МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Напівпровідникові перетворювачі в сучасних електроприводах

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
які навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Київ 2024

УДК 004.3'144
Н27

Укладачі: Б. М. Ковалишин, кандидат технічних наук, доцент;
І. М. Кравченко, асистент

Рецензент Г. М. Голенков, кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний за випуск Л. І. Мазуренко, доктор технічних наук, професор

Затверджено на засіданні кафедри електротехніки та електроприводу, протокол № 8 від 29 лютого 2024 року.

В авторській редакції.

Напівпровідникові перетворювачі в сучасних електроприводах : Н27 методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / укладачі: Б. М. Ковалишин, І. М. Кравченко. – Київ : КНУБА, 2024. – 44 с.

Містять лабораторні роботи згідно з робочою навчальною програмою.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© КНУБА, 2024

Зміст

Загальні положення 4

Лабораторна робота № 1. Дослідження однофазних некерованих випрямлячів 5

Лабораторна робота № 2. Дослідження однофазного керованого двопівперіодного випрямляча із середньою точкою 10

Лабораторна робота № 3. Дослідження однофазного мостового керованого випрямляча 15

Лабораторна робота № 4. Дослідження трифазних некерованих випрямлячів 20

Лабораторна робота № 5. Дослідження трифазного керованого випрямляча з нульовим виводом 25

Лабораторна робота № 6. Дослідження трифазного мостового керованого симетричного випрямляча 29

Лабораторна робота № 7. Дослідження трифазного мостового керованого несиметричного випрямляча 32

Лабораторна робота № 8. Дослідження однофазного автономного інвертора напруги 35

Список літератури 43

Загальні положення

Мета цих методичних вказівок полягає в забезпеченні підготовки студентів щодо комплексу питань, пов'язаних із використанням напівпровідникових перетворювачів в електромеханічних (машино-вентильних) системах комплексів технологічного призначення із застосуванням віртуальної платформи Electronics Workbench.

Завдання цих методичних вказівок – отримання практичних навичок із розрахунку, проєктування, складання схем і дослідження їх роботи. Важливими є знання й дотримання правил техніки безпеки та безпечної експлуатації обладнання в системах з напівпровідниковими перетворювачами.

Студенти повинні знати: сучасні конструкції, принцип дії, теоретичні основи розрахунків, основи вибору, проєктування й дослідження статичних перетворювачів для електроприводів.

Студенти повинні вміти:

– виконувати проєктно-конструкторські роботи зі створенням систем із застосуванням напівпровідникових перетворювачів;

– обґрунтовано, на основі техніко-економічного аналізу, вибирати електрообладнання;

– створювати нове та вдосконалювати наявне електрообладнання на основі напівпровідникових перетворювачів;

– сприяти використанню й розповсюдженню сучасних напівпровідникових перетворювачів та іншого електрообладнання.

Лабораторна робота № 1. Дослідження однофазних некерованих випрямлячів

Мета роботи: вивчити принцип роботи однофазних схем випрямлення (однопівперіодної, із середньою точкою, мостової); дослідити основні характеристики випрямлячів у середовищі Electronics Workbench.

1. Теоретичні відомості

Некеровані випрямлячі призначені для перетворення змінної напруги в постійну нерегульованої величини. Знаходять як самостійне використання в ролі джерела постійного струму, так і входять до складу більшості перетворювальних пристроїв.

Основні схеми випрямлення (рис. 1):

– однофазна однопівперіодна;

– однофазна двопівперіодна схема випрямлення з нульовим виводом;

– однофазна мостова двопівперіодна схема випрямлення.

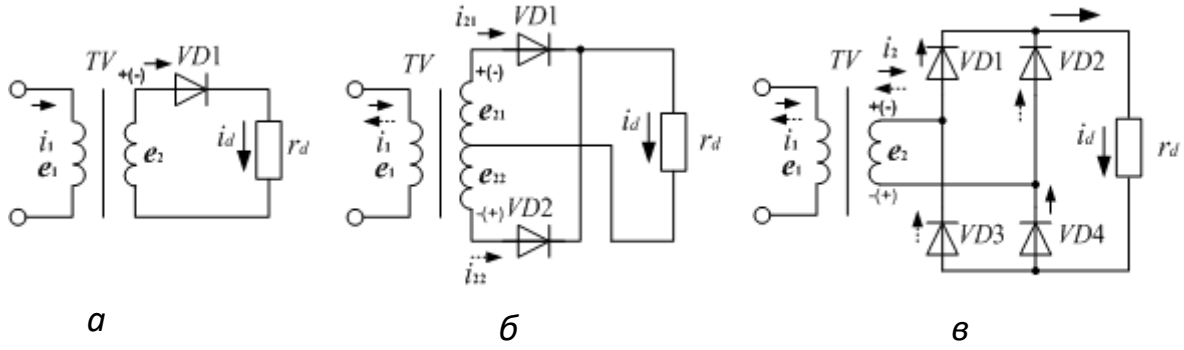

Рис. 1. Однофазні схеми випрямлення: *а* – однопівперіодна, *б* – двопівперіодна із середньою точкою, *в* – двопівперіодна мостова

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схеми вказаних випрямлячів – однопівперіодного (рис. 2), двопівперіодного із середньою точкою (рис. 3), двопівперіодного мостового (рис. 4). Встановити вихідну напругу джерела змінної напруги U2 рівною 24 В, частоту струму – 50 Гц.

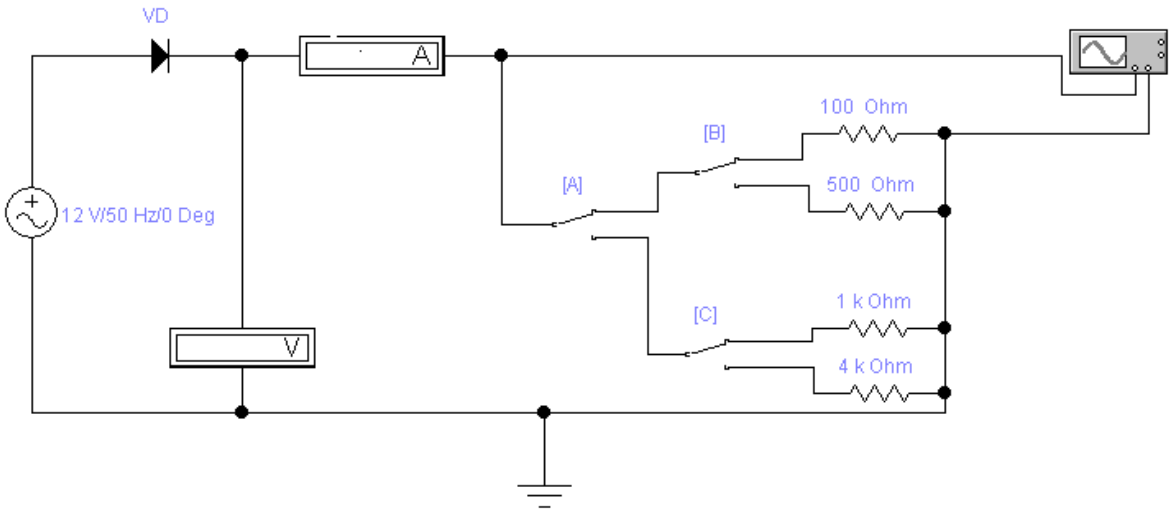

Рис. 2. Однофазна однопівперіодна схема випрямлення в середовищі Electronics Workbench

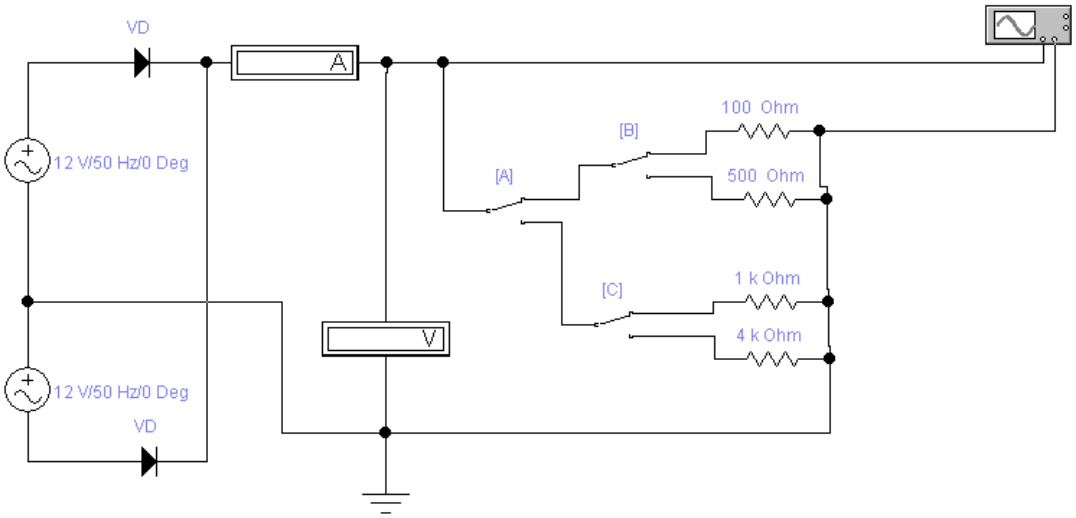

Рис. 3. Однофазна двопівперіодна із середньою точкою схема випрямлення в середовищі Electronics Workbench

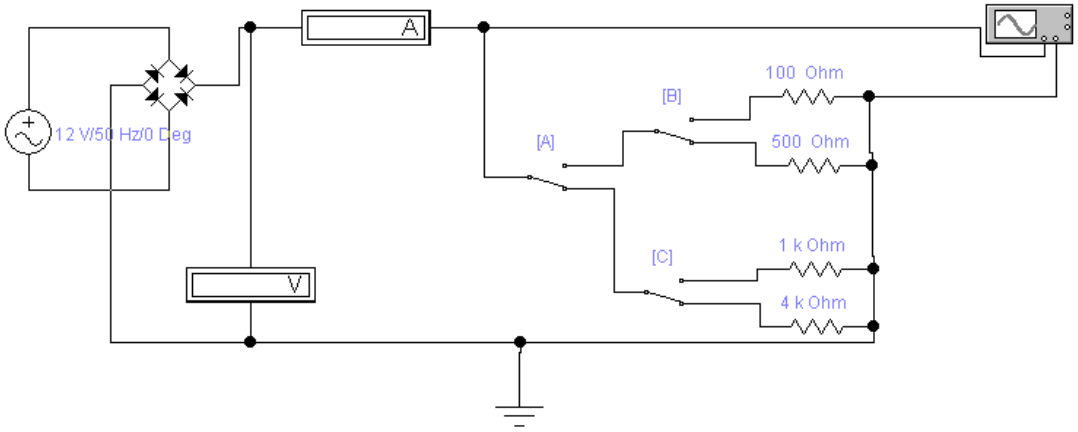

Рис. 4. Однофазна двопівперіодна мостова схема випрямлення в середовищі Electronics Workbench

3. Розрахувати амплітудне значення напруги ($U'_{\sim m}$,В) на вторинній обмотці трансформатора та коефіцієнт пульсацій ($K'_{\text{П}}$) для кожного з досліджуваних випрямлячів і результати занести в таблицю 1. Зняти та побудувати зовнішню (навантажувальну) [1] характеристику $U_d = f(I_d)$ випрямляча, зібраного за однопівперіодною, двопівперіодними із середньою точкою і мостовою схемами, у режимі активного навантаження за зразком на рис. 5.

Таблиця 1

I_d, А	U_d, В	$U'_{\sim m}$, В	$K'_{\text{П}}$
Однопівперіодна схема			
Двопівперіодна із середньою точкою			
Двопівперіодна мостова			

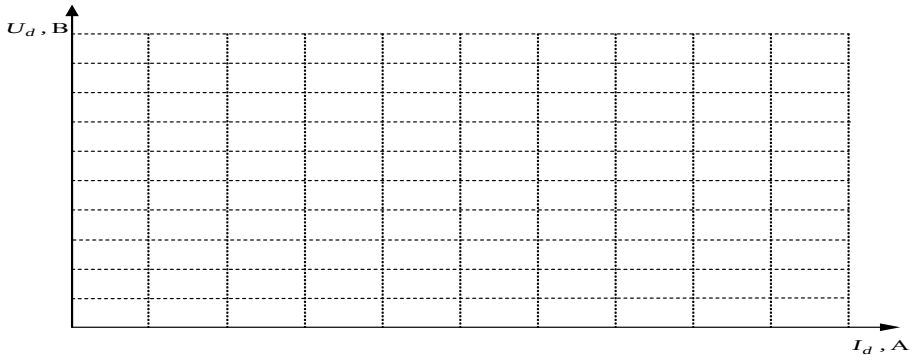

Рис. 5. Зовнішня (навантажувальна) характеристика

4. Використовуючи наведені вирази, розрахувати:

а) середнє значення випрямленої напруги для однопівперіодного випрямляча

$$U_d = \frac{1}{T}\int_0^T u_2(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} U_{m2}\sin(\omega t)dt = \frac{U_{m2}}{\pi} \cong 0,45U_2,$$

де U_{m2} – амплітудне значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора, U_2 – діюче значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора;

$U_d =$;

б) середнє значення випрямленої напруги для двопівперіодних випрямлячів:

- з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора:

$$U_d = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} \frac{1}{2}U_{m2}\sin(\omega t)dt = \frac{U_{m2}}{\pi} = 0,45U_2$$

$U_d =$;

- за мостовою схемою:

$$U_d = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} U_{m2}\sin(\omega t)dt = \frac{U_{m2}}{\pi}\cos\omega t = \frac{2}{\pi}U_{m2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 = 0,9U_2$$

$U_d =$;

в) пульсність випрямлячів $m = f_п / f_1$, де $f_п$ – частота пульсацій випрямленої напруги; f_1 – частота напруги мережі,

пульсність однопівперіодного випрямляча m_1= ;

пульсність двопівперіодних випрямлячів m_2= ;

г) коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги під час роботи на активне навантаження:

- для однопівперіодного випрямляча $k_п = U_{m(1)} / U_d =$;
- для двопівперіодних випрямлячів $k_п = \frac{2}{m^2 - 1}$:

1. виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора: $k_п =$;
2. за мостовою схемою $k_п =$;

д) внутрішній опір випрямлячів $r_{вих} = \mathrm{D}U_d / \mathrm{D}I_d$,

внутрішній опір однопівперіодного випрямляча $r_{вих} =$;

внутрішній опір двопівперіодного випрямляча з середньою точкою трансформатора $r_{вих}$ = ;

внутрішній опір двопівперіодного мостового випрямляча $r_{вих}$ = . .

ВИСНОВКИ

За результатами віртуального експерименту зробити висновки.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що являє собою навантажувальна характеристика випрямляча?
2. Чому рівне середнє значення випрямленої напруги для однопівперіодного випрямляча?
3. Чому рівне середнє значення випрямленої напруги для двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора?
4. Чому рівне середнє значення випрямленої напруги для двопівперіодного мостового випрямляча?
5. Чому рівний коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги під час роботи на активне навантаження для однопівперіодного випрямляча?
6. Чому рівний коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги під час роботи за активного навантаження для двопівперіодного випрямляча з виводом від середньої точки вторинної обмотки трансформатора?
7. Чому рівний коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги під час роботи за активного навантаження для двопівперіодного мостового випрямляча?

Лабораторна робота № 2. Дослідження однофазного керованого двопівперіодного випрямляча із середньою точкою

Мета роботи: вивчити принцип роботи керованого двопівперіодного випрямляча з середньою точкою та його систему керування; визначити основні параметри та характеристики керованого випрямляча.

1. Теоретичні відомості

До керованих належать випрямлячі, у яких є можливість змінювати величину випрямленої напруги. Більш ефективним є метод регулювання з боку випрямленої напруги через використання тиристорів.

У керованих тиристорах є можливість затримувати час його відкривання відносно початку додатного півперіоду змінної напруги на аноді.

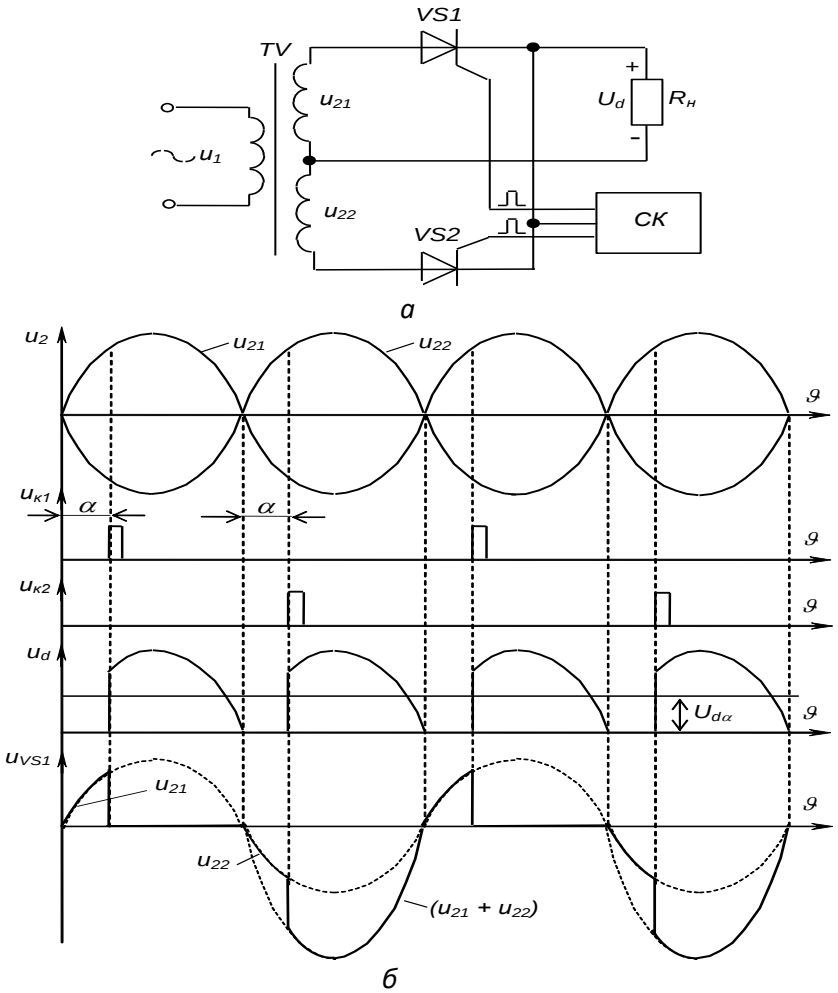

Рис. 6. Схема однофазного керованого двопівперіодного випрямляча з виводом від середньої точки (*а*) та графіки залежностей напруги на його елементах від часу (*б*)

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench зібрати схему керованого випрямляча із середньою точкою (рис. 7). Зберегти її у створеній папці, названій вашим прізвищем, у файлі r2_1.ewb.

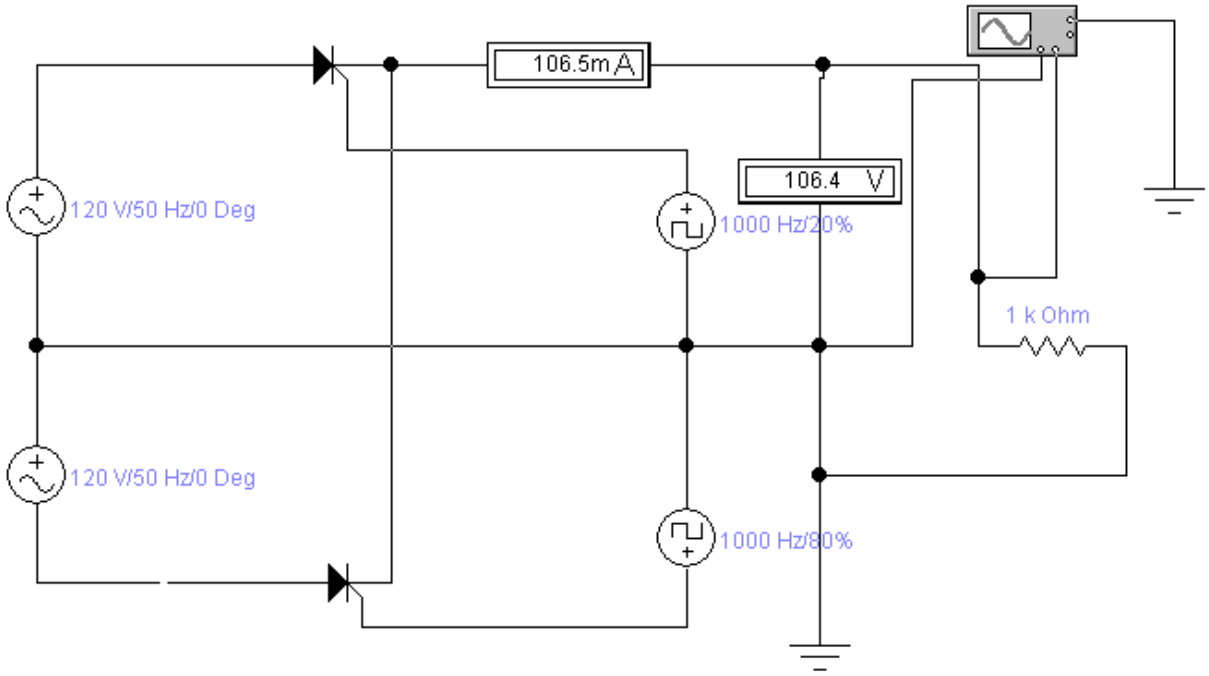

Рис. 7. Однофазна двопівперіодна із середньою точкою схема випрямлення в середовищі Electronics Workbench

1. Зняти дані для побудови регулювальної характеристики $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження.

Кут керування α змінювати в межах 6, 17, 33, 50, 67^0 що задаються відповідно коефіцієнтами заповнення 10, 30, 60, 90, 120 % за допомогою налаштувань генераторів прямокутних імпульсів.

2. Зняти дані для побудови залежності коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{П}}$ від величини кута керування. $K_{\text{П}} = U_{\sim m} / U_d$; $U_{\sim m}$ – амплітуда змінної складові випрямленої напруги.

Амплітуда змінної складової $U_{\sim m}$ визначається за показами вольтметра в режимі вимірювання змінної напруги: його показання потрібно множити на $\sqrt{2}$.

Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 2.

Таблиця 2

R-навантаження					
$\alpha, ^{o}$	$\alpha_1 = 6^{o}$	$\alpha_2 = 17^{o}$	$\alpha_3 = 33^{o}$	$\alpha_4 = 50^{o}$	$\alpha_5 = 67^{o}$
I_d, А					
U_d, В					
$U_{\sim m}$, В					
$K_{\text{П}}$					

3. Побудувати регулювальну характеристику $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження (рис. 8).

4. Побудувати залежність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{П}}$ від величини кута керування α (рис. 9).

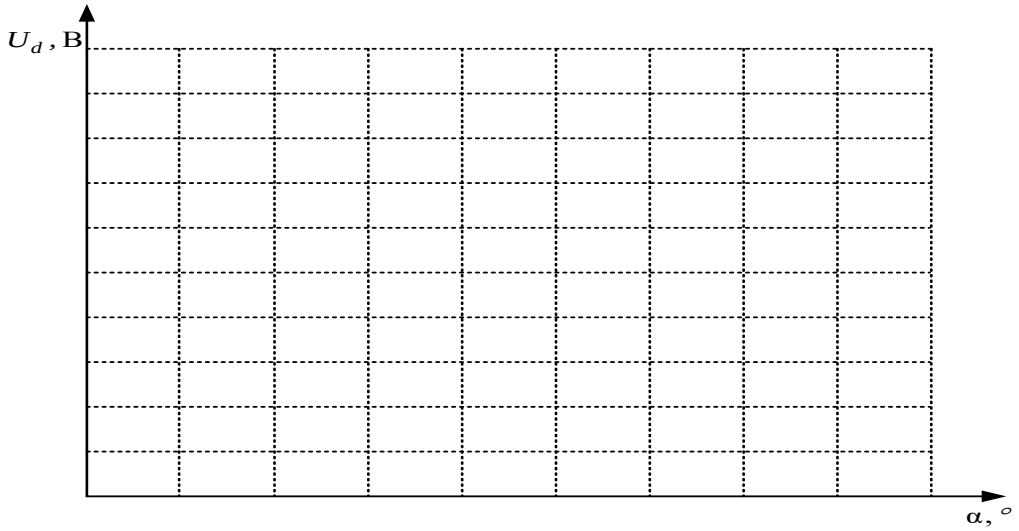

Рис. 8. Регулювальна характеристика

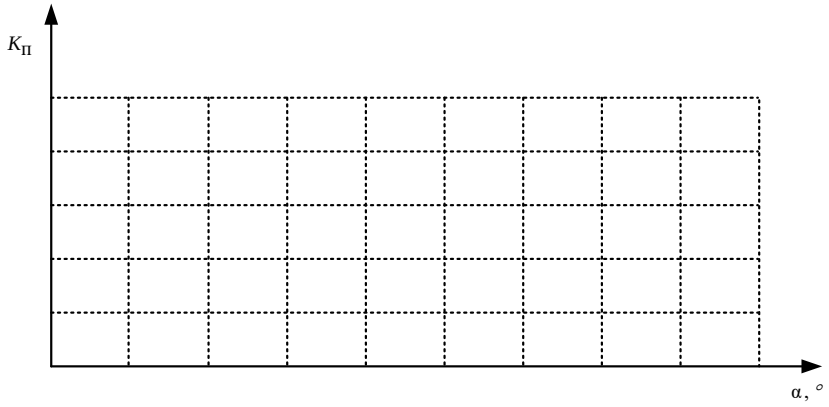

Рис. 9. Залежність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{П}}$ від величини кута керування α

5. Зняти та побудувати навантажувальні (зовнішні) характеристики випрямляча $U_d = f(I_d)$ для кутів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ і занести в таблицю 3. Навантажувальні характеристики випрямляча побудувати на графіку (див. рис. 5).

Таблиця 3

R-навантаження					
$\alpha_1 = 6^0$	I_d, А				
	U_d, В				
$\alpha_2 = 17^0$	I_d, А				
	U_d, В				
$\alpha_3 = 23^0$	I_d, А				
	U_d, В				

6. Зарисувати та пояснити форму кривих: а) напруги на навантаженні; б) напруги між анодом і катодом тиристора *VS1*; в) струму в активному навантаженнii з кутами керування $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

7. Використовуючи наведені вирази, розрахувати та побудувати:

а) регулювальну характеристику випрямляча під час роботи на активне навантаження для значень кутів α, отриманих в п. 1;

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} 0,5u_2(\omega t)d\omega t = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} 0,5U_{m2}\sin(\omega t)d\omega t = \frac{U_{m2}}{\pi}\frac{1+\cos\alpha}{2},$$

де U_{m2} – амплітудне значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора;

б) коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги для значень кутів α, отриманих в п. 1

$$K_{\text{П}(1)} = \frac{2}{3}\sqrt{1+4(1-\cos\alpha)};$$

в) внутрішній опір випрямляча $r_{\text{вих}} = \mathrm{D}U_d / \mathrm{D}I_d =$

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення та принцип роботи керованого випрямляча.
2. Поясніть принцип побудови та роботу схеми керування за принциповою схемою.
3. Поясніть призначення зворотного діода і його вплив на режим роботи та характеристики схеми.
4. Нарисуйте форми напруги і струмів на елементах схеми керування й силовій частині з кутами керування а = 30°, а = 120°.
5. Поясніть особливості роботи керованого випрямляча на ємнісний фільтр.
6. У чому переваги та недоліки керованого випрямляча?
7. Поясніть вихідну та регулювальну характеристики випрямляча.

Лабораторна робота № 3. Дослідження однофазного мостового керованого випрямляча

Мета роботи: вивчити принцип роботи однофазної мостової схеми випрямлення, дослідити основні характеристики випрямляча.

1. Теоретичні відомості

Аналогічно процесам у керованому однопівперіодному випрямлячі, тобто завдяки затримкам моментів проходження струму через вентилі, відбувається керування середніми значеннями випрямлених сигналів у двопівперіодних вентильних схемах на тиристорах: із виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора і в мостовій схемі (рис. 10*а*). Осцилограми напруги і струмів у керованій мостовій схемі однофазного випрямляча показані на рис. 10*б*.

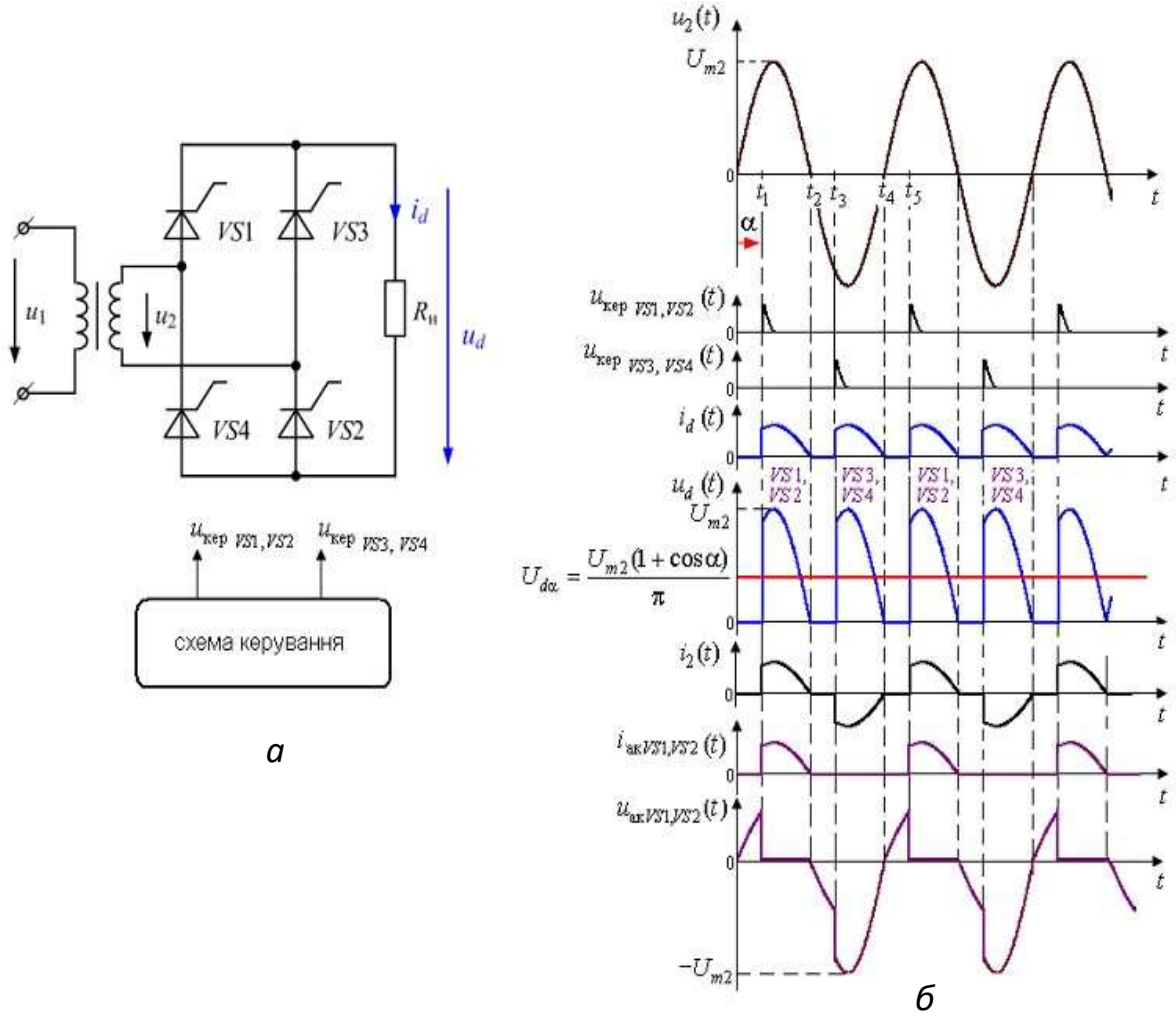

Рис. 10. Мостова схема керованого однофазного випрямляча (*а*), часові діаграми струмів і напруги з кутом керування α (*б*)

На інтервалі часу $0-t_1$ усі чотири тиристори закриті. Під час побудови осцилограм припускаємо, що тиристори мають ідентичні параметри, тому напругу вторинної обмотки трансформатора $u_2(t)$ розподіляємо порівну між тиристорами пар *VS*1, *VS*2 та *VS*3, *VS*4.

Керуючий імпульс $u_{\text{кер}}(t)$ в момент t_1 відкриває пару тиристорів *VS*1, *VS*2. На інтервалі часу t_1-t_2 струм замикається в контурі «вторинна обмотка трансформатора – тиристор *VS*1 – навантаження $R_{\text{н}}$ – тиристор *VS*2 – вторинна обмотка трансформатора». Спад напруги на відкритих тиристорах малий, тому напруга на навантаженні майже повторює вхідну $u_2(t)$. Форма струму через активне навантаження $i_d(t)$ повторює форму випрямленої напруги $u_d(t)$. Через малий спад напруги на відкритих тиристорах *VS*1 і *VS*2 кожен із тиристорів *VS*3 і *VS*4 перебуває під зворотною напругою ($u_2(t)<0$) і струм не пропускає.

У момент t_2 тиристори *VS*1, *VS*2 закриваються зворотною напругою. На інтервалі часу t_2-t_3 до приходу наступного імпульсу керування всі тиристори закриті й напруга на них однакова – $0{,}5u_2(t)<0$.

У момент t_3 надходить імпульс керування і відкриває тиристори *VS*3 і *VS*4. На інтервалі часу t_3-t_4 через відкриті тиристори й навантаження проходить струм, збуджений напругою на вторинній обмотці трансформатора. Спад напруги на відкритих тиристорах малий, тому напруга на навантаженні майже повторює вхідну $u_2(t)$. Форма струму через активне навантаження $i_d(t)$ повторює форму випрямленої напруги $u_d(t)$. Через малий спад напруги на відкритих тиристорах *VS*3 і *VS*4 кожен із тиристорів *VS*1 і *VS*2 перебуває під зворотною напругою ($u_2(t)<0$) і струм не пропускає.

У момент t_4 тиристори *VS*3, *VS*4 закриваються зворотною напругою. На інтервалі часу t_4-t_5 до приходу наступного імпульсу керування всі тиристори закриті і напруга на кожному дорівнює $0{,}5u_2(t)<0$.

Середнє значення випрямленої напруги за активного навантаження в мостовій схемі визначається із формули:

$$U_{d\alpha}=\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}u_2(\omega t)d\omega t=\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi}U_{m2}\sin(\omega t)d\omega t=-\frac{U_{m2}}{\pi}\cos(\omega t)\Big|_{\alpha}^{\pi}=\frac{U_{m2}(1+\cos\alpha)}{\pi}=U_{d0}\frac{1+\cos\alpha}{2},$$

де U_{m2} – амплітудне значення напруги на вторинній обмотці трансформатора, $U_{d0}=\frac{2U_{m2}}{\pi}$ – середнє значення випрямленої напруги некерованого випрямляча за мостовою схемою випрямлення.

Регулювальна характеристика керованого мостового однофазного випрямляча будується за вищевказаним виразом і подібна до регулювальної характеристики однопівперіодного випрямляча (рис. 11*б*). Змінюється максимальне значення випрямленої напруги, якщо $\alpha=0$: $U_{d0}=\frac{2U_{m2}}{\pi}$. Зі збільшенням кута керування до $\alpha=180^{\circ}$ середнє значення випрямленої напруги зменшується до нуля.

Сім'я зовнішніх характеристик $U_d=f(I_d)\big|_{\alpha=const}$ для керованого випрямляча за мостовою схемою подібна до характеристик однопівперіодного випрямляча. Кожна вітка сім'ї характеристик будується за виразом:

$$U_d=U_{d\alpha}-I_d(2R_{\text{ак}}+R_2+R_{\text{пр}})=\frac{U_{m2}(1+\cos\alpha)}{\pi}-I_d R_{\Sigma},$$

де $U_{d\alpha}=\frac{U_{m2}(1+\cos\alpha)}{\pi}$ – середнє значення випрямленої напруги для певного значення кута керування α у схемі випрямлення без втрат, $2R_{\text{ак}}$ – активний опір двох прямо увімкнених тиристорів, R_2 – активний опір проводу, з якого виготовлена вторинна обмотка трансформатора, $R_{\text{пр}}$ – активний опір з'єднувальних проводів, R_{Σ} – внутрішній опір випрямляча.

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench зібрати схему керованого мостового випрямляча (рис. 11). Зберегти її у створеній папці, названій вашим прізвищем, у файлі r3_1.ewb.

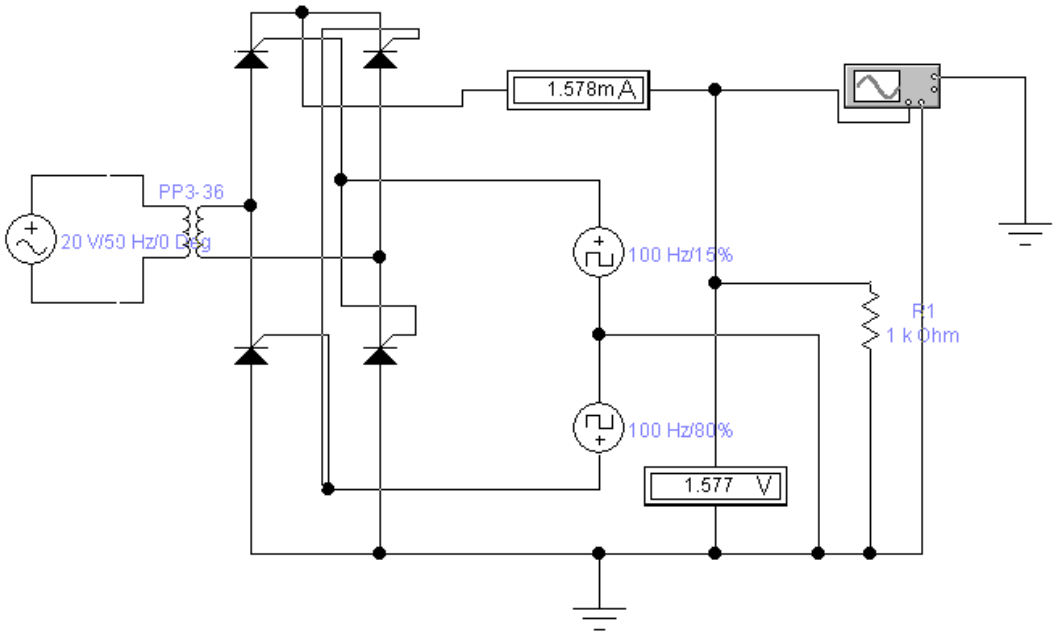

Рис. 11. Схема однофазного двопівперіодного керованого мостового випрямляча в середовищі Electronics Workbench

1. Зняти дані для побудови регулювальної характеристики $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження.

Кут керування α змінювати за допомогою опору R1. Кут керування визначати за допомогою осцилограм напруги на виході випрямляча.

2. Зняти дані для побудови залежності коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{п}}$ від величини кута керування. $K_{\text{п}} = U_{\sim m} / U_d$; $U_{\sim m}$ – амплітуда змінної складові випрямленої напруги.

Амплітуда змінної складової $U_{\sim m}$ визначається за показами вольтметра в режимі вимірювання змінної напруги: його показання потрібно множити на $\sqrt{2}$.

Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 4.

Таблиця 4

R-навантаження								
α, °	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
I_d, А								
U_d, В								
$U_{\sim m}$, В								
$K_{\text{п}}$								

3. Побудувати залежність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{П}}$ від величини кута керування α (див. рис. 9)

4. Побудувати регулювальну характеристику $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження (див. рис. 8).

5. Зняти й побудувати навантажувальні (зовнішні) характеристики випрямляча $U_d = f(I_d)$ для кутів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (див. рис. 5).

Таблиця 5

R-навантаження					
□1□	I_d, А				
	U_d, В				
□2□	I_d, А				
	U_d, В				
□3□	I_d, А				
	U_d, В				

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення і принцип роботи керованого випрямляча.
2. Пояснити принцип побудови й роботу системи керування випрямлячем.
3. Призначення комутаційного діода. Його вплив на режим роботи та характеристики схеми.
4. Нарисувати форму напруги і струмів в елементах схеми керування та силової частини з кутами керування $\alpha = 30^0, 120^0$.
5. Критична індуктивність у згладжувальних LC-фільтрах та її визначення. Залежність від параметрів і режиму роботи схеми.
6. Робота випрямляча на ємнісний фільтр.
7. Переваги і недоліки керованих випрямлячів.
8. Пояснити регулювальну та зовнішню характеристику випрямляча.

Лабораторна робота № 4. Дослідження трифазних некерованих випрямлячів

Мета роботи: дослідити роботу трифазних некерованих випрямлячів (із середньою точкою і мостового), експериментально визначити їх основні параметри та характеристики.

1. Теоретичні відомості

Трифазні некеровані випрямлячі (рис. 12) збираються переважно за схемою із середньою точкою (Міткевича) або за мостовою схемою (Ларіонова). Кожна фаза вхідної трифазної напруги зсунута одна відносно іншої на 120°.

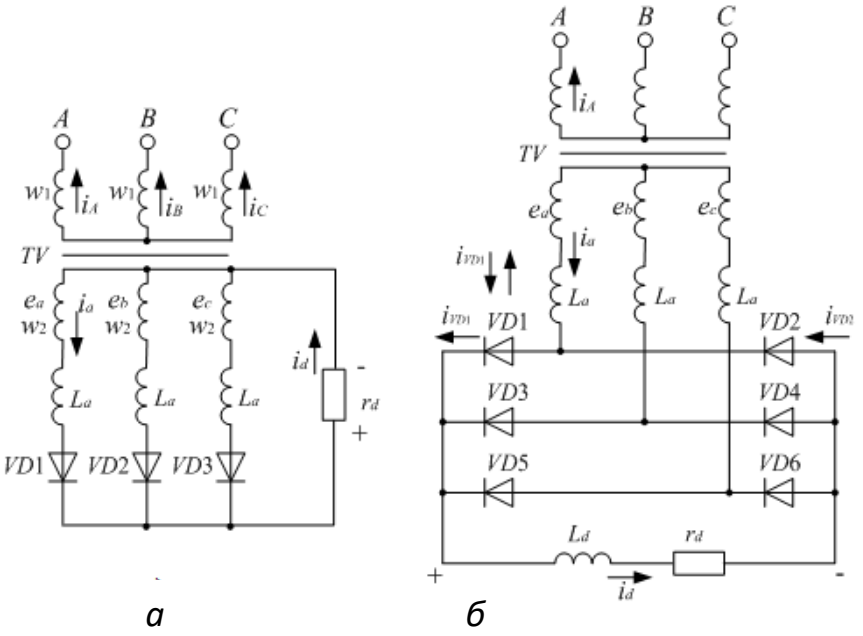

Рис. 12. Схеми трифазних некерованих випрямлячів із середньою точкою – схема Міткевича (*а*) і мостового – схема Ларіонова (*б*)

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему трифазного некерованого випрямляча із середньою точкою (рис. 13). Зберегти її у папці, названій вашим прізвищем, у файлі r4_1.ewb.

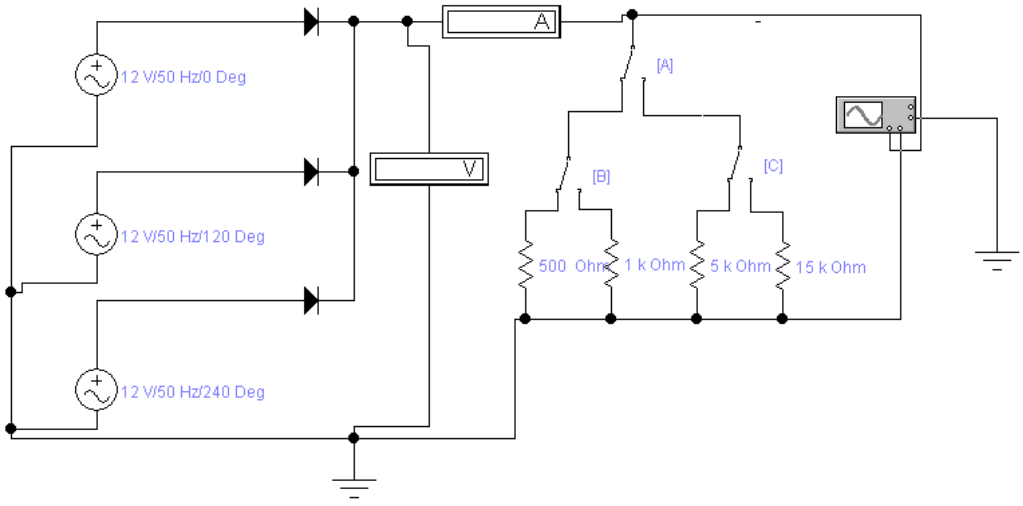

Рис. 13. Схема трифазного некерованого випрямляча із середньою точкою (Міткевича)

2. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему трифазного некерованого мостового випрямляча (рис. 14). Зберегти її у названій вашим прізвищем папці, у файлі r4_2.ewb.

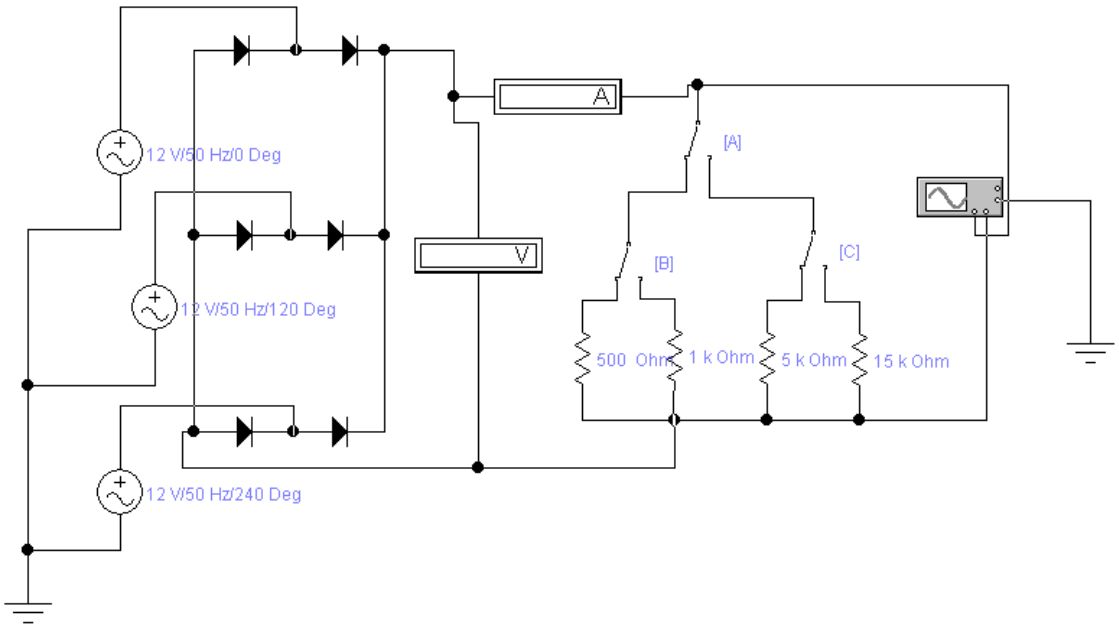

Рис. 14. Схема трифазного некерованого мостового випрямляча (Ларіонова)

3. Зняти дані для побудови зовнішньої характеристики $U_d = f(I_d)$ випрямляча із середньою точкою у режимі роботи за активного навантаження. Результати вимірювань і розрахунків заносимо в таблицю 6.

4. Зняти дані для побудови зовнішньої характеристики $U_d = f(I_d)$ мостового некерованого випрямляча в режимі роботи за активного навантаження. Результати вимірювань і розрахунків заносимо в таблицю 7.

Таблиця 6

Схема Міткевича				
R, Ом	I_d, А	U_d, В	$U_{\sim m}$, В	$K_п$

Таблиця 7

Схема Ларіонова				
R, Ом	I_d, А	U_d, В	$U_{\sim m}$, В	$K_п$

4. Визначити коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги за активного навантаження; $K_п = U_{\sim m}/U_d$, де $U_{\sim m}$ – амплітуда пульсацій випрямленої напруги. $U_{\sim m}$ вимірюємо за допомогою вольтметра в режимі вимірювання змінного струму, помножуючи його покази на $\sqrt{2}$.

5. Зарисувати осцилограми випрямленої напруги u_d; напруги на діоді $u_{ак}$, анодного струму діода i_a, струму навантаження i_d, струму у вторинній обмотці трансформатора i_2, під час роботи за активного навантаження.

6. Використовуючи наведені вирази, розрахувати:

а) середнє значення випрямленої напруги випрямляча за схемою Міткевича

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{m2ф} \cong 0{,}827 U_{m2ф} \cong 1{,}17 U_{2ф},$$

де $U_{m2ф}$ – амплітудне значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора, $U_{2ф}$ – діюче значення фазної напруги на вторинній обмотці трансформатора.

$U_d =$;

б) середнє значення випрямленої напруги випрямляча за схемою Ларіонова

$$U_d = = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{m2ф} = \frac{3}{\pi} U_{m2л} \cong 1,65 U_{m2ф} \cong 2,34 U_{2ф},$$

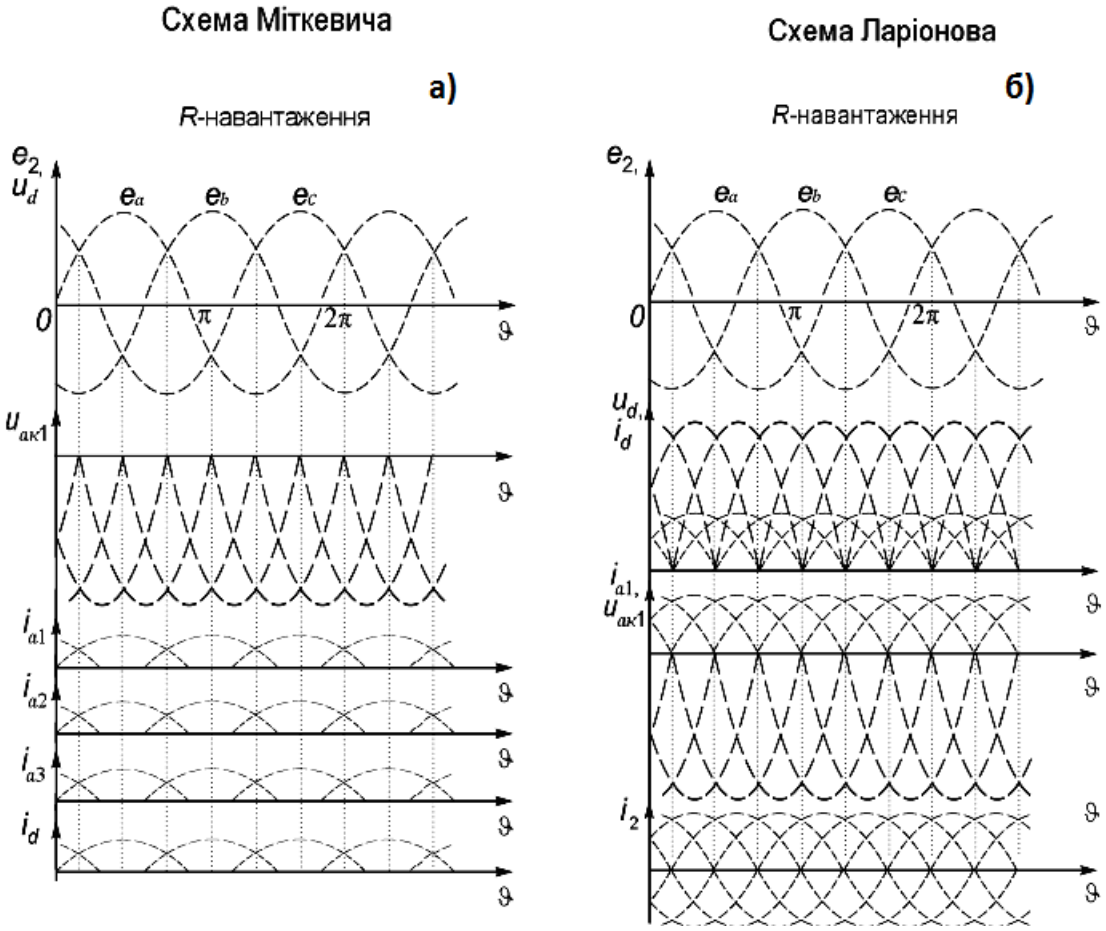

Рис. 15. Діаграми напруги і струму трифазних випрямлячів

в) пульсність випрямлячів $m = f_п / f_1$, де $f_п$ – частота пульсацій випрямленої напруги; f_1 – частота напруги мережі,

пульсність випрямляча за схемою Міткевича $m =$;

пульсність випрямляча за схемою Ларіонова $m =$;

г) коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги випрямлячів у режимі роботи за активного навантаження $k_п = \frac{2}{m^2 - 1}$,

- для випрямляча за схемою Міткевича $k_п =$;
- для випрямляча за схемою Ларіонова $k_п =$;

д) внутрішній опір випрямлячів $r_{вих} = \mathrm{D}U_d / \mathrm{D}I_d$,

для випрямляча за схемою Міткевича $r_{вих}$ = ;

для випрямляча за схемою Ларіонова $r_{вих}$ = ;

7. Побудувати зовнішню характеристику $U_d = f(I_d)$ випрямляча в режимі роботи за активного навантаження (див. рис. 5).

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принцип дії трифазних схем із середньою точкою (Міткевича) та мостової (Ларіонова) із застосуванням часових діаграм.
2. Чому дорівнює тривалість роботи фази у схемах?
3. Чому дорівнює тривалість роботи діоду у схемі Ларіонова та у схемі Міткевича?
4. Яка кратність пульсацій і чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у схемі Ларіонова та Міткевича?
5. Причини виникнення явища комутації.
6. Як впливає кут комутації на середнє значення випрямленої напруги та коефіцієнт пульсацій?
7. Від чого залежить тривалість кута комутації?
8. Як впливає кут комутації на тривалість роботи діода та фази випрямляча?
9. Як впливає кут комутації на коефіцієнт потужності випрямляча?
10. Переваги та недоліки схеми Міткевича.

Лабораторна робота № 5. Дослідження трифазного керованого випрямляча з нульовим виводом

Мета роботи: дослідити роботу трифазного керованого випрямляча з нульовим виводом, експериментально визначити його основні параметри та характеристики.

1. Теоретичні відомості

Однофазні випрямлячі зазвичай використовуються для джерел живлення для домашнього обладнання. Однак для більшості промислових і потужних установок використовують трифазні випрямні ланцюги. Як і у випадку однофазних випрямлячів, трифазні випрямлячі можуть мати форму напівпровідного ланцюга повномасштабної схеми, що використовує трансформатор із середнім виводом, або повномасштабний мостовий контур.

Тиристори зазвичай використовуються замість діодів для створення схеми, яка може регулювати вихідну напругу. Багато пристроїв, що забезпечують постійний струм, насправді отримують за випрямлення трифазного змінного струму.

Багатофазні схеми випрямлення в порівнянні з однофазними мають такі переваги:

1) симетричне навантаження фаз мережі живлення;

2) добре використання трансформатора й вентилів;

3) менший склад вищих гармонік у кривій випрямленої напруги та споживаного з мережі струму.

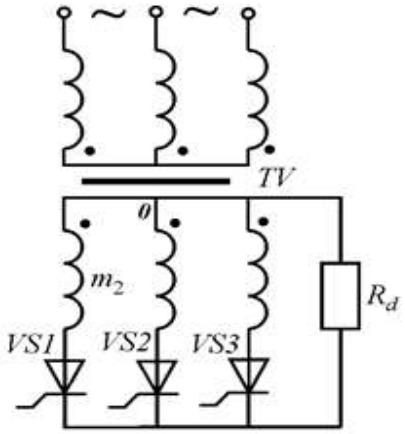

Рис. 16. Схема трифазного керованого випрямляча з нульовим виводом

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему трифазного керованого випрямляча із середньою точкою (рис. 17). Зберегти її у папці, названій вашим прізвищем, у файлі r5_1.ewb.

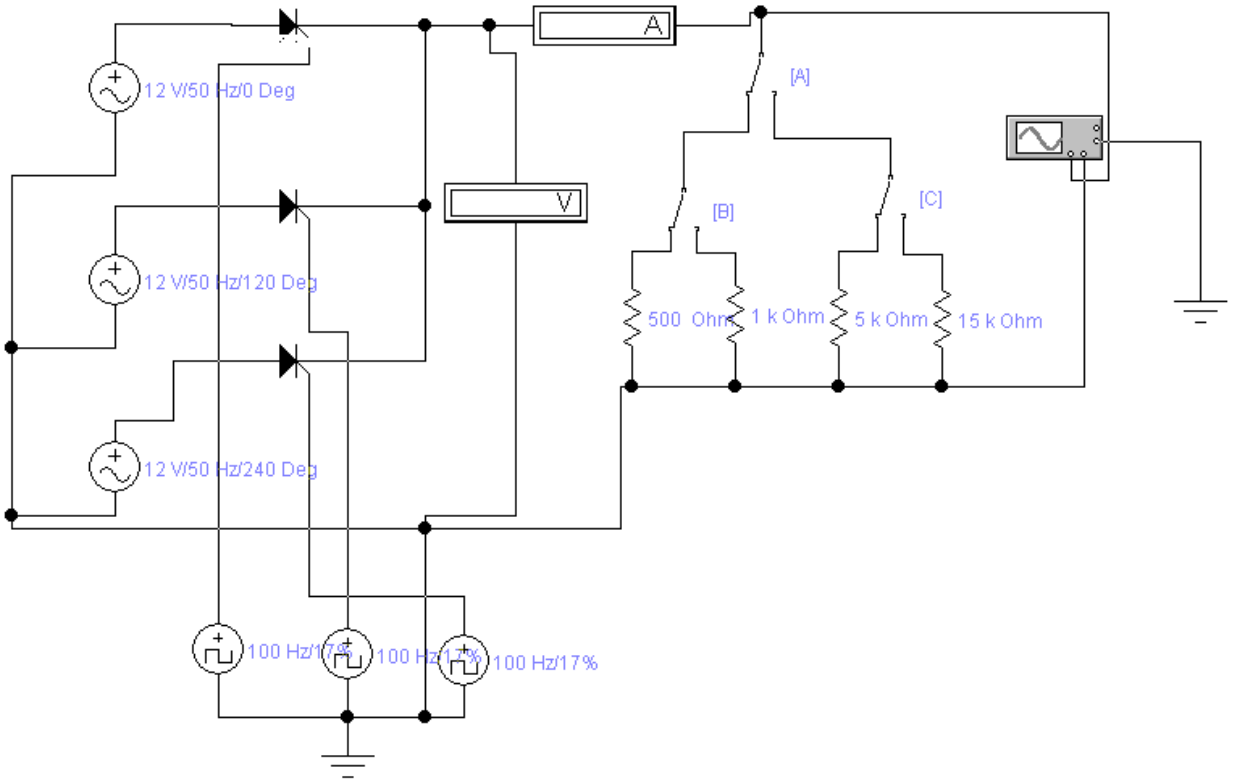

Рис. 17. Схема трифазного керованого випрямляча із середньою точкою (Міткевича)

2. Зняти дані для побудови регулювальної характеристики $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження.

Кут керування α встановлюється за допомогою налаштувань коефіцієнтів заповнення генератора тактових імпульсів. Зв'язок кутів керування α з коефіцієнтами заповнення $К_з$ наведено в таблиці 8.

Таблиця 8

α, °	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180
$К_з$, %	5, 6	11, 1	16, 7	22, 2	27, 8	33, 3	38, 9	44, 4	50, 0	55, 6	66, 7	83, 3	90, 0

2. Зняти дані для побудови залежності коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_п$ від величини кута керування. $K_п = U_{\sim m}/U_d$; $U_{\sim m}$ – амплітуда змінної складові випрямленої напруги.

Амплітуда змінної складової $U_{\sim m}$ визначається за показами вольтметра в режимі вимірювання змінної напруги: його показання потрібно множити на $\sqrt{2}$.

Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 9.

Таблиця 9

R-навантаження				
$\alpha, ^{o}$	10	30	60	90
I_d, А				
U_d, В				
$U_{\sim m}$, В				
$K_{\text{п}}$				

3. Побудувати залежність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги $K_{\text{п}}$ від величини кута керування α (див. рис. 9).

4. Побудувати регулювальну характеристику $U_d = f(\alpha)$ за активного навантаження (див. рис. 8).

5. Зняти та побудувати навантажувальні (зовнішні) характеристики випрямляча $U_d = f(I_d)$ для кутів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (див. рис. 9).

Таблиця 10

R-навантаження					
$\alpha_1 = 10^{o}$	I_d, А				
	U_d, В				
$\alpha_2 = 30^{o}$	I_d, А				
	U_d, В				
$\alpha_3 = 60^{o}$	I_d, А				
	U_d, В				
$\alpha_4 = 90^{o}$	I_d, А				
	U_d, В				

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту та обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принцип дії трифазних схем із середньою точкою (Міткевича) із застосуванням часової діаграм.

2. Чому дорівнює тривалість роботи фази у схемі Міткевича?

3. Чому дорівнює тривалість роботи діода у схемі Міткевича?

4. Яка кратність пульсацій і чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у схемі Міткевича?

5. Причини виникнення явища комутації у схемі Міткевича.

6. Як впливає кут комутації на середнє значення випрямленої напруги?

7. Як впливає кут комутації на коефіцієнт пульсацій?

8. Від чого залежить тривалість кута комутації?

8. Як впливає кут комутації на тривалість роботи діода та фази випрямляча?

9. Як впливає кут комутації на коефіцієнт потужності випрямляча?

10. Переваги та недоліки схеми Міткевича.

Лабораторна робота № 6. Дослідження трифазного мостового керованого симетричного випрямляча

Мета роботи: дослідити роботу трифазного мостового керованого симетричного випрямляча, експериментально визначити його основні параметри та характеристики.

1. Теоретичні відомості

Трифазний мостовий керований випрямляч може бути реалізований із повним числом керованих вентилів (симетрична схема) і з неповним числом керованих вентилів (несиметрична схема).

Симетрична схема (рис. 18) керованого випрямляча досить складна. Для її побудови потрібні шість тиристорів. Система керування повинна містити шість ідентичних каналів, що забезпечують формування імпульсів керування для кожного тиристора. Вихідні каскади системи керування повинні забезпечувати гальванічну розв'язку із силовою схемою. Настроювання й фазування такої системи керування, особливо в разі несиметрії фаз мережі живлення, викличуть певні труднощі. Крім того, для здійснення початкового пуску такого випрямляча й можливості його роботи з більшими кутами керування ($\alpha > 60^0$) потрібно подавати на тиристори імпульси керування, ширина яких більше за 60, або здвоєні імпульси, що слідують один за одним через 60. Це потрібно для одночасного вмикання відповідних тиристорів з анодної та катодної групи.

Переваги: можливе створення випрямлячів великої потужності, вищий коефіцієнт потужності, низька пульсація випрямленої напруги, простота реалізації, ефективне використання можливостей трансформатора.

Недоліки: складна система керування, велика кількість елементів схеми випрямлення.

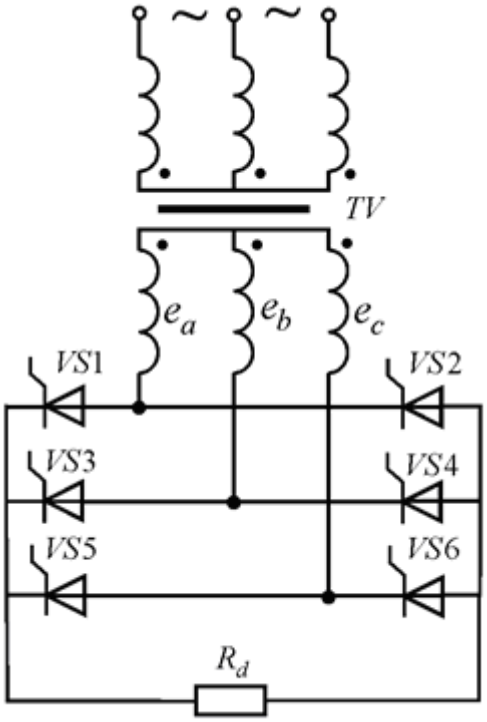

Рис. 18. Трифазна мостова схема керованого симетричного випрямляча

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему трифазного керованого мостового симетричного випрямляча (рис. 19). Зберегти її у папці, названій вашим прізвищем, у файлі r6_1.ewb.

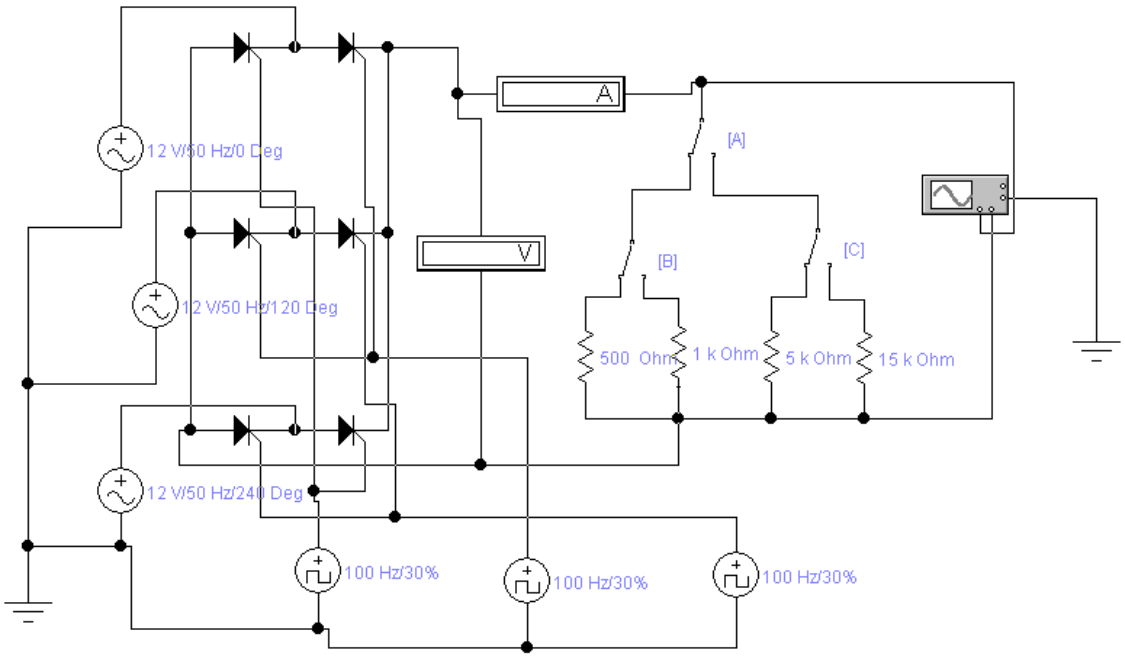

Рис. 19. Схема трифазного мостового керованого симетричного випрямляча

2. Зняти та побудувати навантажувальні (зовнішні) характеристики трифазного мостового керованого симетричного випрямляча $U_d = f(I_d)$ для кутів керування 10, 30, 50 і 70°.

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Пояснити принцип дії трифазної мостової схеми (Ларіонова) із застосуванням часової діаграми.
2. Чому дорівнює тривалість роботи фази у схемах?
3. Чому дорівнює тривалість роботи діода у схемі Ларіонова?
4. Яка кратність пульсацій і чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у схемі Ларіонова?
5. Причини виникнення явища комутації.
6. Як впливає кут комутації на коефіцієнт пульсацій?
7. Від чого залежить тривалість кута комутації?
8. Як впливає кут комутації на тривалість роботи діода та фази випрямляча?
9. Переваги та недоліки схеми Ларіонова.

Лабораторна робота № 7. Дослідження трифазного мостового керованого несиметричного випрямляча

Мета роботи: дослідити роботу трифазного мостового керованого симетричного випрямляча, експериментально визначити його основні параметри та характеристики.

1. Теоретичні відомості

Трифазний мостовий керований випрямляч, реалізований із неповним числом керованих вентилів, носить назву несиметричного.

Схему несиметричного керованого мостового випрямляча наведено на рис. 20.

Переваги: можливе створення випрямлячів великої потужності, вищий коефіцієнт потужності, низька пульсація випрямленої напруги, простота реалізації, ефективне використання можливостей трансформатора.

Недоліки: складна система керування, велика кількість елементів схеми випрямлення.

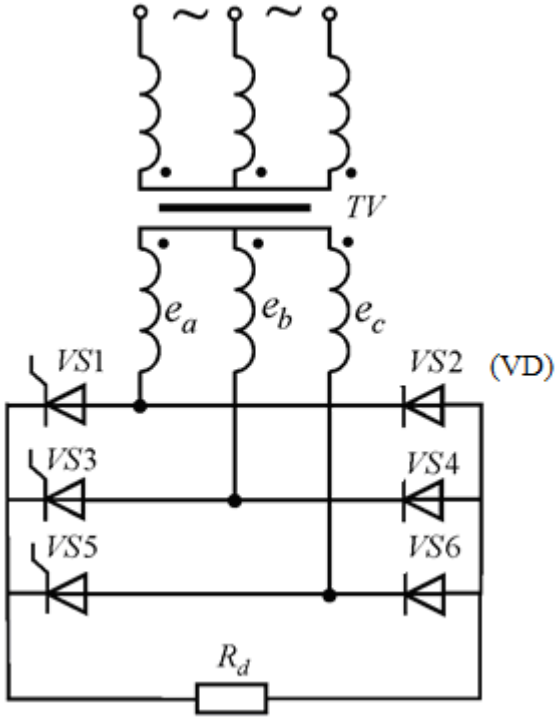

Рис. 20. Трифазна мостова схема керованого несиметричного випрямляча

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему трифазного керованого мостового несиметричного випрямляча (рис. 21). Зберегти її у папці, названій вашим прізвищем, у файлі r7_1.ewb.

2. Зняти та побудувати навантажувальні (зовнішні) характеристики трифазного мостового керованого несиметричного випрямляча $U_d = f(I_d)$ для кутів керування 10, 30, 50 і 70°.

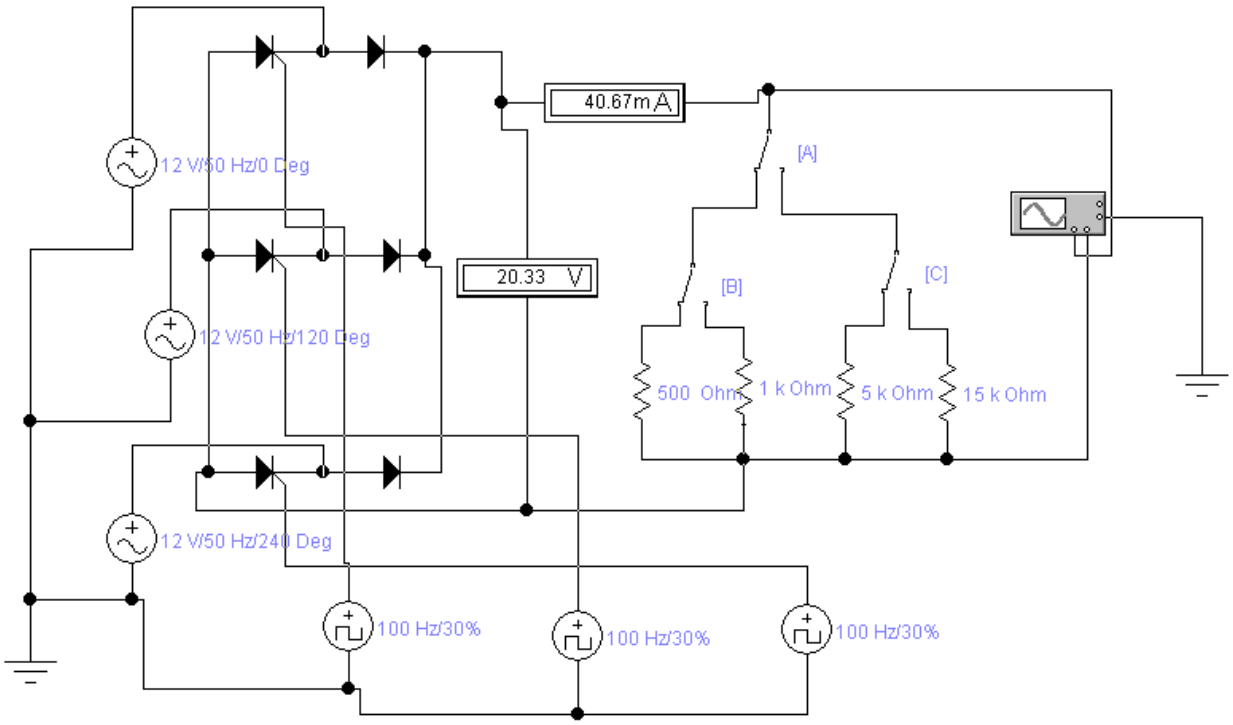

Рис. 21. Схема трифазного мостового керованого несиметричного випрямляча

В усіх несиметричних (напівкерованих) випрямлячах за *RL*-навантаження паузи у струмі не виникають (у разі *ERL*-навантаження така можливість з'являється). Усі вони мають удвічі менший зсув споживаного струму відносно живильної напруги, однак форма споживаного струму несиметрична, діапазон регулювання випрямленої напруги обмежений, а інверторний режим неможливий. Унаслідок цього напівкеровані випрямлячі використовують зазвичай для живлення обмоток збудження, а також обмоток якоря у випадках недосить жорстких вимог до діапазону регулювання та в нереверсивних електроприводах.

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть принцип дії трифазної мостової схеми (Ларіонова).
2. Чим відрізняється трифазний мостовий керований симетричний випрямляч від трифазного мостового керованого несиметричного випрямляча?
3. Чому дорівнює тривалість роботи діода у схемі Ларіонова?
4. Яка кратність пульсацій і чому дорівнює коефіцієнт пульсацій у схемі Ларіонова?
5. Причини виникнення явища комутації.
6. Як впливає кут комутації на коефіцієнт пульсацій?
7. Від чого залежить тривалість кута комутації?
8. Як впливає кут комутації на тривалість роботи діода та фази випрямляча?
9. Переваги та недоліки схеми Ларіонова.

Лабораторна робота № 8. Дослідження однофазного автономного інвертора напруги

Мета роботи: дослідити роботу однофазного автономного інвертора напруги, експериментально визначити його основні параметри та характеристики.

1. Теоретичні відомості

В інверторному режимі енергія передається від навантаження через випрямляч до живильної мережі. Тому такий режим виникає тільки за наявності в складі навантаження джерела проти-ЕРС. Для зміни напрямку передачі енергії знаки середніх випрямлених напруги та струму повинні бути різними. Оскільки тиристори мають однобічну провідність, можлива зміна знака лише напруги. Для цього необхідно, щоб кут керування перевищував 90°. Щоб за негативної випрямленої напруги протікання струму взагалі не мало місце, проти-ЕРС повинна бути протилежною за напрямком середній випрямленій напрузі (рис. 22), а за модулем – перевищувати її.

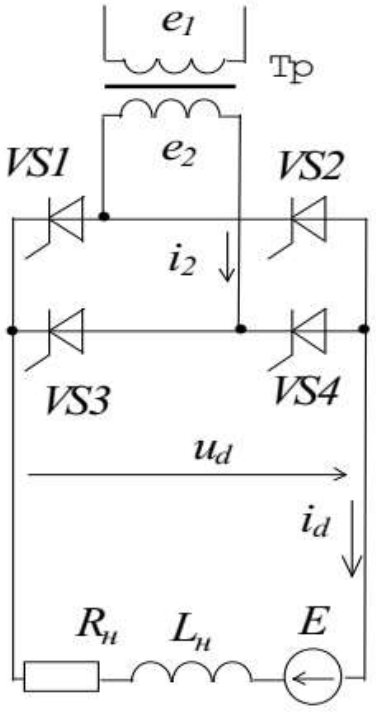

Рис. 22. Схема однофазного інвертора напруги

Таким чином, випрямляч переходить до інверторного режиму за таких умов:

• $\alpha > 90°$;

• у складі навантаження є проти-ЕРС E , спрямована за випрямленим струмом;

• $E > U_d$.

На рис. 23 зображені діаграми напруги та струму за $\alpha = 120°$ і $E = 0$. На рис. 2.30, 2.31 – те саме за різних проти-ЕРС.

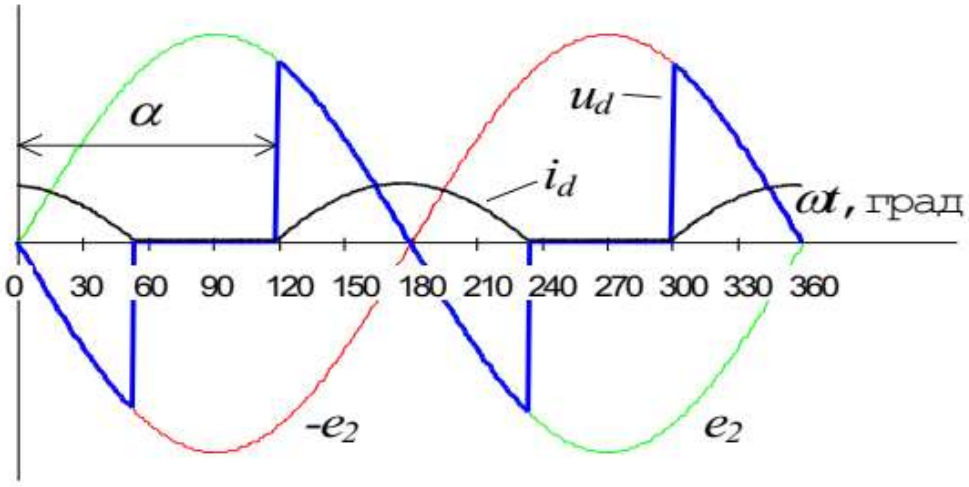

Рис. 23. Процеси в схемі рис. 28 за *RL*-навантаження

Поява проти-ЕРС, ввімкненої згідно з напрямком струму, призводить до збільшення його середнього значення $I_d = (U_d + E) / R_н$ та тривалості протікання (див. рис. 24). Завдяки цьому середня випрямлена напруга стає негативною, хоч і меншою за модулем від проти-ЕРС (на спад напруги в активному опорі).

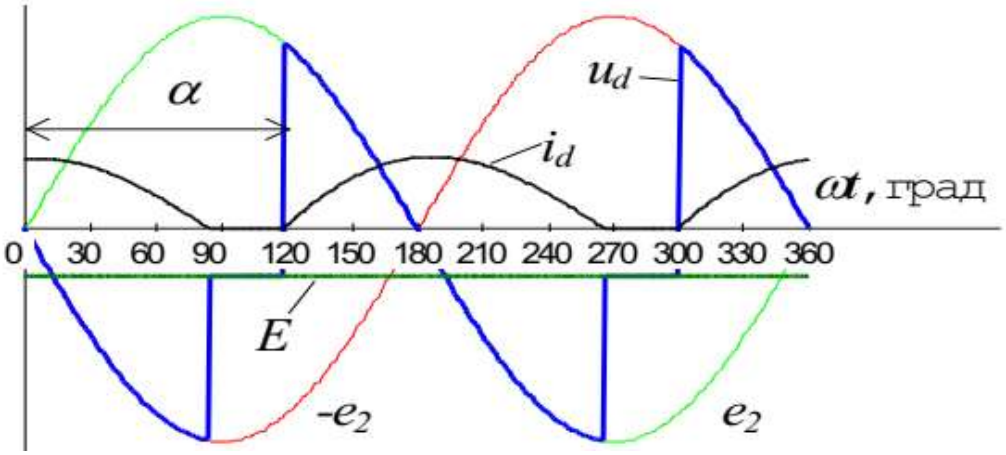

Рис. 24. Процеси в інверторному режимі (переривистий струм)

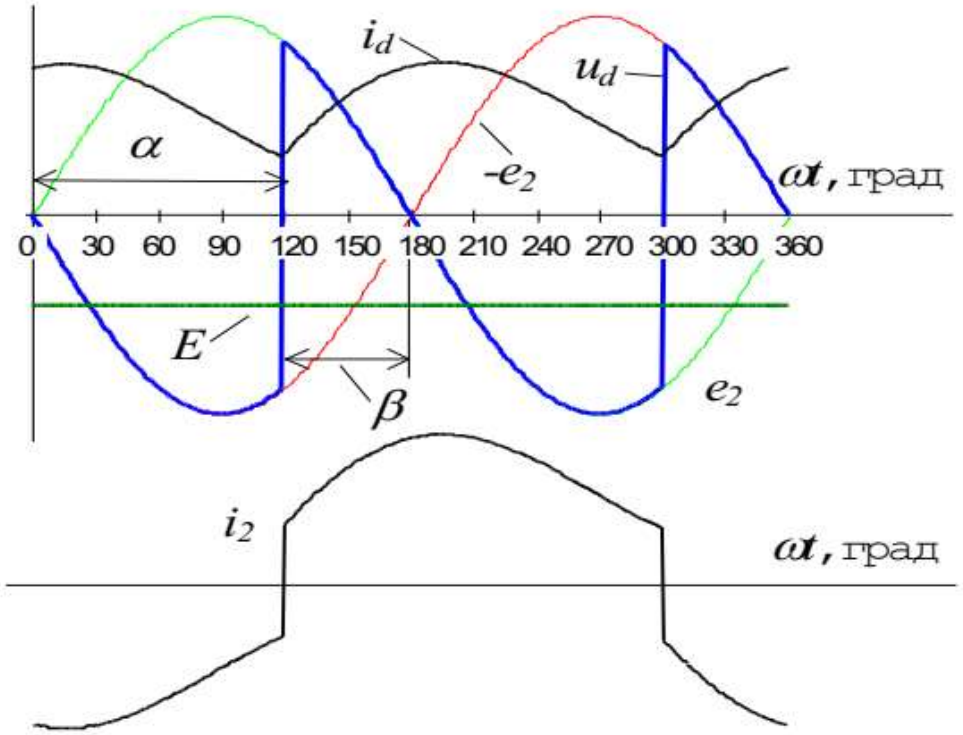

Рис. 25. Процеси в інверторному режимі (безперервний струм)

Оскільки протягом усього інтервалу провідності напрямки струму та проти-ЕРС збігаються, енергія віддається від джерела проти-ЕРС до випрямляча та вторинної обмотки трансформатора і далі до живильної мережі. Якщо навантаженням випрямляча є машина постійного струму, за однакових напрямків струму та проти-ЕРС вона працює в рекуперативному режимі. Подальше збільшення проти-ЕРС сприяє зменшенню, а потім і взагалі зникненню безструмової паузи (рис. 25). Якби не було проти-ЕРС, випрямлений струм за таких великих кутів керування швидко впав би до нуля, однак на інтервалі зростання струму відбувається передача додаткової енергії до індуктивності від джерела проти-ЕРС, що й сприяє зберіганню безперервного характеру струму. На інтервалі зниження струму енергія, отримана від джерела проти-ЕРС, передається до живильної мережі.

Слід зауважити, що в інверторному режимі зсув між споживаним випрямлячем струмом та ЕРС вторинної обмотки трансформатора більший за 90° (див. рис. 25). В інверторному режимі замість кута керування α часто використовується т. з. кут інвертування $\beta = 180° - \alpha$ (див. рис. 26). На рис. 26, 27 зображені часові діаграми інверторного режиму в трифазній нульовій схемі для двох різних кутів керування.

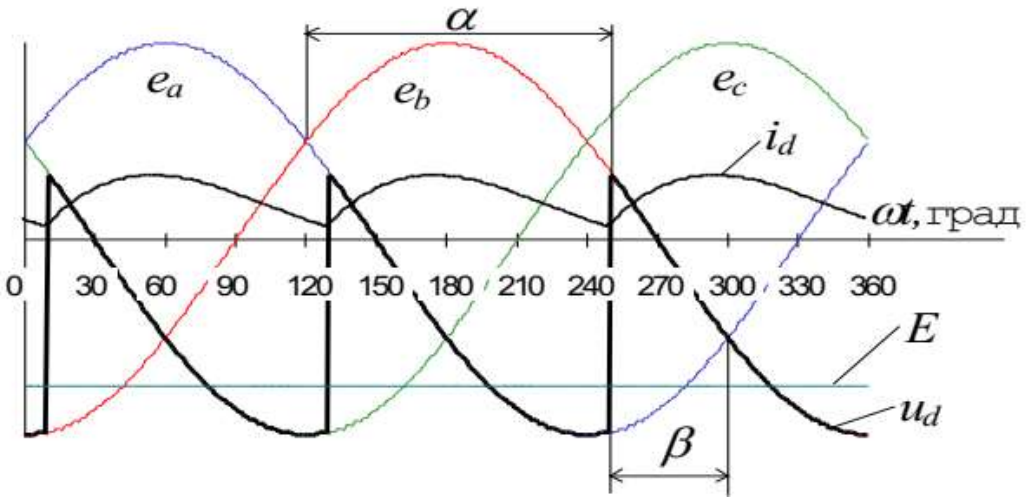

Рис. 26. Процеси у трифазній нульовій схемі в інверторному режимі (безперервний струм)

Випрямляч, що працює в інверторному режимі, часто звуть залежним інвертором або інвертором, веденим мережею, оскільки моменти комутації тиристорів визначаються формою напруги в живильній мережі.

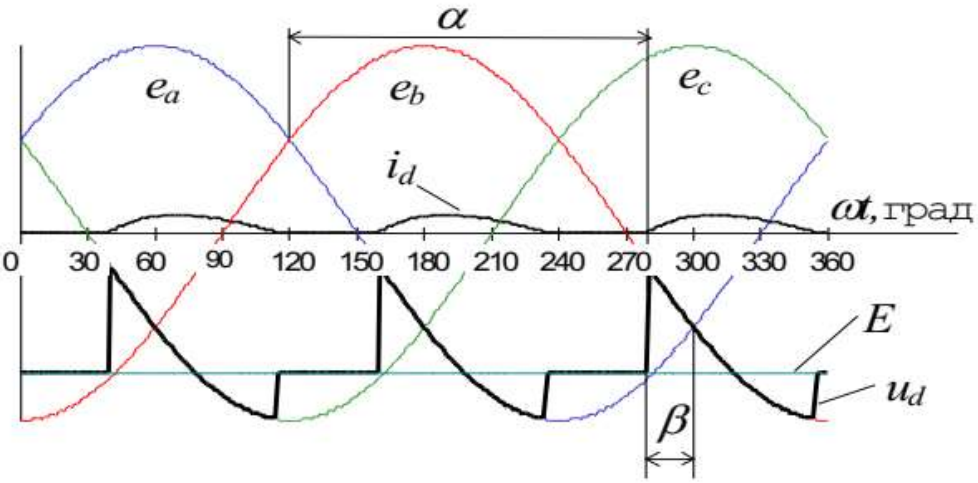

Рис. 27. Процеси у трифазній нульовій схемі в інверторному режимі (переривистий струм)

Інверторний режим випрямляча широко використовується в автоматизованому електроприводі. Це дає можливість передати до мережі енергію, яка генерується електричною машиною під час її роботи в рекуперативному режимі.

Раніше під час розгляду електромагнітних процесів у випрямлячах було зроблено припущення про відсутність індуктивності розсіювання живильного трансформатора. Тому процес комутації (перемикання) вентилів вважався миттєвим. Насправді внаслідок наявності індуктивності в контурі

комутації струми тиристорів нездатні змінитися стрибком, тому на процес перемикання потрібен певний час.

Розглянемо процес комутації в однофазній мостовій та трифазній нульовій схемах, вважаючи, що індуктивність контуру комутації $Lk \neq 0$, а індуктивність навантаження – Ld>>Lк. Остання умова означає, що випрямлений струм безперервний і не має коливань. Активним опором контуру комутації знехтуємо.

А. Однофазна мостова схема

Нехай на момент чергової комутації працювали тиристори *VS1, VS4*, а тиристори *VS2, VS3* тільки що отримали керуючі імпульси. На цей момент часу ЕРС вторинної обмотки трансформатора вже встигла змінити свій знак на протилежний (див. рис. 28). Одразу після відкриття тиристорів *VS2, VS3* створюються два ідентичні короткозамкнені контури комутації: «*VS1* – вторинна обмотка трансформатора – *VS3*» та «*VS2* – вторинна обмотка – *VS4*». Ці контури мають джерело ЕРС ($e2$). Під впливом означеної ЕРС виникають струми комутації *ік1* та *ік2*. Тому цю ЕРС називають комутаційною ($ek = e2$). Темп зростання цих струмів обмежений тільки індуктивністю контуру комутації ($Lk = La$): $di_{к1}/\mathrm{dt} = di_{k2}/dt = e_к/ L_k$, і тому вони досить швидко збільшуються. Слід, однак, зауважити, що початкові значення ЕРС та похідної струму на початку комутації залежать від кута керування. Якщо випрямляч не має власного силового трансформатора та живиться безпосередньо від потужної мережі з малою внутрішньою індуктивністю, для обмеження похідних комутаційних струмів та ЕРС самоіндукції в контурі комутації до кожної фази послідовно з випрямлячем вмикають додатковий комутаційний (струмообмежувальний) реактор.

Сумарний струм через *VS1, VS4* завдяки появі комутаційних струмів зменшується, а через *VS2, VS3* – зростає.

У той момент, коли струм через *VS1, VS4* впаде до нуля, тиристори закриваються, струм навантаження цілком переходить на *VS2, VS3* і процес комутації закінчується.

Оскільки в процесі комутації всі чотири тиристори відкриті, вторинна обмотка замкнена накоротко і вихідна напруга *ud = 0* (див. рис. 29).

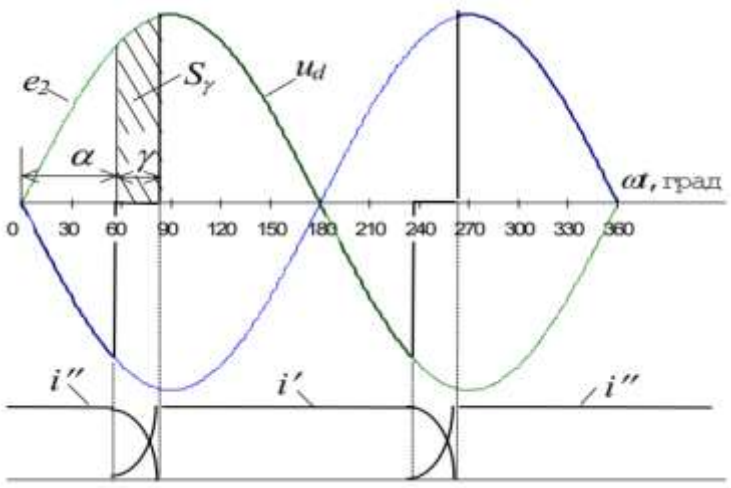

Рис. 28. Процес комутації у випрямному режимі однофазної мостової схеми

Явище одночасного відкритого стану тих тиристорів, що вмикаються, і тих, що вимикаються, зветься ефектом перекриття вентилів. Унаслідок ефекту перекриття в кривій миттєвої випрямленої напруги з'являються т. зв. комутаційні провали, а середня випрямлена напруга зменшується на величину комутаційного спаду напруги ΔU_γ. Цей спад зростає зі збільшенням тривалості γ процесу комутації. В інверторному режимі процес комутації проходить аналогічно, лише з тією різницею, що ефект перекриття призводить не до зниження, а до збільшення модуля середньої вихідної напруги (рис. 29).

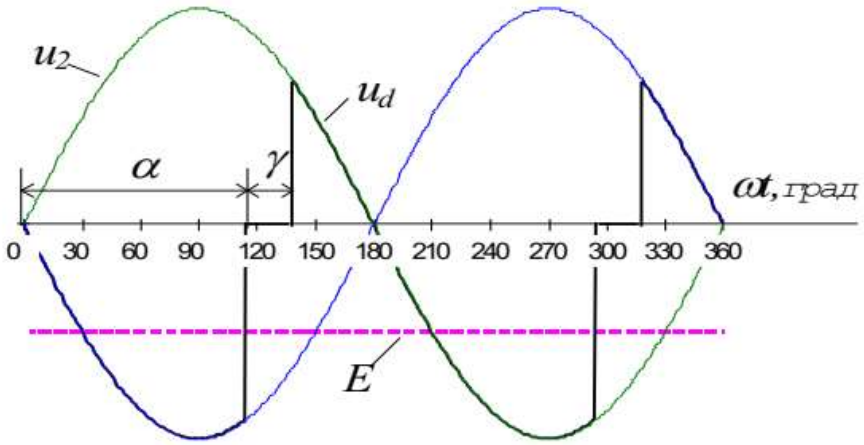

Рис. 29. Процес комутації в інверторному режимі однофазної мостової схеми

2. Порядок виконання роботи

1. У середовищі Electronics Workbench побудувати схему однофазного автономного інвертора напруги (рис. 30). Зберегти її у папці, названій вашим прізвищем, у файлі r8_1.ewb.

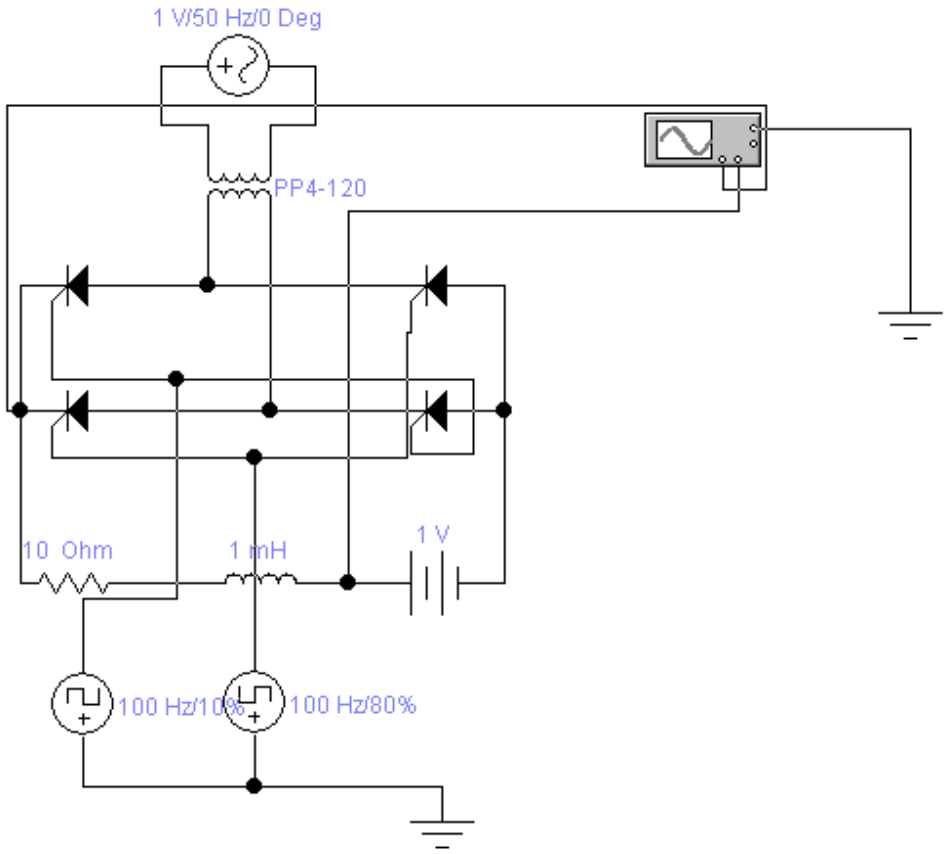

Рис. 30. Схема однофазного автономного інвертора напруги

ВИСНОВКИ

Висновки зробити за результатами віртуального експерименту й обчислень.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. За якими признаками автономні інвертори поділяються на інвертори напруги, інвертори струму резонансні інвертори?

2. Поясніть призначення зворотних діодів в інверторах напруги.

3. Які можливі варіанти алгоритмів керування силовими ключами автономних інверторів напруги?

4. Поясніть роботу АІН з подіагональним керуванням силовими ключами.

5. Поясніть сутність широтно-імпульсного формування й регулювання вихідної напруги АІН.

6. Поясніть сутність широтно-імпульсного регулювання вихідної напруги АІН із залежною від параметрів навантаження формою вихідної напруги.

Список літератури

1. Конспект лекцій з кредитного модуля «Електроніка та схемотехніка» дисципліни «Електротехніка та електроніка» для студентів напряму підготовки 6.050504 – Зварювання / Уклад.: І. А. Петренко. – Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017.– 211 с.

2. Перетворювальна техніка : підручник. Частина 1 / В.С. Руденко, В. Л. Ромашко, В. Г. Морозов. – Київ : ІСДО, 1996. – 262 с.

3. Перетворювальна техніка : підручник. Частина 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний. В. Г Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. За ред. В. С. Руденка. – Харків : Фоліо, 2000. – 360 с.

4. Городжа А. Д., Мазуренко Л. І., Подольцев О. Д. Загальна електротехніка : навчальний посібник. – Київ : КНУБА, 2015. – 224 с.

Навчально-методичне видання

Напівпровідникові перетворювачі в сучасних електроприводах

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
які навчаються за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: **Ковалишин** Богдан Михайлович,
Кравченко Ігор Миколайович

Випусковий редактор *Т. В. Івченко*
Комп'ютерне верстання *Л. В. Лабунець*

Підписано до друку 15.01.2025. Формат 60 х $84_{1/16}$
Ум. друк. арк. 2,56. Обл.-вид. арк. 2,75.
Електронний документ. Вид. № 183/ІІІ-24

Видавець і виготовлювач:
Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002