Виміряти амплітудне реальним на макеті чи віртуальним (на змодельованій схемі) осцилографом та діюче значення напруг (реальним чи віртуальним вольтметром) вторинної обмотки трансформатора без навантаження та порівняти співвідношення цих величин.

2. При середньому активному навантаженні замалювати чи зробити скріншоти осцилограми напруг в єдиному масштабі часу на вторинній обмотці трансформатора та навантаженні для кожної схеми випрямляча вказавши значення цих напруг.

3. Завдання п.2 повторити для ємнісно-активного навантаження.

4. Завдання п.2 повторити для індуктивно-активного навантаження.

5. Для мостової схеми випрямляча в єдиному масштабі часу при фіксованому середньому положенні опору навантаження замалювати одна під одною осцилограми струмів через діоди при різних видах навантаження, вказавши амплітудне значення цих струмів.

6. Для всіх схем випрямлячів при ємнісно-активному навантаженні зняти та побудувати графіки зовнішніх характеристик  $U_n = f(I_n)$ .

#### Хід роботи

Змодельовати схему одноперіодного випрямляча (рис.2.1), підключити осцилографи XSC1, XSC2 до виходу трансформатора та до навантаження (режим вимірювання «АС»).

Осцилограф має входи «А» та «В». Вибрати вхід «А». Кожен зі входів має клеми «+» (фаза) та «-» (земля). Клема «+» під'єднується до точки, в якій вимірюється напруга, а «-» – на землю. Вимірювання проводити при середньому значенні навантаження. Для чого поставити повзунок змінного резистора R2 в середнє положення (50%). Подивитися осцилограми в вибраних точках (рис.2.2 та рис.2.3).



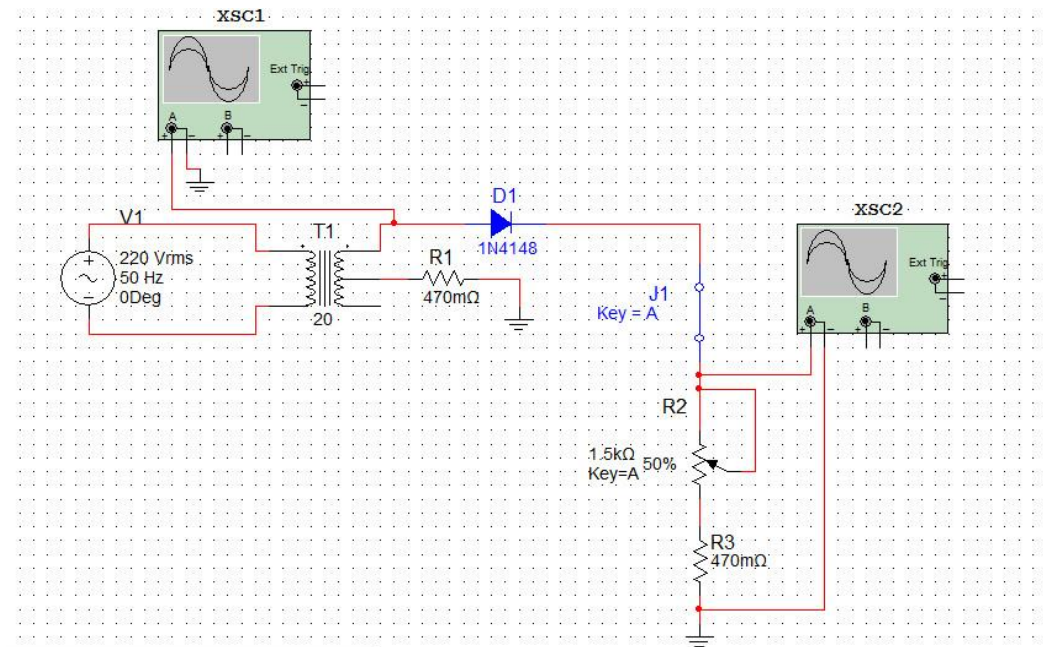


Рисунок 2.1 – Схема під'єднання осцилографів до схеми випрямляча

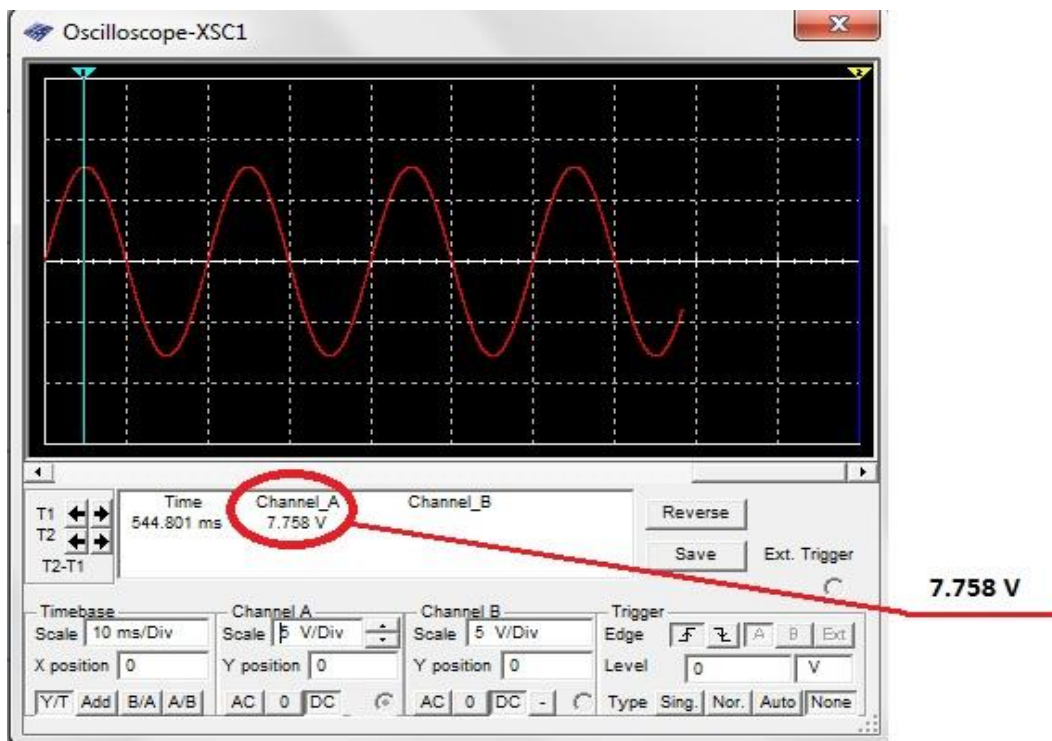


Рисунок 2.2 – Осцилограма напруги на вторинній обмотці трансформатора

Визначивши амплітудне значення змінної напруги на виході трансформатора, розрахувати її діюче значення, знаючи, що

$U_{\text{діюче}} = \frac{U_{\text{амплітудне}}}{\sqrt{2}}$ . Порівняти

його з показаннями вольтметра, який також підключити до точки вимірювання.

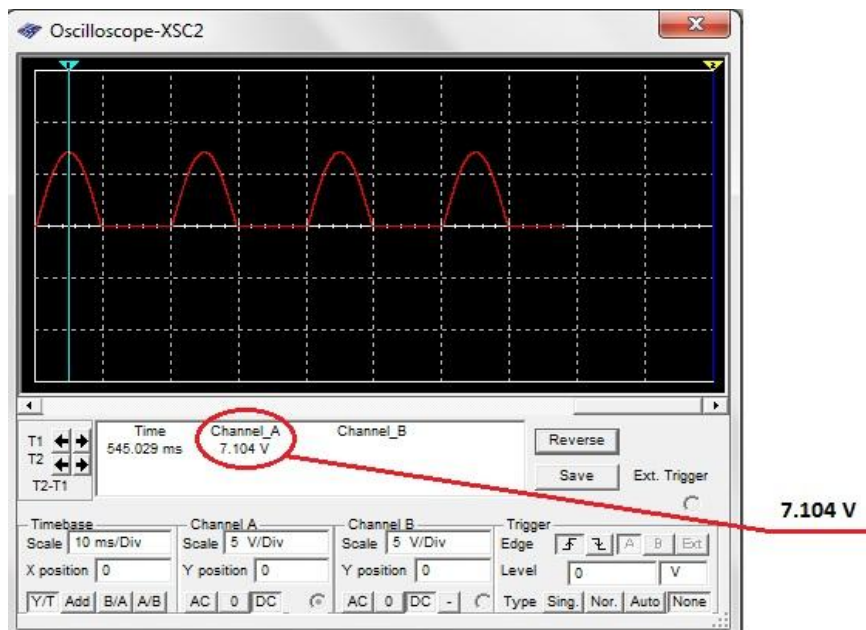


Рисунок 2.3 – Осцилограма напруги на навантаженні однофазного однопотічного випрямляча

Аналогічно розглянути осцилограми напруги на навантаженні для інших схем випрямлячів. (рис.2.4, 2.5, 2.6).

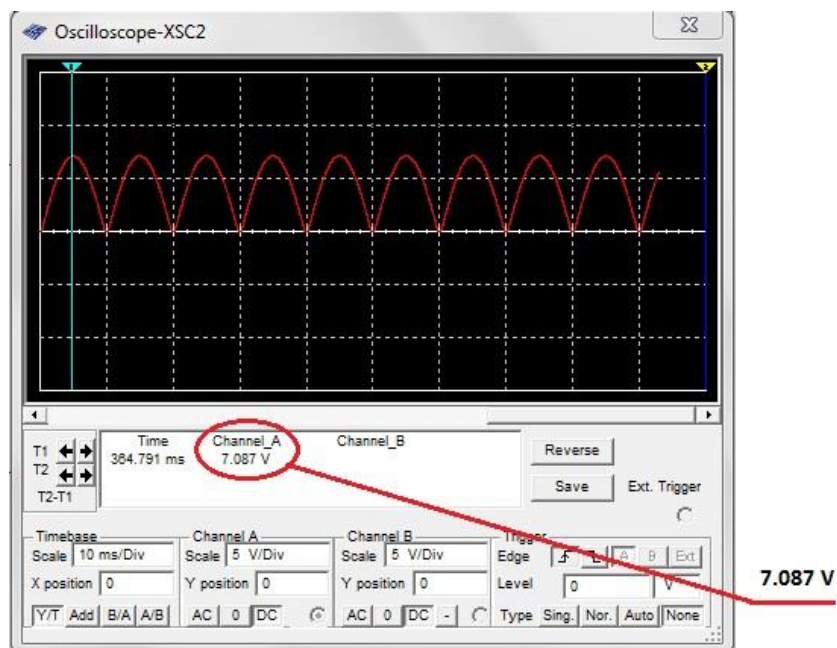


Рисунок 2.4 – Осцилограма напруги на навантаженні двофазного однопотічного випрямляча з відводом від середньої точки трансформатора

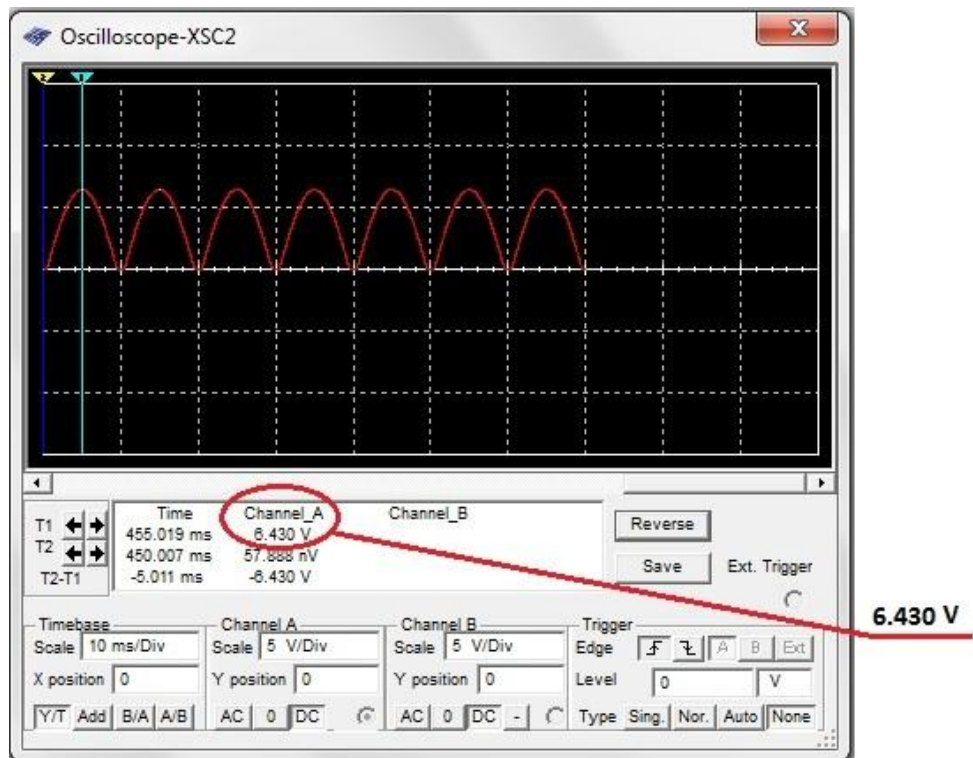


Рисунок 2.5 – Форма напруги на навантаженні для мостової схеми

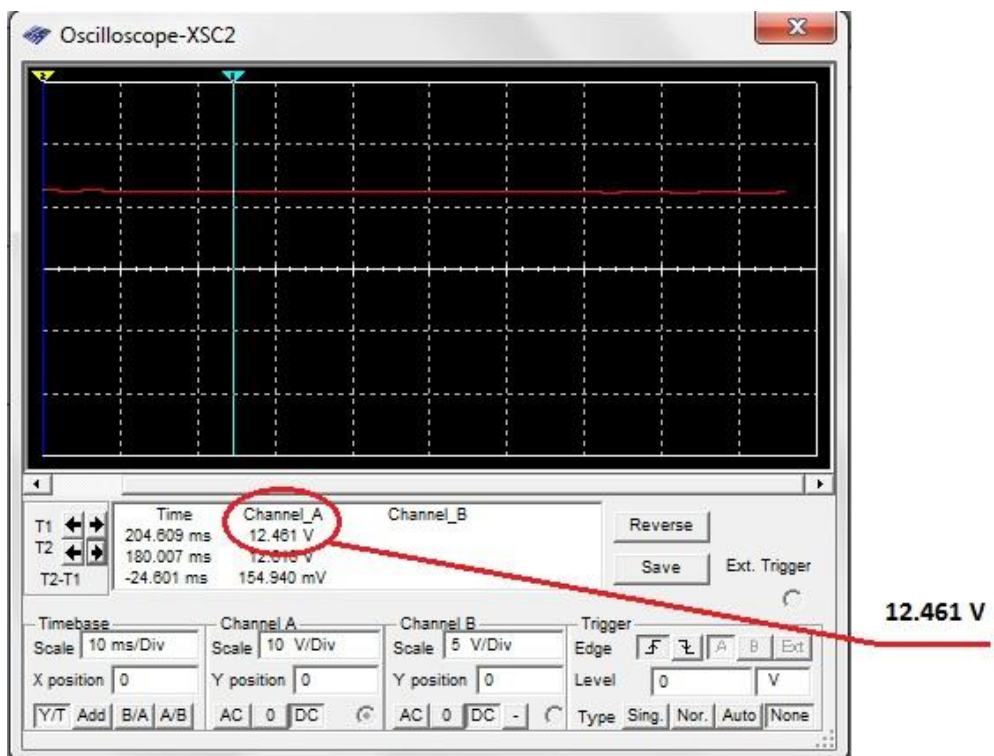


Рисунок 2.6 – Осцилограма напруги на навантаженні для схеми подвоєння напруги

## Ємнісно-активне навантаження

Для того щоб отримати ємнісно-активне навантаження необхідно під'єднати конденсатор паралельно опору навантаження. На рис.2.7 показано під'єднання конденсатора до однопівперіодної схеми.

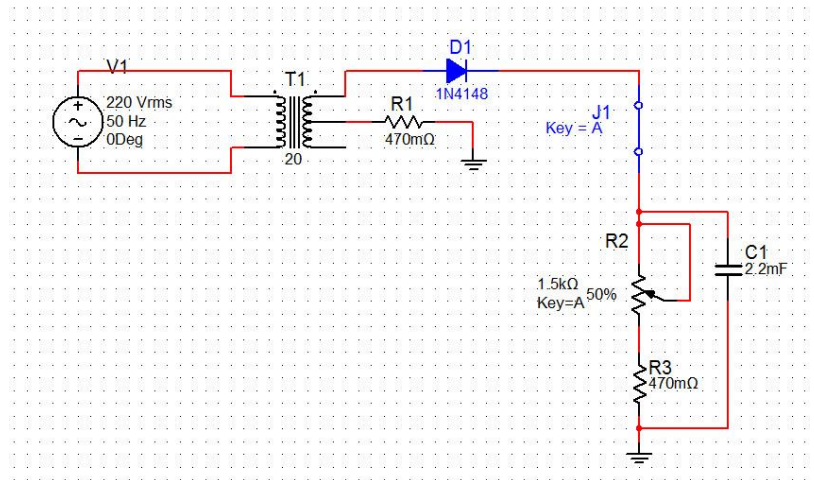


Рисунок 2.7 – Схема під'єднання конденсатора до навантаження

1. Подивитися вихідну напругу для розглянутої схеми (рис.2.8).

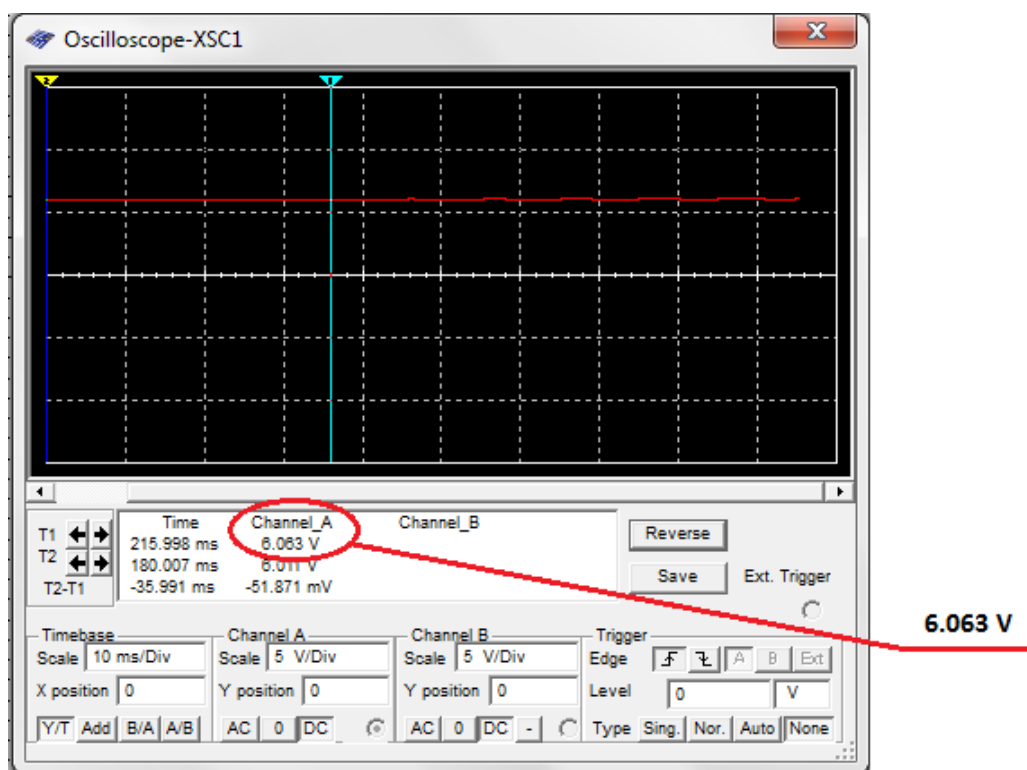


Рисунок 2.8 – Осцилограма напруги на ємнісно-активному навантаженні для однофазного однопіткового випрямляча

Під'єднати осцилограф до навантаження та подивитися пульсації напруги на ньому. Осцилограф повинен працювати в режимі «АС».

Аналогічні дослідження провести для інших схем.

Слід звернути увагу, що для роботи випрямляча з подвоєнням напруги (схема Латура) принципово необхідні конденсатори. Тому форма осцилограм при під'єднанні ємнісного навантаження не зміниться.

### Форма струму через діоди при ємнісно-активному навантаженні

Розглянути мостову схему. Для неї при фіксованому середньому положенні опору навантаження (рис.2.9) зняти осцилограми струмів через діоди при різних видах навантаження, вказуючи амплітудне значення цих струмів. Струм визначити як падіння напруги поділене на опір резистора R1 (0,47 Ом).

Амплітудне значення струму буде дорівнювати  $I_{амп} = \frac{U_{ампл}}{R1}$ .

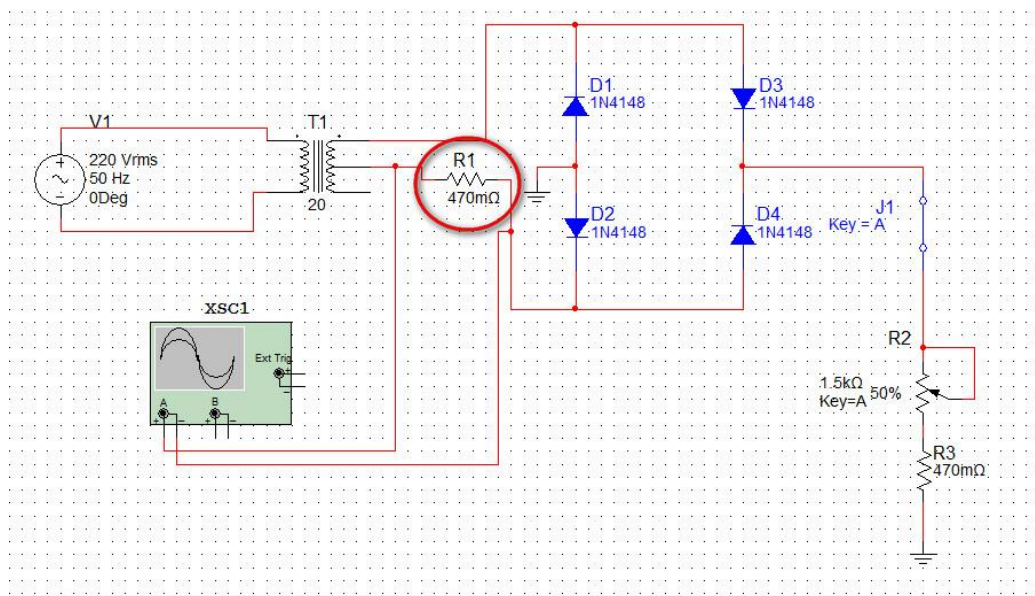


Рисунок 2.9 – Схема під'єднання осцилографа до резистора з відомим значенням опору

Осцилограми струмів на діодах при активному та ємнісно-активному навантаженнях наведені на рис.2.10 та рис.2.11.

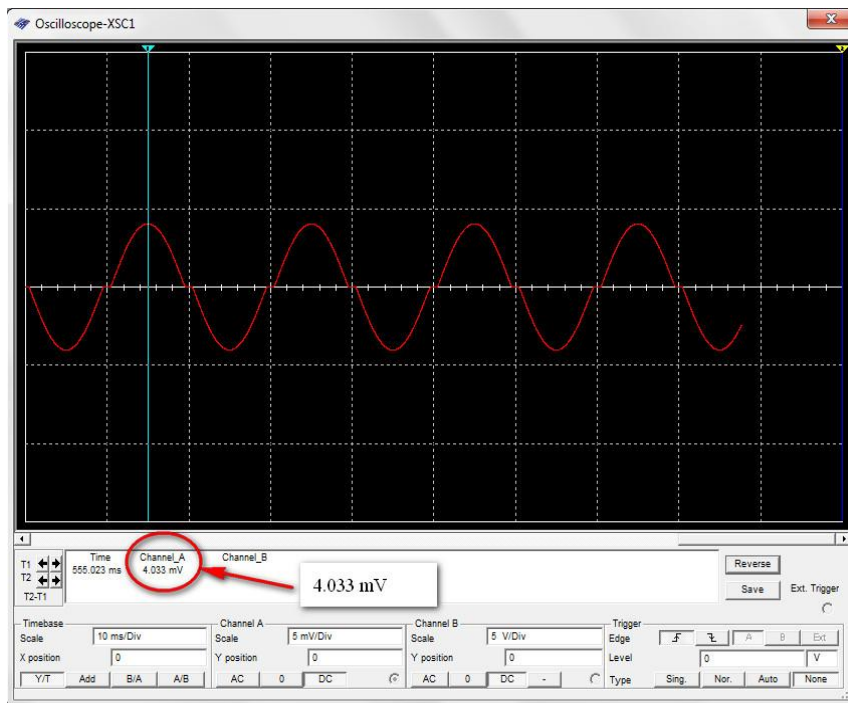


Рисунок 2.10 – Осцилограма струму на діодах при активному навантаженні

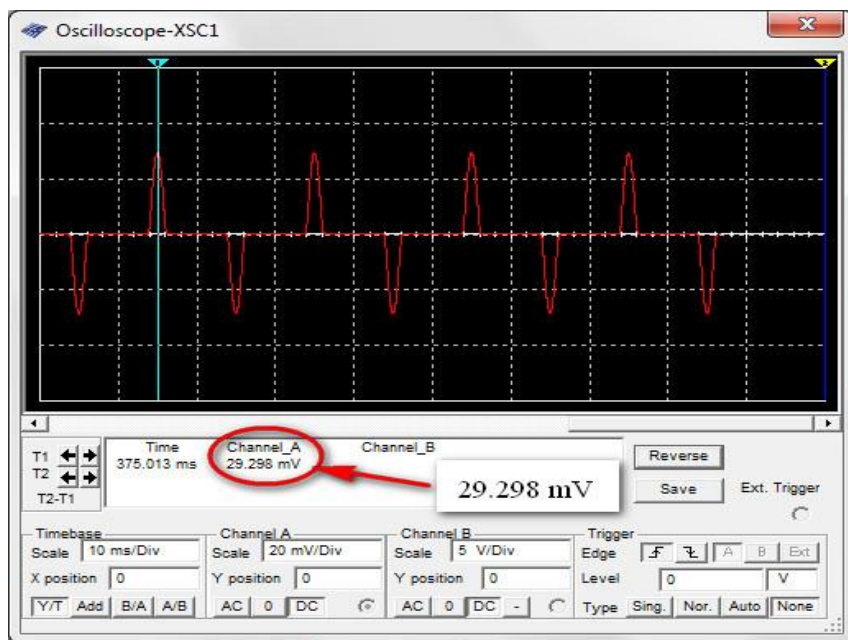


Рисунок 2.11 – Осцилограма струмів при ємнісно-активному навантаженні

### Індуктивно-активне навантаження

Щоб отримати індуктивно-активне навантаження послідовно з резистором під'єднуємо котушку індуктивністю L1 400 мГн (рис.2.12).

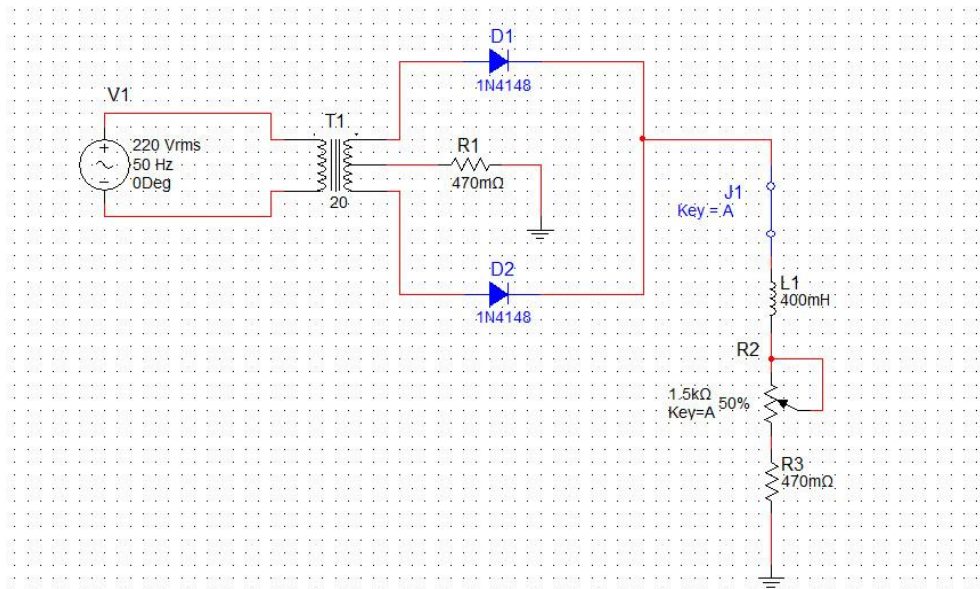


Рисунок 2.12 – Схема випрямляча з індуктивно-активним фільтром

Для інших випрямлячів під'єднання індуктивності L1 та дослідження виконуються аналогічно з попередніми.

Зовнішня характеристика випрямляча знімається за допомогою вольтметра та амперметра, які під'єднані до навантаження (рис.2.13).

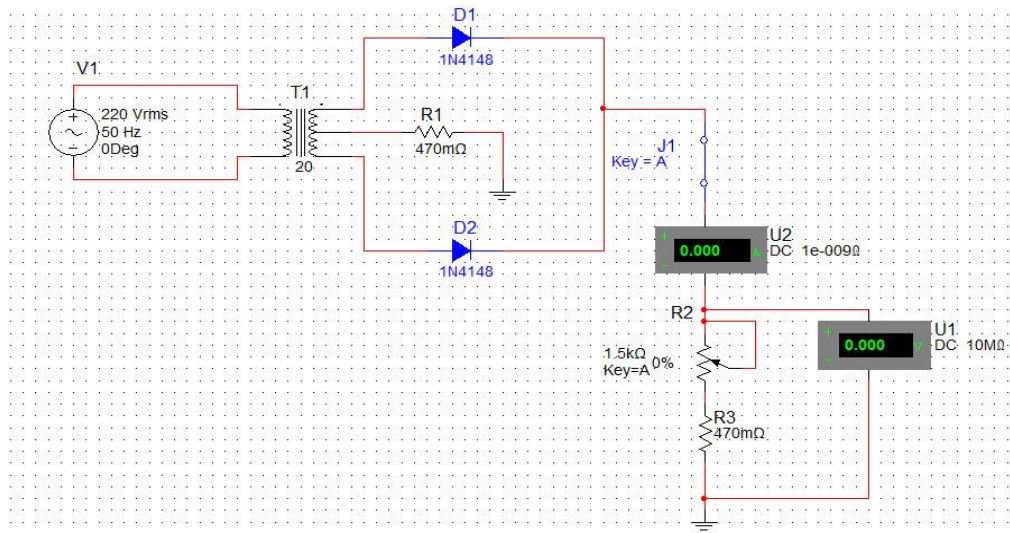


Рисунок 2.13 – Схема підключення приладів для зняття зовнішньої характеристики

Зовнішню характеристику  $U_n = f(I_n)$  знімають змінюючи значення опору резистора R2 та реєструючи показання вольтметра та амперметра. Графіки можна побудувати вручну, за допомогою пакету MathCad чи будь-яким іншим способом.

## 2.4. Контрольні запитання

1. Пояснити характер зовнішніх характеристик.
2. Що таке електрорушійна сила джерела живлення?
3. Яким вимогам повинні задовольняти діоди в схемах випрямлячів?
4. Пояснити залежність форми імпульсів струму у вторинній обмотці трансформатора від навантаження.
5. Чому виникають короткі імпульси струму через вентильний діод і від чого залежить їх тривалість?
6. Чим відрізняється однопериодна схема випрямляча від двохперіодної?
7. В чому полягають переваги мостової схеми?
8. Як розрахувати внутрішній опір випрямляча за зовнішніми характеристиками?



### 3. Лабораторна робота

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГЛАДЖУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ

##### 3.1. Мета та зміст роботи

**Мета:** ознайомитись із схемами згладжуючих фільтрів.

**Зміст роботи:** дослідити напруги та струми в різних типах згладжуючих фільтрів; дослідити залежність коефіцієнта пульсації від струму навантаження для різних фільтрів.

##### 3.2. Завдання для самостійної підготовки

1. Познайомитися зі схемою робочого місця. Накреслити мостову схему випрямляча з ємнісним та індуктивним фільтрами зі спрощеним зображенням опору навантаження та вимірювальних приладів, вказавши положення перемикача SA3.

2. Визначити, між якими контрольними точками схеми можна виміряти та спостерігати форму напруг на реактивних елементах фільтрів та навантаженні і форму струмів, що протікають через реактивні елементи фільтрів та навантаження. Розібратися де ці точки знаходяться на схемах.

4. Розробити методику розрахунку коефіцієнта пульсації вихідної напруги за допомогою осцилографа. Формулу для розрахунку і графічне пояснення коефіцієнта пульсації привести у звіті.

##### 3.3. Порядок виконання роботи

1. Для мостової схеми випрямляча при середньому активному навантаженні замалювати одна під одною в єдиному масштабі часу осцилограми напруг на навантаженні без фільтра і з ємнісним фільтром та осцилограми форми струмів, які протікають через діоди випрямляча, конденсатор фільтра та навантаження, вказавши на графіках всі значення величин.

2. Для мостової схеми випрямляча при середньому активному навантаженні замалювати одна під одною в єдиному масштабі часу осцилограми струму на навантаженні без фільтра і з індуктивним фільтром та осцилограми форми на-

пруги на виході випрямляча, дроселі фільтра та навантаженні, вказавши на графіках всі значення величин.

3. Розрахувати для мінімального, середнього та максимального навантаження коефіцієнти пульсації для ємнісного та індуктивного фільтра.

### Хід виконання роботи

Зібрати мостову схему однофазного двотактного випрямляча без фільтра (рис.3.1).

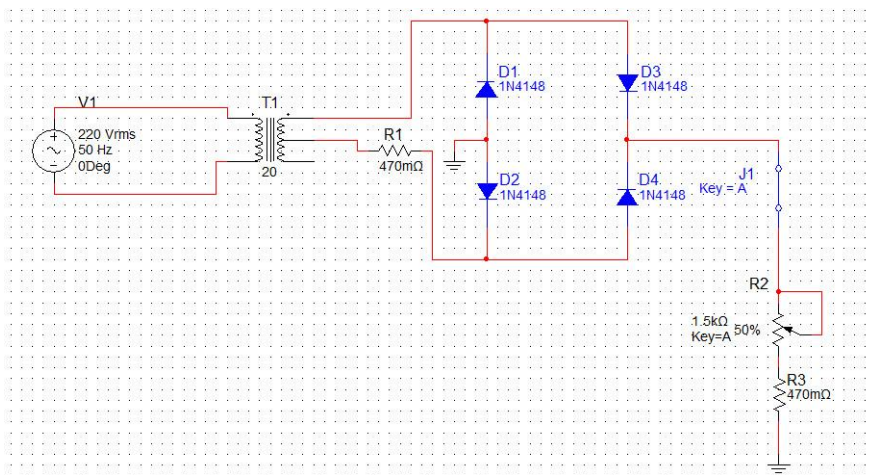


Рисунок 3.1 – Мостова схема випрямляча

Осцилограма напруги на активному навантаженні та її значення приведені на рис.3.2.

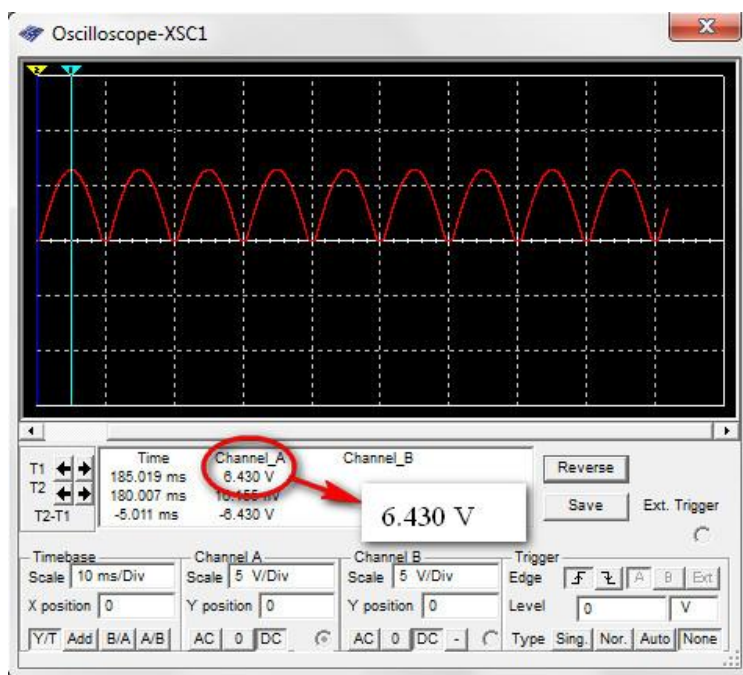


Рисунок 3.2 – Осцилограма напруги на навантаженні для мостової схеми

Під'єднати ємнісний фільтр. Для цього потрібно поставити конденсатор C1 ємністю від 2 до 10 мкФ паралельно опору навантаження (рис.3.3).

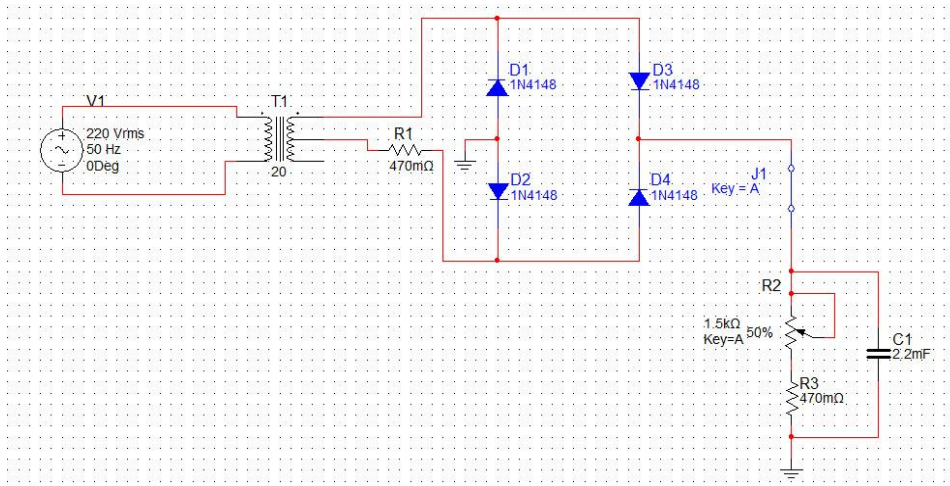


Рисунок 3.3 – Мостова схема з ємнісним фільтром

Осцилограма напруги на навантаженні з підключеним ємнісним фільтром наведена на рис.3.4.

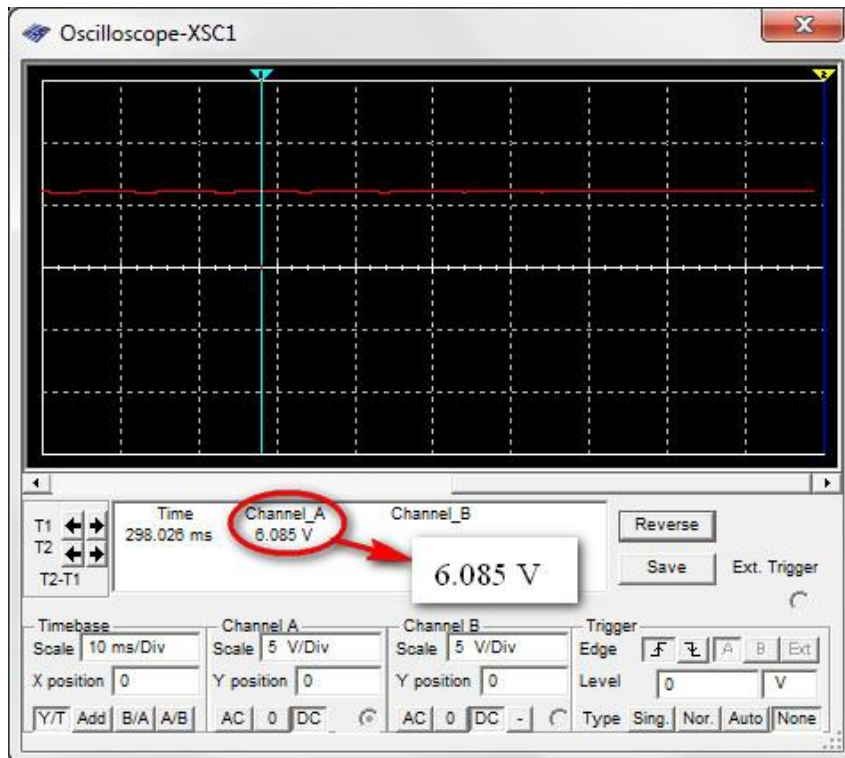


Рисунок 3.4 – Осцилограма напруги на навантаженні з підключеним ємнісним фільтром

Для дослідження пульсацій напруги (рис.3.5) на навантаженні необхідно

встановити закритий вхід на осцилографі (режим «АС»).

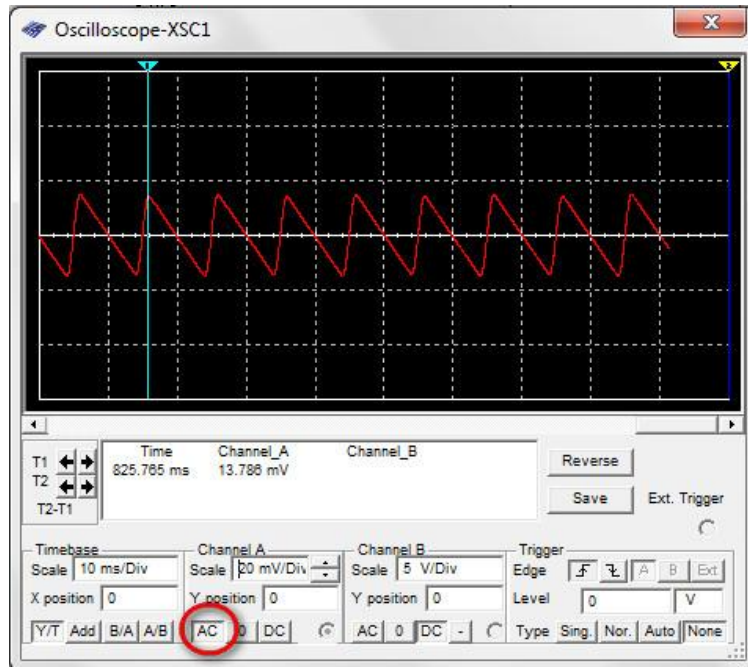


Рисунок 3.5 – Форма пульсацій вихідної напруги на ємнісному навантаженні

Осцилограми струмів (рис.3.6), які протікають через діоди випрямляча, зняти аналогічно до попередньої роботи.

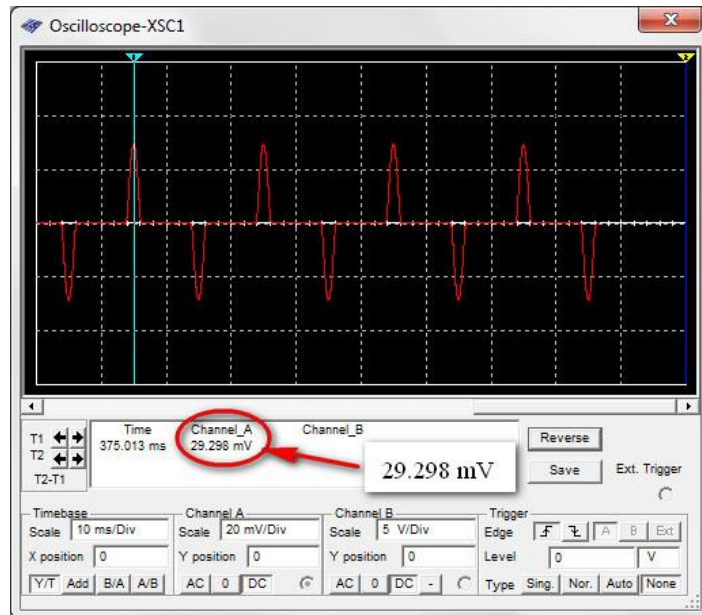


Рисунок 3.6 – Осцилограма струмів випрямних діодів

Для зняття осцилограми струму, який протікає через конденсатор фільтра, необхідно підключити послідовно з C1 резистор R4 опором 0,47 Ом (рис.3.7).

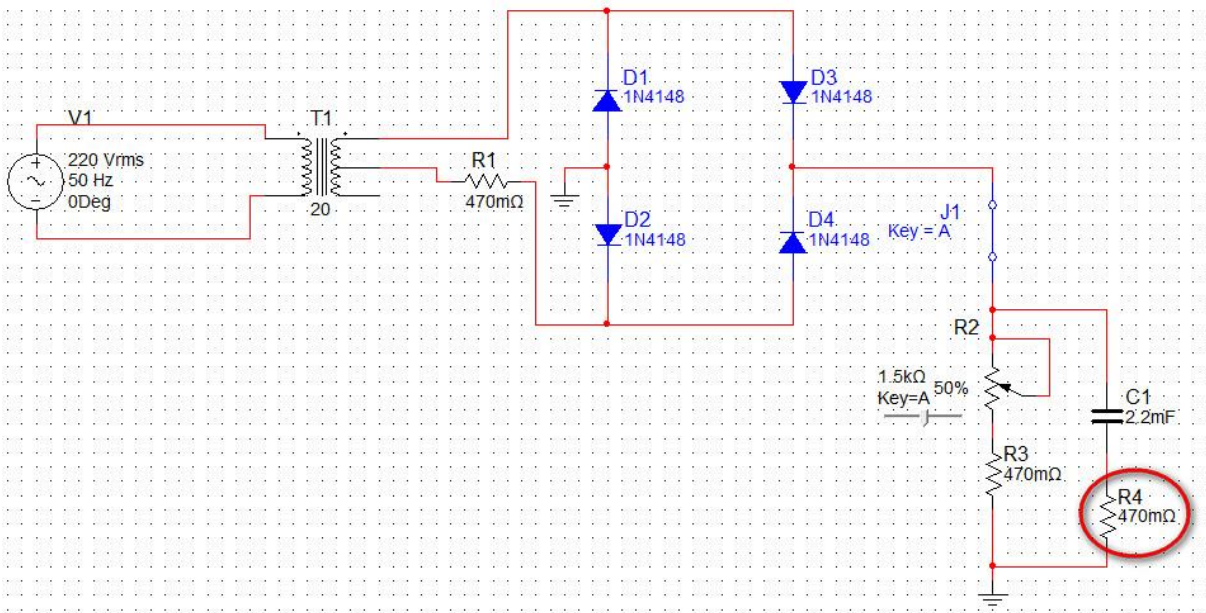


Рисунок 3.7 – До дослідження струму, щор протікає через конденсатор C1

Розглянути осцилограму напруги на R4 (рис.3.8). Вона по формі буде повторювати струм, який протікає через конденсатор.

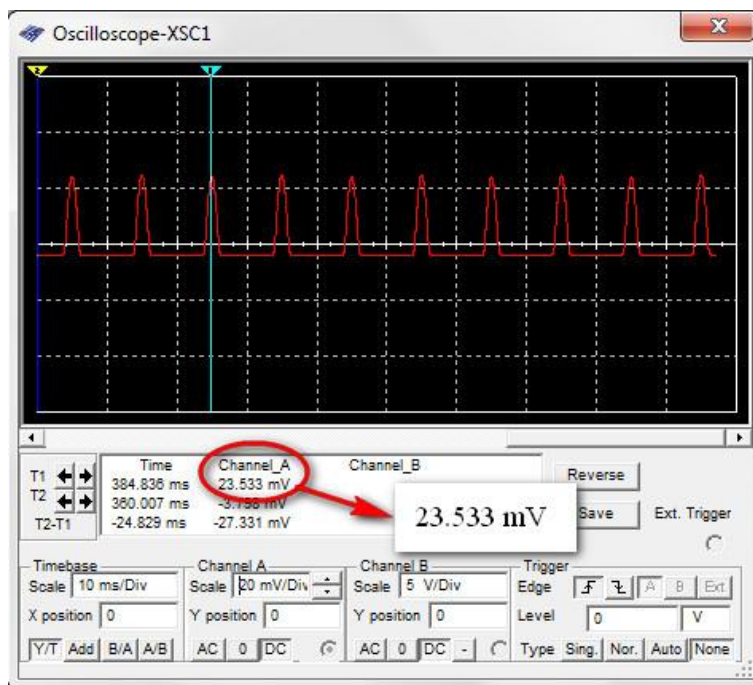


Рисунок 3.8 – Осцилограма струму, що протікає через конденсатор C1

Під'єднати осцилограф до резистора R3 та зняти осцилограму струму, який протікає через навантаження (рис.3.9).

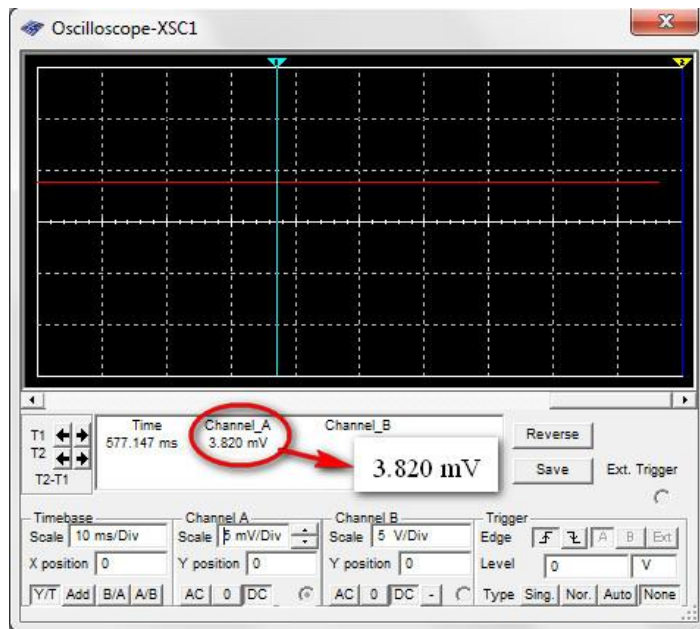


Рисунок 3.9 – Осцилограма струму, що протікає через навантаження

Провести аналогічні вимірювання для інших схем випрямлячів.

### Індуктивно-активне навантаження

Зібрати схему двофазної однокатної схеми (рис 2.16) та при середньому значенні (50%) активного навантаження зняти осцилограму струму навантаження. Осцилограма напруги на резисторі R3 (рис.3.10) за формою аналогічна струму, що протікає через навантаження.

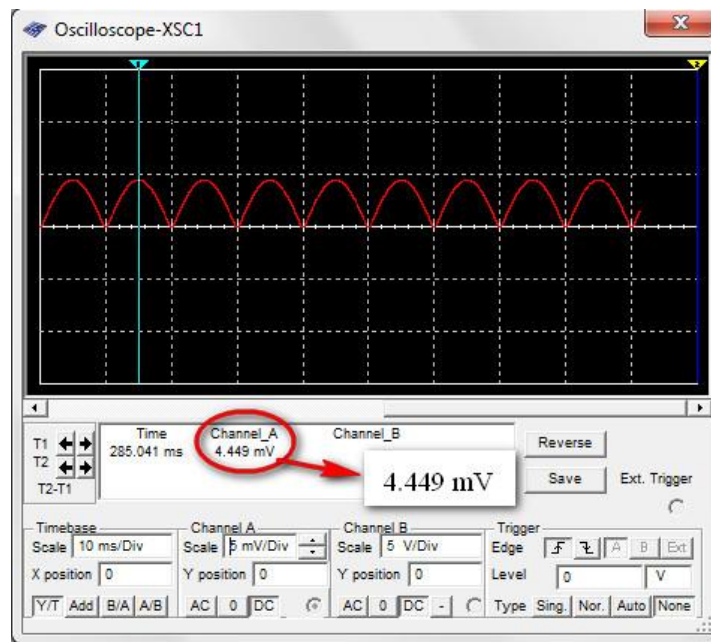


Рисунок 3.10 – Осцилограма струму на резисторі R3 без фільтра

Для одержання індуктивно-активного навантаження послідовно з наван-

таженням під'єднати дросель L1, який має номінальне значення індуктивності 10 Гн (рис.3.11).

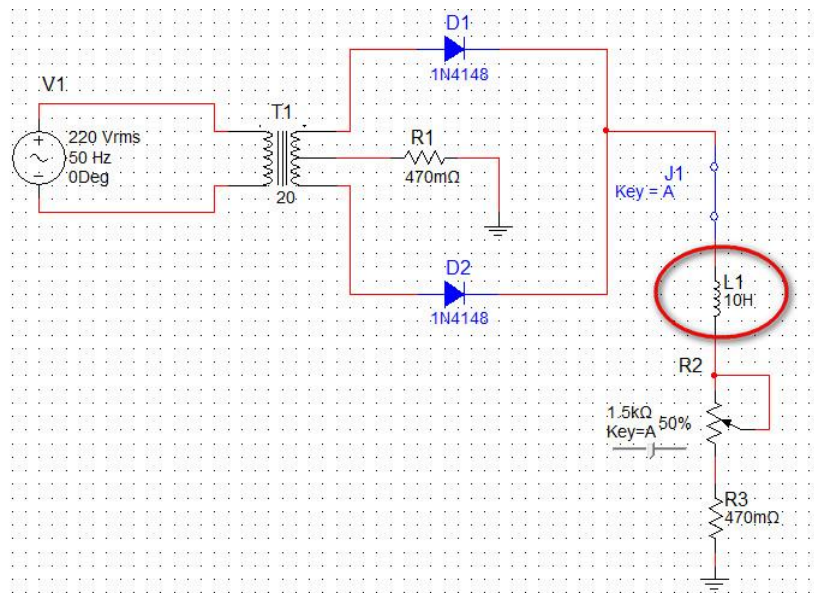


Рисунок 3.11 – Схема ввімкнення індуктивного фільтра в схему випрямляча

Осцилограма струму, що протікає через навантаження приведена на рис.3.12.

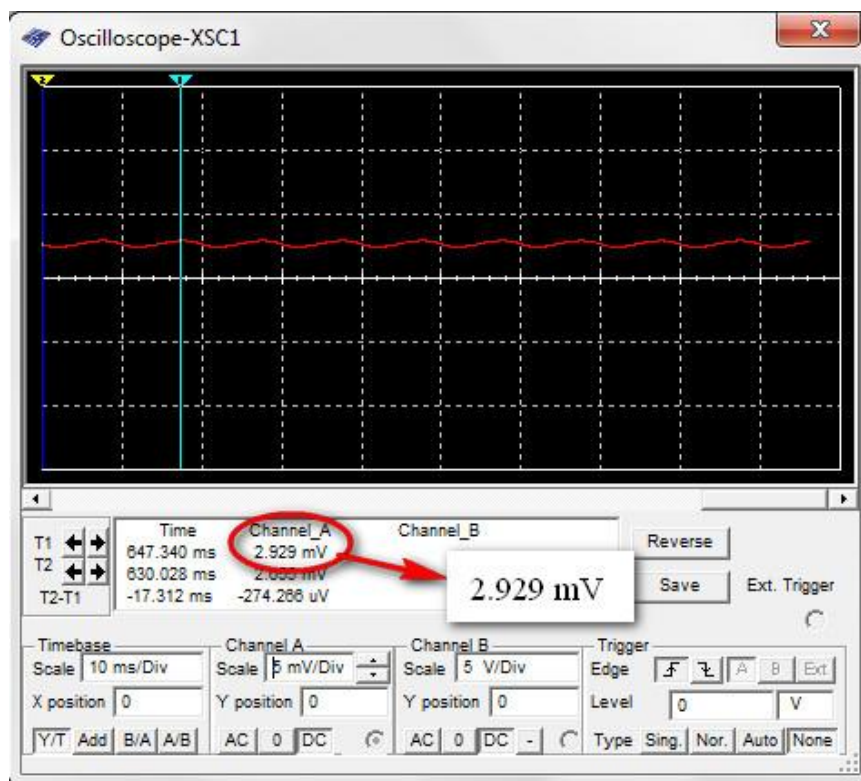


Рисунок 3.12 – Осцилограма струму на навантаженні

Зняти осцилограму напруги на навантаженні (рис.3.13).

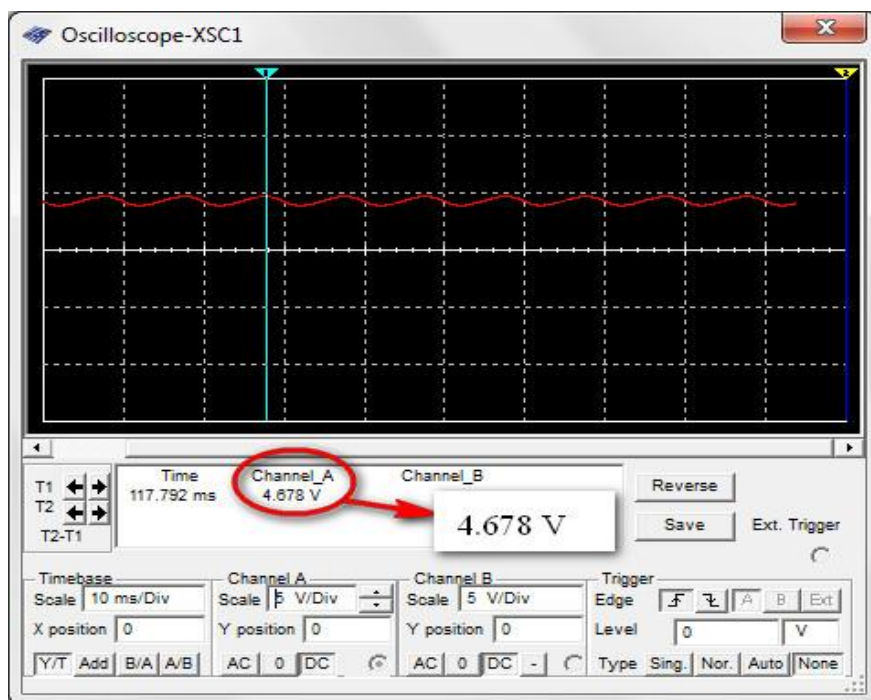


Рисунок 3.13 – Осцилограма напруги на виході випрямляча

Аналогічним чином дослідити інші схеми випрямлячів.

### Розрахунок коефіцієнтів пульсації

Коефіцієнт пульсацій – це відношення амплітуди найбільш різко вираженої гармонійної складової напруги чи струму на виході випрямляча до середнього значення напруги чи струму. Він знаходиться за формулою:

$$K_{\text{пульс}} = \frac{U_{\text{гармсклад}}}{U_{\text{вих}}}$$

Розрізняють коефіцієнт пульсації на вході та на виході фільтра.

Розглянемо розрахунок коефіцієнта пульсації для мінімального, середнього та максимального навантаження на прикладі двофазної одноктної схеми випрямляча (рис.3.14).

Визначити коефіцієнт пульсацій на вході індуктивного фільтра для середнього навантаження. Для цього використати схему, зображену на рис.3.14 та поставити повзунок змінного навантаження R2 в середнє положення (50%).



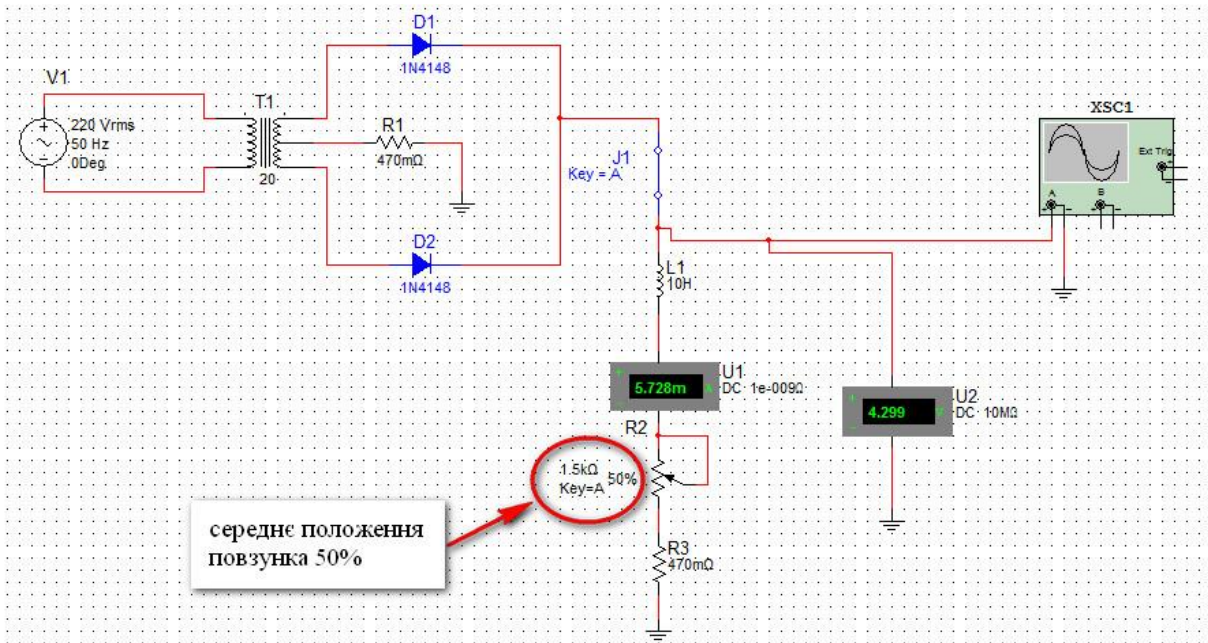


Рисунок 3.14 – Схема для знаходження коефіцієнта пульсації на вході фільтра

Значення амплітуди найбільш різко вираженої гармонійної складової напруги знаходимо за осцилограмою (рис.3.15).

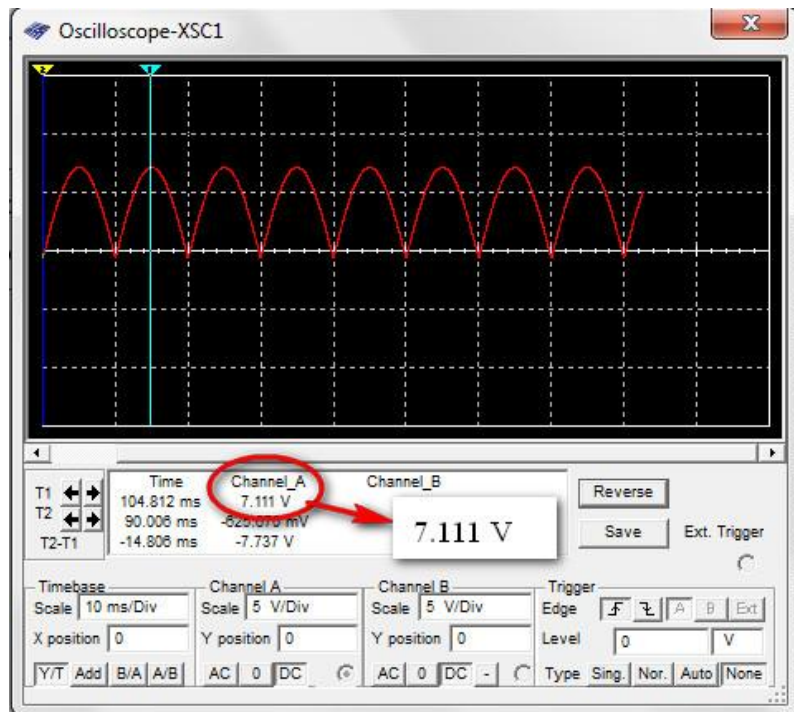


Рисунок 3.15 – Осцилограма амплітуди найбільш вираженої гармонійної складової напруги

Величину середнього значення напруги зняти за показами вольтметра під'єданого паралельно з навантаженням (рис.3.16).

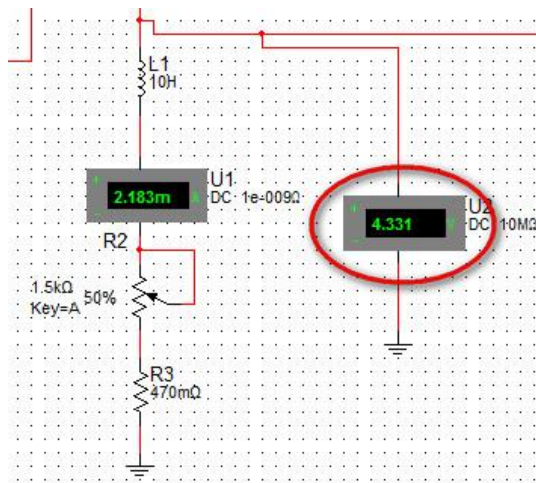


Рисунок 3.16 – Значення напруги на навантаженні

Визначити коефіцієнт пульсації на вході схеми, пам'ятаючи, що вольтметр показує діюче значення, а осцилограф амплітудне. Розрахувати коефіцієнт пульсації для інших значень навантаження (10% та 90%).

Для знаходження коефіцієнту пульсації на виході фільтра зібрати схему зображену на рис.3.17.

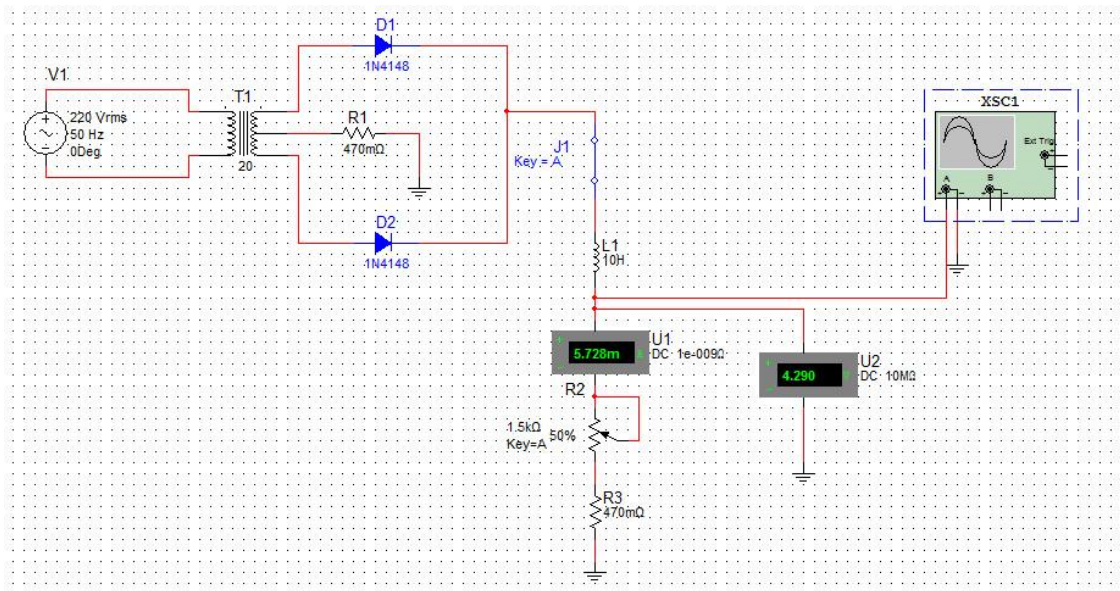


Рисунок 3.17 – Підключення приладів для знаходження коефіцієнта пульсації вихідної напруги

Підключити закритий вхід осцилограф до навантаження та розглянути осцилограму, з допомогою якої знайти значення амплітуди найбільш різко вираженої гармонійної складової напруги (рис.3.18).

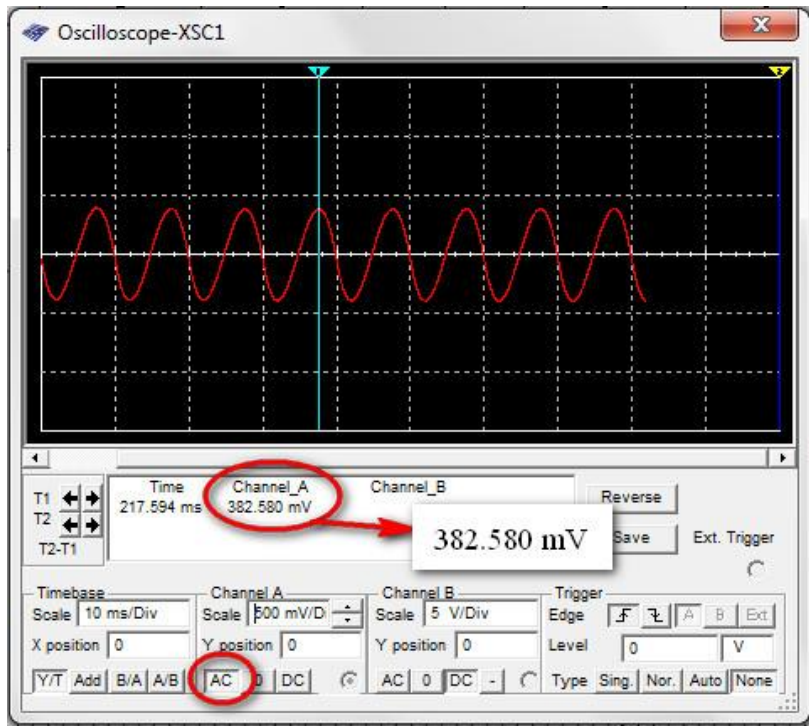


Рисунок 3.18 – Осцилограма амплітуди гармонійної складової напруги

Вольтметр вимірює середнє значення випрямленої напруги (рис.3.19).

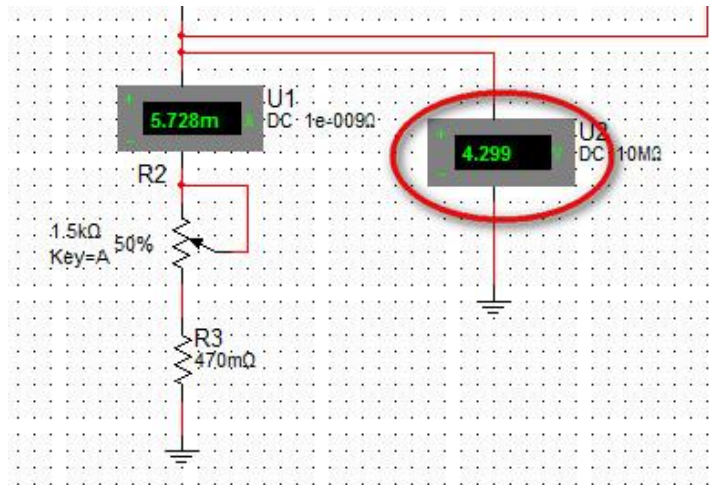


Рисунок 3.19 – Значення напруги на навантаженні

Знайти коефіцієнт пульсації на виході фільтра  $K_{пульс} = \frac{U_{гармсклад}}{U_{вих}}$ , беручи

до уваги що  $U_{гармсклад} = 2 \cdot U_{амплітудне}$

Аналогічно знайти коефіцієнти пульсації на вході та виході випрямляча з підключеним ємнісним фільтром.

### 3.4. Контрольні запитання

1. Як визначається коефіцієнт фільтрації і що він характеризує?
2. Яким вимогам повинен відповідати згладжувальний фільтр?
3. Пояснити роботу ємнісного фільтра.
4. Пояснити роботу індуктивного фільтра.
5. Яку максимальну напругу на навантаженні можна отримати при ємнісному фільтрі? Порівняти її з напругою вторинної обмотки трансформатора.
6. Яку максимальну напругу на навантаженні можна отримати при індуктивному фільтрі? Порівняти її з напругою вторинної обмотки трансформатора.
7. Як залежить коефіцієнт згладжування пульсацій від струму навантаження для ємнісного фільтра?
8. Як залежить коефіцієнт згладжування пульсацій від струму навантаження для індуктивного фільтра?
9. Чому при збільшенні навантаження коефіцієнт пульсації при ємнісному фільтрі збільшується, а при індуктивному – зменшується?

## 4. Лабораторна робота

### ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

#### 4.1. Мета та зміст роботи

**Мета роботи:** ознайомитися зі схемами параметричних та компенсаційних стабілізаторів постійної напруги.

**Зміст роботи:** дослідити залежність вихідної напруги параметричного стабілізатора від зміни вхідної напруги; дослідити залежність вихідної напруги компенсаційного стабілізатора від зміни вхідної напруги та навантаження; порівняти коефіцієнти пульсації напруги на вході та виході компенсаційного стабілізатора; розрахувати ККД компенсаційного стабілізатора.

#### 4.2. Завдання для самостійної підготовки

1. Накреслити структурну схему обладнання робочого місця та ознайомитися зі схемою лабораторного макета.

2. Накреслити схему параметричного стабілізатора із ємнісним фільтром на вході та вказати контрольні точки, між якими виконуються необхідні вимірювання.

3. Накреслити схему компенсаційного стабілізатора із ємнісним фільтром на вході та спрощеним зображенням опору навантаження і вимірювальних приладів із зазначенням контрольних точок для виконання необхідних вимірювань.

4. Розробити методику розрахунку ККД компенсаційного стабілізатора та привести вираз для його розрахунку.

Необхідно:

1. При зміні напруг електричної мережі на  $-20\% \dots +10\%$  від номінального її значення зняти залежність вихідної напруги параметричного стабілізатора від зміни вхідної і побудувати графік.

2. При середньому активному навантаженні зняти залежність вихідної напруги компенсаційного стабілізатора від зміни вхідної і побудувати графік. Для цього напругу мережі змінювати в межах  $-20\% \dots +10\%$  від номінального її значення.

3. Зняти зовнішню характеристику компенсаційного стабілізатора при номінальному значенні напруги електричної мережі.

4. Для максимального навантаження при номінальному значенні напруги електричної мережі розрахувати коефіцієнти пульсації на вході та виході компенсаційного стабілізатора.

5. Для максимального навантаження і при збільшеному на 10% значенні номінальної напруги розрахувати ККД компенсаційного стабілізатора та визначити потужність, що розсіюється на регулювальному транзисторі.

### **4.3. Порядок виконання роботи**

1. Зібрати у програмному пакеті Multisim схему параметричного стабілізатора із ємнісним фільтром на вході.

2. Зібрати схему компенсаційного стабілізатора із ємнісним фільтром на вході та спрощеним опором навантаження.

3. Змінюючи напругу джерела живлення від  $-20\%$  до  $+10\%$  номінального її значення зняти залежність вихідної напруги параметричного стабілізатора від зміни вхідної і побудувати графік.

4. При середній величині активного навантаження зняти залежність вихідної напруги компенсаційного стабілізатора від зміни значення вхідної напруги. Побудувати її графік. Для цього напругу мережі змінного струму змінювати в межах від  $-20\%$  до  $+10\%$  від номінального її значення.

5. Зняти зовнішню характеристику компенсаційного стабілізатора для номінального значення напруги електричної мережі.

6. Для максимального навантаження для номінального значення напруги електричної мережі розрахувати коефіцієнти пульсації на вході і виході компенсаційного стабілізатора.

7. Для максимального навантаження і збільшеному на 10% значенні номінальної напруги розрахувати коефіцієнт корисної дії компенсаційного стабілізатора та визначити потужність, що розсіюється на регулювальному транзисторі.

Для виконання роботи в Multisim необхідно:

1. Зібрати схеми параметричного (рис.4.1) та компенсаційного (рис.4.2) стабілізаторів.

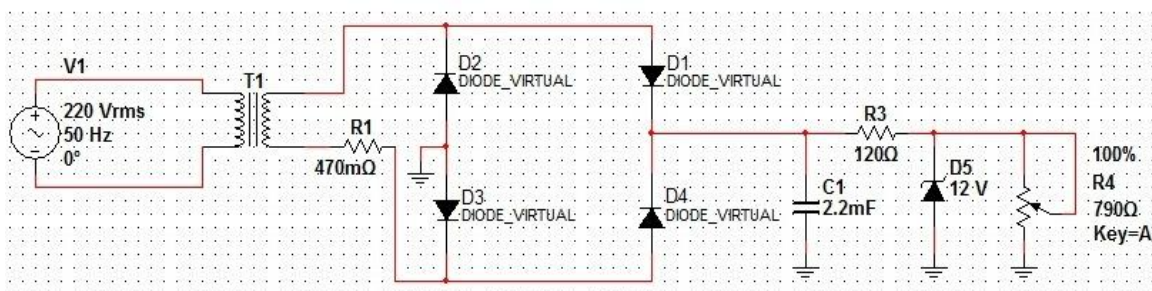


Рисунок 4.1 – Схема параметричного стабілізатора.

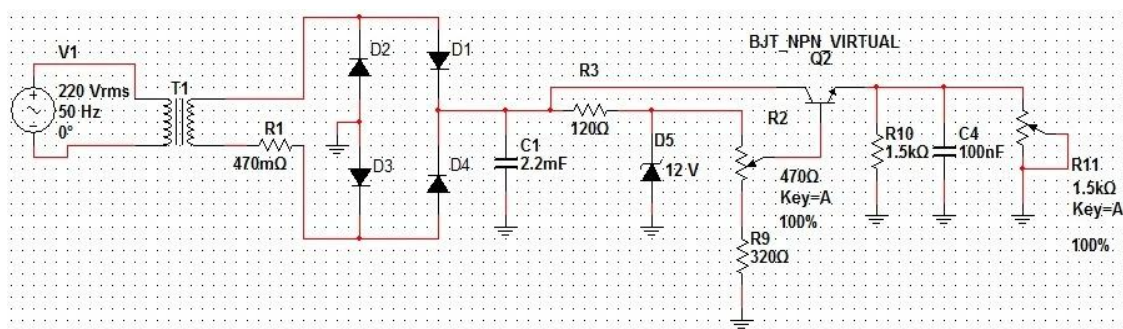


Рисунок 4.2 – Схема компенсаційного стабілізатора

2. Зняти залежність вихідної напруги параметричного та компенсаційного стабілізаторів від зміни вхідної в діапазоні  $-20\% \dots +10\%$  від номінального її значення (проводиться у вікні параметрів для цього джерела). Для вимірювання вихідної напруги використати осцилограф. Схема його підключення до параметричного стабілізатора наведена на рис.4.3, а до компенсаційного – на рис.4.4.

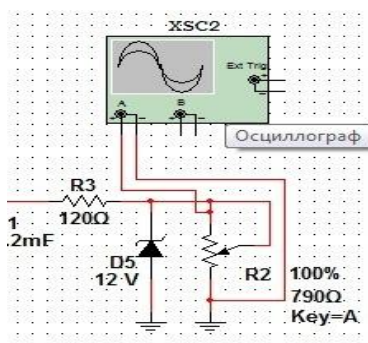


Рисунок 4.3 – Схема підключення осциллографа до навантаження

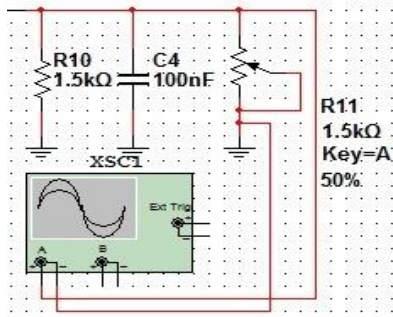


Рисунок 4.4 – Схема підключення осцилографа до навантаження компенсаційного стабілізатора

Процес устанавлення вихідної напруги параметричного та компенсаційного стабілізаторів показано на рис.4.5 та рис.4.6.

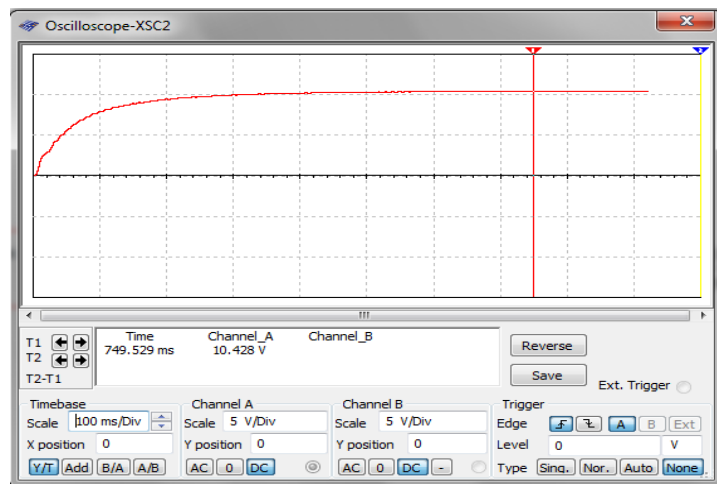


Рисунок 4.5 – Зміна вихідної напруги параметричного стабілізатора після ввімкнення при номінальному значенні вхідної напруги

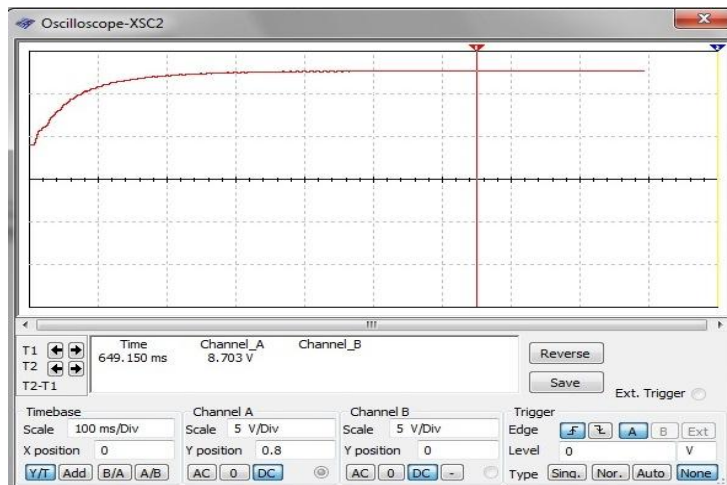


Рисунок 4.6 – Зміна вихідної напруги компенсаційного стабілізатора при номінальному значенні вхідної напруги та середньому активному навантаженні



3. Зняти зовнішню характеристику компенсаційного стабілізатора. Для цього необхідно підключити до навантаження вольтметр та амперметр (рис.4.7).

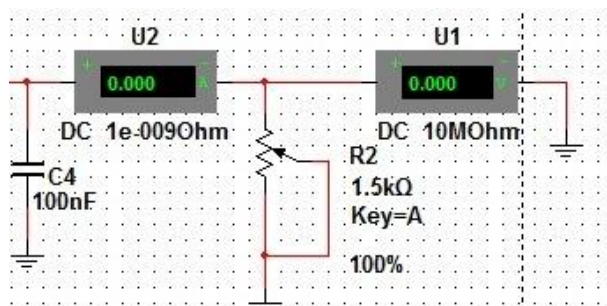


Рисунок 4.7 – Схема підключення приладів для зняття зовнішньої характеристики

4. Для розрахунку коефіцієнти пульсації необхідно за допомогою осцилографа виміряти величину пульсацій на вході та виході компенсаційного стабілізатора (режим осцилографа «АС»).

5. Для розрахунку ККД та потужності використати амперметри та вольтметри, які під'єднати до входу та виходу компенсаційного стабілізатора.

При виконанні роботи бажано віртуальні елементи (діоди, стабілітрон та транзистор) замінити на реальні, які вибрати самостійно.

#### 4.4. Контрольні запитання

1. Привести методику розрахунку параметричного стабілізатора.
2. В чому полягає принцип роботи параметричного стабілізатора?
3. Вказати основний недолік компенсаційних стабілізаторів.
4. Пояснити принцип роботи схеми компенсаційного стабілізатора.
5. Як здійснюється захист джерела живлення від КЗ?
6. Від чого залежить ККД стабілізатора?
7. Привести методику розрахунку компенсаційних стабілізаторів.

## 5. Лабораторна робота

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ

#### 5.1. Мета і зміст роботи

**Мета роботи:** ознайомитися з роботою мостового інвертора та ШІМ-контролера зібраного на мікросхемі TL494.

**Зміст роботи:** дослідити роботу транзисторів інвертора в ключовому режимі, залежність випрямленої напруги від зміни напруги живлення та навантаження при вимкненому та увімкненому зворотному зв'язку, залежність ширини імпульсів керування транзисторами від зміни вхідної напруги та навантаження при увімкненому зворотному зв'язку.

#### 5.2. Завдання для самостійної підготовки

В макеті використовується блок живлення з перетворенням частоти (БЖПЧ), який побудований на базі ШІМ-контролера TL494. Це мостовий інвертор, який виконаний на транзисторах VT1...VT4. Він керується сигналами управління, що надходять з ШІМ-контролера. Схема БЖПЧ приведена на рис.5.1. Структурна схема контролера – на рис.5.2.

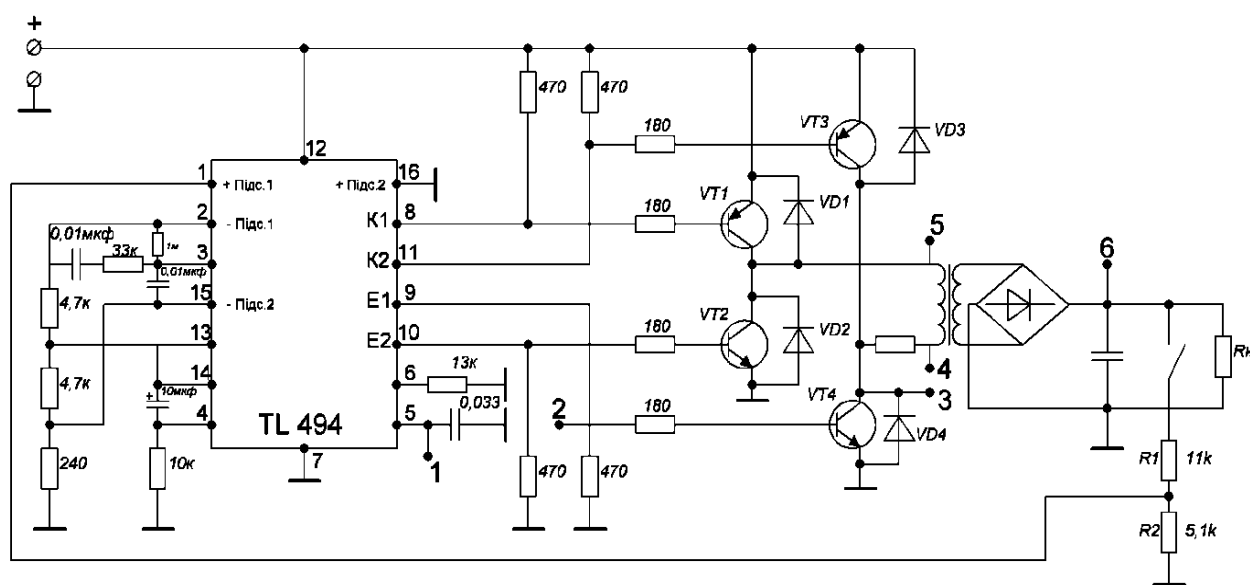


Рисунок 5.1 – Схема БЖПЧ

Живлення БЖПЧ здійснюється вихідною напругою регульованого стабілізованого джерела напруги, що використовується в лабораторній роботі «Дослідження стабілізаторів напруги», яке під'єднується до його входу перемикачем SA5 (див. рис.1.2).

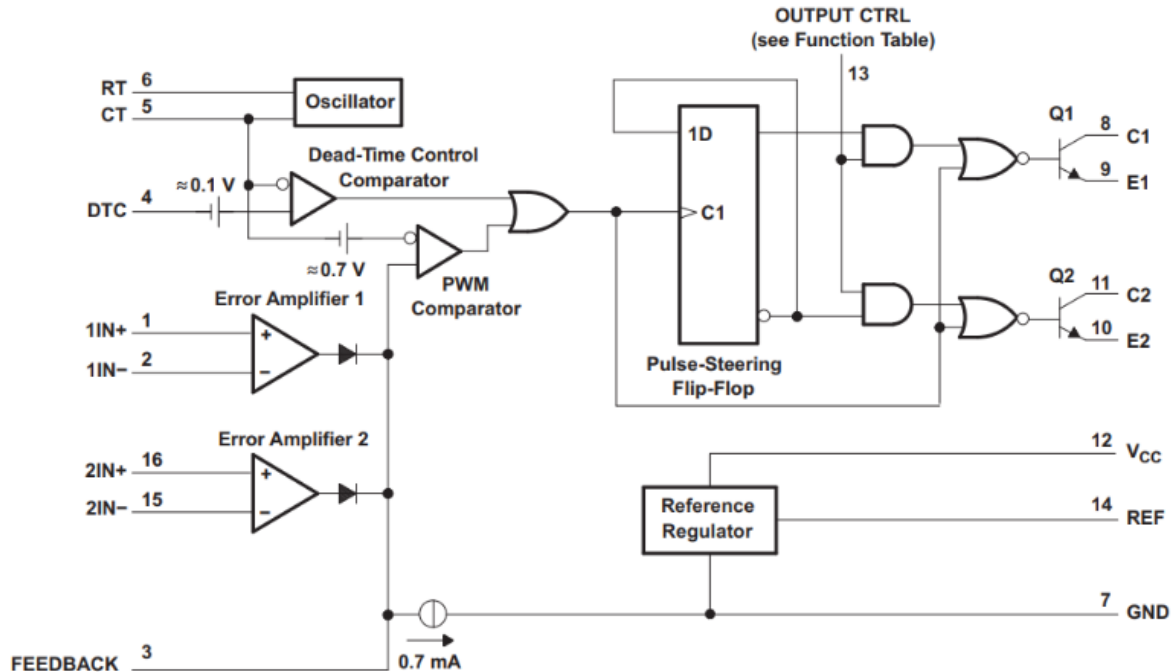


Рисунок 5.2 – Структурна схема мікросхеми TL494

Перед виконанням роботи необхідно:

1. Ознайомитися з внутрішньою структурою контролера імпульсних перетворювачів (мікросхема TL494). Розібратися з основними вузлами мікросхеми та їх призначенням.

2. Накреслити мостову схему інвертора з трансформатором, випрямлячем, фільтром, подільником зворотного зв'язку, навантаженням та показати підключення баз транзисторів мостової ключової схеми інвертора до вихідних транзисторів мікросхеми TL494.

### 5.3. Порядок виконання роботи

1. При роботі в режимі offline під'єднати необхідні прилади та вимкнути фізичний макет.

2. При максимальному значенні вхідної напруги та середньому значенні активного навантаження і вимкненому колі зворотного зв'язку (ЗЗ) розглянути

осцилограми напруг генератора (точка 1 правого блоку контрольних точок (ПБКТ)), напруги керування транзисторами інвертора (точка 2 ПБКТ), колекторної напруги (точка 3 ПБКТ), напруги первинної обмотки трансформатора (точки 4 та 5 ПБКТ), випрямленої напруги (точка 6 ПБКТ) та форми струмів первинної обмотки трансформатора (точки 3 та 4 ПБКТ).

3. При вимкненому колі ЗЗ зняти залежність випрямленої напруги від зміни вхідної напруги та зняти зовнішню характеристику БЖЧП. Вихідну напругу змінювати від 9 В до максимального значення.

4. Виконати завдання п.3 для ввімкненого кола зворотного зв'язку.

5. При мінімальному (але не в режимі холостого ходу) активному навантаженні і ввімкненому колі ЗЗ замалювати осцилограми керуючих імпульсів (точка 2 ПБКТ) при кількох значеннях вхідної напруги вибраному в інтервалі напруг від 9 В до максимального значення.

6. При максимальному значенні вхідної напруги та ввімкненому колі зворотного зв'язку замалювати осцилограми керуючих імпульсів (точка 2 ПБКТ) при мінімальному, максимальному та кількох проміжних значеннях навантаження.

При виконанні роботи в режимі online необхідно:

1. Ознайомитися зі схемою макету. Створити в середовищі Multisim віртуальну модель макету (рис.5.1) або використати файл зі схемою, який дається в дистанційному курсі «Електроживлення радіоелектронної апаратури» платформі дистанційного навчання «Сікорський» НТУУ КПІ (<https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=6395>) чи платформі Moodle МікроТік (<http://iot.kpi.ua/lms/course/view.php?id=37>). При самостійному створення макету для живлення БЖПЧ використати компенсаційний стабілізатор з регульованою вихідною напругою, який розглядався в роботі «Дослідження стабілізаторів напруги».

2. Виконати п.п.1...6 попереднього розділу на віртуальному макеті.

Для вивчення осцилограм (рис.5.3) напруг генератора (точка 1), напруги керування транзисторами інвертора (точка 2), колекторної напруги (точка 3) в

єдиному масштабі використати чотирьохканальний осцилограф, який підключається до відповідних точок. Щоб вибрати необхідний осцилограф, потрібно перейти за **Simulate** → **Instruments** → **Four Channel Oscilloscope**.

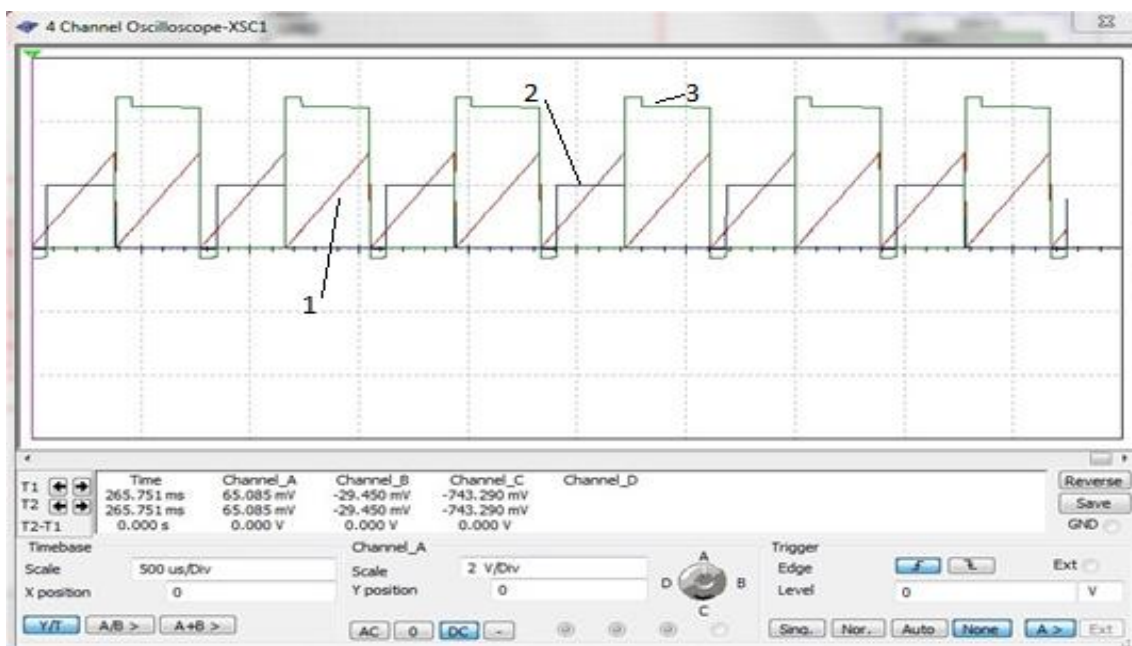


Рисунок 5.3 – Осцилограми напруг знятих з точок 1,2,3

Напряга первинної обмотки трансформатора (точки 4 та 5) (рис.5.4) та випрямлена напруга (точка 6) (рис.5.5) вимірюється осцилографом, який знаходиться за посиланням **Simulate** → **Instruments** → **Oscilloscope**.

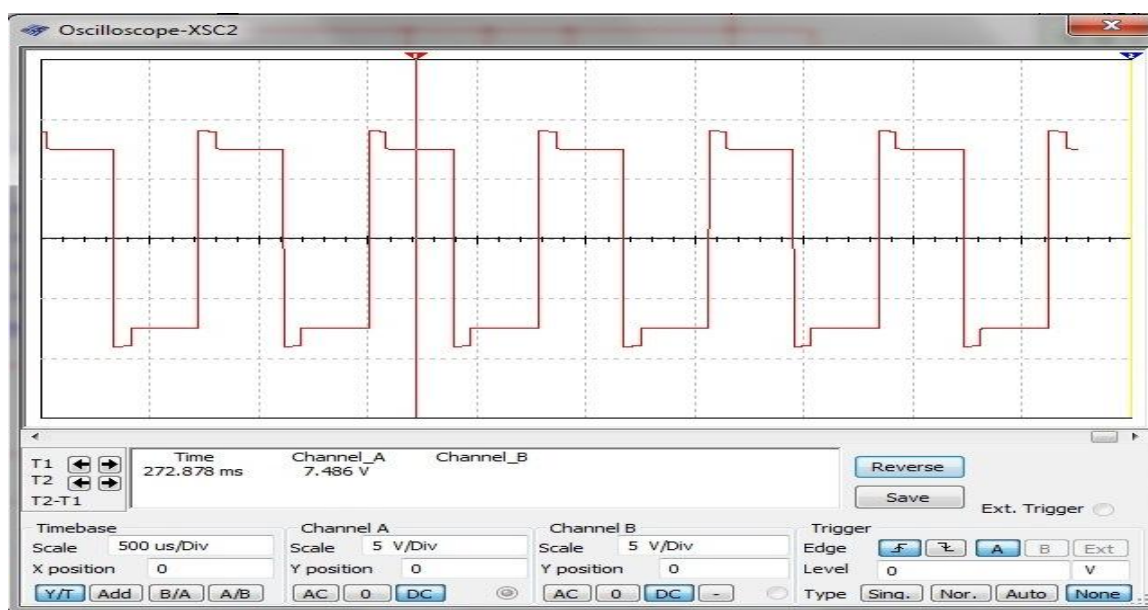


Рисунок 5.4 – Напряга первинної обмотки трансформатора

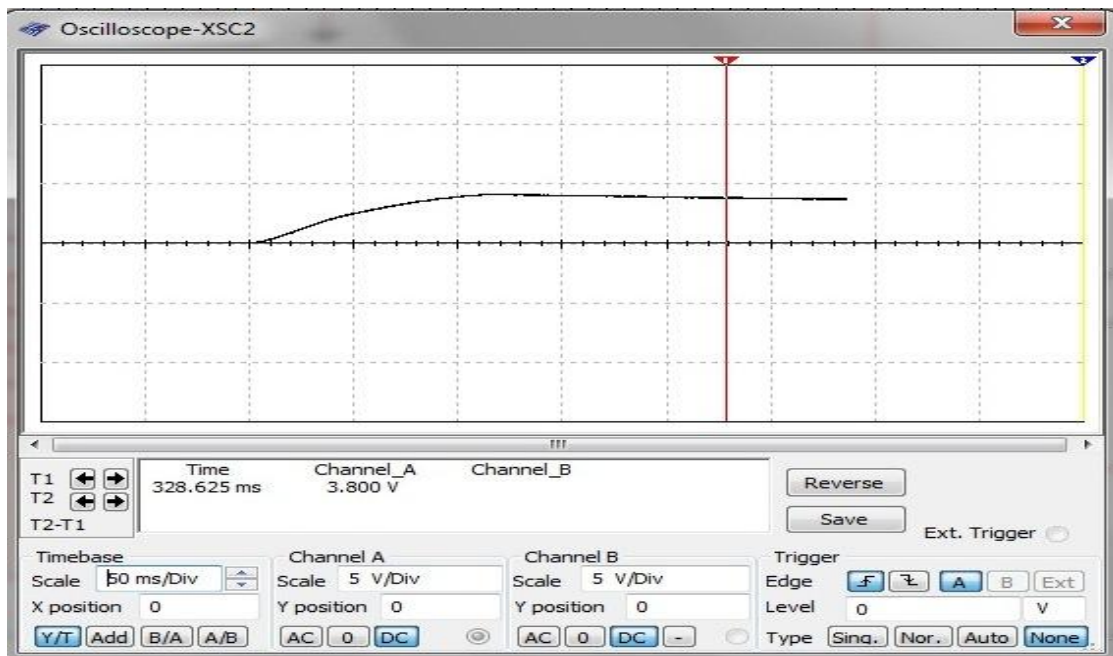


Рисунок 5.5 – Випрямлена напруга

Форму струму первинної обмотки трансформатора (рис.5.6) спостерігати за допомогою осцилографа, який під'єднати до точок 3 та 4.

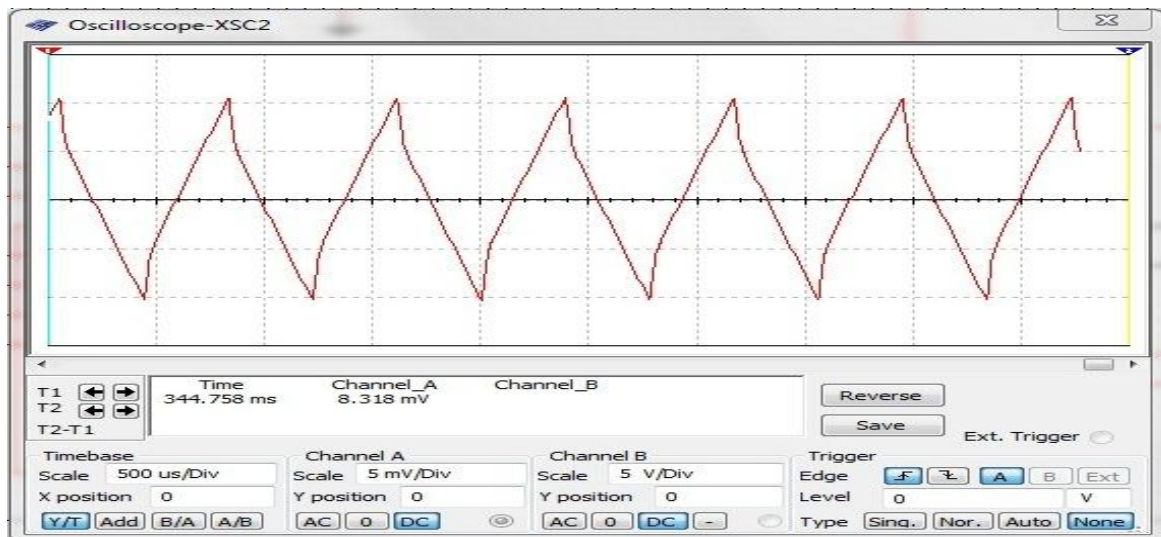


Рисунок 5.6 – Форма струму первинної обмотки трансформатора

Зняти залежність випрямленої напруги від вхідної. Для цього використати осцилограф, який для спостереження форми вихідної напруги підключити до активного навантаження.

Зовнішню характеристику БЖПЧ зняти за допомогою амперметра та вольтметра (рис.5.7).

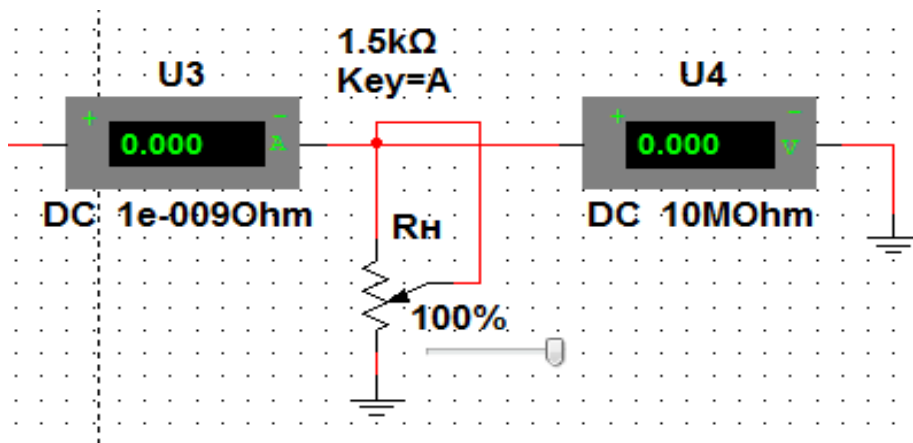


Рисунок 5.7 – Підключення амперметра і вольтметра

Виконати п.3, але для вимкненого кола зворотного зв'язку.

Розглянути осцилограми керуючих імпульсів в точці 2 (рис.5.8) за допомогою осцилографа при кількох значеннях вхідної напруги в межах (9...15 В). Осцилограма керуючих імпульсів при максимальній вхідній напрузі наведена на рис.5.8.

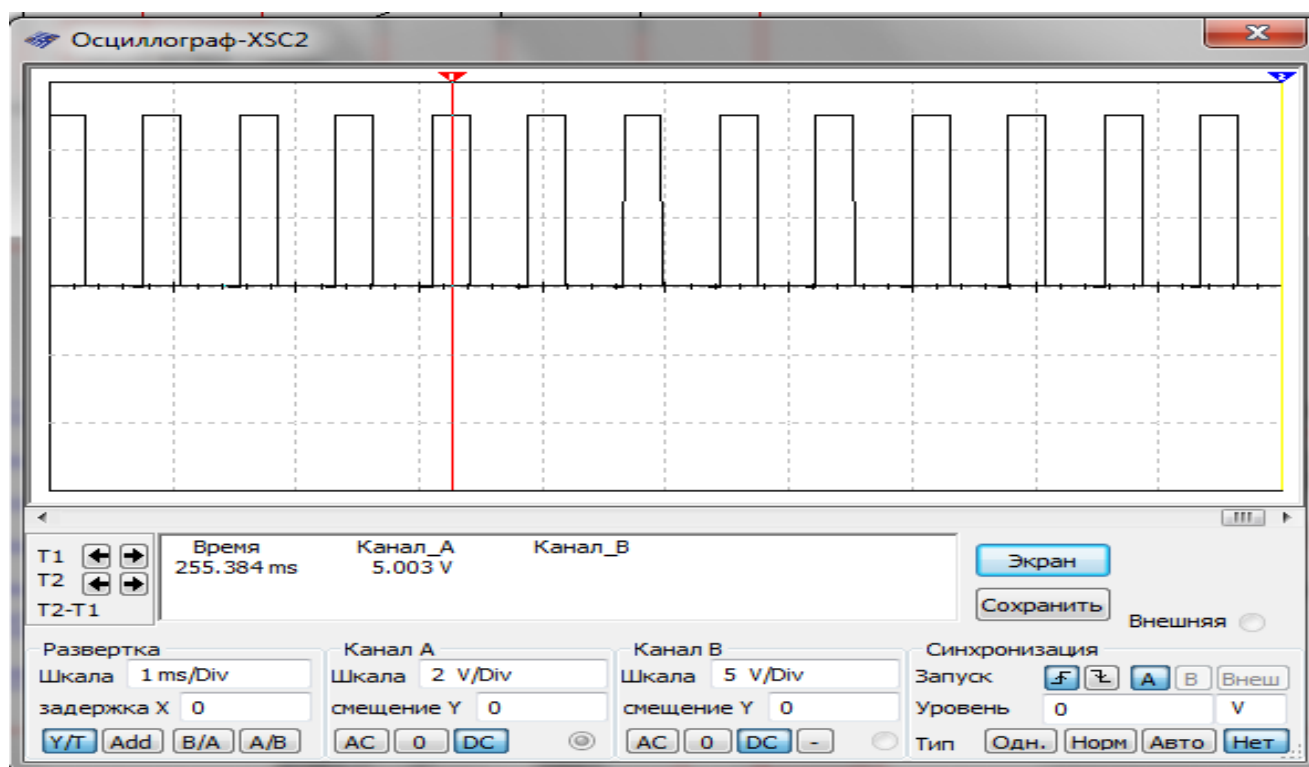


Рисунок 5.8 – Керуючі імпульси при максимальній вхідній напрузі

Для кількох значень навантаження та максимальній вхідній напрузі отримати осцилограми керуючих імпульсів в точці 2.

## 5.5. Контрольні запитання

1. Дати класифікацію джерел живлення з перетворенням напруги.
2. В чому полягає принцип роботи ШІМ контролера?
3. Наведіть осцилограми сигналів при роботі ШІМ контролера.
4. Пояснити принцип роботи мостових схем інверторів.
5. Як перетворити мостову схему інвертора в напівмостову?
6. Пояснити принцип роботи інверторів із відводом від середньої точки трансформатора і зовнішнім збудженням.
7. Що таке «мертва» зона в вихідному сигналі контролера і навіщо вона потрібна?
8. Як зняти зовнішню характеристику імпульсного джерела напруги?
9. Які типи драйверів можуть використовуватися в схемах інверторів?



## 6. Лабораторна робота

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

#### 6.1. Мета і зміст роботи

**Мета роботи:** ознайомитися з особливостями експлуатації сонячних панелей (СП).

**Зміст роботи:** дослідити залежність потужності СП від кліматичних умов, залежність потужності, яку віддає СП, від величини навантаження та отримати навички в розрахунку та забезпеченні режиму роботи СП в точці максимальної потужності.

#### 6.2. Опис лабораторного макету

При виконанні роботи використовуються дві сонячні панелі, встановлені на даху корпусу №17 (радіотехнічного факультету). Дивися рис.6.1. Дана робота виконується лише в режимі offline.



Рисунок 6.1 – Сонячні панелі на даху корпусу №17

Від СП в лабораторію електроживлення заведені дві пари силових та чотири пари сигнальних кабелів. Завдяки цьому створено два робочих місця, обладнаних двохканальними осцилографами, вольтметрами, змінними опорами навантаження, до яких підведені по одній парі силових та сигнальних кабелів.

Схема лабораторного макета для дослідження ефективності сонячних панелей приведена на рис.6.2.

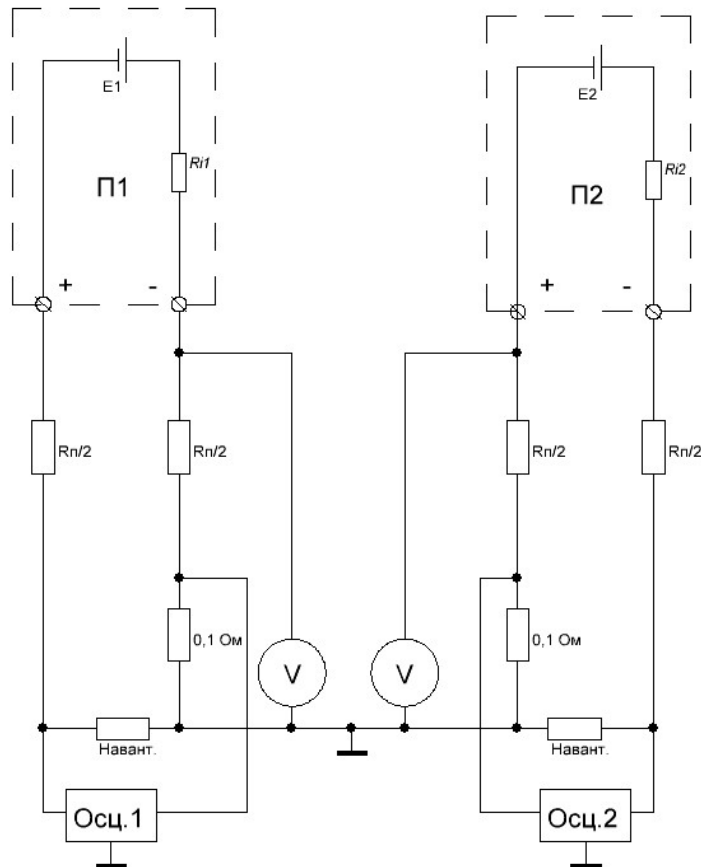


Рисунок 6.2 – Схема лабораторного макета ЛМ2

В лабораторному макеті використовуються полікристалічні сонячні панелі висотою 1640 мм, шириною 990 мм та потужністю 250 Вт, які мають наступні параметри:

Напруга холостого ходу	$U_{xx} = 37,2 \text{ В}$
Напруга максимальної потужності	$U_{mn} = 29,3 \text{ В}$
Струм короткого замикання	$I_{кз} = 8,3 \text{ А}$
Струм максимальної потужності	$I_{mn} = 7,8 \text{ А}$

### 6.3. Завдання для самостійної підготовки

1. Ознайомитися зі схемою макету та методикою вимірювання наступних параметрів:

- напруги холостого ходу,  $U_{xx}$ ;
- струму короткого замикання,  $I_{кз}$ ;

- опору силових кабелів,  $R_k$ ;
- внутрішнього опору СП,  $R_i$ ;
- потужності на навантаженні,  $P$ .

#### 6.4. Порядок виконання роботи

1. Закоротити силовий кабель шунтом, опір якого складає  $R_{ш}=0,1$  Ом. Виміряти на ньому падіння напруги  $U_{ш}$ . Струм  $I_{КЗ}$  визначити за формулою

$$I_{КЗ} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}}.$$

2. Виміряти напругу, що падає на одному провіднику силового кабеля  $U_k$ , та розрахувати опір кабеля

$$R_k = \frac{2U_k}{I_{КЗ}}.$$

3. На від'єднаному від навантаження силовому кабелі виміряти напругу холостого ходу  $U_{хх}$ .

4. Розрахувати внутрішній опір СП за формулою

$$R_i = (U_{хх} - (U_{ш} + 2U_k)) / I_{КЗ}.$$

5. Навантажити СП на  $R_n \approx R_i$  та отримати режим роботи СП в точці максимальної потужності.

6. Змінюючи опір навантаження  $R_n$  зняти характеристику  $P=f(R_n/R_i)$ .

#### 6.5. Контрольні запитання

1. Дати класифікацію сонячних електростанцій.
2. Пояснити залежність ефективності роботи сонячних панелей від температури.
3. Як забезпечити режим максимальної потужності сонячних панелей?
4. Як виміряти внутрішній опір сонячних панелей?
5. Дати рекомендації щодо підвищення ефективності роботи сонячних панелей.

## 7. Лабораторна робота

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРА ТА ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

#### 7.1. Мета і зміст роботи

**Мета роботи:** Ознайомлення з принципом роботи напівпровідникових тиристорів та їх зі структурою. Вивчити способи управління тиристорами, навчитися визначати їхні основні параметри.

**Зміст роботи:** дослідити вольт-амперні характеристики тиристора, роботу однофазного та трифазного тиристорного регулятора напруги.

#### 7.2. Короткі теоретичні відомості.

Тиристори – це перемикальні багатоперехідні структури, які використовуються в силовій електроніці і мають більше ніж три  $p-n$  переходи. Він має два стійких стани: закрито, коли через нього протікає малий струм, і відкрито – коли протікає значний струм.

Перевести тиристор у провідний стан можна, підключивши до однієї з його базових областей джерело струму в прямому включенні. Залежно від того база якого емітерного переходу буде керуючою, розрізняють триністори з керуванням по аноду і з керуванням по катоду. На рис.7.1, показане включення джерела керуючого струму в нижню базову тиристора, а на рис.7.2 підключення тиристора при різних схемах керування.

Для перемикальних діодів в віртуальній лабораторії Multisim можна задати тип тиристора та за допомогою діалогового вікна, скорегувати значення наступних параметрів переключаючи елементів:

Saturation current  $I_s$  [IS], A – зворотний максимальний струм динистора;

Peak Off-state Current  $I_{drm}$  [IDRM], A – зворотний максимальний струм тринистора;

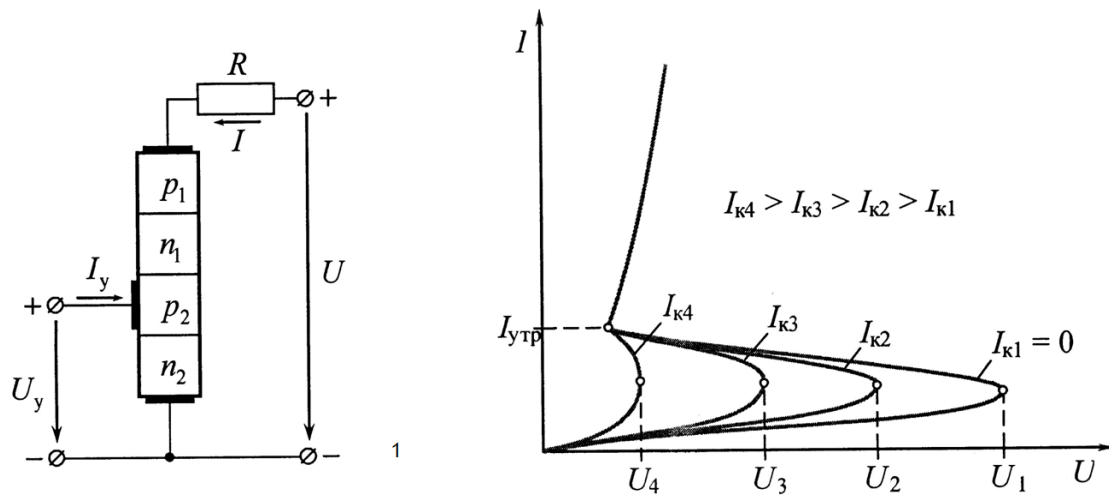


Рисунок 7.1 – Схема ввімкнення тиристора та його ВАХ

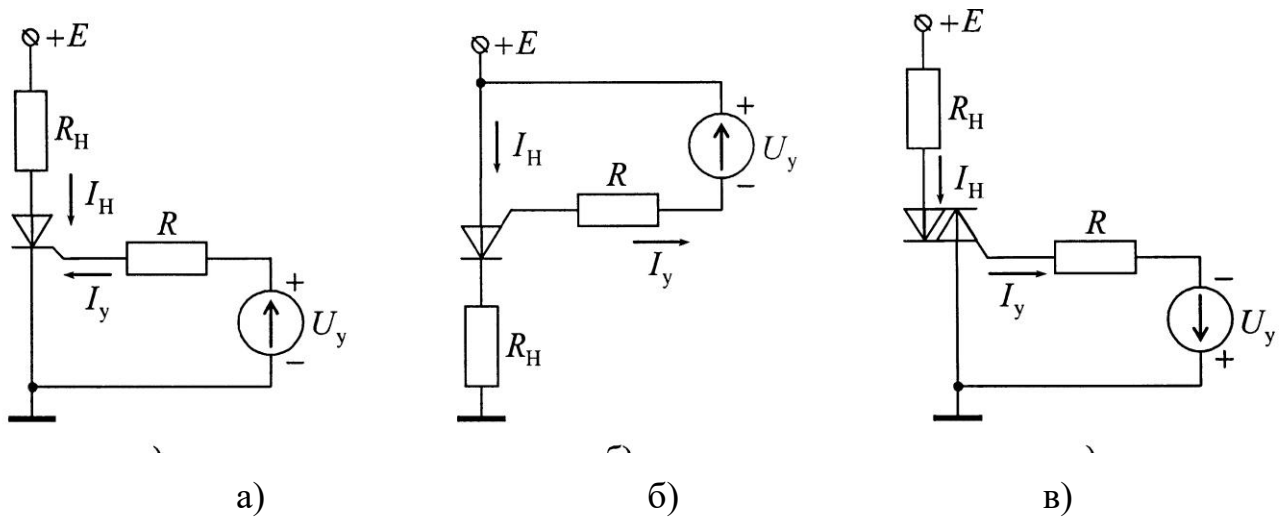


Рисунок 7.2 – Підключення джерел керування тиристорів

(керування за катодом – а; за анодом – б; та керування симістором – в)

Switching voltage  $V_s$  [VS], В – напруга, за якої динистор перемикається у відкритий стан, напруга включення ( $U_{вкл}$ );

Forward Breakover voltage  $V_{drm}$  [VDRM], В – напруга, за якої тринистор перемикається у відкритий стан, напруга включення ( $U_{вкл}$ );

Peak On-State Voltage  $V_{tm}$  [VTM], В – пряме падіння напруги у відкритому стані;

Forward Current at which  $V_{tm}$  is measured  $I_{trn}$  [ITM], А – максимально допустимий струм у відкритому стані;

Turn-off time  $T_g$  [TG], с – час перемикування в закритий стан;

Holding current  $I_h$  [IH], А – мінімальний струм у відкритому стані (якщо

він менше встановленого, то прилад переходить у закритий стан);

Critical rate of off-state voltage rise  $dv/dt$  [DV/DT], В/мкс – гранична швидкість наростання анодної напруги тринистора, при якому він залишається в закритому стані (при більшій швидкості тринистор відкривається);

Zero-bias junction capacitance  $C_j$  [CJO], Ф – бар'єрна ємність динистора при нульовій напрузі на переході;

Gate Trigger voltage  $V_{gt}$  [VGT], В – напруга на керуючому електроді відкритого тринистора, керуюча напруга включення;

Gate Trigger current  $I_{gt}$  [IGT], А – струм керуючого електрода, керуючий струм включення;

Voltage at which  $I_{gt}$  is measured  $V_d$  [VD], В – напруга на керування.

### 7.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму. Вибрати тиристор. Зібрати схему для дослідження ВАХ тиристора (рис.7.3). Установити задані параметри елементів схеми.

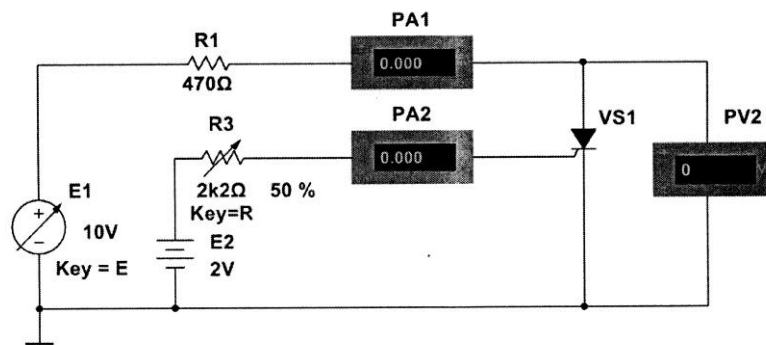


Рисунок 7.3 – Схема для дослідження характеристик тиристора

2. Ввімкнути схему. Змінюючи напругу джерела живлення  $E1$  зняти по точкам сімейство ВАХ тиристора  $I_{пр} = f(U_{пр})$  при різних струмах, що протікають через керуючий електрод  $I_k$  (0,95 мА, 0,97 мА та 1,0 мА). За приладом PV2 визначити напругу вмикання тиристора  $U_{вм}$ . Струм керування  $I_k$  регулювати за допомогою змінного резистора  $R3$ . Результати вимірювань записати в табл.7.1.

## Результати експериментальних досліджень ВАХ тиристора

$I_{k1} = 0,95 \text{ mA}, U_{BM1} = \text{ } \text{B}$							
$EI, \text{ B}$							
$U_{пр}, \text{ B}$							
$I_{пр}, \text{ mA}$							
$I_{k2} = 0,95 \text{ mA}, U_{BM2} = \text{ } \text{B}$							
$EI, \text{ B}$							
$U_{пр}, \text{ B}$							
$I_{пр}, \text{ mA}$							
$I_{k3} = 0,95 \text{ mA}, U_{BM3} = \text{ } \text{B}$							
$EI, \text{ B}$							
$U_{пр}, \text{ B}$							
$I_{пр}, \text{ mA}$							

3. За даними табл.1 побудувати сімейство ВАХ тиристора.

4. Зібрати схему для дослідження однофазного однопівперіодного керуваного джерела напруги (рис.7.4).

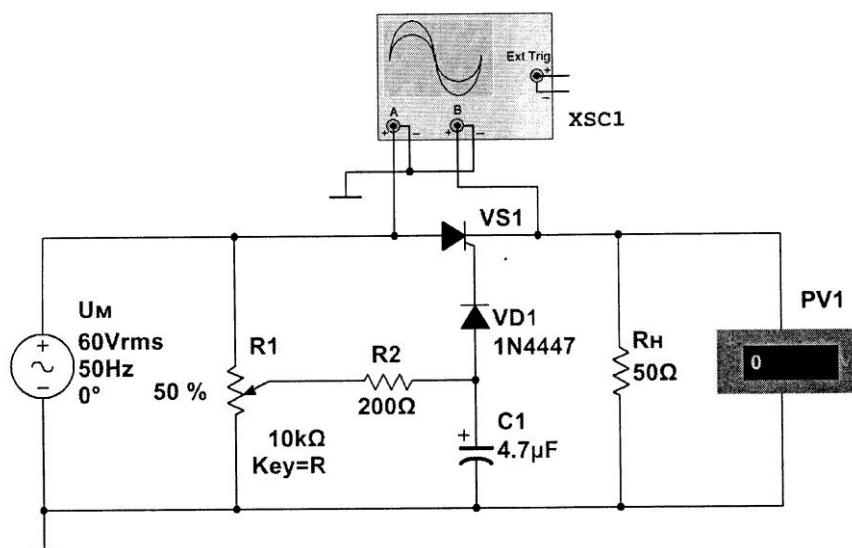


Рисунок 7.4 – Схема для дослідження однофазного регулятора напруги

5. Установити параметри елементів схеми відповідно до заданого варіанту (табл.7.2).

## Параметри схеми для дослідження

№ варіанту	Напруга $U_{\text{ВМ}}$ , В	Кут відсічки, $\alpha$ , град.	$R_2$ , Ом	$C$ , мкФ	$R_H$ , Ом
1	40	10	70	5,5	30
2	60	20	90	5,0	40
3	90	30	110	4,5	50
4	100	50	130	4,0	60
5	127	90	150	3,5	70
6	160	110	170	3,0	80
7	200	130	190	2,5	90
8	220	150	210	2,0	100
9	230	160	230	1,5	110
10	240	170	250	1,0	120

6. Включити схему та змінюючи опір резистора фазообертача дослідити зміну випрямленої напруги як функцію величини кута керування тиристором. Кут визначати за допомогою осцилографа (рис.7.5).

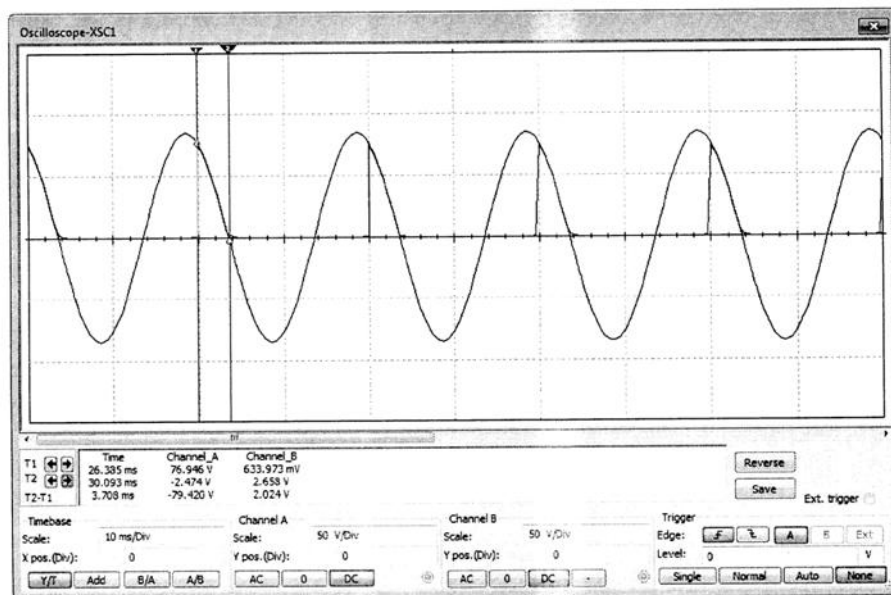


Рисунок 7.5 – Осцилограма напруг до визначення кута відсічки

7. Зібрати схему трьохфазного регулятора (рис.7.6). Впевнитися в його працездатності. Скан екрану приведено на рис.7.7. Навести осцилограми напруг.



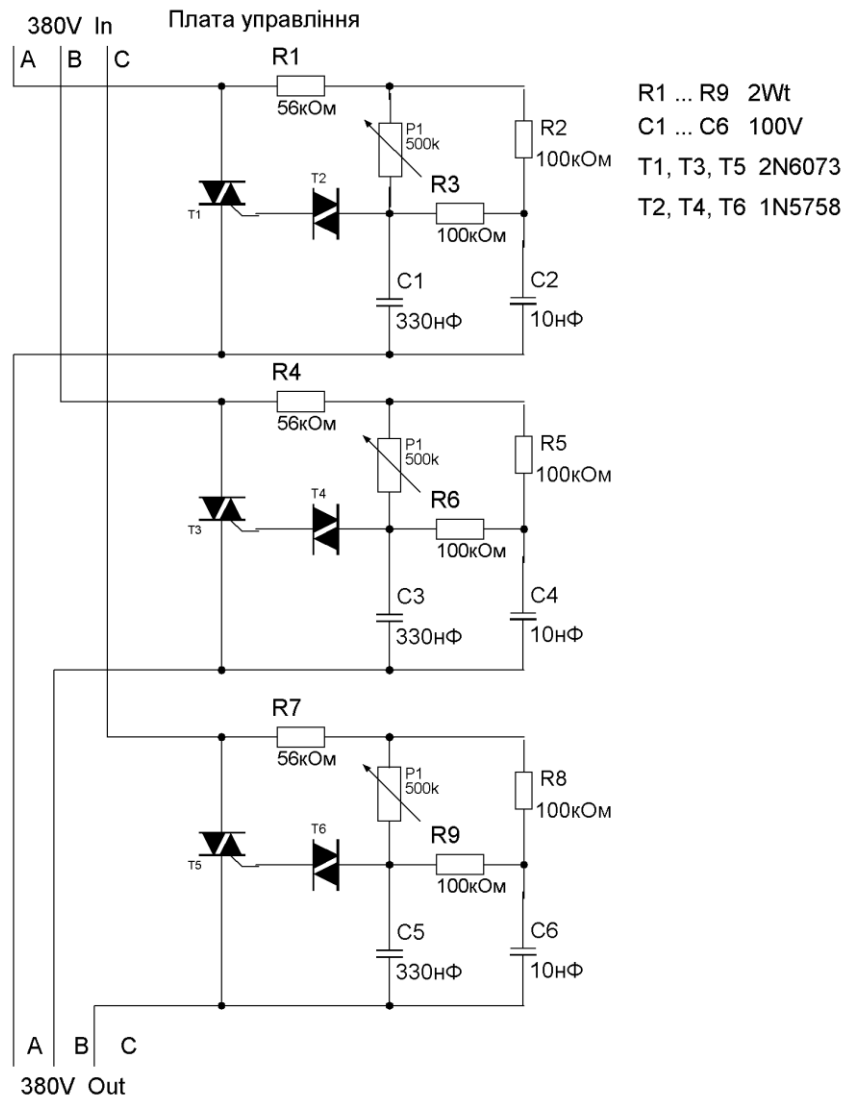


Рисунок 7.6 – Схема для дослідження трьохфазного регулятора напруги

Результатами виконання кожного з пунктів завдання є:

- схема досліджень з зображенням приладів контролю;
- епюри напруг на момент, що досліджуються;
- таблиці з результатами вимірювань;
- технічні висновки;
- графіки відповідно до завдань, виконані в одних осях координат з обов'язковою постановкою величин, в яких вимірювалися дані.

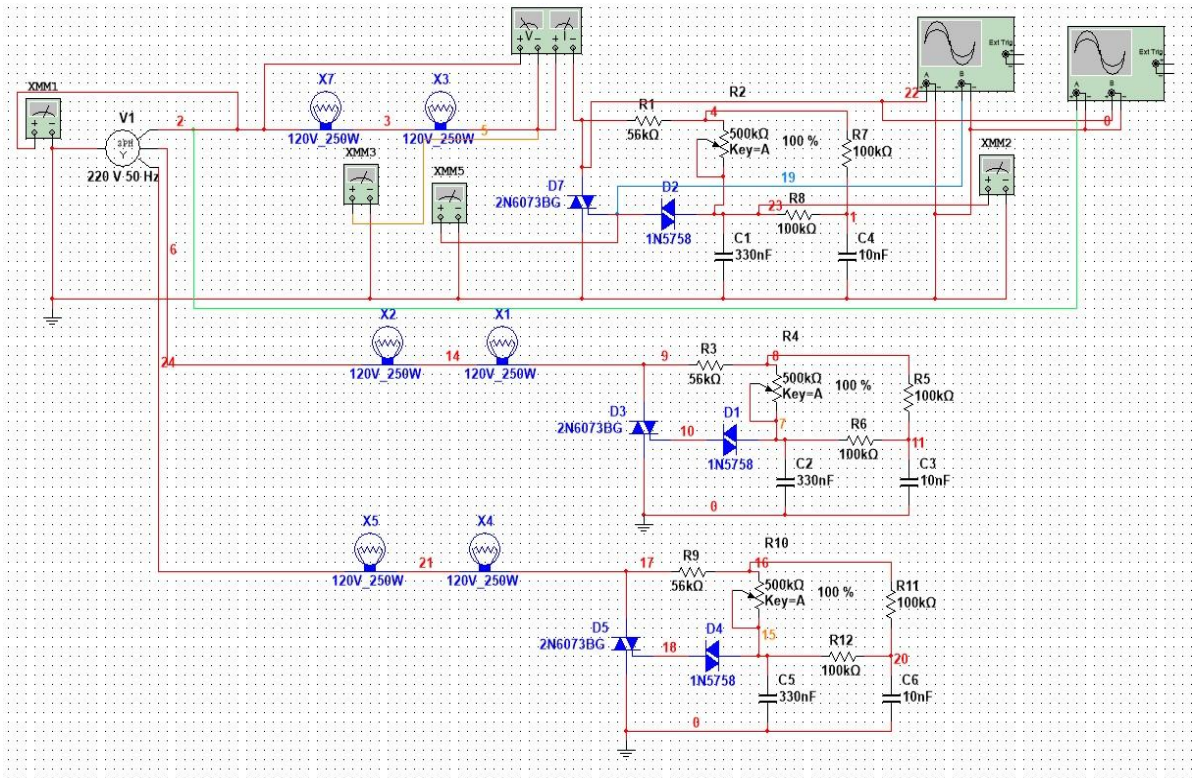


Рисунок 7.7 – Трифазний тиристорний регулятора напруги

Робота виконується лише на комп'ютері в віртуальній лабораторії Multisim.

#### 7.4. Контрольні питання

1. Поясніть будову і принцип роботи тиристора.
2. За якими ознаками класифікуються тиристори? Дати класифікацію.
3. Зобразіть вольт-амперну характеристику тиристора.
4. Чому при анодній напрузі від 0 до  $U_{\text{ввімк}}$  тиристор замкнений? Якої величини струм протікає при цьому через тиристор?
5. Як можна вимкнути тиристор?
6. Наведіть ВАХ динистора. У чому полягає відмінність динистора від діода?
7. Що таке симістор? Наведіть його ВАХ.
8. Наведіть експериментальну схему для вимірювання ВАХ тиристорів.
9. Які Ви знаєте способи управління відкриттям тиристорів на змінному струмі?

## 8. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Базова

1. Електроживлення радіоелектронної апаратури: Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / Уклад. О.М.Антонець, В.О.Дмитрук, В.О.Піддубний – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 27 с.

2. Зіньковський Ю.Ф., Коваль А.В. Комп'ютерне схемотехнічне моделювання елементів радіоелектроніки, підручник, Т2, – К. НТУ, 2013 – 376 с.

3. Вербицький Є.В. Системи електроживлення електронної апаратури. [Електронний ресурс]: Конспект лекцій – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 180 с. URL: [http://ela.kpi.ua/21710/Power\\_Supply\\_Systems.pdf](http://ela.kpi.ua/21710/Power_Supply_Systems.pdf)

4. Енергозабезпечення електронної апаратури. Практикум: Навч. посібник /В.В.Пілінський, М.В.Радіонова та ін. – К.: Вища школа, 1994. – 258 с.

Англомовні з російським перекладом

1. Браун Мартин. Источники питания. Расчет и конструирование / М. Браун: Пер. с англ. – К.; МК-Прес, 2007.–288 с., (рус).

2. Санджай Маниктала. Импульсные источники питания от А до Z / Маниктала Санджай: Пер. с англ. – К.: МК-Пресс, 2008. – 256 с., (рус).

### Допоміжна

1. Елементна база радіоелектронної апаратури: В 4 ч. Ч. 2. Напівпровідники та діоди [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 117 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41347/1/EBRA\\_2.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41347/1/EBRA_2.pdf)

2. Елементна база радіоелектронної апаратури: В 4 ч. Ч. 3. Багатоперехідні структури [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 134 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41348/1/EBRA\\_3.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41348/1/EBRA_3.pdf)

3. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник / За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
4. Електротехнічні пристрої радіоелектронних засобів: монографія / Є.О.Чемес, Ю.С.Ямпольський . – Одеса: Бахва, 2014. – 563 с.
5. Шпіка М. І. Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу: конспект лекцій / М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. – 82 с. URL: [http://eprints.kname.edu.ua/55278/1/2019%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%2080%D0%9B%20%D0%A1%D0%9F\\_2019.pdf](http://eprints.kname.edu.ua/55278/1/2019%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%2080%D0%9B%20%D0%A1%D0%9F_2019.pdf)
6. Електроніка та мікросхемотехніка. [Електронний ресурс]: навчальний посібник / А.А. Щерба, К.К. Побєдаш, В.А. Святненко: – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>.
7. Борисов О.В. Твердотільна електроніка / О.В.Борисов, Ю.І.Якименко – К.: БХВ – НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
8. М.Я. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. – Київ, 2020. – 248 с.