



Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**5314 Методичні вказівки**  
до виконання лабораторних робіт  
із дисципліни «**Енергетична електроніка**»  
для студентів спеціальності *171 «Електроніка»*  
всіх форм навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2022

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Енергетична електроніка» / укладачі: А. І. Новгородцев, В. М. Гапич. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 60 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

## Зміст

	С.
Основні вимоги до виконання лабораторних робіт .....	4
<b>Лабораторна робота 1</b> Дослідження однофазних однофазних випрямлячів малої потужності .....	6
<b>Лабораторна робота 2</b> Дослідження однофазного двопівперіодного мостового випрямляча .....	11
<b>Лабораторна робота 3</b> Дослідження випрямлячів, що множать напругу .....	14
<b>Лабораторна робота 4</b> Дослідження трифазного однофазного випрямляча з нульовим виводом .....	17
<b>Лабораторна робота 5</b> Дослідження трифазного двотактного мостового випрямляча .....	21
<b>Лабораторна робота 6</b> Дослідження однофазного двопівперіодного керованого випрямляча з нульовим виводом .....	24
<b>Лабораторна робота 7</b> Дослідження однофазного двопівперіодного мостового керованого випрямляча .....	29
<b>Лабораторна робота 8</b> Дослідження трифазного мостового керованого випрямляча .....	35
<b>Лабораторна робота 9</b> Дослідження згладжу вальних фільтрів на реактивних елементах .....	40
<b>Лабораторна робота 10.</b> Досліджування згладжувальних фільтрів на транзисторах .....	45
<b>Лабораторна робота 11</b> Дослідження параметричного стабілізатора постійної напруги .....	51
<b>Лабораторна робота 12</b> Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги .....	55
Список літератури .....	59

## Основні вимоги до підготовки лабораторних робіт

Методичні вказівки, призначені для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка», нададуть допомогу студентам під час підготовки й виконання лабораторних робіт із дисципліни «Напрявні системи електричного та оптичного зв'язку».

Під час позааудиторної підготовки студенти повинні відповісти на контрольні запитання з теми лабораторної роботи, виконати розрахункові завдання, підготувати таблиці для записування результатів вимірювання.

Обсяг кожної роботи розрахований на чотири години лабораторних занять. За цей час студенти повинні відповісти на контрольні запитання, наведені в методичних вказівках, зібрати досліджувану схему, зафіксувати результати експерименту, побудувати графіки й усі матеріали дослідження погодити з керівником робіт.

Цілі проведення лабораторних робіт із дисципліни «Напрявні системи електричного та оптичного зв'язку».

- закріплення основних теоретичних положень і висновків із дисципліни;
- розвиток навичок самостійної роботи студентів;
- стимулювання пізнавальної активності студентів;
- вироблення у студентів навичок планування та проведення експерименту;
- оброблення студентами одержаних даних для формулювання висновків за результатами досліджень;
- з'ясування студентами основних принципів складання структурних і принципових схем пристрою перетворювальної техніки;
- ознайомлення студентів із сучасними пристроями перетворювальної техніки;
- ознайомлення студентів із сучасними перетворювачами й завданнями, вирішуваними ними в народному господарстві країни;

– освоєння основної технічної документації, стандартів та ЕСКД, необхідних інженерові - проектувальникові перетворювальної техніки.

Під час виконання лабораторних робіт студенти одержують знання з:

– цільового використання перетворювачів електричної енергії;

– критичного аналізу властивостей і можливостей окремих блоків перетворювальної техніки;

– розроблення структурних, принципівих схем та конструкцій перетворювачів;

– оформлення документації відповідно до чинних державних стандартів та ЕСКД.

Під час виконання лабораторних робіт студенти набувають уміння:

– складати структурні та принципіві схеми перетворювачів згідно з вихідними технічними даними до завдання;

– розраховувати елементи блоків перетворювальних пристроїв;

– досліджувати макети основних типів перетворювачів з оформленням необхідної документації;

– робити висновки щодо технічного стану досліджуваного макета;

– вибирати елементи пристрою відповідно до існуючої номенклатури комплектувальних виробів.

# Лабораторна робота 1

## Дослідження однокатних однофазних випрямлячів малої потужності

**Мета роботи** – вивчення принципу дії основних видів випрямних схем, застосовуваних у блоках живлення малої потужності, дослідження зовнішніх характеристик випрямних схем із різними видами навантаження, діаграм напруг і струмів випрямних схем.

### 1 Опис лабораторної установки

#### 1.1 Конструкція

Стенд сконструйований у вигляді настільного переносного пристрою. Усі ручки й органи керування, а також вимірювальні прилади розміщені на передній панелі. На фальшпанелі й панелях, що накладаються на неї, досліджуваних випрямлячів і фільтрів нанесені зображення досліджуваних схем та відповідні написи.

На фальшпанелі встановлюють змінні панелі досліджуваних випрямлячів і фільтрів із пристроями комутації.

На лицьовій панелі стенда розміщені:

- тумблер вмикання стенда з написом «Мережа»;
- сигнальна лампочка;
- тумблер SA2 для послідовного вмикання діодів однопівперіодного випрямляча під час дослідження впливу внутрішнього опору діода на характеристики випрямляча;
- тумблер SA3 для підключення конденсаторів різної ємності (C1 або C2) під час роботи випрямлячів на ємність;
- тумблер SA5, що перемикає L1 і L2 у схемі LC – фільтра або підключає компенсаційну обмотку дроселя L2 під час дослідження LC – фільтра з компенсацією;
- тумблер SA6 для підключення різних ємностей (C3 або C4) у фільтрах LC;
- тумблер SA7, за допомогою якого підключають різні конденсатори (C5 або C6) в транзисторному фільтрі;

- тумблер  $SA4$ , за допомогою якого підключаєть активне навантаження до різних схем випрямлячів;
- ручка регулювання опору навантаження « $R_H$ »;
- ручка регулювання опору в  $RC$  - фільтрі « $R_\phi$ »;
- ручка регулювання величини опору базового діляника в транзисторному фільтрі « $R_D$ »;
- гнізда «1–20» для вимірювання напруг і перегляду осцилограм у характерних точках досліджуваних схем;
- вольтметр  $PV1$  для вимірювання напруги на вторинній обмотці трансформатора;
- міліамперметр  $PA$  для вимірювання величини середнього випрямленого струму;
- вольтметр  $PV2$  для вимірювання напруги в характерних точках схем.

До складу лабораторного стенда входять:

- знижувальний трансформатор;
- однопівперіодний випрямляч;
- двопівперіодний випрямляч;
- випрямляч подвоєння напруги;
- мостовий випрямляч;
- згладжувальні фільтри;
- регульоване навантаження;
- пристрій комутації випрямлячів;
- пристрій комутації фільтрів.

## 2 Дослідження однопівперіодного випрямляча

### Порядок виконання роботи

2.1 На стенді встановити змінні панелі з мнемосхемами: випрямляч однопівперіодний (панель 1) і  $LC$  - фільтр (панель 6). Досліджувана схема наведена на рисунку 1.

Через пристрої комутації  $LC$  - фільтра досліджуємо роботу випрямляча на активно-індуктивне й активно-емнісне навантаження.

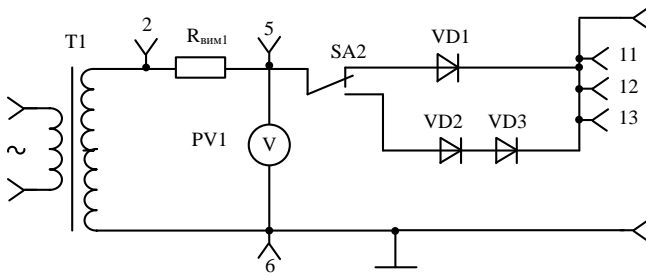


Рисунок 1 – Однопівперіодний випрямляч

## 2.2 Зняти зовнішні характеристики випрямляча за

$U_2 = const$  для таких видів навантаження:

- активного;
- активно-ємнісного;
- активно-індуктивного.

**Примітка.** Зняття зовнішньої характеристики проводим для декількох точок, змінюючи струм навантаження за допомогою потенціометра, розміщеного на передній панелі з написом « $R_H$ ».

Величину ємності вибирають перемикачем SA3, а зміну величин індуктивностей тумблером SA5.

2.3 Замалювати тимчасові діаграми напруг на навантаженні, струму у вторинній обмотці трансформатора й напруги на діоді для варіантів підпункту 2.2 за допомогою осцилографа.

**Примітка.** Форму струму вторинної обмотки знімати з  $R_{вим1}$  і  $R_{вим2}$  (контрольні гнізда 2, 5)

2.4 Розрахувати параметри  $E_2$ ,  $I_2$ ,  $S_T$ ,  $U_{звор.струм}$ ,  $I_a$ ,  $m_n$ ,  $f_{2(1)}$ ,  $k_{n(1)}$  для активної, індуктивної та ємнісної реакцій навантаження, якщо відомо, що  $U_d = 40B$  і  $I_d = 1A$ .

З довідника вибрати тип вентилів.



### 3 Дослідження двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом

3.1 На стенді встановити змінні панелі з мнемосхемами: випрямляч двопівперіодний із середньою точкою (панель 2) і LC- фільтр (панель 6). Досліджувана схема наведена на рисунку 2.

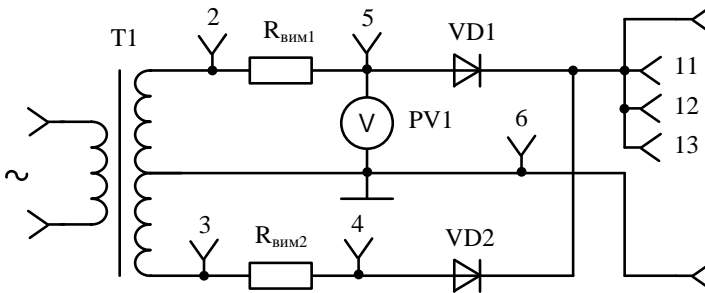


Рисунок 2 – Двопівперіодний нульовий випрямляч

У двопівперіодній схемі випрямлення вторинна обмотка трансформатора має вивід середньої точки. Напряга з вторинної обмотки, трансформатора надходить на діоди  $VD1$ ,  $VD2$ , катоди яких з'єднані в спільній точці.

Через пристрої комутації LC- фільтра досліджуємо роботу випрямляча на активно-індуктивне й активно-ємнісне навантаження.

3.2 Зняти зовнішні характеристики випрямляча за

$U_2 = const$  для таких варіантів:

- активного навантаження;
- активно-ємнісного навантаження;
- активно-індуктивного навантаження.

**Примітка.** Зняття зовнішньої характеристики проводити для декількох точок, змінюючи струм навантаження за допомогою потенціометра, розміщеного на передній панелі з написом «  $R_H$  ».

Величину ємності вибирають перемикачем SA3, а зміну величин індуктивностей тумблером SA5.

3.3 Замалювати тимчасові діаграми напруг на навантаженні струму у вторинній обмотці трансформатора й напруги на одному з діодів для варіантів підпункту 2.2 за допомогою осцилографа.

**Примітка.** *Форму струму вторинної обмотки знімати з  $R_{вим1}$  і  $R_{вим2}$  (контрольні гнізда 2, 5 і 3, 4)*

3.4 Розрахувати параметри  $E_2$ ,  $I_2$ ,  $S_T$ ,  $U_{звор.струм}$ ,  $I_a$ ,  $m_n$ ,  $f_{2(1)}$ ,  $k_{n(1)}$  для активної, індуктивної та ємнісної реакцій навантаження, якщо відомо, що  $U_d = 40B$  і  $I_d = 1A$ .

З довідника вибрати тип вентилів.

### **Контрольні запитання**

- 1 Пояснити принцип роботи схеми з нульовим виводом.
- 2 Намалювати форму струмів в елементах схеми випрямляча і навантаження.
3. Навантажувальна характеристика випрямляча. Від чого залежить її нахил?
- 4 Що таке внутрішній опір випрямляча і як його визначають?
- 5 Чому в схемі з нульовим виводом трансформатора зворотна напруга на вентилях удвічі більша, ніж у мостовій схемі?
- 6 Чому максимальне значення струму у вентилі випрямляча різне для різних видів навантаження за однієї і тієї самої потужності в навантаженні?

## Лабораторна робота 2

### Дослідження однофазного двопівперіодного мостового випрямляча

Діяти аналогічно до підпунктів 2.1, 2.2 і 2.3. Досліджувана схема зображена на рисунку 3.

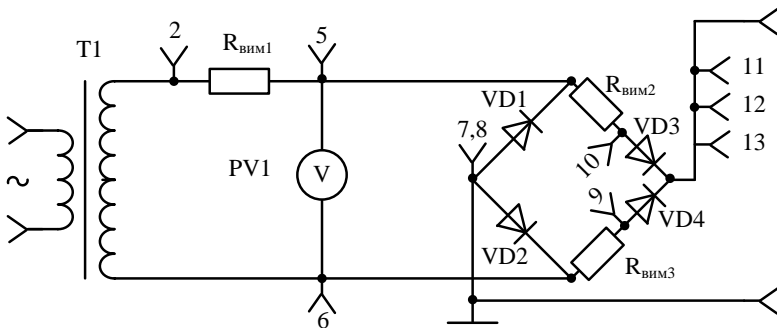


Рисунок 3 – Мостовий однофазний двопівперіодний випрямляч

В однофазній мостовій схемі випрямлення чотири діоди  $VD1 - VD4$  з'єднані так, що впродовж однієї половини періоду напруга вторинної обмотки подається на навантаження через одну пару діодів –  $VD3, VD2$ , а впродовж іншої половини періоду – через іншу пару –  $VD1, VD4$ .

У цій схемі вторинна обмотка трансформатора працює обидві половини періоду, і через неї проходить струм в обох напрямках. Через опір навантаження струм також проходить упродовж періоду напруги в одному напрямку.

У мостовій схемі в первинній обмотці трансформатора під час роботи на активне навантаження проходить чисто синусоїдальний струм. Схема характеризується хорошим використанням вентилів і трансформатора, тому її широко використовують під час випрямлення однофазного струму.

Під час роботи на активно-індуктивне навантаження форма струму у вентилях стає більш згладженою і за достатньо великої індуктивності має форму прямокутних імпульсів. Під

час роботи на активно-ємнісне навантаження в цій схемі, як і в інших, з'являється кут відсічки, тобто зменшується тривалість проходження струму у вентилях. У цьому разі струм вентилів має форму косинусоїдальних імпульсів із великою амплітудою.

Найсприятливіший режим роботи вентилів – у схемі з активно-індуктивним навантаженням. Найнесприятливіший – у схемі з активно-ємнісним навантаженням. Тому її застосовують, переважно у випрямлячах невеликої потужності.

Зовнішня характеристика випрямляча або навантажувальна характеристика  $U_d = f(I_d)$  – це залежність середнього значення випрямленої напруги від середнього значення випрямленого струму, що проходить у навантаженні.

Зміна напруги на виході випрямляча за зміни струму обумовлена наявністю явища комутації вентилів, а також визначається зниженням напруги в обмотках трансформатора та на опорах відкритих вентилів.

## Порядок виконання роботи

2.1 На стенді встановити змінні панелі з мнемосхемами: двопівперіодний випрямляч (панель 3) і LC- фільтр (панель 6). Досліджувана схема наведена на рисунку 3.

Через пристрої комутації LC- фільтра досліджуємо роботу випрямляча на активно-індуктивне й активно-ємнісне навантаження.

2.2 Зняти зовнішні характеристики випрямляча за

$U_2 = const$  для таких варіантів:

- активного навантаження;
- активно-ємнісного навантаження;
- активно-індуктивного навантаження.

Величину ємності вибирають перемикачем SA3, а зміну величин індуктивностей – тумблером SA5.

2.3 Замалювати тимчасові діаграми напруг на навантаженні струму у вторинній обмотці трансформатора й напруги на одному з діодів (рисунок 3) за допомогою осцилографа.

## Контрольні запитання

- 1 Пояснити принцип роботи мостової схеми.
- 2 Намалювати форму струмів в елементах схеми випрямляча і навантаження.
- 3 Навантажувальна характеристика випрямляча. Від чого залежить її нахил?
- 4 Що таке внутрішній опір випрямляча і як він визначають?
- 5 Чому максимальне значення струму у вентилі випрямляча різне для різних видів навантаження за однієї й тієї самої потужності в навантаженні?
- 6 У якій схемі кращий коефіцієнт використання потужності трансформатора і чому?
- 7 У якій схемі кращий коефіцієнт використання вентилів за напругою і чому?
- 8 Від чого залежить ККД випрямляча, і в якій схемі він більший?

## Лабораторна робота 3

### Дослідження випрямлячів, що множать напругу

#### Теоретичні відомості

Принцип роботи помножувачів напруги базується на використанні кількох конденсаторів, кожен із яких заряджається від однієї обмотки трансформатора через відповідний вентиль. Щодо навантаження, конденсатори ввімкнені послідовно, і їх напруги додаються.

Такі випрямлячі застосовують для живлення високовольтних пристроїв малої потужності, що споживають незначний струм (кілька міліампер), таких як рентгенівські трубки, аноди високовольтних електронно-променевих трубок, електронні мікроскопи, фотоелектронні помножувачі і т. ін.

Розрізняють симетричні й несиметричні схеми множення напруги.

Симетрична схема подвоєння напруги – схема Латура складається з двох однопівперіодних випрямлячів (рис. 4) .

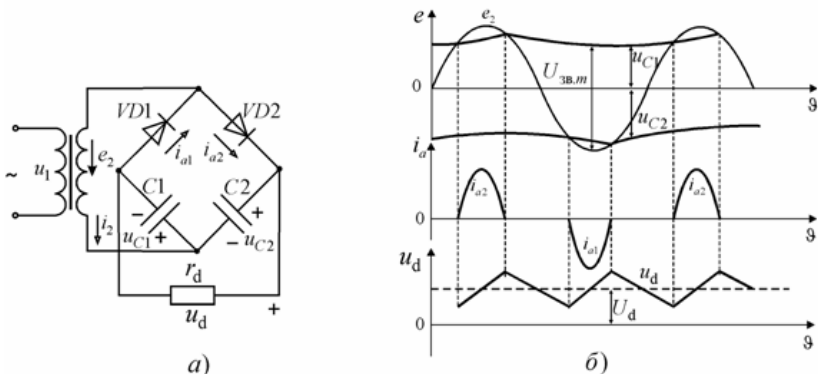


Рисунок 4 – Симетрична схема подвоєння напруги:  
а) електрична схема; б) часові діаграми роботи

У несиметричній схемі подвоєння напруги (рис. 5) два однопівперіодні випрямлячі живляться від різних за величиною напруг.

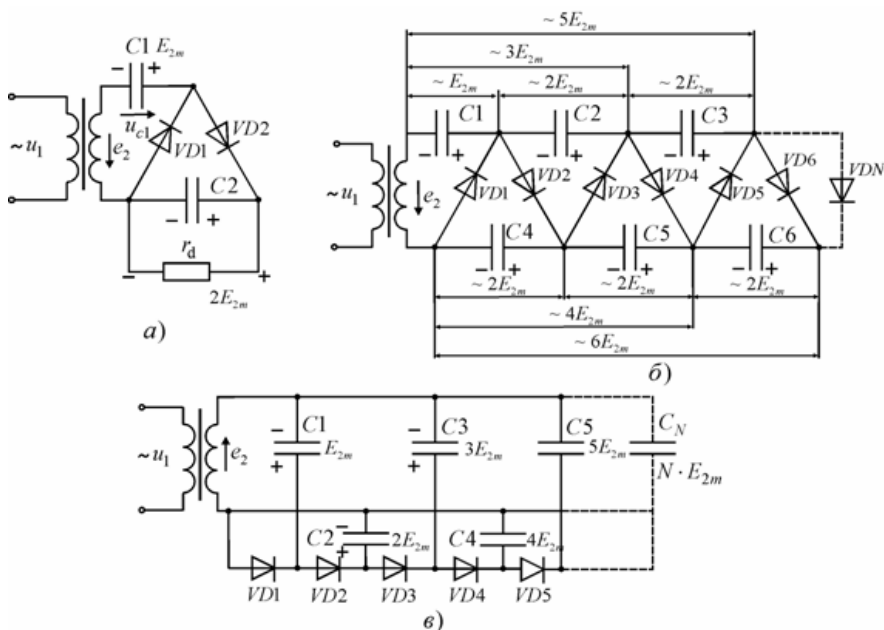


Рисунок 5 – Несиметричні схеми помножувачів напруги

Досліджувана схема зображена на рисунку 6.

Діяти аналогічно до підпунктів 2.1, 2.2, 2.3 (лаб. роб. 1). Щоб дослідити випрямляч подвоєння напруги з різними характеристиками навантаження, необхідно виключити дослідження на активно-індуктивний характер навантаження.

У схемі на два плеча моста ввімкнені діоди  $VD1$ ,  $VD2$ , а на два інших плеча – конденсатори  $C1$  і  $C2$ .

До однієї з діагоналей моста під'єднана вторинна обмотка трансформатора, а до іншої діагоналі – навантаження.

У перший півперіод струм проходить через вторинну обмотку, діод  $VD2$  і конденсатор  $C1$ , у другий півперіод струм проходить через діод  $VD1$  і конденсатор  $C2$ .

Конденсатор розряджається на опір навантаження. Оскільки напруги на конденсаторах  $U_{C1}$  і  $U_{C2}$  зрушені за фазою на половину періоду, то сумарна напруга змінюється з подвоєною частотою, тобто в цій схемі частота першої

гармоніки випрямленої напруги дорівнює подвоєній частоті мережі ( $f_{n1} = 2f_C$ ).

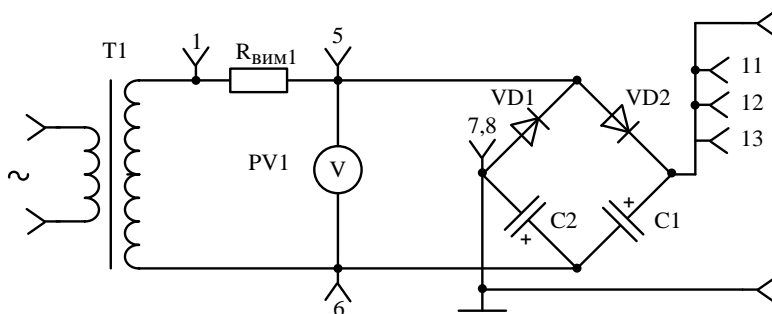


Рисунок 6 – Схема з подвоєнням напруги

Струм у вторинній обмотці трансформатора в різні півперіоди має протилежний напрямок, і постійна складова струму у вторинній обмотці дорівнює нулю.

### Зміст звіту з роботи

- 1 Навести принципові схеми несиметричних помножувачів напруги.
- 2 Таблиця експериментальних даних за підпунктом 2.2.
- 3 Графіки зовнішніх характеристик та осцилограм напруг і струмів за підпунктами 2.2, 2.3.
- 4 Висновки з порівняння результатів експерименту з теоретичними положеннями з досліджуваних питань.

### Контрольні запитання

- 1 Як поділяють схеми подвоєння випрямленої напруги?
- 2 Чому вихідна напруга менша від амплітудної?
- 3 Який недолік симетричної схеми подвоєння напруги?
- 4 На основі якої схеми побудовані помножувачі напруги?
- 5 Які переваги й недоліки помножувачів напруги?
- 6 Що є джерелом струму навантаження?
- 7 Що таке час комутації?



## Лабораторна робота 4

### Дослідження трифазного однофазного випрямляча з нульовим виводом

**Мета роботи** – вивчення принципу дії трифазної нульової схеми випрямлення та її основні розрахункові співвідношення, дослідження зовнішніх характеристик випрямляча, діаграм напруг і струмів для різних ділянок схеми.

#### 1 Конструкція стенда

Стенд виконаний у вигляді настільного переносного приладу. Конструктивно стенд складається з розбірного каркаса й кожуха зі змінною задньою стінкою. До передньої панелі кріпиться лицьова панель із нанесеним на ній зображенням частини схеми стенда.

До лицьової панелі двома гвинтами, що не випадають, кріпиться лицьова панель із нанесеним на ній зображенням частини схеми стенда.

До лицьової панелі двома гвинтами, що не випадають, кріпиться одна зі змінних панелей із зображенням схеми досліджуваного трифазного випрямляча.

Усі органи керування, контрольні гнізда та вимірювальні прилади розміщені на передній панелі й мають такі написи:

– вимикач «Q1» «Мережа» – для вмикання стенда;  
– лампочка індикації – для контролю вмикання живлення за фазами;

– прилад «I1» – для вимірювання струму у фазі;

– прилад «I2» і кнопка « $\frac{x_2}{x_1}$ » – для вимірювання струму у

вторинному ланцюзі;

– прилад «U» – для вимірювання фазової або лінійної напруги;

– прилад «Ia» – для вимірювання постійного струму в ланцюзі випрямляча;

- прилад « $I_d$ » – для вимірювання постійного струму в навантаженні;
- прилад « $U_d$ » – для вимірювання постійної напруги на навантаженні;
- тумблери « $S1$ », « $La$ », « $Lb$ », « $Lc$ » – для вмикання індуктивностей у фазах А, В, С;
- тумблери « $S2$ », « $U_l - U_\phi$ » – для перемикання приладу;
- тумблери « $S3$ », « $Ld$ » – для підключення індуктивності до навантаження;
- тумблер « $S4$ », « $R_n$ » – для вмикання активного навантаження;
- перемикач « $R_n$ » – для перемикання величині навантаження « $0,5R_n$ », « $R_n$ », « $2R_n$ »;
- гнізда «1–12» – для перегляду осцилограм струму.

## 2 Порядок виконання роботи

Трифазний випрямляч із нульовим виводом вторинної обмотки трансформатора реалізований на діодах  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD$  (рис. 7).

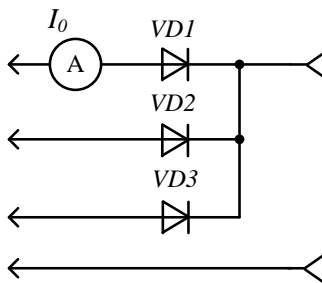


Рисунок 7 – Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом

У ланцюгах живлення фаз після трансформатора ввімкнені дроселі  $La$ ,  $Lb$ ,  $Lc$ , що імітують індуктивності розсіювання обмоток трансформатора, які можна закорочувати тумблером  $S1$ , – « $La$ », « $Lb$ », « $Lc$ ».

Величину активного навантаження змінюють дискретно перемикачем  $S5$  НАВАНТАЖЕННЯ і вона має такі значення: « $0,5R_n, R_n, 2R_n$ ».

Тумблером  $S4$  ( $R_n$ ) можна створити режим  $X, X$ .

Індуктивно-активне навантаження створюють підключенням дроселя  $L_d$ . Вмикають дросель  $L_d$  тумблером  $S3$  (« $L_d$ »).

Для перегляду осцилограм у характерних ділянках схеми ввімкнені вимірювальні резистори опором  $1\text{ Ом}$  із контрольними гніздами.

2.1 Зняти зовнішні характеристики випрямляча для таких варіантів:

- активного навантаження;
- індуктивно-активного навантаження.

**Примітка.** Для побудови зовнішньої характеристики досить виміряти випрямлену напругу за різних значень струму навантаження – відповідно  $2R_n, R_n, 0,5R_n, R_n = \infty$

2.2 Змалювати часові діаграми напруг на навантаженні для варіантів п. 2.1, на вентилі  $VD1$  і струму, що проходить через вентиль  $VD1$ .

2.3 За даними експерименту визначити співвідношення  $U_d/U_2, I_d/I_2$  і порівняти їх із теоретичними співвідношеннями. З довідника вибрати тип вентилів.

2.4 Розрахувати зовнішню характеристику випрямляча  $U_d = f(I_d), E2 = const$ , що працює на активне навантаження. Вихідні дані для розрахунку зовнішньої характеристики:  $U_d = 40\text{ В}, r_{np} = 3\text{ Ом}$ , тип діодів Д226Д, струм навантаження змінювати від  $0\text{ А}$  до  $1,0\text{ А}$ .

### Контрольні запитання

1 Опишіть принцип дії трифазної нульової схеми випрямлення із застосуванням часових діаграм струмів і напруг.

2 Наведіть основні розрахункові співвідношення для трифазної нульової схеми випрямлення.

3 Оцініть якісні показники досліджуваних схем випрямлення, їх застосування.

4 Що таке кут комутації вентилів і від чого він залежить?

5 Поясніть хід зовнішньої характеристики схеми.

6 Порядок виконання роботи.

## Лабораторна робота 5

### Дослідження трифазного двотактного мостового випрямляча

#### Теоретичні відомості

Трифазні випрямлячі використовують для одержання випрямленої напруги за великих потужностей у навантаженні.

Шість вентилів випрямляча умовно поділяють на дві групи: вентиля  $VD1, VD2, VD3$  складають катодну групу (мають спільний катод), а  $VD4, VD5, VD6$  – анодну групу (мають спільний анод). Кожен вентиль випрямляча пропускає струм упродовж  $1/3$  періоду напруги мережі (тривалість відкритого стану вентиля  $\lambda = 2\pi/3$ ).

В анодній групі в кожний момент часу працює той вентиль, напруга на катоді якого найбільш негативна. У катодній групі буде пропускати струм той вентиль, на аноді якого найбільш позитивна напруга (рис. 8). Таким чином, у випрямлячі одночасно пропускають струм два вентиля: один із катодної, а інший з анодної групи.

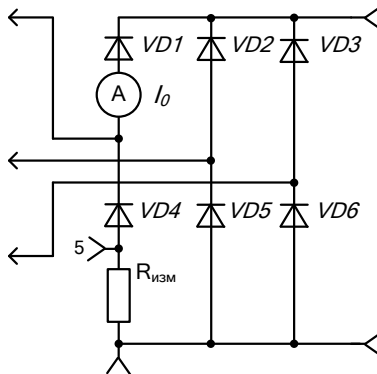


Рисунок 8 – Схема трифазного мостового випрямляча

Значення напруги на навантаженні визначають різницею напруг фаз із найбільш позитивною та найбільш негативною напругою, тобто лінійною напругою (рис. 8).

Оскільки кожна фаза пов'язана з двома вентилями, по ній проходить струм цих вентилів, причому струм проходить двічі за період у протилежних напрямках. Завдяки цьому в мостовій схемі відсутнє явище підмагнічування осердя, що є перевагою цієї схеми.

До вентиля, що не працює, в мостовій схемі прикладена зворотна напруга, яка дорівнює різниці напруг фаз, пов'язаної з цим вентиляем, і тієї фази, на якій у цей момент найбільш позитивна напруга. Максимальна величина зворотної напруги на вентилі дорівнює амплітуді лінійної напруги:

$$U_{VD\max} = \sqrt{2} U_{2л} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2ф}.$$

### Порядок виконання роботи

5.1 Зняти зовнішні характеристики випрямляча для таких варіантів:

- активного навантаження;
- індуктивно-активного навантаження.

*Примітка.* Для побудови зовнішньої характеристики досить виміряти випрямлену напругу за різних значень струму навантаження – відповідно  $2R_n$ ,  $R_n$ ,  $0,5R_n$ ,  $R_n = \infty$

5.2 Для всіх варіантів навантаження зарисувати часові діаграми напруг на навантаженні, а також напруги на вентилі  $VD1$  і струму, що проходить через вентиль  $VD4$ .

5.3 За даними експерименту визначити співвідношення  $U_d / U_2$ ,  $I_d / I_2$  та порівняти їх із теоретичними.

### Зміст звіту з роботи

- 1 Порядок виконання роботи й розрахункових даних.
- 2 Принципові схеми.

3 Таблиці експериментальних даних за підпунктами 5.1, 5.2.

4 Графіки зовнішніх характеристик та осцилограм вихідних напруг і струмів за підпунктами 5.1, 5.2.

5 Висновки з порівняння результатів експерименту з теоретичними положеннями з досліджуваних питань.

### **Контрольні запитання**

1 Опишіть принцип дії трифазної мостової схеми випрямлення із застосуванням часових діаграм струмів і напруг.

2 Як можна визначити, які вентиля випрямляча пропускають струм в певний момент часу?

3 Кратність пульсацій випрямленої напруги та коефіцієнт пульсації трифазної мостової схеми?

4 Яка тривалість роботи кожної з фаз у трифазному мостовому випрямлячі?

5 Яка тривалість роботи вентилів у трифазному мостовому випрямлячі?

6 Які причини виникнення явища комутації?

7 Наведіть основні розрахункові співвідношення для трифазної мостової схеми випрямлення.

8 Оцініть якісні показники досліджуваної схеми випрямлення.

## Лабораторна робота 6

### Дослідження однофазного двопівперіодного керованого випрямляча з нульовим виводом

**Мета роботи** – вивчення способів регулювання вихідної напруги, принципу дії тиристорних керованих випрямлячів, характеристик і параметрів керованих випрямлячів, схем систем керування тиристорними випрямлячами.

#### Теоретичні відомості

У заданій схемі (рис. 9) як випрямні елементи використовують керовані тиристори  $VS1$  і  $VS2$ . Катоди тиристорів об'єднані спільною точкою та з'єднані з навантаженням, а аноди – приєднані до кінців вторинних обмоток силового трансформатора  $T$  із виведеною середньою точкою.

Із вторинних обмоток трансформатора стосовно середньої точки знімаються дві протифазних напруги.

У той півперіод, коли через одну з вторинних обмоток трансформатора проходить позитивна півхвиля синусоїдальної напруги, потенціал анода одного з тиристорів (наприклад,  $VS1$ ), вищий від потенціалу катода, і, отже, тиристор  $VS1$  може пропустити струм через навантаження випрямляча за появи керувальної напруги.

Тиристор  $VS2$  у цей півперіод замкнений, тому що в цей момент у нього потенціал катода вищий від потенціалу анода.

В інший півперіод полярність напруги на обмотках трансформатора зміниться на протилежну, і тиристор  $VS1$  закритється, а тиристор  $VS2$  – відкриється.

Подаючи на керувальний електрод тиристора імпульс із деякою затримкою, можна регулювати середнє значення струму й напруги в ланцюзі навантаження.

Навантаження випрямляча підключене між спільною точкою катодів тиристорів і середньою точкою трансформатора. Напруга керування тиристорами повинна відставати за фазою від анодної напруги. У цьому разі тиристор буде закритий із моменту подання позитивної анодної напруги



до часу подання керувальної напруги. Запізнювання вмикання тиристора оцінюється кутом регулювання  $\alpha$ .

Кут  $\alpha$  в загальному випадку може бути визначений за формулою

$$\alpha = -2\arctg R\omega C,$$

де  $R$  – активний опір у плечі моста ( $R3 - R10$ );

$C$  – конденсатор  $C1$ .

Залежність середнього значення напруги в ланцюзі навантаження від кута регулювання  $\alpha$  є регулювальною характеристикою випрямляча  $U_d = f(\alpha)$ .

### Конструкція стенда

Конструктивно стенд виконаний настільним переносним приладом і складається з окремих вузлів і блоків, змонтованих у металевому кожусі.

До передньої панелі й кожуха кріпиться фальшпанель із нанесеним на ній зображенням досліджуваної схеми однофазного регульованого випрямляча на тиристорах.

На панель виведені ручки керування й регулювання:

- тумблер « $S1$ » – вимикач активного або активно-індуктивного навантаження;
- потенціометр НАВАНТАЖЕННЯ – для зміни величини опору активного навантаження;
- перемикач « $R\phi$ » – для зміни кута  $\alpha$ ;
- гнізда «1–16» – для зняття осцилограм у характерних точках випрямляча.

### Порядок виконання роботи

6.1 Зняти зовнішні характеристики випрямляча  $U_d = f(I_d)$  за  $U_a = const$  і  $\alpha = const$  для таких варіантів:

- активного навантаження;
- активно-індуктивного навантаження.

Для кожного з варіантів повинно бути знято не менше ніж дві зовнішні характеристики за різних кутів керування

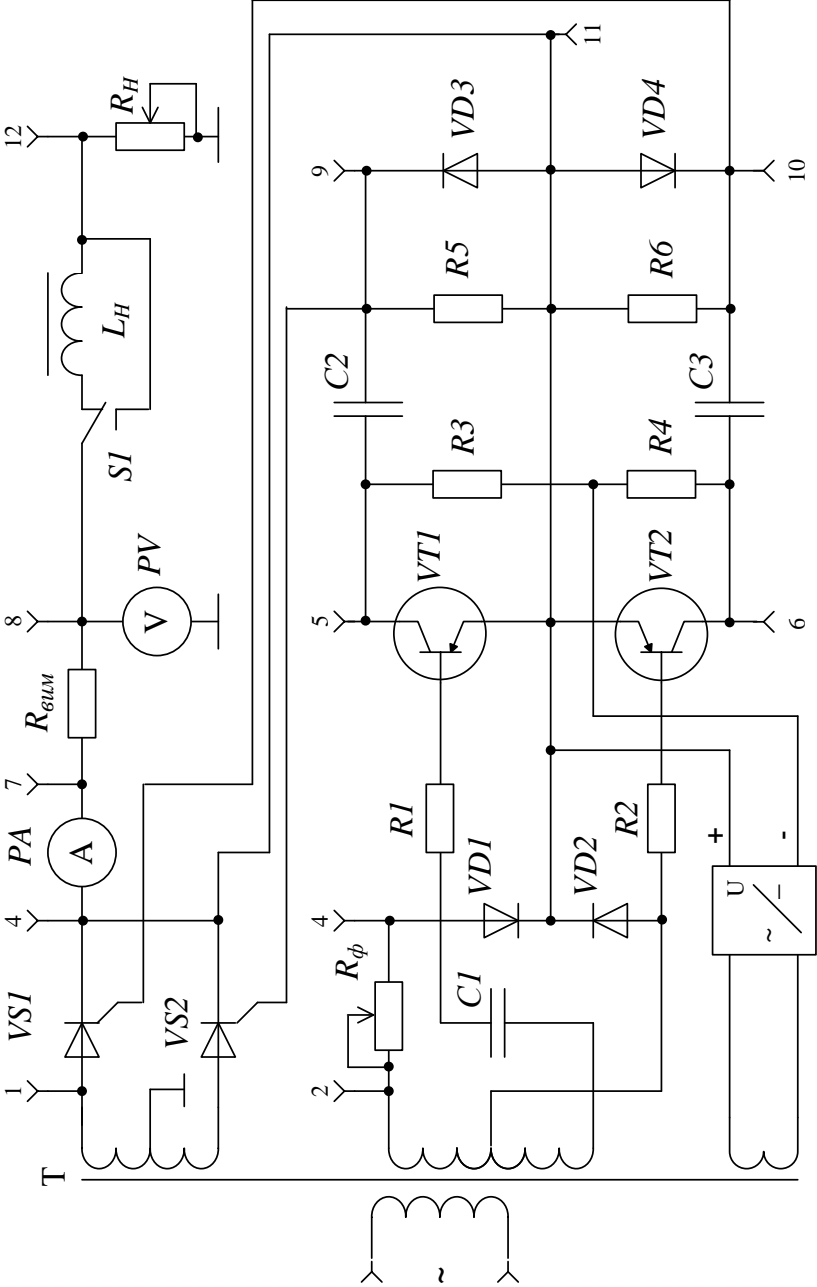


Рисунок 9 – Однофазный кероаний выпрямляч

тиристорами:  $\alpha = \min$ ,  $\alpha = \max$ ,  $\alpha = 60^\circ$ . Кути керування визначити в градусах з екрана осцилографа.

6.2 Замалювати осцилограми напруг на навантаженні й струм для варіантів за підпунктом 2.1 для різних кутів керування.

6.3 За активно-індуктивного навантаження тумблером SA8 увімкнути вентиль VDO із контрольним резистором R0. Замалювати осцилограми напруги в контрольних точках 7–16 струму – 16–17 для кутів керування  $\alpha = 60^\circ$  та  $\alpha = \max$ .

6.4 Зняти регульовальні характеристики  $U_d = f(\alpha)$  керованого випрямляча для таких варіантів:

- активного навантаження;
- активно-індуктивного навантаження.

Залежність  $U_d = f(\alpha)$  знімають за  $U_a = \text{const}$  і  $R_H = \text{const}$ .

6.5 Розрахувати параметри:

$U_{\text{звор}}$ ,  $I_a$ ,  $I_2$ ,  $S_T$  для активного й активно-індуктивного навантажень, якщо відомо, що  $U_d = 40 \text{ В}$  і  $I_d = 1 \text{ А}$ .

За довідником вибрати тип вентилів.

### **Зміст звіту з роботи**

1 Мета роботи.

2 Порядок виконання роботи й розрахункових даних за підпунктом 2.5.

3 Принципова схема випрямляча.

4 Таблиці експериментальних даних за підпунктами 6.1, 6.4.

5 Графіки зовнішніх регульовальних характеристик за підпунктами 6.1, 6.4 та осцилограми напруг за підпунктами 6.2, 6.3.

6 Висновки щодо порівняння результатів експерименту з теоретичними положеннями з вивчених питань.

## Контрольні запитання

- 1 Перелічіть способи зміни вихідної напруги випрямлячів.
- 2 Чому виникає необхідність у регулюванні вихідної напруги випрямлячів?
- 3 Оцініть якісні показники різних способів зміни вихідної напруги випрямлячів.
- 4 Замалюйте зовнішні й регулювальні характеристики випрямляча за активного й активно-індуктивного навантажень та ввімкненого вентиля *VDO*.
- 5 Зарисуйте осцилограми напруг на навантаженні за різних кутів керування.

## Лабораторна робота 7

### Дослідження однофазного двопівперіодного мостового керованого випрямляча

**Мета роботи** – вивчити принцип роботи керованого випрямляча та його системи керування; визначити основні параметри й характеристики.

#### Короткі теоретичні відомості

Керованим називають такий випрямляч, який окрім випрямлення змінної напруги, здійснює ще й регулювання. У керованих випрямлячах застосовують напівкеровані напівпровідникові елементи – тиристри. У тиристорах перехід від закритого до відкритого стану здійснюється за наявності додатного потенціалу на аноді та імпульсу керування на керувальному електроді.

Інтервал затримки вмикання чергового тиристора називають кутом керування  $\alpha$ , й відраховують від моменту природної комутації вентилів, тобто від моменту прикладання до тиристора позитивної напруги. Для однофазних випрямлячів момент природної комутації збігається з моментом переходу напруги мережі через 0.

Інтервал часу  $\alpha$  називають кутом керування тиристорів. Після подання імпульсу керування на тиристор він переходить у відкритий стан і закривається лише тоді, коли струм через нього стає меншим, ніж струм утримання тиристора  $I_{\text{упр.т}}$ .

Зміною кута керування тиристора  $\alpha$  регулюють середнє значення випрямленої напруги  $U_d$  керованого випрямляча.

Важливою характеристикою керованих випрямлячів є їх регульовальна характеристика  $U_d = f(\alpha)$  – залежність середнього значення випрямленої напруги  $U_d$  від кута керування  $\alpha$ . Для схеми мостового керованого випрямляча регульовальну характеристику описують рівнянням

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 + \cos\alpha}{2},$$

де  $U_{d0}$  – середнє значення випрямленої напруги за  $\alpha = 0$ .

Мостовий випрямляч може бути складений за симетричною або несиметричною схемою. У першому випадку всі чотири вентиля є тиристорами, в другому – два вентиля анодної чи катодної групи є діодами. Схема несиметричного керованого випрямляча з додатковим нульовим діодом V0 наведена на рисунку 10.

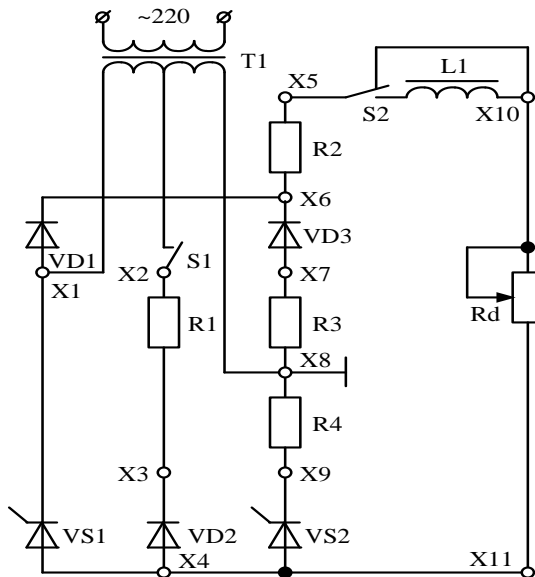


Рисунок 10 – Схема мостового несиметричного керованого випрямляча

Кожний діод працює в парі з тиристором. Перевагою несиметричної схеми є спрощення системи керування, оскільки імпульси керування необхідно подавати лише на два вентиля. У симетричній схемі імпульси керування діагональними тиристорами повинні бути точно синхронізованими, що призводить до ускладнення системи керування.

Однак за необхідності комутувати великі струми і напруги застосовують саме симетричну схему. Регульовальна

характеристика керованого мостового випрямляча має такий самий вигляд, як і для схеми з нульовим виводом.

Збільшити середнє значення напруги та зменшити коефіцієнт пульсацій у мостовій схемі можна за допомогою діода VD0, який називають нульовим (комутаційним) діодом і підключають до середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рис. 10).

Нульовий діод створює шлях для проходження струму навантаження на інтервалі закритого стану тиристора. Водночас збільшується площа під кривою випрямленої напруги  $U_d(t)$ , і відповідно збільшується і середнє значення цієї напруги. Після вмикання тиристорів діод VD0 не впливає на роботу схеми. Уведення нульового діода призводить до зміни регульовальної характеристики, що вже не буде зменшуватися до нуля за  $\alpha = 180^\circ$ , а буде дорівнювати напрузі на половині вторинної обмотки (рис. 11).

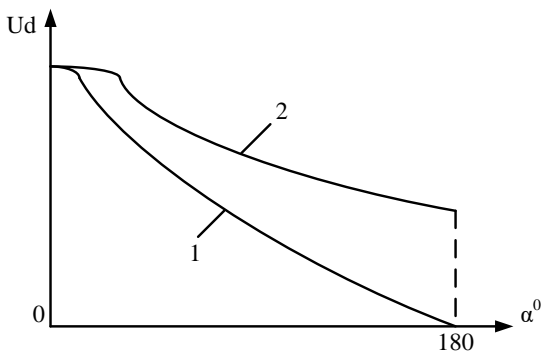


Рисунок 11 – Регульовальна характеристика випрямляча з нульовим діодом

До недоліків керованих випрямлячів порівняно з некерованими належать:

- ускладнення схеми за рахунок появи системи керування. Для симетричної мостової схеми з'являється ще додаткове завдання точної синхронізації моментів умикання діагональних тиристорів;

- збільшення коефіцієнта пульсації випрямленої напруги та погіршення його гармонічного складу за рахунок

появи нульових ділянок на інтервалах закритого стану тиристорів і стрибків напруги в моменти їх відкривання;

– поява зсуву фаз між струмом та напругою первинної обмотки трансформатора за рахунок затримки появи струму у вторинному колі на інтервалі  $\alpha$ .

### Порядок виконання роботи

1 Подати на лабораторний стенд напругу мережі 220 В. За активного навантаження зняти та побудувати регульовальну характеристику випрямляча з увімкненим та вимкненим комутаційним діодом VD0,  $U_d = f(\alpha)$ , де  $U_d$  – середнє значення випрямленої напруги;  $\alpha$  – кут керування. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1

Діод VD0	$\alpha^0$	30	45	60	75	90	105	120	130	150	180
Увімкнено	$U_d, \text{В}$										
Вимкнено	$U_d, \text{В}$										

*Примітка.* Характеристику знімати при перемикачі «Rd» у положенні 4. Кут керування  $\alpha$  змінювати за допомогою резистора R13. Величину кута керування визначати за осцилограмою напруги на вході фільтра (контрольні точки X23–X24).

2 Зняти і побудувати навантажувальні характеристики випрямляча  $U_d = f(I_d)$  за увімкненого та вимкненого діода VD0 для кутів керування  $\alpha = 45^0, 90^0, 135^0$  за  $\alpha = \text{const}$ , де  $I_d$  – середнє значення струму навантаження. Результати вимірювань занести до таблиці 2. Визначити вихідний опір випрямляча  $r_{\text{вих}}$ .



Таблиця 2

Діод VD0	Id, мА										
увімкнено	U <sub>d</sub> , В										
ввимкнено	U <sub>d</sub> , В										

3 Зняти й побудувати залежність коефіцієнта пульсацій випрямленої напруги від величини кута керування  $K_p = f(\alpha)$  за ввімкненого та вимкненого комутаційного діода VD0, де  $K_p = U_{\max} / U_d$ ,  $U_{\max}$  – амплітуда змінної складової випрямленої напруги. Результати вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3

Діод VD0	$\alpha^{\circ}$	30	45	60	75	90	105	120	130	150	180
увімкнено	U <sub>d</sub> , В										
	U <sub>max</sub> , В										
ввимкне- но	U <sub>d</sub> , В										
	U <sub>max</sub> , В										

*Примітка.* Амплітуду змінної складової вимірюють ламповим вольтметром, помножуючи його показання на  $\sqrt{2}$

4 Замалювати форму напруги на навантаженні (X23–X24), анодної напруги тиристора (X16–X19), напруги на комутаційному діоді VD0 (X15–X16), а також форму струмів у навантаженні (X20–X21), вентилях (X17–X18), комутаційному діоді (X14–X15), ємності (X22–X24) та індуктивності (X20–X21) фільтра з кутом керування  $\alpha = 90^{\circ}$  за ввімкненого та вимкненого комутаційного діода VD0.

5 Замалювати форму напруги в контрольних точках системи керування випрямляча.

## Контрольні запитання

- 1 Призначення і принцип роботи керованого випрямляча.
- 2 Пояснити принцип побудови та роботу системи керування випрямлячем.
- 3 Призначення комутаційного діода VD0, його вплив на режим роботи і характеристики схеми.
- 4 Намалювати форму напруг і струмів в елементах схеми керування та силової частини з кутами керування  $\alpha = 30^\circ, 120^\circ$  ; .
- 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 й недоліки керованих випрямлячів.
- 8 Пояснити регульовальну та зовнішню характеристики випрямляча.

## Лабораторна робота 8

### Дослідження трифазного мостового керованого випрямляча

**Мета роботи** – вивчити принцип роботи трифазної мостової несиметричної схеми випрямлення та її системи керування, дослідити основні параметри й характеристики випрямляча.

#### Короткі теоретичні відомості

Багатофазні схеми випрямлення порівняно з однофазними мають такі переваги:

- симетричне навантаження фаз мережі живлення;
- гарне використання трансформатора й вентилів;
- менший склад вищих гармонік у кривій випрямленої напруги й споживаного з мережі струму.

Трифазний мостовий керований випрямляч може бути реалізований із повною кількістю керованих вентилів (симетрична схема) і з неповною кількістю керованих вентилів (несиметрична схема). **Симетрична схема** (рис. 12) керованого випрямляча досить складна. Для її побудови необхідно 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.

Налаштовування й фазування такої системи керування, особливо при несиметрії фаз мережі живлення, становитимуть певні труднощі. Крім того, для здійснення початкового пуску такого випрямляча й можливості його роботи за більших кутів керування ( $\alpha > 60^0$ ) необхідно подавати на тиристри імпульси керування, ширина яких більша ніж  $60^0$ , або здвоєні імпульси, що йдуть один за одним через  $60^0$ .

Це необхідно для одночасного вмикання відповідних тиристорів з анодної й катодної груп.

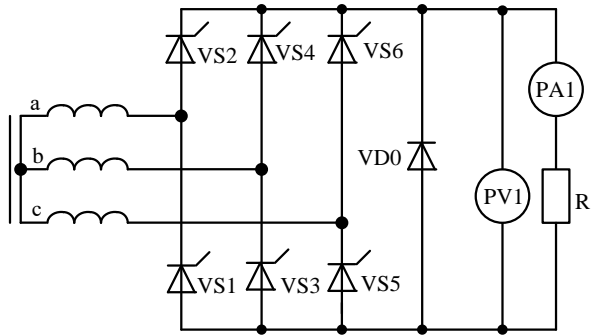


Рисунок 12 – Симетрична схема керованого випрямляча

Для реалізації **несиметричної схеми** (рис. 13) необхідно три тиристори й три діоди. Система керування такого випрямляча містить три ідентичних канали, немає необхідності формувати довгі або здвоєні імпульси. Якщо в цій схемі керовані вентиля утворюють катодну групу вентилів випрямляча, можна системи керування безпосередньо підключати до силової частини без здійснення гальванічної розв'язки між ними.

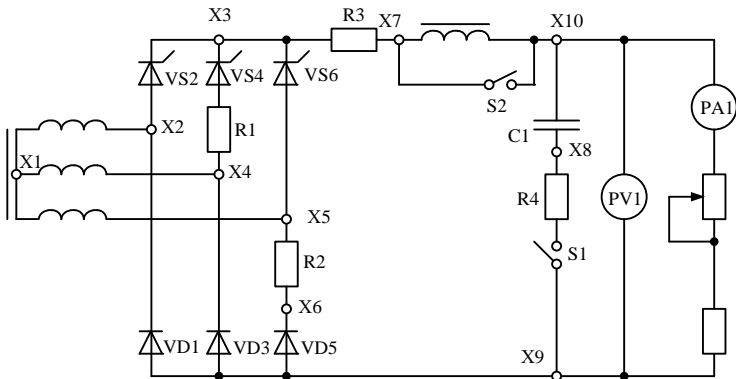


Рисунок 13 – Несиметрична схема керованого випрямляча

Тому часто, особливо за порівняно невеликих потужностей та обмеженою діапазону регулювання,

застосовують схему з неповною кількістю керованих вентилів. Таку схему можна розглядати як послідовне з'єднання двох трифазних схем із нульовим виводом, одна з яких працює в керованому, а інша – у некерованому режимі.

Несиметрична схема дозволяє регулювати середнє значення напруги на навантаженні від максимального значення  $U_d = U_{d0} = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \approx 2,32E$  за кута керування  $\alpha = 0$  до мінімального значення  $U_d = 0$  за  $\alpha = 180$ .

Регулювальну характеристику цього випрямляча описують тим самим виразом, що й в однофазному мостовому випрямлячі:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

### Порядок виконання роботи

1 Подати на лабораторний стенд напругу 3х 220В. За активного навантаження зняти й побудувати регулювальну характеристику випрямляча  $U_d = f(\alpha)$ , де  $U_d$  – середнє значення випрямленої напруги;  $\alpha$  – кут керування. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1

$\alpha$ , °	30	45	60	75	90	105	120	135	150	180
$U_d$ , В										

**Примітка.** Під час зняття характеристики перемикач  $R_d$  установити в положення 5. Кут  $\alpha$  змінити за допомогою резистора  $R3$ . У багатофазних схемах випрямлення кут керування  $\alpha$  відраховують від моменту природного вимкнення вентилів. Величину кута керування визначити за осцилограмою напруги на виході випрямляча. У діапазоні  $0 < 60 < \alpha$  зручно відраховувати сам кут  $\alpha$ , а в діапазоні  $60 < \alpha < 180$  більш зручно відраховувати величину  $180 - \alpha$ , а потім обчислювати значення кута  $\alpha$  (рис. 3).

2 Зняти й побудувати навантажувальні характеристики випрямляча  $U_d = f(I_d)$  за  $\alpha = \text{const}$ , де  $I_d$  – середнє значення струму навантаження. Характеристики зняти та побудувати для чотирьох значень кута керування  $\alpha$ , що відповідно дорівнюють 30, 60, 90, 120°. Результати вимірювань занести до таблиці 2.

Визначити вихідний опір випрямляча  $r_{\text{вих}} = \Delta U_d / \Delta I_d$ .

Таблиця 2

$\alpha^\circ$	$I_d$ , мА									
30	$U_d$ , В									
60	$U_d$ , В									
90	$U_d$ , В									
120	$U_d$ , В									

3 Зняти й побудувати залежність коефіцієнта пульсації випрямленої напруги  $K_{\text{П}}$  від величини кута керування  $\alpha$ :

$K_{\text{П}} = f(\alpha)$ ,  $K_{\text{П}} = U_{\sim\text{max}} / U_d$ ,  $U_{\sim\text{max}}$  – амплітуда змінної складової випрямленої напруги. Результати вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3

$\alpha^\circ$	30	45	60	75	90	105	120	135	150	180
$U_d$ , В										
$U_{\text{max}}$ , В										
$K_{\text{П}}$										

**Примітка.** Амплітуду змінної складової випрямленої напруги виміряти ламповим вольтметром, множачи його показання на  $\sqrt{2}$ .

4 Замалювати форму напруги на навантаженні, тиристорі й діоді, а також форму струму в цих елементах /навантаження активне для двох значень кута керування  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 90^\circ$ .

5 Включити RL-навантаження. Установити кут керування  $\alpha = 30^\circ$ . Потім різко вивести вліво до упору регулятор кута керування (потенціометр R3). Водночас із тиристорів знімаються імпульси керування. Замалювати форму

напруги на виході випрямляча й на вентилях. Відключити й знову підключити індуктивність навантаження  $L_1$ . Знову замалювати ті самі часові діаграми. Пояснити одержані результати.

6 Замалювати часові діаграми під час роботи випрямляча на навантаження з різними згладжувальними фільтрами, а також форму пульсації напруги на навантаженні з LR-, LC-, і C-фільтрами.

7 З'ясувати принцип формування й зсуву імпульсів у системі керування. Замалювати форму сигналів у контрольних точках системи керування.

### **Контрольні запитання**

1 Сфера застосування багатофазних керованих випрямлячів.

2 Принцип роботи трифазної несиметричної схеми.

3 Принцип роботи системи керування випрямляча.

4 Порівняти переваги й недоліки симетричної та несиметричної схем.

5 Яка кратність пульсації  $m$  у несиметричній схемі?

6 Чому регульовальна характеристика керованого випрямляча нелінійна?

7 З якою метою в схему випрямляча вмикають нульовий вентиль VD0?

8 Пояснити форму напруги на RL-навантаженні за відсутності імпульсів керування тиристорами.

9 Від яких напруг здійснюють синхронізацію каналів СУ несиметричної схеми?

## Лабораторна робота 9

### Дослідження згладжувальних фільтрів на реактивних елементах

**Мета роботи** – дослідження згладжувальних фільтрів та їх вплив на роботу некерованих випрямлячів, експериментальне визначення основних параметрів і характеристик схем різних фільтрів, їх порівняльне оцінювання.

#### Короткі теоретичні відомості

На стенді встановити змінні панелі з мнемосхемами двопівперіодного випрямляча й досліджуваних фільтрів:

- індуктивний ( $L1$  і  $L2$ );
- ємнісний ( $C1$  і  $C2$ );
- Г-подібний ( $LC$ );
- П-подібний ( $RC$ ) і ( $LC$ );
- Г-подібний резонансний (із послідовним і паралельним резонансами);

9.1 Індуктивний фільтр (панель 6) складається з дроселя  $L1$  або  $L2$ , що вмикаються тумблером  $SA4$ . Зміна величин індуктивностей здійснюється тумблером  $SA5$  (рис. 14).

9.2 Ємнісний фільтр (панель 6) складається з конденсаторів  $C1$  і  $C2$ , що підключаються тумблером  $SA3$ , або конденсаторів  $C3$  та  $C4$ , що комутують тумблером  $SA6$  (рис. 14).

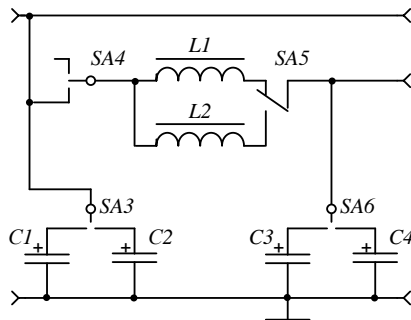


Рисунок 14 – LC-фільтр



9.3 Г - подібний  $LC$ -фільтр (панель 6) містить у собі дроселі  $L1$  або  $L2$  і конденсатори  $C3$  і  $C4$ , що комутують відповідно  $SA4$  і  $SA6$  (рис. 14).

9.4 П-подібний  $RC$ -(панель 5)-і  $LC$ -(панель 6)-фільтри. Схема  $RC$ -фільтра складається з активного опору « $R_\phi$ » та ємностей  $C1 - C4$ . Оскільки через резистор « $R_\phi$ » проходить весь струм навантаження, то відмінними характеристиками схеми є значне зменшення постійної складової напруги на виході фільтра і збільшення втрат потужності в опорі « $R_\phi$ ».

Для дослідження впливу величини опору  $RC$ -фільтра на параметри випрямляча резистор « $R_\phi$ » обраний регульованим (рис. 15).

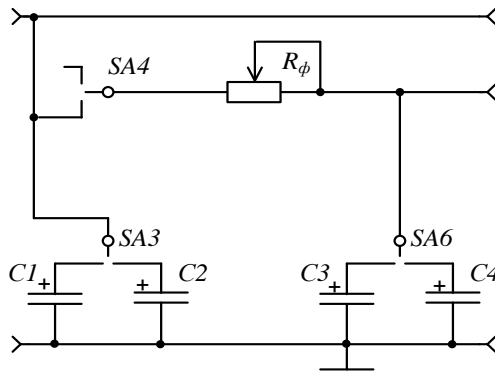


Рисунок 15 –  $RC$ -фільтр

Схема  $LC$  П-подібного фільтра містить у собі індуктивності  $L1$  і  $L2$ , а також конденсатори  $C1 - C4$  (рис. 14).

9.5 Г-подібний резонансний із послідовним (панель 9) або паралельним резонансом (панель 8). Резонансні фільтри утворюються зі звичайного  $LC$ -фільтра за допомогою:

– увімкнення паралельно індуктивності дроселя  $L2$  ємності конденсатора  $C_\phi$ , тобто утвориться фільтр із паралельним резонансним контуром (рис. 16);

– послідовного ввімкнення ємності  $C_\phi$  і дроселя  $L1$ , тобто утвориться фільтр із послідовним резонансним контуром (рис. 17).

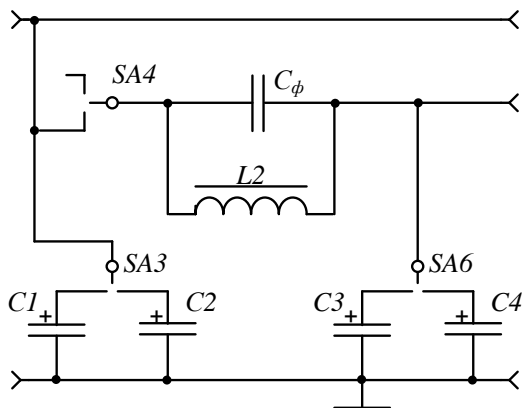


Рисунок 16 – LC-фільтр із паралельним резонансним контуром

Порівняно зі звичайним Г-подібним LC-фільтром коефіцієнт згладжування фільтра з паралельним контуром у 3–4 рази вищий.

Коефіцієнт згладжування резонансних фільтрів залежить від струму навантаження випрямляча.

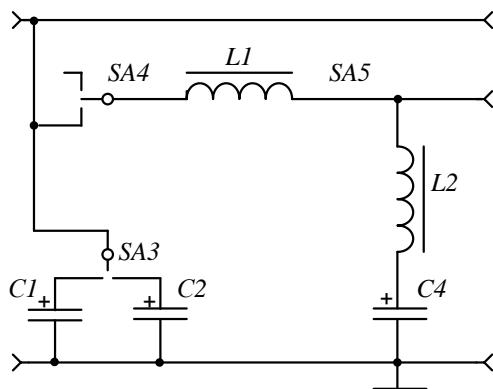


Рисунок 18 – L7-фільтр із послідовним резонансним контуром

## Порядок виконання роботи

Результати вимірювань усіх дослідів для зазначених фільтрів занести до таблиці 1.

Таблиця 1

Тип фільтра	$U_2$	$I_2$	$I_d$	$U'_d$	$U_d$	$U'_{\text{вд}}$	$U_{\text{вд}}$
	В	А	А	В	В	В	В

$U_2$  – напруга на вході випрямляча;

$I_2$  – струм у вторинній обмотці трансформатора;

$I_d$  – постійна складова струму навантаження;

$U'_d$  – постійна складова напруги до фільтра;

$U_d$  – постійна складова після фільтра;

$U'_{\text{вд}}$  – змінна складова напруги до фільтра;

$U_{\text{вд}}$  – змінна складова після фільтра.

За даними вимірювань зробити розрахунок змінних складових  $U'_{\text{вм}}$  і  $U_{\text{вм}}$ , коефіцієнтів пульсацій на вході фільтра  $k'_n$  і на навантаженні  $k_n$ , коефіцієнта фільтрації  $k_\phi$  та ККД.

Дані розрахунків занести до таблиці 2.

Таблиця 2

Тип фільтра	$U'_{\text{вм}}$	$U_{\text{вм}}$	$k'_n$	$k_n$	$k_\phi$	$\eta$
	В	В	%	%	%	%

За даними дослідів і теоретичних розрахунків побудувати залежності для кожного з досліджуваних фільтрів:

$$U_d = f(I_d), k_n = f(I_d), k_\phi = f(I_d).$$

## Контрольні запитання

1 У яких випадках рекомендують використовувати дані фільтри?

2 Як впливає характер фільтра на роботу некерovanого випрямляча?

3 За яких фільтрів коефіцієнт використання вентилів випрямляча вищий?

4 За яких фільтрів коефіцієнт використання перетворювального трансформатора буде вищим?

5 У яких випадках рекомендують застосовувати багатоланкові фільтри?

6 Особливості роботи й розрахунку Г-подібного  $LC$ -фільтра.

7 Принцип дії резонансних фільтрів і сфера їх застосування.

8 Особливості роботи дроселів фільтрів згладжування.

9 Особливості роботи електричних конденсаторів у фільтрах.

## Лабораторна робота 10

### Дослідження згладжувальних фільтрів на транзисторах

**Мета роботи** – ознайомитися з принципом дії транзисторних згладжувальних фільтрів. Експериментально визначити основні параметри та характеристики фільтрів із навантаженням у колі емітера (ФЕ), а також у колі колектора (ФК). Дати порівняльну характеристику цих схем.

#### Короткі теоретичні відомості

У тому разі, якщо необхідні невеликі габарити й відсутність завад, застосовують транзисторні фільтри.

Вихідні характеристики транзистора на пологій ділянці задовольняють вимоги, що ставляться до індуктивності в схемі LC-фільтру.

Ця властивість транзистора аналогічна властивості дроселя. Тому за відповідної схеми вмикання транзистор може відігравати роль дроселя у згладжувальних фільтрах.

Існують дві основні схеми побудови транзисторних фільтрів:

- схема з навантаженням у колі колектора (ФК);
- схема з навантаженням у колі емітера (ФЕ).

**Фільтр із навантаженням у колі колектора** наведений на рисунку 18. Для того щоб транзистор працював як фільтр, необхідно, щоб його струм бази залишався постійним (не містив пульсацій).

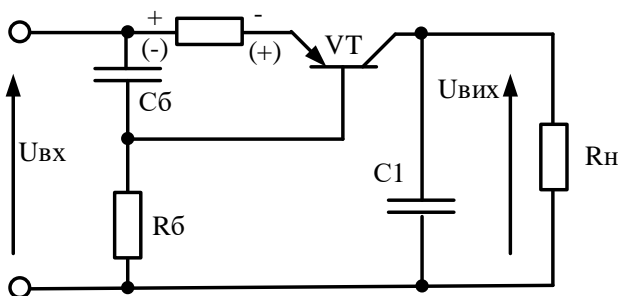


Рисунок 18 – Фільтр із навантаженням у колі колектора

Для цього на базу транзистора VT подається відфільтрована за допомогою фільтра вхідна напруга.

Згладжена напруга на конденсаторі має невелику пульсацію. Для того щоб здійснювалася ефективна фільтрація, в коло емітера транзистора вводять невеликий за розміром резистор  $R_E$ . На ньому буде виділятися, крім постійної складової вхідної напруги, також і пульсація змінної складової.

**Фільтр із навантаженням у колі емітера**, зображений на рисунку 19, – фактично згладжувальний RC-фільтр, навантаженням якого є емітерний повторювач на транзисторі.

Оскільки вхідний опір емітерного повторювача дуже великий (це опір закритого р–п-переходу колектор–емітер), хороша фільтрація може бути одержана за великого опору  $R_B$  і малої ємності  $C_B$ , тобто за невеликих габаритів RC-ланцюжка і відносно високого ККД.

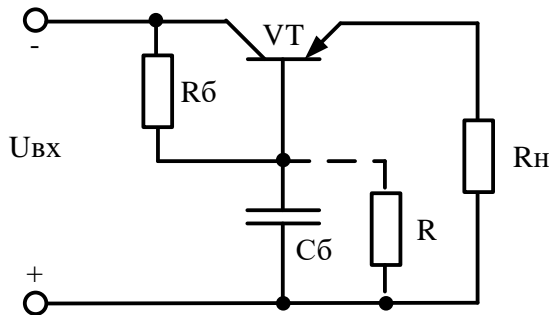


Рисунок 19 – Фільтр із навантаженням у колі емітера

Таким чином, згладжування пульсацій у цій схемі здійснюється фільтром, а транзистор є елементом узгодження RC-фільтра з низькоомним навантаженням  $R_N$ . Узгодження здійснюється завдяки тому, що опір відкритого р–п-переходу база–емітер є незначним.

Транзистор не може накопичувати в собі енергію. Він є лише керованим активним опором. Тому ККД транзисторних фільтрів завжди менший, ніж LC-фільтрів.

### Порядок виконання роботи

Дослідити схему транзисторного фільтра з навантаженням у колі емітера (ФЕ) схема рис. 20).

На стенді застосована схема транзисторного фільтра з послідовним регулювальним транзистором і навантаженням, увімкненим у ланцюг емітера.

Для підвищення коефіцієнта фільтрації, для живлення базового ланцюга використовують деталь у вигляді  $RC$ -фільтра з двох ланок. Подвійний  $RC$ -фільтр змщує напругу пульсації на 180 електричних градусів.

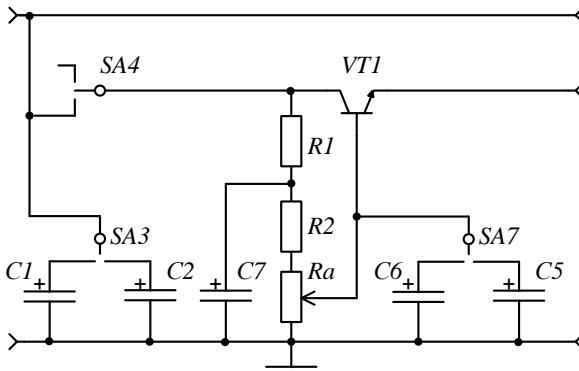


Рисунок 20 – Транзисторний фільтр із навантаженням у колі емітера

Результати вимірювань усіх дослідів занести до таблиці 1.

Таблиця 1

Тип фільтра	$U_2$	$I_2$	$I_d$	$U'_d$	$U_d$	$U'_{\text{вд}}$	$U_{\text{вд}}$
	В	А	А	В	В	В	В

$U_2$  – напруга на вході випрямляча;

$I_2$  – струм у вторинній обмотці трансформатора;

$I_d$  – постійна складова струму навантаження;

$U'_d$  – постійна складова напруги до фільтра;

$U_d$  – постійна складова після фільтра;

$U'_{\text{вд}}$  – змінна складова напруги до фільтра;

$U_{\text{вд}}$  – змінна складова після фільтра.

За даними вимірювань зробити розрахунок змінних складових  $U'_{\text{вм}}$  і  $U_{\text{вм}}$ , коефіцієнтів пульсацій на вході фільтра  $k'_n$  та на навантаженні  $k_n$ , коефіцієнта фільтрації  $k_\phi$  й ККД.

Дані розрахунків занести до таблиці 2.

Таблиця 2

Тип фільтра	$U'_{\text{вм}}$	$U_{\text{вм}}$	$k'_n$	$k_n$	$k_\phi$	$\eta$
	$B$	$B$	%	%	%	%

За даними дослідів і теоретичних розрахунків побудувати залежності для кожного з досліджуваних фільтрів:

$$U_d = f(I_d), k_n = f(I_d), k_\phi = f(I_d).$$

### Методичні вказівки до розрахунку

Під час розрахунку параметрів фільтрів, потрібно пам'ятати, що згладжувальну дію фільтра оцінюють за величиною його коефіцієнта згладжування.

Коефіцієнтом згладжування фільтра гармоніки пульсацій прийнято вважати відношення коефіцієнта пульсацій на вході фільтра  $k'_{n(k)}$  до коефіцієнта пульсацій на його виході  $k_{n(k)}$ , де

$$k_{n(k)} = \frac{U_{\text{вм}(k)}}{U_d}, \quad k_{\text{сз}(k)} = \frac{k'_{n(k)}}{k_{n(k)}}. \quad (1)$$

Зазвичай коефіцієнт пульсацій визначають за основною гармонікою, тому коефіцієнт згладжування оцінюють також за нижчою гармонікою пульсацій випрямленої напруги. Номером гармоніки в позначенні  $k_{\text{сз}}$  звичайно нехтують. Підставивши значення  $k'_{n(k)}$  і  $k_{n(k)}$  в (1), одержимо



$$k_{cz} = \frac{U'_{(1)m}}{U'_d} \cdot \frac{U_d}{U_{(1)m}} = k_\phi \cdot \eta_\phi,$$

де  $\eta_\phi = \frac{U_d}{U'_d}$  – коефіцієнт передавання постійної складової з входу фільтра на його вихід, що характеризує втрату напруги у фільтрі та його ККД.

Величина коефіцієнта корисної дії фільтрів великої потужності  $\eta_\phi = 0,99$ , а малої потужності –  $\eta_\phi = 0,50-0,90$ .

Нехтуючи втратами у фільтрі, можна вважати, що

$$k_{cz} = \frac{U'_{(1)m}}{U_{(1)m}} = k_\phi, \quad k_\phi = \frac{U'_{\phi d}}{U_{\phi d}}.$$

Величина коефіцієнта пульсацій на вході фільтра залежить від обраної схеми випрямляча і для фільтра з індуктивною реакцією та без втрат на комутацію може визначатися як

$$k_{n(1)} = \frac{U_{(1)m}}{U_d}, \quad \text{або } k_{n(1)} = \frac{2}{P^2 - 1}, \quad \text{де } P = n_T m_2.$$

Таким чином, коефіцієнт фільтрації фільтра

$$k_\phi = \frac{k'_{n(1)}}{k_{n(1)}} = \frac{2}{(p^2 - 1)k'_{n(1)}}.$$

### **Зміст звіту з роботи**

- 1 Схеми досліджуваних фільтрів.
- 2 Таблиця вимірювань.
- 3 Таблиця розрахунків.
- 4 Графіки залежностей  $U_d = f(I_d)$ ,  $k_n = f(I_d)$ ,  
 $k_\phi = f(I_d)$ .
- 5 Осцилограми напруг на вході й виході фільтрів.

## Контрольні запитання

- 1 На чому ґрунтується застосування транзистора як елемента згладжувального фільтра?
- 2 Як здійснюють вибір робочої точки на характеристиці транзистора?
- 3 Фільтр ФК. Принцип роботи. Призначення елементів.
- 4 Фільтр ФЕ. Принцип роботи. Призначення елементів.
- 5 Дати порівняльну характеристику фільтрів ФК і ФЕ.
- 6 Способи збільшення коефіцієнта фільтрації транзисторних фільтрів.
- 7 Як залежить коефіцієнт фільтрації транзисторного фільтра від величини струму навантаження?
- 8 Яким типом навантаження є транзисторні фільтри для схеми випрямляча?
- 9 Чому необхідно попередньо згладити напругу, що подавану на транзисторний фільтр, який стоїть на виході однофазної схеми випрямляча?
- 10 Сфера застосування транзисторних фільтрів.

## Лабораторна робота 11

### Дослідження параметричного стабілізатора постійної напруги

**Мета роботи**—вивчення принципу дії стабілізаторів постійного струму, дослідження параметрів і характеристик стабілізаторів постійної напруги.

#### Конструкція стенда

Стенд сконструйований у вигляді настільного переносного пристрою. На фальшпанелі лабораторного стенда встановлені відповідні змінні блоки досліджуваних стабілізаторів із пристроями комутації.

На лицьовій панелі стенда розміщені:

- тумблер вмикання стенда з написом «Мережа»;
- сигнальна лампочка з написом «Вкл»;
- тумблер  $B2$  для ввімкнення різних видів вхідної напруги: згладженої й пульсуючої;
- тумблер  $B3$  для ввімкнення навантаження;
- ручка регулювання вхідної напруги « $U_0$ »;
- ручка регулювання струму навантаження « $I_H$ »;
- ручка регулювання величини опору гасіння в параметричному стабілізаторі « $R_r$ »;
- ручка регулювання величини опору омичного діляника в мостовому стабілізаторі « $R_\delta$ »;
- ручки регулювання величини опору порівняльного діляника, в компенсаційних стабілізаторах « $U_{CT1}$ », « $U_{CT2}$ »;
- ручка регулювання величини баластового опору в компенсаційному стабілізаторі « $R_B$ »;
- гнізда «1–26» і « $U_m$ » для вимірювання напруг і перегляду осцилограм у характерних точках досліджуваних схем;
- вольтметр « $U_0$ » для вимірювання вхідної напруги;

- міліамперметр « $I_0$ » для вимірювання вхідного струму;
- міліамперметр « $I_{CT}, I_3$ » для вимірювання струму стабілізації в параметричних стабілізаторах і струму емітера регульовального транзистора в компенсаційному стабілізаторі з паралельним умиканням регульовального елемента;
- вольтметр « $U_m$ » для вимірювання напруг у характерних точках досліджуваних схем;
- міліамперметр « $I_H$ » для вимірювання струму навантаження;
- вольтметр « $U_H$ » для вимірювання напруги навантаження.

Однокаскадний параметричний стабілізатор (рис. 21) складається з активного лінійного опору  $R_r$ , увімкненого послідовно з навантаженням, і стабілітрона  $VD1$ , увімкненого паралельно навантаженню.

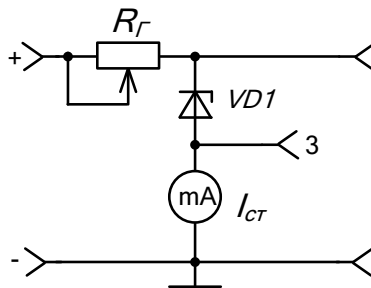


Рисунок 21 – Параметричний стабілізатор

Більшу точність стабілізації можна одержати за допомогою мостової схеми (рис. 22), що складається з однокаскадного параметричного стабілізатора  $VD1$ ,  $R_1 - R_2$  та омичного дільника напруги  $R_d$ . Вихідна напруга цієї схеми дорівнює різниці напруг стабілізації стабілітрона  $VD1$  й напруги, зниженої на опорі дільника.

Оскільки при зміні вхідної напруги відповідні напруги на стабілітроні та опорі дільника змінюються синфазно, то їх різниця за певного вибору  $R_0$  може змінюватися набагато менше, ніж напруга на стабілітроні.

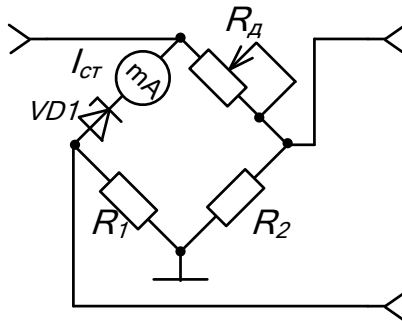


Рисунок 22 – Параметричний мостовий стабілізатор

### Порядок виконання роботи

1 Зняти дані для побудови залежності  $U_d = f(U_{вх})$  за  $I_H = 0$ . Вхідну напругу змінювати від 0В до 20В.

2 Побудувати характеристику  $U_d = f(I_d)$ , розрахувати коефіцієнт стабілізації, вихідний опір і баластовий опір стабілізатора, реалізованого на стабілітроні типу Д815Б.

3 Зняти осцилограму вхідної й вихідної напруг за баластового опору на максимумі, струмі навантаження  $I_H = 0$  і живленні пульсуючою напругою.

### Контрольні запитання

1 Дати визначення і охарактеризувати фізичний зміст основних параметрів стабілізаторів напруги.

2 Пояснити механізм стабілізації напруги на навантаженні параметричного стабілізатора в умовах зміни вхідної напруги за незмінного струму навантаження.

3 Пояснити механізм стабілізації напруги на навантаженні параметричного стабілізатора в умовах зміни опору навантаження за незмінної вхідної напруги.

4 Що таке мінімальний і максимальний струми стабілізації стабілітрона?

5 Які величини задають під час розрахунку параметричного стабілізатора напруги?

6 Намалюйте вольтамперну характеристику та назвіть основні параметри стабілізатора.

7 У чому полягає розрахунок стабілізатора за постійним струмом?

8 Як вибрати робочу точку на ділянці стабілізації стабілітрона?

9 Дати фізичне пояснення впливу опору баластного резистора на коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора.

## Лабораторна робота 12

### Дослідження компенсаційних стабілізаторів постійної напруги

#### Короткі теоретичні відомості

**Компенсаційний стабілізатор із послідовним регулювальним елементом** наведений на рисунку 23.

У цій схемі регулювальний елемент  $VT2$  увімкнений послідовно з навантаженням, і компенсація здійснюється за рахунок зміни зниження напруги на самому регулювальному елементі.

Частина вихідної напруги надходить на вхід схеми порівняння, що складається з джерела опорної напруги  $R4$ ,  $VD2$  й порівнювального діляника  $R_d$ , де вона порівнюється зі стабільною опорною напругою.

Різниця вихідної та опорної напруг надходить на вхід підсилювача постійного струму, де вона підсилюється й подається в необхідній фазі на регулювальний елемент. Водночас зміна вихідної напруги спричиняє таку саму зміну напруги на регулювальному елементі, за якої величина вихідної напруги відновлюється із заданим ступенем точності.

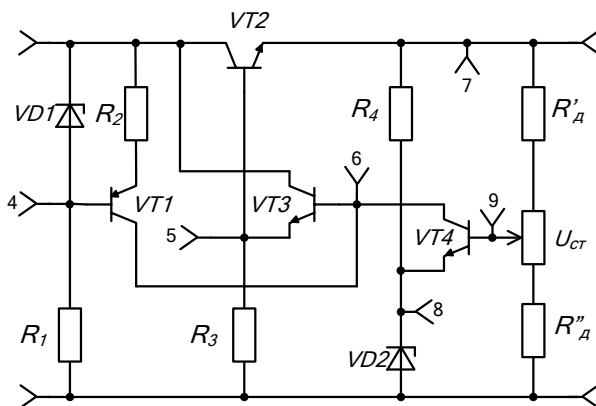


Рисунок 23 – Стабілізатор компенсаційний послідовного типу

Для стабілізації струму підсилювача постійного струму як навантаження транзистора  $VT4$  використовують емітерний повторювач.

**Компенсаційний стабілізатор із паралельним регулювальним елементом** наведений на рисунку 24.

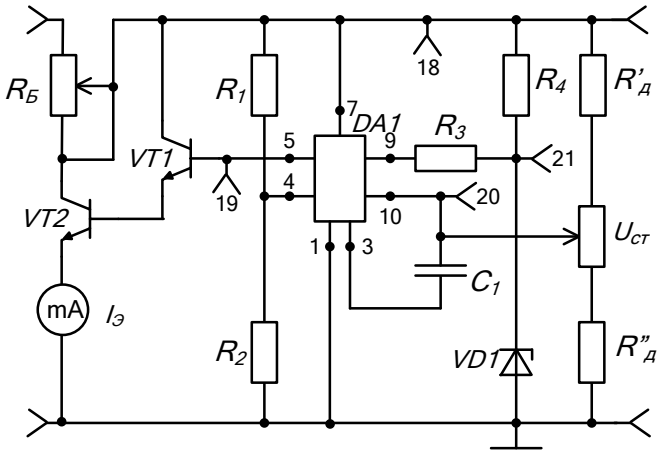


Рисунок 24 – Стабілізатор компенсаційний паралельного типу

У цій схемі регулювальний елемент  $VT2$  ввімкнений паралельно з навантаженням, а рівень вихідної напруги підтримується за рахунок зміни струму через регулювальний елемент, у результаті цього змінюється зниження напруги на баластовому резисторі  $R_B$ , увімкненому послідовно з навантаженням.

Інші вузли виконують функції, аналогічні функціям схеми з послідовним регулювальним елементом.

### Порядок виконання роботи

1 Записати дані для побудови сім'ї характеристик  $U_d = f(U_{ex})$  за  $R_H = const$  і різних значень напруги стабілізації (зазначає керівник робіт).



2 Записати дані для побудови сім'ї залежностей  $U_d = f(I_d)$  для різних значень вхідної напруги (зазначає керівник робіт).

3 Побудувати сім'ю характеристик за підпунктом 1.2, розрахувати вихідний опір, коефіцієнт стабілізації та ККД стабілізатора.

4 Зняти осцилограму вхідної й вихідної напруг за баластового опору на максимумі, струмі навантаження  $I_H = 0$  і живленні пульсуючими напругами.

### **Зміст звіту з роботи**

1 Порядок виконання роботи.

2 Принципові схеми параметричних і компенсаційних стабілізаторів.

3 Таблиці експериментальних даних за пп. 1, 2, 3.

4 Графіки характеристик за пп. 2, 3.

5 Розрахунок параметрів за пп. 2, 3.

6 Осцилограми напруг за пп. 2, 3, 4.

7 Висновки щодо порівняння результатів експерименту з теоретичними положеннями теми дослідження.

### **Контрольні запитання**

1 Чому виникає необхідність у застосуванні стабілізаторів напруги і яке їх призначення?

2 Пояснити принцип роботи компенсаційного стабілізатора послідовного типу.

3 Пояснити принцип роботи компенсаційного стабілізатора паралельного типу.

4 Проаналізувати умови роботи регульовальних елементів стабілізаторів послідовного й паралельного типів за короткого замикання навантаження.

5 Проаналізувати умови роботи регулювальних елементів стабілізаторів послідовного й паралельного типів у режимі холостого ходу.

6 Що таке коефіцієнт згладжування пульсацій стабілізатора і як його визначають?

7 Пояснити принцип устанавлення вихідної напруги компенсаційного стабілізатора.

8 Які параметри стабілізаторів можна визначити за графіками залежностей  $U_d = f(U_{ex})$ ,  $U_d = f(I_d)$  ?

## Список літератури

1. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка : навчальний посібник / О. О. Шавьолкін. – К.: КНУТД, 2018. – 396 с.
2. Перетворювальна техніка : підручник : 2 Ч. / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний та ін; за ред. В. С. Руденка. – Харків : Фоліо, 2017. – 360 с.
3. Пристрої перетворювальної техніки : конспект лекцій / укладач А. І. Новгородцев. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 124 с.
4. Шавьолкін О. О. Перетворювальна техніка : навчальний посібник / О. О. Шавьолкін, О. М. Наливайко. – Краматорськ : Донбаська ДМА, 2016. – 328 с.
5. Лабораторний практикум з дисципліни «Електроживлення» / укладачі : С. Т. Барась, О. П. Шеремета. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 84 с.

Електронне навчальне видання

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

До виконання лабораторних робіт  
із дисципліни «Енергетична електроніка»  
для студентів спеціальності 171 «Електроніка»  
всіх форм навчання

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк  
Редактори: Н. З. Клочко, С. М. Симоненко  
Комп'ютерне верстання А. І. Новгородцева

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,49. Обл.-вид. арк. 3,36.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.