Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за
спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»

Електронний ресурс

Харків – 2026

УДК 621:536.7
П 27

Рецензенти:

Ю. С. Олійник – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»;

О. Б. Єгоров – кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. Бекетова.

Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 8 від 21 травня 2026 року)

П 27 **Перетворювальна** техніка енергосистем : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)» [Електронний ресурс] / уклад. П. В. Васюченко, С. М. Войтенко, О. М. Пономаренко. – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026. – (PDF 44 с.).

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи містять загальні відомості, опис порядку виконання лабораторних робіт з дисципліни, вказівки з техніки електробезпеки на робочому місці та методичні вказівки щодо виконання та оформлення лабораторних робіт. У методичних вказівках наведені контрольні питання, відповідаючи на які, здобувач освіти краще підготується до захисту лабораторної роботи.

УДК 621:536.7

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026
© Васюченко П. В., Войтенко С. М., Пономаренко О. М., уклад., 2026

ЗМІСТ

Загальні методичні вказівки 4

Лабораторна робота № 1 «Дослідження напівпровідникових випрямлячів на діодах» 6

1. Мета роботи 6
2. Програма роботи 6
3. Завдання на самопідготовку 6
4. Основні теоретичні положення 6
5. Опис лабораторної установки 22
6. Порядок проведення випробувань напівпровідникових випрямлячів 25
7. Дослідження аварійних режимів роботи схем випрямлення 27
8. Обробка результатів дослідів 27
9. Зміст звіту 27
10. Перелік контрольних питань 27

Лабораторна робота № 2 «Дослідження однофазних випрямлячів на тиристорах» 29

1. Мета роботи 29
2. Програма роботи 29
3. Завдання на самопідготовку 29
4. Основні теоретичні положення 29
5. Опис лабораторної установки 38
6. Порядок проведення випробувань однофазних випрямлячів на тиристорах 38
7. Обробка результатів дослідів 42
8. Зміст звіту 42
9. Перелік контрольних питань 42

Список використаних джерел 43

Загальні методичні вказівки

Цілі і завданнялабораторного практикуму

Кращим способом закріплення теоретичного матеріалу служать експериментальні дослідження. Уміння самостійно вирішувати теоретичні і експериментальні завдання, що зустрічаються в лабораторній роботі, є заставою успішного засвоєння курсу.

Мета лабораторного практикуму:

- закріплення теоретичних знань шляхом практичної перевірки основних законів і положень в лабораторних умовах;
- придбання практичних навичок в проведенні наукового експерименту і аналізу його результатів, в складанні звітів по проведеному експерименту;
- практичне ознайомлення з контрольно-вимірювальною і реєструючою апаратурою і методами вимірів, пристроєм експериментальної апаратури і устаткування.

Вимоги до підготовки і проведення занять

Виконанню кожної лабораторної роботи повинні передувати попередня самостійна робота студентів, яка повинна включати вивчення необхідного теоретичного матеріалу по вказаній літературі, конспекту лекцій і керівництву до лабораторних робіт, з'ясування мети і змістукожної лабораторної роботи, а також уважне ознайомлення з методикою і порядком її виконання

Кожне лабораторне заняття починається з 15-20 хвилинного письмового за теоретичним матеріалом, що відноситься до даної теми, і методики проведення експериментальних досліджень. До виконання роботи допускаються лише студенти, що отримали позитивні оцінки в ході контролю і засвоїли правила виконання роботи і вимоги по заходах електробезпеки при роботі в лабораторії.

На лабораторні заняття здобувачі освіти приходять із заздалегідь підготовленими звітами, в яких намальовані основні схеми досліджень, заповнені відповідні розділи і таблиці.

Звіт по лабораторному заняттю є робочим і звітним документом здобувача освіти про виконану роботу. Він ведеться акуратним, розбірливим почерком, необхідні малюнки і графіки виконуються відповідно до вимог ЄСКД.

Після закінчення лабораторного заняття здобувачі освіти лабораторну установку і контрольно-вимірювальну апаратуру у вихідний стан, упорядковують робоче місце.

Правила і заходи електробезпеки

При виконанні лабораторних робіт студенти зобов'язані виконувати правила і заходи електробезпеки при роботі на електроустановках. Порушення цих правил пов'язане з можливістю електричним струмом.

При виконанні експериментальних досліджень студент зобов'язаний:

- перед початком виконання лабораторних робіт вивчити зміст інструкції і розписатися про її засвоєння в журналі інструктажу;

- збірку досліджуваних схем виконувати лише при відключеному джерелі електроживлення на блоці живлення установки;

- при збірці схем для досліджень забезпечувати надійність електричних з'єднань, аби уникнути випадкових обривів і замикань в ланцюгах;

- вмикання живлячої напруги на силовому щиті лабораторії і блоці живлення установки виконувати лише з дозволу керівника занять;

- вмикання і вимикання приладів і необхідних органів управління установки виконувати лише в тій послідовності, яка передбачена керівництвом до даної лабораторної роботи;

- в разі виникнення яких-небудь несправностей або потреб в консультації при роботі з електроприладами звертатися до керівника занять;

- перед вмиканням електроживлення на досліджувану схему, а також після закінчення досліджень необхідно всі органи управління встановити у вихідний стан. При закінченні робіт необхідно вимкнути живлення установки і доповісти керівникові занять про закінчення робіт.

При виконанні лабораторних робіт забороняється:

- загороджувати прохід до силового щита і лабораторного стенду сторонніми предметами;

- виконувати на робочих місцях роботи, не пов'язані з виконанням лабораторних досліджень;

- вмикати і вимикати живлячу напругу на силовому щиті лабораторії без дозволу керівника занять;

- змінювати порядок лабораторних досліджень без дозволу керівника занять;

- торкатися руками або відкритимичастинамитіла струмоведучих частині дротів, що знаходяться під напругою;

- залишати без спостереження схеми що знаходятьсяпід напругою.

Відповідальність за дотримання викладених правил і заходів електробезпеки покладається на здобувачів освіти, що працюють в лабораторії, а контроль над їх виконанням здійснюється керівником занять.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Тема: Дослідження напівпровідникових випрямлячів на діодах

1. Мета роботи

Метою роботи є вивчення електричних схем і принципу дії однофазних і трифазних схем випрямлення при активному характері навантаження в нормальному і аварійному режимах роботи, дослідження впливу згладжуючих фільтрів на величину і якість вихідної напруги випрямляча, освоєння методики визначення основних параметрів і характеристик схем випрямлення, проведення їх порівняльного аналізу і табличного розрахунку.

2. Програма роботи

1. Вивчити електричні схеми і принцип дії однофазних і трифазних схем випрямлення.
2. Експериментально досліджувати електромагнітні процеси в однофазних і трифазних схемах випрямлення при активному характері навантаження.
3. Досліджувати вплив згладжуючих фільтрів на величину і якість вихідної напруги випрямлячів.
4. Експериментально визначити зовнішні характеристики випрямлячів при різному характері навантаження.
5. Досліджувати аварійні режими роботи схем випрямлення.

3. Завдання на самопідготовку

1. Вивчити теоретичні положення і ознайомитись з програмою роботи.
2. Підготувати звіт до виконання роботи:
   - намалювати електричні схеми досліджуваних випрямлячів (таблиця. 1.3) і розрахувати число фаз випрямлення *m* для кожної схеми;
   - підготувати форми таблиць 1.4, 1.5.
3. Розрахувати по формулах (1.15) і (1.3) теоретичні значення коефіцієнта випрямлення $K_в$ для досліджуваних схем і результати обчислень занести в таблицю 1.4.

4. Основні теоретичні положенняПроцес перетворення змінного струму в постійний називається випрямленням, а електротехнічні пристрої, що реалізовують таку можливість, отримали назву випрямлячів. Найбільшого поширення в системах автономного електропостачання набули статичні випрямлячі, що мають переваги перед електромашинними перетворювачами. У статичних випрямлячах використовуються нелінійні напівпровідникові прилади-вентилі як некеровані (діоди), так і керовані (тиристори). У лабораторній роботі досліджуються напівпровідникові діодні випрямлячі.

Випрямлення представляє сукупність перетворюючих процесів:

- узгодження напруги мережі з напругою на вході випрямляча (процес узгодження);

- перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм (процес зміни роду струму);

- згладжування постійного пульсуючого струму (процес фільтрації).

Процес зміни роду струму є основним. Процеси узгодження і фільтрації можуть бути відсутніми залежно від вимог споживачів до параметрів електричної енергії і її якості. Класична схема напівпровідникового випрямляча, в якій протікають вказані перетворюючі процеси, представлена на рисунку 1.1.

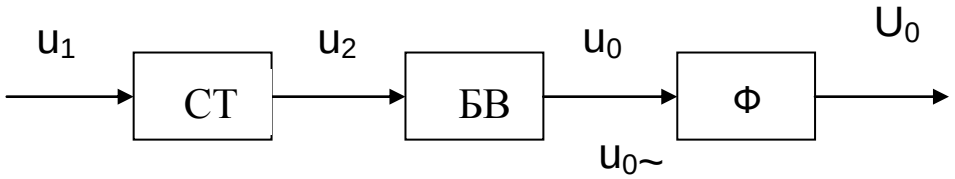


Рисунок 1.1 – Структурна схема напівпровідникового випрямляча

Силовий трансформатор *СТ* окрім узгодження напруги мережі u_1 з напругою на виході випрямляча U_0 виконує функцію гальванічної розв'язки і може мати число фаз напруги u_2, що подається на блок вентилів *БВ*. Процес зміни роду струму здійснюється схемою випрямлення, під якою мається на увазі схема, утворена діодами блоку вентилів *БВ*, зібраними з вторинними обмотками трансформатора. В разі відсутності трансформатора випрямляч має без трансформаторну схему випрямлення. В процесі фільтрації, здійснюваної згладжуючим фільтром *Ф*, зменшується величина змінної складової $u_{0\sim}$ у випрямленій напрузі U_0, чим досягається підвищення якості електричної енергії на виході випрямляча. Змінна складова напруги на виході випрямляча, обмежена згладжуючими властивостями фільтру, має бути менше величини, допустимої для нормальної роботи споживачів.

Напівпровідникові випрямлячі систем автономного електропостачання виконуються за простими і складними (комбінованим) схемами випрямлення. Складні схеми є синтезом простих схем.

Найбільшого набули випрямлячі, побудовані на основі наступних простих схем випрямлення:

- однотактна однофазна (рис. 1.2, а);
- однотактна двофазна (рис. 1.2, б);
- однотактна трифазна (рис. 1.2, г);
- однотактна шестифазна (рис. 1.2, е);
- двотактна однофазна (рис. 1.2, в);
- двотактна трифазна (рис. 1.2, д).

На рисунку 1.3 приведена складна схема випрямлення, що відрізняється в порівнянні з простими схемами підвищеною якістю електроенергії на виході.

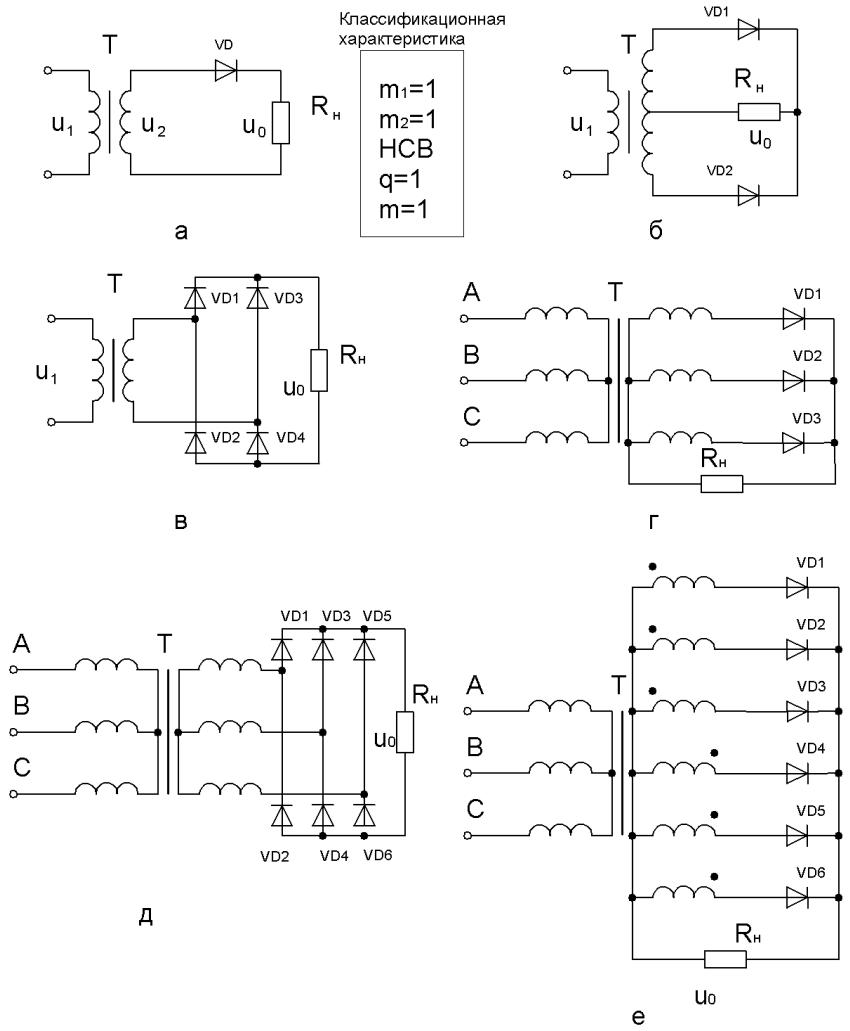


Рисунок 1.2 – Напівпровідникові випрямлячі систем електропостачання

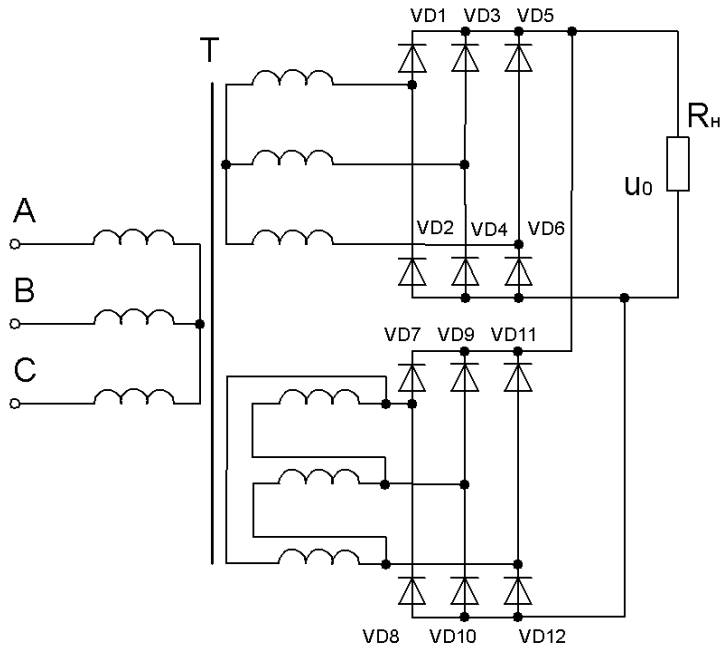


Рисунок 1.3 – Комбінована схема напівпровідникового випрямляча

Схеми випрямлення класифікують по ряду характерних ознак:

1. Залежно від числа фаз джерела електричної енергії змінного струму або живлячої мережі, що визначають число фаз m_1 первинного ланцюга трансформатора (кількість первинних обмоток), розрізняють схеми випрямлення:
   - однофазні ($m_1 = 1$) – рис. 1.2, а, б, в;
   - трифазні ($m_1 = 3$) – рис. 1.2, г, д, е
2. Залежно від числа фаз m_2 у вторинному ланцюзі трансформатора (кількості вторинних фазних обмоток):
   - однофазні ($m_2 = 1$) – рис. 1.2, а, в;
   - двофазні ($m_2 = 2$) – рис. 1.2, б;
   - трифазні ($m_2 = 3$) – рис. 1.2, г, д;
   - шестифазні ($m_2 = 6$) – рис. 1.2, е.

   Перша і друга ознаки дозволяють дати оцінку силовому трансформатору як перетворювачу числа фаз.
3. Залежно від способу підключення навантаження до вторинних обмоток трансформатора:
   - нульові схеми випрямлення (НСВ) – рис. 1.2, а, б, г, е;
   - мостові схеми випрямлення (МСВ) – рис. 1.2, в, д.

   У НСВ навантаження безпосередньо пов'язане із загальним (нульовим) виведенням трансформатора. У МСВ безпосередньо зв'язок навантаження з вторинною обмоткою трансформатора відсутній.
4. За способом перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм розрізняють:
   - однотактні (однонапівперіодні) схеми випрямлення ($q = 1$) – рис. 1.2, а, б, г, е;
   - двотактні (двонапівперіодні) схеми випрямлення ($q = 2$) – рис. 1.2, в, д.

У однотактних схемах випрямлення реалізується однотактний (однонапівперіодний) спосіб перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм, а в двухтактних – двотактний (двонапівперіодний) спосіб. Всі нульові схеми випрямлення є однотактними, а всі мостові схеми – двохтактними. У однотактних схемах випрямлення струм у фазній обмотці трансформатора протікає протягом одного напівперіоду (такту) перетворюваної напруги або його частини. У двотактних схемах випрямлення струм у фазній обмотці трансформатора протікає протягом двох напівперіодів (тактів) перетворюваної напруги або їх частин.

5. По числу фаз випрямлення (кількості пульсацій випрямленої напруги u_0 за період T живлячої мережі u_1) розрізняють схеми випрямлення:
   - однофазні ($m = 1$) – рис. 1.2, а;
   - двофазні ($m = 2$) – рис. 1.2, б, в;
   - трифазні ($m = 3$) – рис. 1.2, г;
   - шестифазні ($m = 6$) – рис. 1.2, д, е;

- дванадцятифазні (m = 12) – рис. 1.3.

Під числом випрямлення *m* розуміють

$$m = m_2 \cdot q, \qquad (1.1)$$

де *m2* – число фазних обмоток (фаз) вторинного ланцюга силового трансформатора (m = 1, 2, 3, 6);

q – тактність схеми випрямлення, тобто кількість імпульсів струму, які протікають по одній фазній обмотці трансформатора за один період перетворюваної напруги (q = 1, 2).

Класифікація схем випрямлення дозволяє дати кожній схемі класифікаційну характеристику (КХ), приклад якої для однофазної однонапівперіодної схеми наведений на рисунку 1.2, а.

Сутність однотактного (однонапівперіодного) способу перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм полягає в забезпеченні протікання по навантаженню струму одного напряму (випрямленого струму i_0) за рахунок відключення навантаження за допомогою діода *VD* від джерела електричної енергії змінного струму в один з напівперіодів утворюваної напруги (рис. 1.4).

Середнє значення випрямленої напруги u_0 є середнєвипрямленим значенням напруги на виході випрямляча U_0, яке визначається із співвідношення

$$U_0 \cdot T_П = \int_0^{T_П} u_0(\omega t) d(\omega t), \qquad (1.2)$$

де $T_П$ – період пульсації випрямленої напруги (період функції $u_0(u_t)$) і для приведеної схеми дорівнює

$$U_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \alpha(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi \cdot K}. \qquad (1.3)$$

де U_1, U_2 – значення напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора, що діють, відповідно;

K – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Для даної схеми характерно, що через діод *VD*, навантаження $R_н$ і вторинну обмотку w_2 трансформатора *T* протікає струм однакової величини $i_v = i_0 = i_2$ і сердечник трансформатора підмагнічується постійною складовою I_0 випрямленого струму i_0, що погіршує параметри схеми. Через особливості напівпровідникової структури діода *VD* завдання управління діодом випрямляча вирішується без системи управління самою перетворюваною напругою, синхронно з яким відбувається комутація діода в точках природної комутації 0, 1, 2, 3…n.

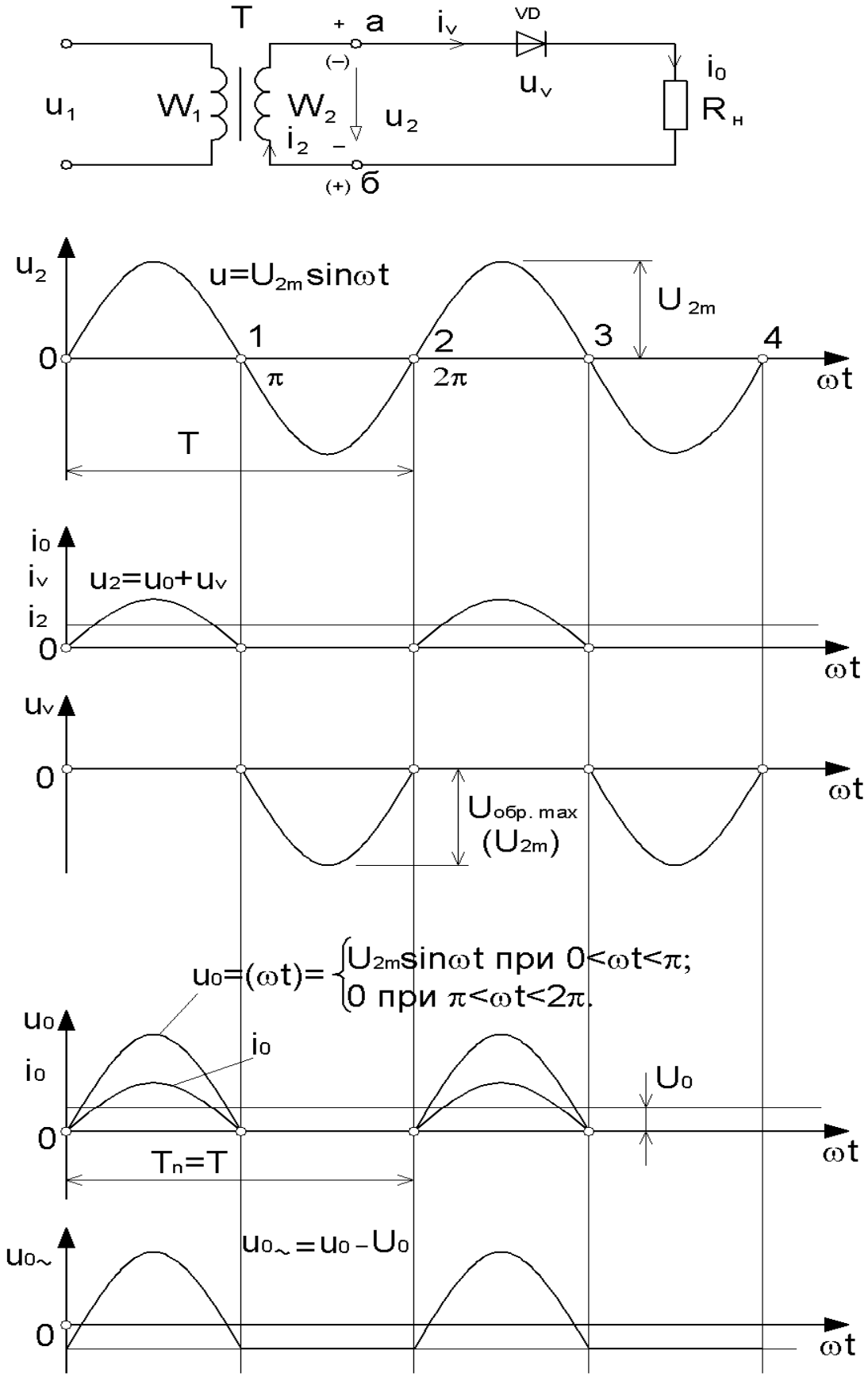


Рисунок 1.4 – Однофазна однонапівперіодна схема випрямлення

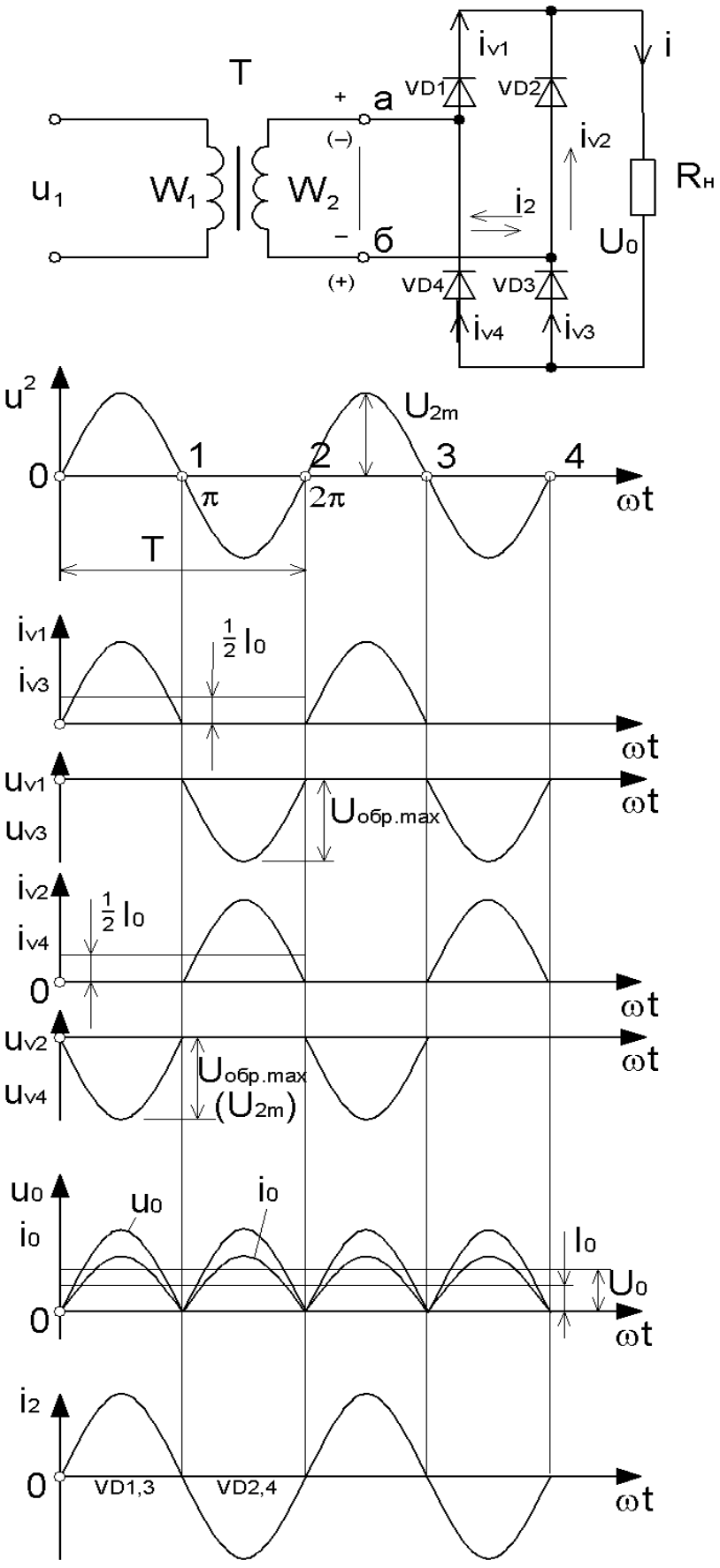


Рисунок 1.5 – Однофазна мостова схема випрямлення

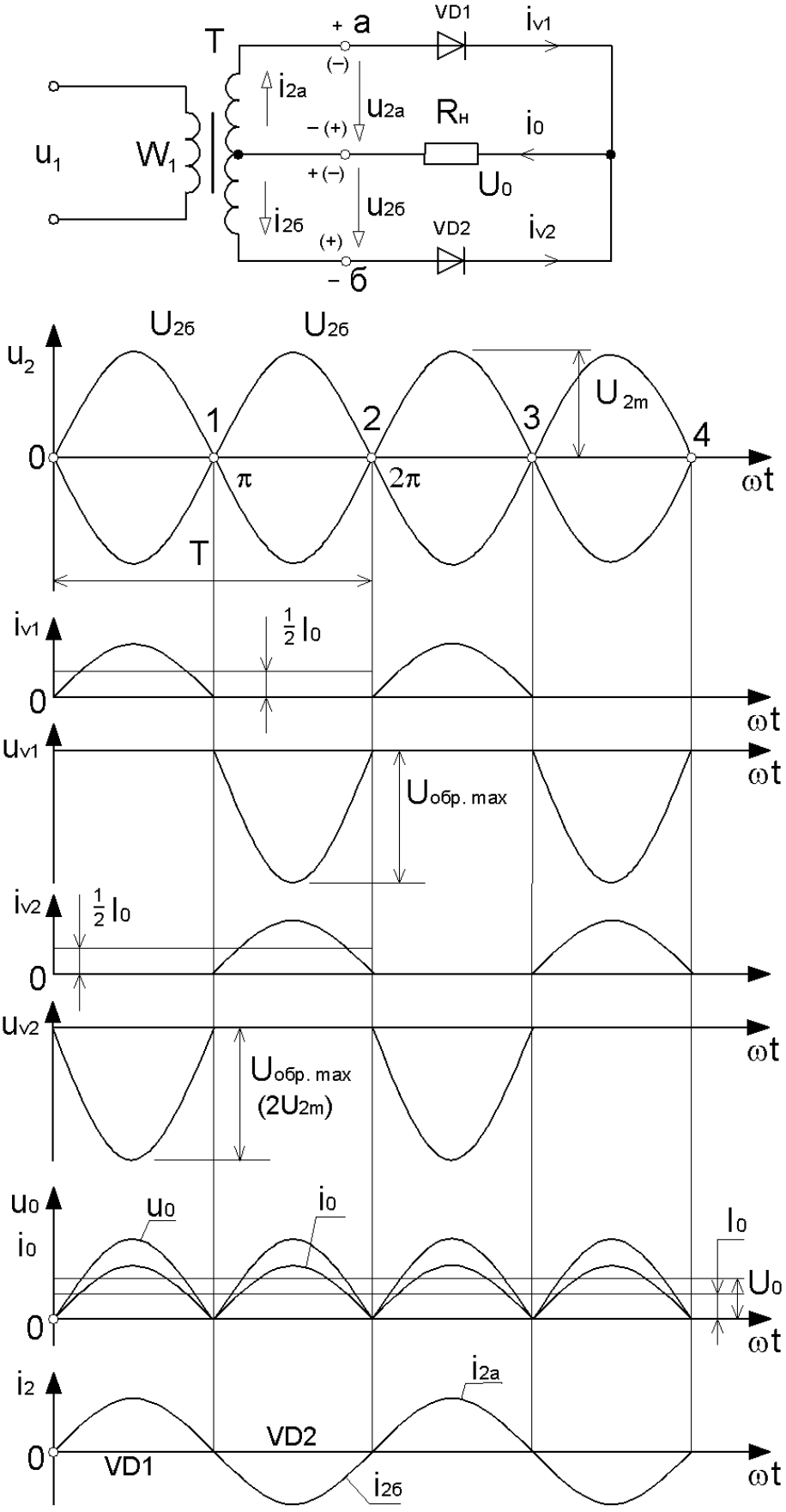


Рисунок 1.6 – Двофазна нульова схема випрямлення

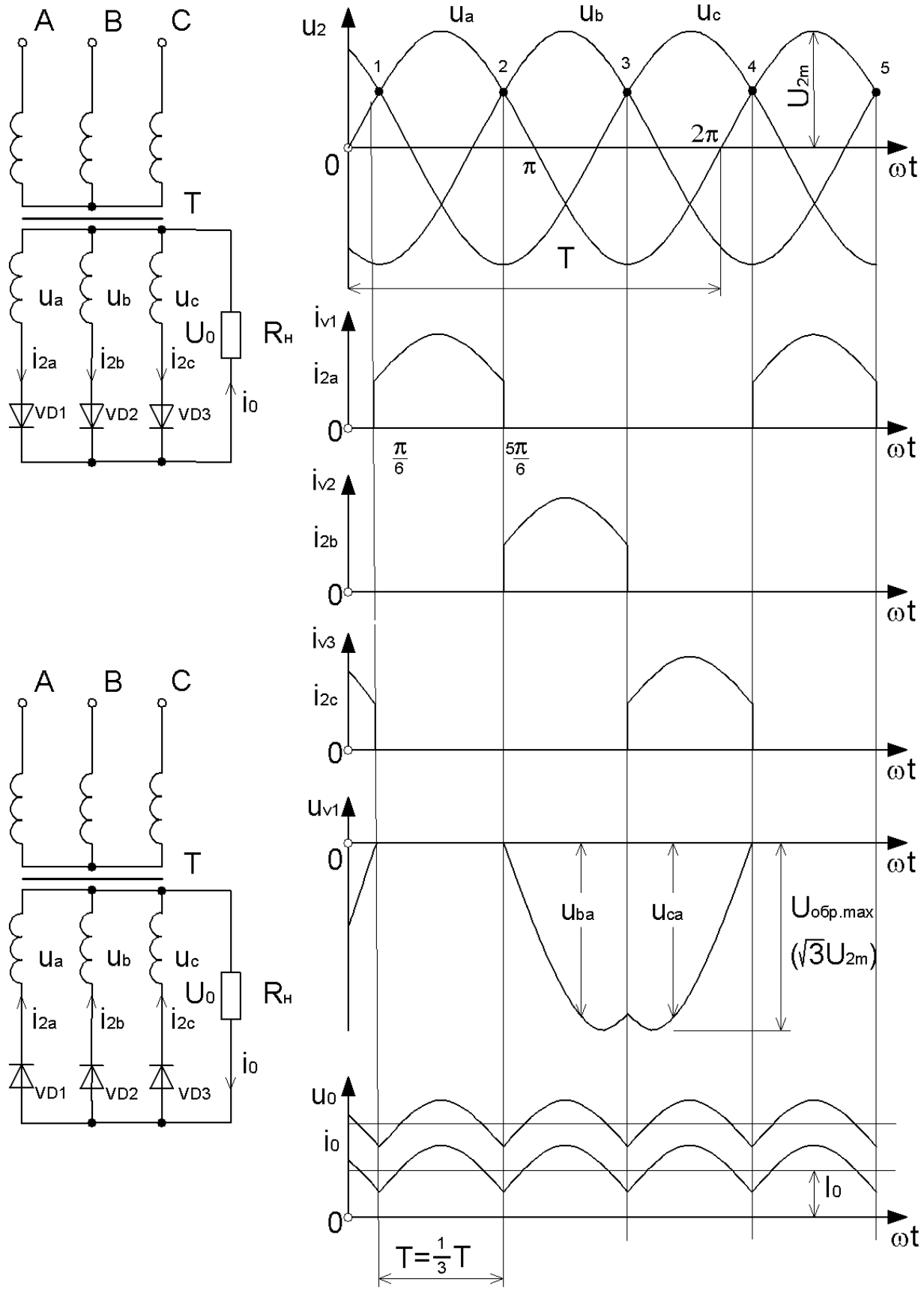
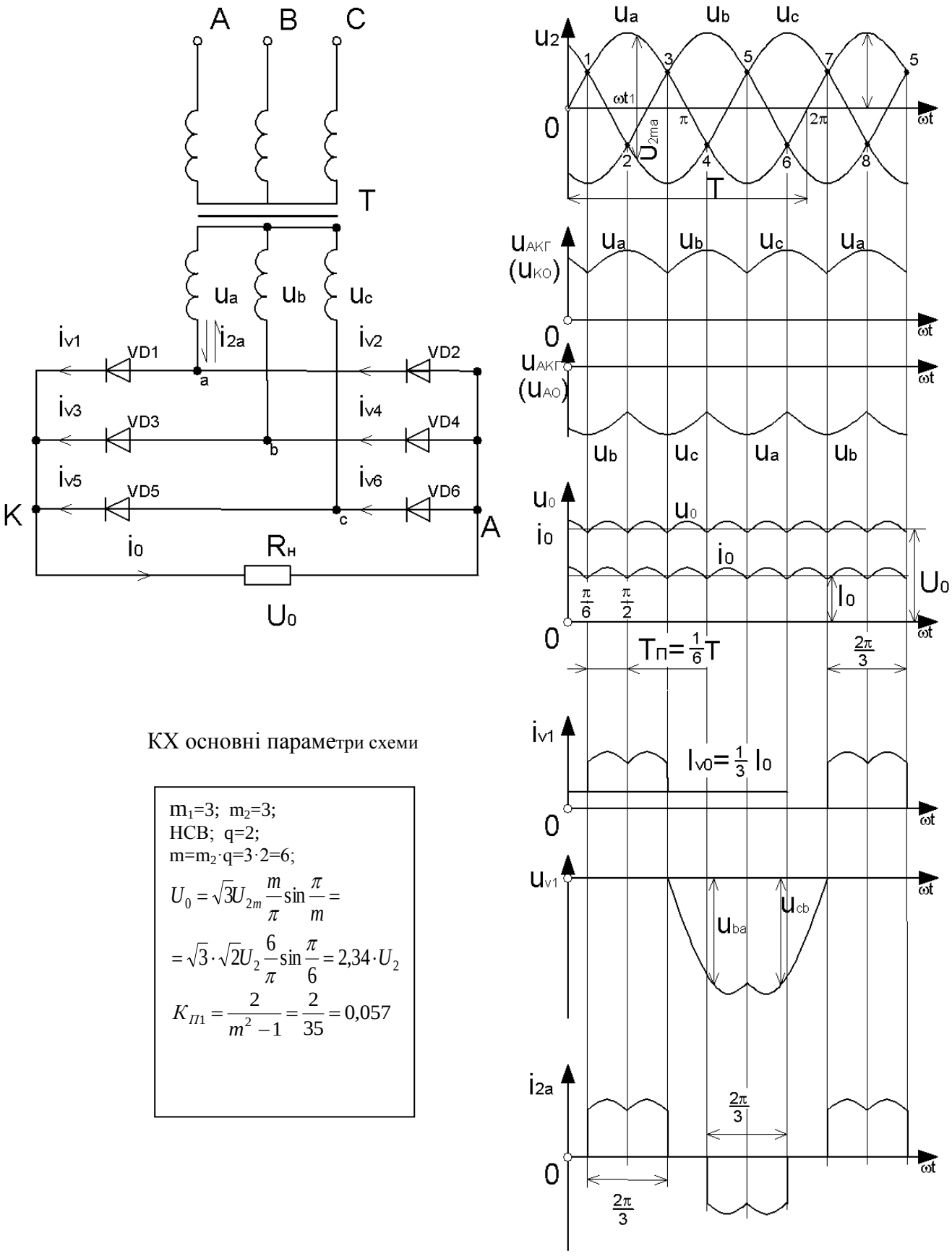


Рисунок 1.7 – Трифазна нульова схема випрямлення (схема Міткевіча)



КХ основні параметри схеми

$m_1=3;\ m_2=3;$
НСВ; $q=2;$
$m=m_2 \cdot q=3 \cdot 2=6;$

$$U_0=\sqrt{3}U_{2m}\frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}=$$

$$=\sqrt{3}\cdot\sqrt{2}U_2\frac{6}{\pi}\sin\frac{\pi}{6}=2{,}34\cdot U_2$$

$$K_{П1}=\frac{2}{m^2-1}=\frac{2}{35}=0{,}057$$

Рисунок 1.8 – Трифазна мостова схема випрямлення (схема Ларіонова)

Відповідно до другого закону Кірхгофа для вторинного ланцюга трансформатора можна записати

$$u_2 = u_0 + u_V, \qquad (1.4)$$

де u_V – напруга, що прикладається до діода, що знаходиться в замкнутому стані.

Сутністьдвотактного (двонапівперіодного) способу перетворення полягає в забезпеченні схемою випрямлення такого підключення навантаження до джерела електричної енергії, абипо навантаженню протікав струмодного напряму в обидванапівперіода перетворюваної напруги (рис.1.5).

Двофазна однотактна схема випрямлення є схемою, в якій працюють на загальне навантаження дві однотактні однонапівперіодні схеми випрямлення кожна в свій напівперіод перетворюваної напруги (рис. 1.6).

У однотактних і двотактних трифазних схемах випрямлення за рахунок ефекту «перекриття фаз» струм у фазній обмотці трансформатора протікає протягом частини одного або двох напівперіодів відповідно.

Для аналізу електромагнітних процесів в трифазній схемі випрямлення необхідно:

- вибрати для розгляду конкретний момент часу (накласти обмеження $u_t = u_{t1} = const$);
- визначити для даного моменту фазу перетворюваної напруги, в якій найбільша негативна напруга;
- за схемою випрямлення визначити групи включення напівпровідникових діодів (групу вмикання), що входять до складу схеми, і сформулювати умову провідності діода в кожній групі;
- за схемою випрямлення визначити конкретні діоди, для яких в даний момент часу виконуються умови провідності, і показати ланцюг протікання струму навантаження;
- зняти обмеження u_t і розглянути перетворюючий процес в динаміці за декілька періодів перетворюваної напруги.

Ознакою групи включення діодів є загальна точка, в яку вони сполучені анодами або катодами. Діоди, сполучені в загальну точку катодами, утворюють катодну групу (*К*), діоди, сполучені анодами, - анодну групу (*А*).

У катодній групі проводить струм той діод, у якого анодна напруга u_{KA} вища, ніж в останніх. Комутація вентилів катодної групи виникає в той момент, коли напруга вступаючої в роботу фази стає або рівним напрузі працюючої фази, або більше його. У анодній групі проводить струм той діод, в якого напруга катода u_{AK} найменша. Комутація у вентилів анодної групи виникає в той момент, коли напруга вступаючої в роботу фази стає або рівним напрузі працюючої фази, або менше його. Загальний катод завжди є плюсовим, а загальний анод – мінусовим виведенням схеми випрямлення.

Аналіз електромагнітних процесів, що протікають в нульових схемах випрямлення (рис. 1.4, 1.6, 1.7) показує, що в загальному випадку робота *m* –

фазної нульової схеми випрямленняхарактеризується наступними особливостями:

- у будь-який момент часу на навантаження включена лише одна фаза перетворюваної напруги (до навантаження прикладається фазна напруга) і саме та, яка в даний момент часу забезпечує найбільший потенціал на аноді свого вентиля, коли діоди зібрані в катодну групу;
- фаза підключається до навантаження протягом періоду лише один раз, тобто за період перетворюваної напруги від фази через навантаження проходить лише один імпульс струму;
- випрямлений струм (струм навантаження) є сумарним струмом всіх по черзі працюючих фаз, а випрямлена напругамає форму огинаючої кривої фазної напруги вторинної обмотки трансформатора;
- частота пульсації напруги (струму) на навантаженні кратна числу фаз випрямлення, тобто

$$f_{\Pi} = mf \ ; \qquad (1.5)$$

- при непарному числі фаз випрямлення (m = 1,3,5) силовий трансформатор *T* працює в умовах наявності постійного потоку підмагничування його сердечника, а при парному числі фаз випрямлення (m = 2,4,6,.) потік постійного підмагнічування відсутній.

  Аналіз електромагнітних процесів, що протікають в мостових схемах випрямлення (рис. 1.5, 1.8), показує, що в загальному випадку робота *m* фазної мостової схеми випрямленняхарактеризується наступними особливостями:

  - у будь-який момент часу на навантаження включено дві фази перетворюваної напруги (до навантаження прикладається лінійна напруга), а саме ті, які в даний момент часу забезпечують найбільший позитивний потенціал на аноді вентиля катодної групи і найбільший негативний потенціал на катоді вентиля анодної групи, тобто струм проводять два вентилі – один з катодної, а інший з анодної групи;
  - кожна фаза перетворюваної напругипротягом періоду підключається до навантаження двічі – в позитивний і негативний напівперіод, тобто за період перетворюваної напруги від кожної фази через навантаження проходять два імпульси струму в одному напрямі і через фазну обмотку трансформатора два імпульси струму у різних напрямах, що забезпечує відсутність потоку постійного підмагнічування сердечника трансформатора;
  - частота пульсацій напруги (струму) на навантаженні кратна числу фаз випрямлення, тобто величину середнєвипрямленої напруги U_0 отримують теоретично для будь-якої схеми випрямлення з умови (1.2) або для схем випрямлення з *m = 2*, скориставшись співвідношенням, отриманим в теорії m – фазного випрямляча:

$$U_0 = \sqrt{2}U_2 \frac{m}{\pi} \sin\frac{\pi}{m}, \qquad (1.6)$$

де *U2* – значення фазної напруги, що діє, перетворюваного схемою випрямлення;

m = m2q – число фаз випрямлення.

Випрямлене напругу u_0 можна представити у вигляді суми постійної середнєвипрямленої напруги U_0 і змінній складової $u_{0\sim}$, тобто

$$u_0 = U_0 + u_{0\sim} \tag{1.7}$$

Розкладання змінної складовою $u_{0\sim}$, що знижує якість вихідної напруги і що робить вплив на функціонування споживачів в ряд Фур'є, показує, що її можна представити у вигляді ряду гармонійних складових, який для однонапівперіодної схеми випрямлення (рис. 1.4) має вигляд

$$\begin{aligned} u_{0\sim} = {} & 1{,}57U_0 \sin\omega t - 0{,}66U_0 \cos 2\omega t - 0{,}13U_0 \cos 4\omega t - \\ & - 0{,}057U_0 \cos 6\omega t - 0{,}031U_0 \cos 8\omega t - \ldots \end{aligned} \tag{1.8}$$

З (1.8) видно, що найбільший вплив на величину постійної вихідної напруги U_0 має перша гармоніка, оскільки її амплітуда є найбільшою.

Оцінку впливу змінної складовою $u_{0\sim}$ на якість вихідної напруги виробляють по коефіцієнту пульсації $K_П$, який є відношенням амплітуди гармоніки до середнього значення випрямленої напруги і для першої гармоніки однонапівперіодної схеми випрямлення на підставі (1.8) рівний

$$K_{П1} = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{1{,}57U_0}{U_0} = 1{,}57, \tag{1.9}$$

У загальному випадку коефіцієнт пульсації K_m-ой гармоніки $K_{ПК}$ можна отримати для будь-якої схеми випрямлення з $m = 2$ із співвідношення, отриманого в теорії m-фазного випрямляча

$$K_{ПК} = \frac{2}{(km)^2 - 1} \cdot 100[\%], \tag{1.10}$$

де K_m – номер гармоніки.

Схеми випрямленняхарактеризуються наступними параметрами:

- коефіцієнтами використання вентилів по напрузі K_{vu} і струму K_{vi};
- коефіцієнтом використання трансформатора K_T;
- коефіцієнтом випрямлення K_B;
- коефіцієнтом пульсації по першій гармоніці $K_{П1}$.

Коефіцієнти використання вентилів по напрузі K_{vu} і струму K_{vi} є відповідно відношенням середнєвипрямленого значення напруги U_0 до максимальної зворотної напруги діода $U_{обр\ max}$ і відношення середнього значення струму через діод I_{V0} до середнєвипрямленого значення струму навантаження I_0:

$$K_{VU} = \frac{U_0}{U_{обр.\max}}, \tag{1.11}$$

$$K_{VI} = \frac{I_{V0}}{I_0}. \tag{1.12}$$

Коефіцієнт використання трансформатора K_T є відношенням корисної (активною) потужності випрямляча P_0 до розрахункової потужності

трансформатора S_T:

$$K_T = \frac{P_0}{S_T} = \frac{U_0 \cdot I_0}{S_T}. \qquad (1.13)$$

Для двохобмоточного трансформатора розрахункова (габаритна) потужність визначається як сума потужностей його первинної і вторинної обмоток:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{m_1 U_1 I_1 + m_2 U_2 I_2}{2}, \qquad (1.14)$$

де $S_1 = m_1 U_1 I_1$ - розрахункова потужність первинної обмотки;

$S_2 = m_2 U_2 I_2$ - розрахункова потужність вторинної обмотки;

m_1, m_2 – число фаз первинної і вторинної обмоток;

U_1, I_1, U_2, I_2 – значення фазної напруги і струмів первинної і вторинної обмоток трансформатора, що діють.

Розрахункова потужність трансформатора завжди має бути більше потужності, споживаним навантаженням постійного струму. Аналогічно можуть бути визначені коефіцієнти використання первинної і вторинної обмотки трансформатора.

Коефіцієнт випрямлення K_B є відношенням середнєвипрямленого значення напруги U_0 до значення напруги U_2 вторинної обмотки трансформатора, що діє, і для схем випрямлення з $m = 2$ на підставі (1.6) має вигляд

$$K_B = \frac{U_0}{U_2} = \sqrt{2}\frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}. \qquad (1.15)$$

Чим вище K_B, тим більше ефектно здійснюється схемою випрямлення процес перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм.

У зв'язку із складністю виміру амплітуди першої гармоніки в реальній кривій випрямленої напруги коефіцієнт $K_{П1}$ можна визначати по наближеній формулі з достатньою для практики точністю як відношення напіврізниці максимального $U_{0\ max}$ і мінімального $U_{0\ min}$ миттєвих значень випрямленої напруги (половини розмаху пульсацій u_0) до середнєвипрямленого значення напруги:

$$K_{П1} = \frac{\Delta u_0}{2U_0} = \frac{u_{0\max} - u_{0\min}}{2U_0}. \qquad (1.16)$$

Теоретичні значення параметрів схем випрямленняприведені в таблиці 1.1.

Вони дозволяють виробити табличний розрахунок схем випрямлення (таб. 1.2) при заданих параметрах навантаження (U_0 *і* I_0).

Найбільш широко вживаним способом підвищення якості електричної енергії на виході схеми випрямлення за рахунок фільтрації випрямленої напруги u_0 згладжуючим фільтром $Ф$ є пасивний спосіб, заснований на використанні у складі згладжуючого фільтру $Ф$ реактивних елементів (індуктивностей L і ємностей C). Сутність способу полягає в накопиченні реактивними елементами енергії в період її надлишку і віддачі енергії в

період її недоліку. У випрямлячах знаходять вживання L –, C – і Г – образний LC – фільтри (рис. 1.9, а, б, в відповідно).

Для оцінки ефективності згладжуючого фільтру застосовується коефіцієнт згладжування $K_{сгл}$, який є відношенням коефіцієнта пульсації на вході згладжуючого фільтру *КП* до коефіцієнта пульсації на його виході $K'_П$, тобто

$$K_{СГЛ} = \frac{K_П}{K'_П}. \qquad (1.17)$$

Значення $K_П$ і $K'_П$ визначаються по одній і тій же формулі (1.16). Оскільки ефективність роботи фільтру полягає в зменшенні розмаху пульсації u_0 при одночасній зміні середнєвипрямленого значення напруги U_0, то значення коефіцієнтів $K_П$ і $K'_П$ виявляються різними. Згладжуючий фільтр повинен мати $K_{сгл}$, що істотно перевищує одиницю. При величині $K_{сгл}$, близькій до одиниці, фільтр практично мало ефективний.

Таблиця 1.1

№	Схема випрямлення	Параметри				
		K_{VU}	K_{VI}	K_T	K_B	$K_{П1}$
1.	Однотактна однофазна	0,32	1	0,32	0,18	1,57
2.	Однотактна двофазна	0,32	0,5	0,68	0,9	0,67
3.	Двотактна однофазна	0,64	0,5	0,81	0,9	0,67
4.	Однотактна трифазна	0,47	0,3	0,74	1,17	0,25
5.	Двотактна трифазна	0,95	0,3	0,96	2,34	0,057

Таблиця 1.2

№	Схема випрямлення	Трансформатор		Діоди	
		S	U_2	I_{V0}	$U_{обр.\ max}$
1.	Однотактна однофазна	3,1 P_0	2,34 U_0	I_0	3,1 U_0
2.	Однотактна двофазна	1,5 P_0	1,17 U_0	0,5 I_0	3,1 U_0
3.	Двотактна однофазна	1,2 P_0	1,17 U_0	0,5 I_0	1,6 U_0
4.	Однотактна трифазна	1,4 P_0	0,86 U_0	0,3 I_0	2,1 U_0
5.	Двотактна трифазна	1,04 P_0	0,42 U_0	0,3 I_0	1,05 U_0

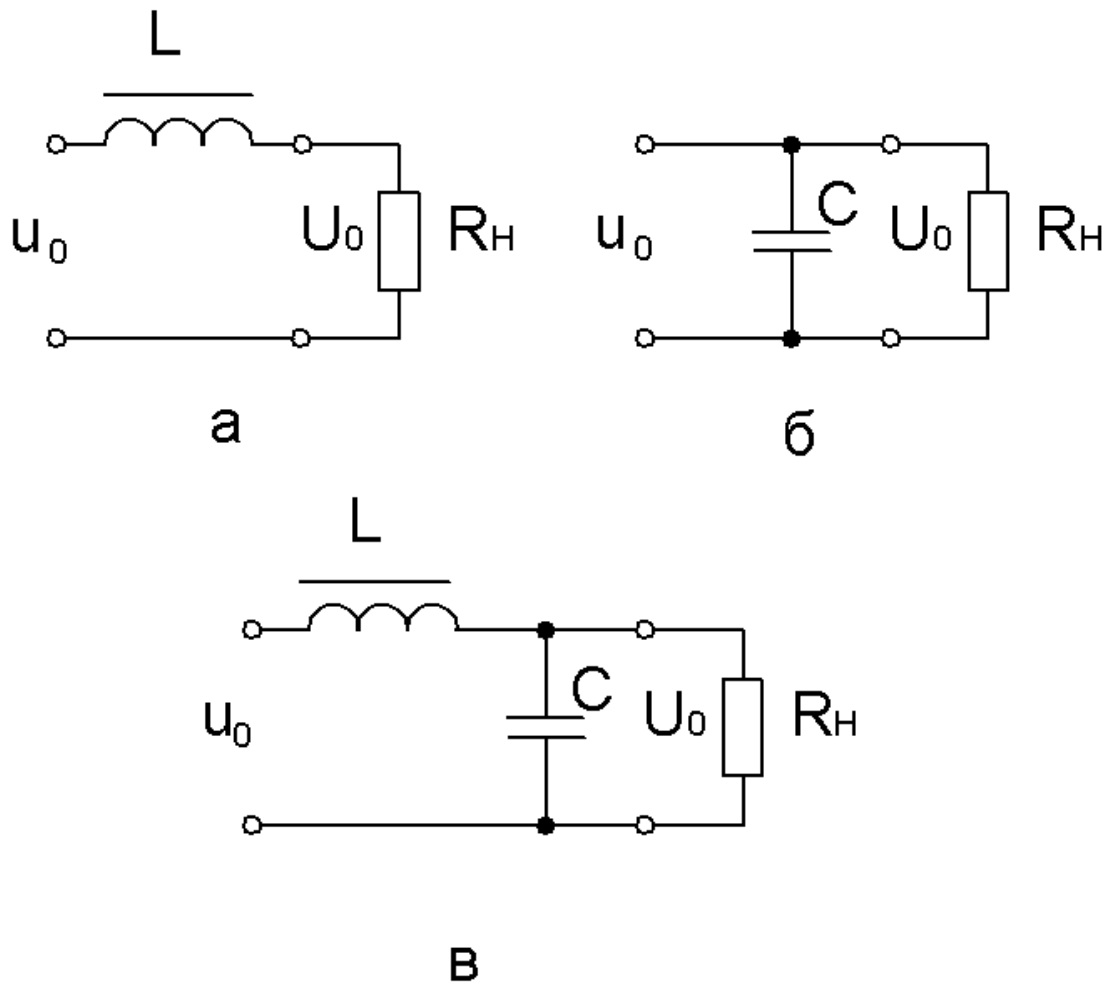


Рисунок 1.9 – Схеми згладжуючих фільтрів

Важливоюхарактеристикою випрямляча є зовнішня характеристика, яка визначає залежність значення напругина виході випрямляча від величини середнєвипрямленого значення струму при незмінній величині перетворюваної напруги і незмінному характері навантаження:

$$U_0 = f(I_0). \qquad (1.18)$$

Характер навантаження випрямляча впливає на жорсткість його зовнішньої характеристики (рис. 1.10). Найбільшу жорсткість зовнішньої характеристики має випрямляч при індуктивному характері навантаження. Оскільки характер навантаження визначається згладжуючим фільтром, то на практиці прагнуть вибрати параметри фільтру такими, абинавантаження випрямляча мало індуктивний характер. В цьому випадку полегшуються умови роботи стабілізатора постійної напруги, що підключається на вихід випрямляча.

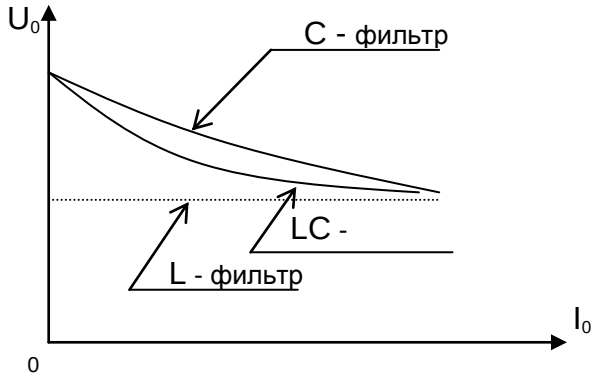


Рисунок 1.10 – Зовнішніх характеристик випрямляча при різному характері навантаження.

5. Опис лабораторної установки

Принципова електрична схема установки, представлена на рисунку 1.11, складається з однофазного і трифазного трансформаторів (T_2, CT), блоку вентилів $БВ$, утвореного діодами $VD_1 ... VD_6$, згладжуючого фільтру $Ф$ з елементами L і C_1, C_2, опори навантаження R_k і вимірювальних приладів ($A_1 ... A_3$ і $V_1 ... V_3$). За допомогою комплекту перемичок і гнізд на набірному полі стенду можна зібрати будь-яку схему випрямляча, що підлягає дослідженню (таблиця 1.3), і змоделювати будь-який фільтр, приведений на рисунку 1.9.

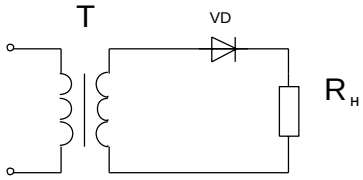
Для виміру значень фазної напруги (U_1, U_2) і струмів (I_1, I_2) первинної і вторинної обмоток трансформатора, використовуються вольтметри V_1, V_2 і амперметри A_1, A_2 відповідно. Для виміру середнєвипрямлених значень напруги U_0 і струму I_0 використовується вольтметр V_3 і амперметр A_3.

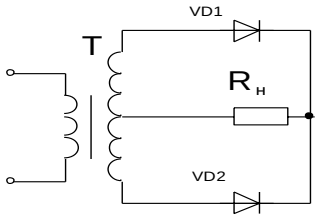
Для зняття епюр миттєвих значень фазної напруги u_2, фазного струму i_2, зворотної напруги на діодах u_V, випрямлених напруги u_0 і струму i_0, а також для виміру максимальної зворотної напруги на діоді $U_{обр.\ max}$ і розмаху пульсацій Δu_0 випрямленої напруги використовується осцилограф. Епюра струму i_2 знімається на активному опорі R_1, включеному у фазу випрямлення. Для виміру $U_{обр.\ max}$ вхід осцилографа підключається на анод і катод один з працюючих вентилів, а для виміру Δu_0 – на клеми навантаження $R_н$.

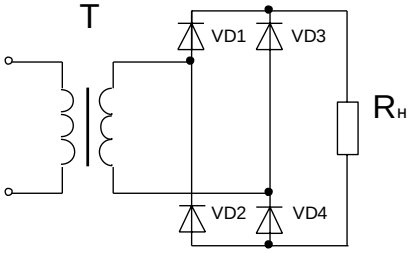
Вимикач S_1 і S_2 призначені для підключення установки до мережі ~ 220 В, 50 Гц.

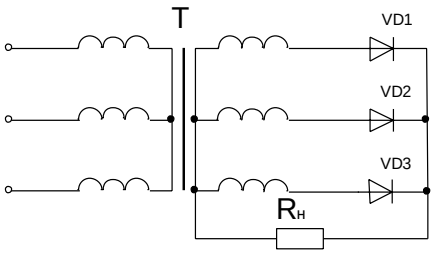
Таблиця 1.3

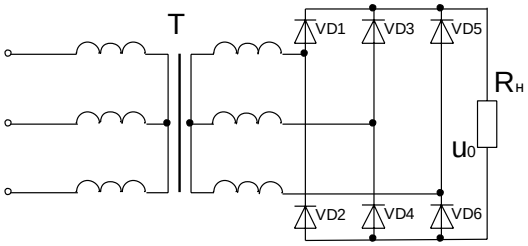
№ п\п	Схема випрямлення	Значення параметра m = m2·q

1		m =___;
		m2 =___;
		q =___.

2		m =___;
		m2 =___;
		q =___.

3		m =___;
		m2 =___;
		q =___.

4		m =___;
		m2 =___;
		q =___.

5		m =___;
		m2 =___;
		q =___.

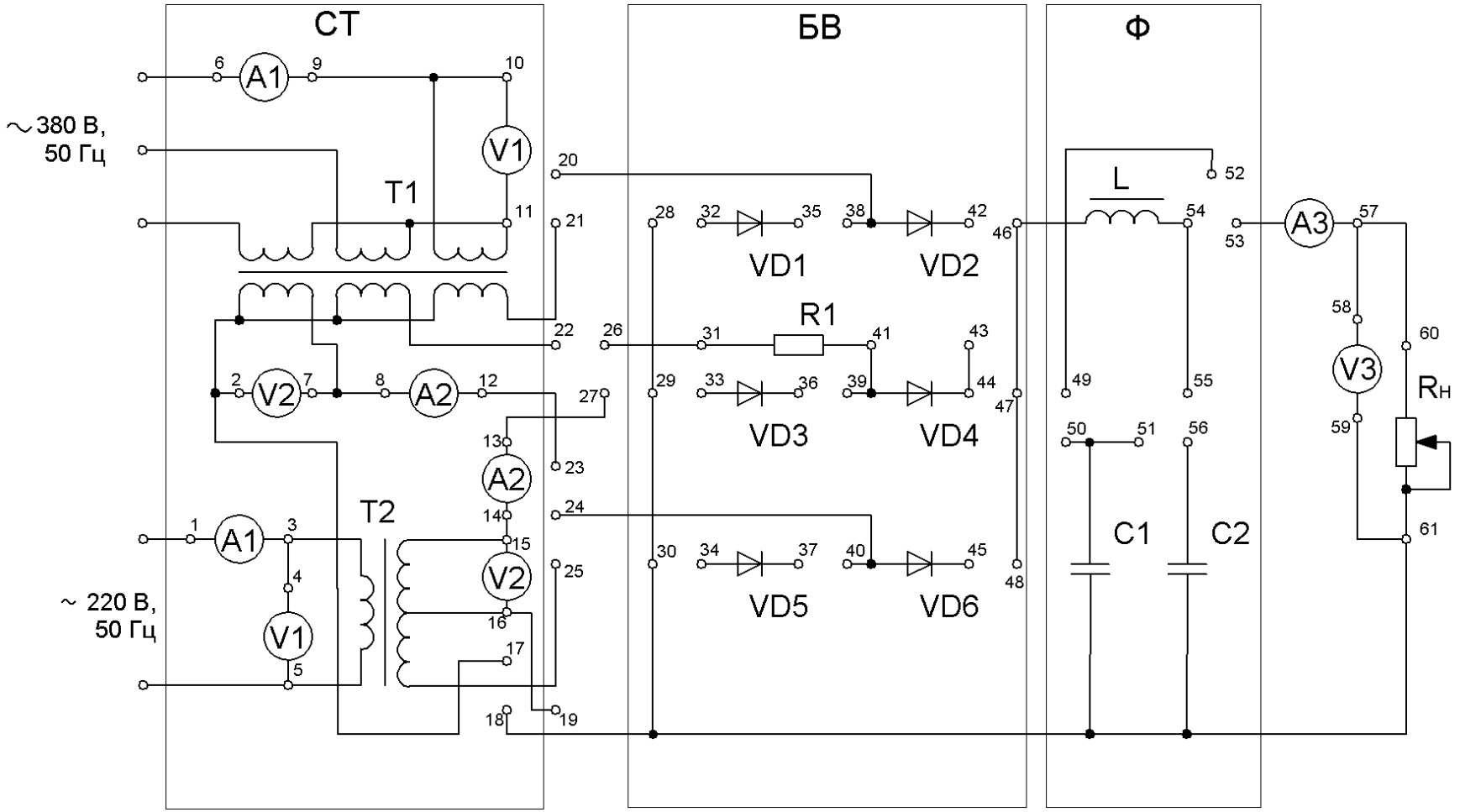


Рисунок 1.11 – Принципова електрична схема установки

6. Порядок проведення випробувань напівпровідникових випрямлячів

6.1 Дослідження електромагнітних процесів в однофазних і трифазних схемах випрямлення при активному характері навантаження

1. Перевірити вихідний стан випробувального стенду. Воно повинне відповідати наступним вимогам:

- вимикач S_1 відключений;
- осцилограф повинен знаходитися на столі установки, вимірювальні входи підключені до опору навантаження $R_н$ (гнізда 60 і 61);
- всі перемички мають бути у відключеному положенні, стенд знеструмлений.

2. За допомогою перемичок на лицьовій панелі установки зібрати досліджувану схему випрямляча. Встановити наступні перемички залежно від схеми:

- однофазна однонапівперіодна схема випрямлення: 26-27, 44-47, 47-49, 52-53, 18-19;
- однофазна мостова схема випрямлення: 26-27, 29-33, 36-39, 44-47, 47-49, 52-53, 24-25, 30-34, 37-40, 45-48;
- двофазна нульова схема випрямлення: 26-27, 44-47, 47-49, 52-53, 18-19, 24-25, 45-48;
- трифазна нульова схема випрямлення (схема Міткевіча): 17-18, 20-21, 22-26, 23-24, 42-46, 44-47, 45-48, 47-49, 52-53;
- трифазна мостова схема випрямлення (схема Ларіонова): 20-21, 22-26, 23-24, 28-32, 29-33, 30-34, 35-38, 36-39, 37-40, 42-46, 44-47, 45-48, 47-49, 52-53.

3. Підключити вимірювальні прилади V_1, A_1, V_2, A_2, V_3, A_3 до відповідних клем стенду за допомогою вимірювальних шнурів. Відкалібрувати вертикальну шкалу осцилографа по наближеному значенню очікуваної випрямленої напруги U_0. Подати напругу живлення на стенд (вимикач S_1).

4. Виставити необхідний струм навантаження за допомогою регульованого реостата навантаження $R_н$.

5. Відкалібрувати вертикальну шкалу ЕПТ, використовуючи співвідношення (1.3) і величину середнєвипрямленої напруги U_0, вимірювану вольтметром V_3. Ціну ділення вертикальної шкали ЕПТ записати в звіт.

6. Записати в таблицю 1.4 величин напруги і струмів первинної U_1 *і* I_1, вторинною U_2 *і* I_2 обмоток трансформатора, а також середнєвипрямлене значення напруги U_0 і струму I_0 випрямляча, величину розмаху пульсацій Δu_0 випрямленої напруги u_0, величину зворотньої напруги на діоді $U_{обр}$, виміряні за допомогою приладів V_1, A_1, V_2, A_2, V_3, A і осцилографа відповідно (осцилограф при цьому підключити до клем 41-43).

Таблиця 1.4

Дано			Виміряно								Вируховано								
			U_1, В	I_1, А	U_2, В	I_2, А	U_0, В	I_0, А	Δu_0,В	$U_{обр}$, В	Теоретично				За результатами вимірів				
											$К_{п1}$	$К_{vu}$	$К_в$	$К_т$	$К_{п1}$	$К_{vu}$	$К_в$	$К_т$	$f_п$, Гц
Схема випрямлення	Однофазна	однонапівперіодна																	
		Нульова																	
		Мостова																	
	Трифазна	Нульова																	
		Мостова																	

7. На підставі отриманих експериментальною дорогою даних визначити основні параметри випрямляча: $K_{п1}$, K_{vu}, $K_в$, $K_т$, $f_п$. Обчислені значення занести в таблицю 1.4.

8. Відповідно до співвідношення

$$U_{0\alpha}=f(I_{0\alpha}), \text{ при } U_1=const;\ cos\varphi_н=const,$$

змінюючи величину регулювального опору навантаження $R_н$, за свідченнями вольтметра V_3 і амперметра A_3, зняти зовнішню характеристику випрямляча для чисто активного навантаження, результати вимірів занести в таблицю 1.5.

9. Змінюючи характер навантаження випрямляча шляхом підключення різних згладжуючих фільтрів, зняти зовнішні характеристики випрямляча для ємкісного характеру навантаження (підключивши С-фільтр на вхід схеми випрямлення) і для індуктивного характеру навантаження (підключивши дросель L на вхід випрямляча), результати вимірів занести в таблицю 1.5.

Таблиця 1.5

Схема випрямлення (Міткевіча, Ларіонова)				
Вигляд навантаження	Параметр	Номер виміру		
		1	2	3
R	U_0, В			
	I_0, А			
RC	U_0, В			
	I_0, А			
RL	U_0, В			
	I_0, А			

10. На підставі таблиці 1.5 побудувати зовнішню характеристику випрямляча.

7. Дослідження аварійних режимів роботи схем випрямлення

1. Зібрати по вказівці викладача одну з схем випрямлення.
2. Отримати осцилограму випрямленої напруги u_0 .
3. Відключити від схеми випрямленняживлячу напругуі ввести несправність "обрив фази випрямлення" шляхом зняття перемички в колі одній з вторинних обмоток трансформатора.
4. Вимикачем S_1 підключати схему до живлячої мережі і зробити вивід про вплив несправності на величину і якість вихідної напруги після зміни параметрів U_0 *і* $K_{П1}$.
5. Відключити від схеми випрямленняживлячу напругуі ввести несправність "обрив діода фази випрямлення", прибравши в його колі відповідну перемичку. Виконати п. 4.
6. Привести устаткування учбово-тренувального стенду в початковий стан.

8. Обробка результатів дослідів

1. За даними таблиці 1.4 з використанням співвідношень (1.5); (1.11); (1.13)-(1.16) розрахувати параметри схеми випрямлення і провести порівняльний аналіз схем.
2. За даними таблиці 1.5 побудувати в одних осях координат зовнішні характеристики випрямляча при різному характері навантаження і зробити вивід про жорсткість зовнішніх характеристик (оцінити $\beta = \Delta U_0/\Delta I_0$ для різного характеру навантаження).

9. Змістзвіту

Звіт кожного здобувача освіти по роботі повинен містити:

- перелік вимірювальних приладів і їх характеристики;
- принципову електричну схему лабораторної установки;
- таблиці з результатами вимірів, розрахунків і осцилограм миттєвих значень напруги і струмів (таблиця. 1.4, 1.5);
- графіки зовнішніх характеристик випрямляча для активного, ємкісного і індуктивного характеру навантаження;
- короткі за результатами досліджень.

10. Перелік контрольних питань

1. Призначення, склад і принцип роботи діодного випрямляча.
2. Намалювати задану схему випрямлення (рис. 1.2) при активному характері навантаження, епюри напруги u_2, u_V, u_0 і струму i_2, що пояснюють принцип її роботи.

3. Перерахувати параметри схем випрямлення і привести їх математичні вирази.

4. Сформулювати умову провідності вентиля анодної і катодної групи включення.

5. У яких схемах випрямленнямає місце підмагнічування сердечника трансформатора постійною складовою струмувторинноїобмотки трансформатора і чому?

6. Дати визначення коефіцієнта пульсацій і привести теоретичне і практичне вираження для його обчислення.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Тема: Дослідження однофазних випрямлячів на тиристорах

1. Мета роботи

Метою роботи є вивчення електричних схем і принципу дії однофазних схем тиристорних випрямлячів при активному характері навантаження, визначення їх основних характеристик і з'ясування принципу регулювання постійної напруги за допомогою тиристорів.

2. Програма роботи

1. Вивчити електричні схеми і принцип дії однофазних тиристорних випрямлячів.
2. Експериментально дослідити електромагнітні процеси у тиристорних випрямлячах при активному характері навантаження і різних кутах регулювання.
3. Експериментально визначити зовнішні і регулювальні характеристики тиристорних випрямлячів.

3. Завдання на самопідготовку

1. Вивчити теоретичні положення і ознайомитися з програмою роботи.
2. Підготувати звіт до виконання роботи:
   - підготувати форми таблиць 2.1, 2.2;
   - виконати п.13 параграфа 6.

4. Основні теоретичні положення

Процес перетворення змінного струму в постійний називається випрямленням, а електротехнічні пристрої, що реалізовують таку можливість, отримали назву випрямлячі. Найбільшого поширення в системах автономного електропостачання набули статичні випрямлячі, що мають переваги перед електромашинними перетворювачами. У статичних випрямлячах використовуються нелінійні напівпровідникові прилади – вентилі, як некеровані (діоди), так і керовані (тиристори). У лабораторній роботі досліджуються напівпровідникові тиристорні випрямлячі.

Принципи побудови силових частин тиристорних (керованих) випрямлячів і їх класифікація аналогічні принципам побудови силових частин діодних (некерованих) випрямлячів.

Структурна схема керованого випрямляча (рис. 2.1) містить силовий трансформатор *СТ*, блок вентилів *БВ*, що згладжує фільтр *Ф*, створюючи силову частину перетворювача і систему управління *СУ* блоком вентилів. У силовій частині керованого випрямляча відбувається процес керованого

випрямлення, що є сукупністю наступних перетворюючих процесів: узгодження напруги мережі u_1, з напругою на виході перетворювача $u_{0\alpha}$ (за допомогою *СТ*); перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм (за допомогою *СТ, БВ, СУ*); згладжування постійного пульсуючого струму (за допомогою *Ф*); регулювання величини вихідної напруги $U_{0\alpha}$ (за допомогою *БВ* і *СУ*) при коливаннях мережевої напруги U_1, змінах опору навантаження і дії інших дестабілізуючих чинників.

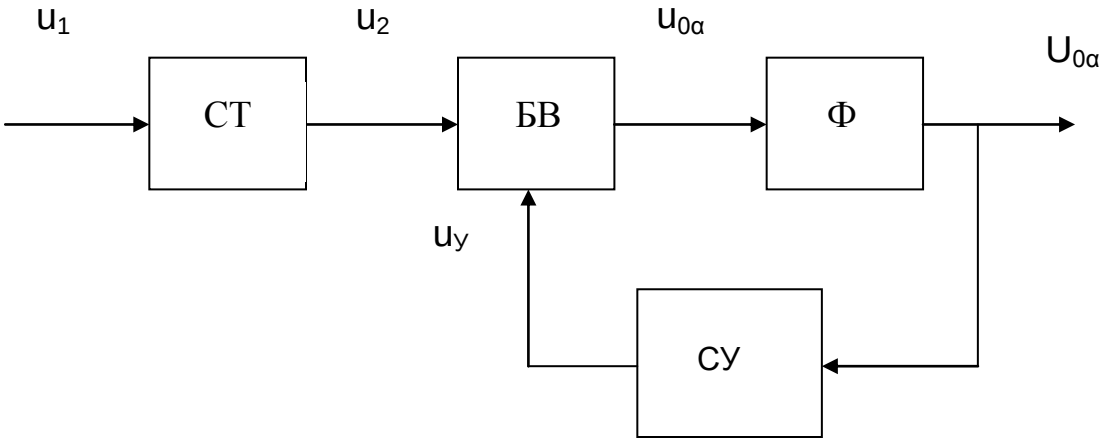


Рисунок 2.1 – Структурна схема керованого випрямляча

У некерованих випрямлячах на діодах відбувається лише процес випрямлення, а для стабілізації напруги на шинах навантаження додатково застосовують стабілізатори напруги, що в цілому ускладнює випрямний пристрій.

У тиристорному (керованому) випрямлячі схема випрямлення, утворена тиристорами блоку вентилів, увімкненими певним чином з вторинними обмотками трансформатора, не лише виконує перетворення змінного струму в постійний пульсуючий струм, але і є одночасно виконавчим елементом системи регулювання постійної напруги $U_{0\alpha,}$ що спрощує конструкцію перетворювача змінного струму в постійний і підвищує його ККД. Основна відмінність випрямлячів тиристорів від діодних полягає в тому, що в керованих випрямлячах замість некерованих вентилів (діодів) застосовують керовані (тиристори). Відмітною особливістю тиристора від діода є можливість довільної затримки моменту його відмикання за наявності прямої напруги на ділянці анод-катод. Це властивість тиристора дозволяє створювати схеми керованих випрямлячів з практично без інерційним регулюванням вихідної напруги, а також в необхідних випадках здійснювати швидкодіючий захист. Тиристори можуть бути неповністю керовані і повністю керовані. У тиристорах з неповним управлінням можна управляти лише процесом вмикання, а вимикання відбувається природним чином за

рахунок зміни полярності перетворюваної напруги на ділянці анод-катод. У тиристорах з повним управлінням можна управляти як процесом увімкнення, так і процесом вимкнення. У роботі досліджуються випрямлячі тиристорів на неповністю керованих тиристорах.

Стан тиристора (закритий або відкритий) залежить від ряду умов. Закритий тиристор знаходитиметься в закритому стані при позитивному потенціалі на аноді і відсутності сигналу, що управляє, або при негативному потенціалі на аноді. Тиристор відкривається при подачі на електрод напруги, що управляє, у вигляді імпульсу або постійної напруги позитивної полярності по відношенню до катода, якщо в даний момент до анода прикладена позитивна напруга.

Розглянемо сутність процесу регульованого випрямлення за допомогою тиристорів на прикладі однофазної однонапівперіодної (однотактної) схеми випрямлення (рис. 2.2).

На інтервалі $0 < \omega t < \alpha$ сигнал, що управляє, відсутній, тиристор закритий і струм через навантаження не протікає. Напруга u_2 буде прикладена до тиристора *VS*.

При ωt = α подається сигнал u_y, що управляє, тиристор відкривається і через навантаження $R_н$ почне протікати струм $i_{0\alpha}$. В результаті напруга на навантаженні змінюється стрибком від 0 до значення $u_2 = U_{2m} \sin\alpha$. Падіння напруги на тиристорі u_V стрибком зменшується від значення $u_2 = U_{2m} \sin\alpha$ до 0.

На інтервалі $\alpha < \omega t < \pi$ тиристор буде відкритий і напруга на навантаженні $u_{0\alpha}$ змінюється відповідно до зміни перетворюваної напруги u_2.

На інтервалі $\pi < \omega t < 2\pi+\alpha$ до подачі наступного керівного імпульсу і за наявності позитивної прямої напруги на ділянці анод-катод тиристор закритий і напруга на навантаженні дорівнює нулю.

При зміні кута управління α (момент відкриття тиристора) змінюватиметься вольт-секундна площа, обмежена кривою напруги на навантаженні $u_{0\alpha}$, а отже, змінюватиметься середнє значення випрямленої напруги $U_{0\alpha}$. Таким чином, здійснюючи затримку моменту включення тиристора по фазі на певний кут, можна змінювати вихідну напругу випрямляча. Кут управління α відлічується відносно точки природної комутації вентиля.

Вочевидь, що при α = 0 фізичних процесів і аналітичні співвідношення даної схеми керованого випрямляча повністю відповідають аналогічна фізичним процесам і аналітичним співвідношенням, отриманим для однофазної однотактної схеми діодного випрямляча.

При $\alpha = \pi$ тиристор буде постійно закритий, а напруга на навантаженні дорівнює нулю. Таким чином, в даній схемі регулювання вихідної напруги $U_{0\alpha}$ може здійснюватися при зміні кута управління α в межах $0 < \alpha < \pi$, а імпульси управління необхідно подавати на електрод тиристора, що

управляє, із зрушенням по фазі на кут 2 π.

В процесі роботи тиристорного випрямляча система управління формує управляючий сигнал, визначає момент його подачі і подає на управляючий електрод тиристора. Оптимальною формою управляючого сигналу для тиристорів є прямокутний імпульс малої тривалості. Така форма дозволяє зменшити нагрів управляючого електроду в тиристорі, а також забезпечити за рахунок високої крутості імпульсу надійне вмикання тиристора.

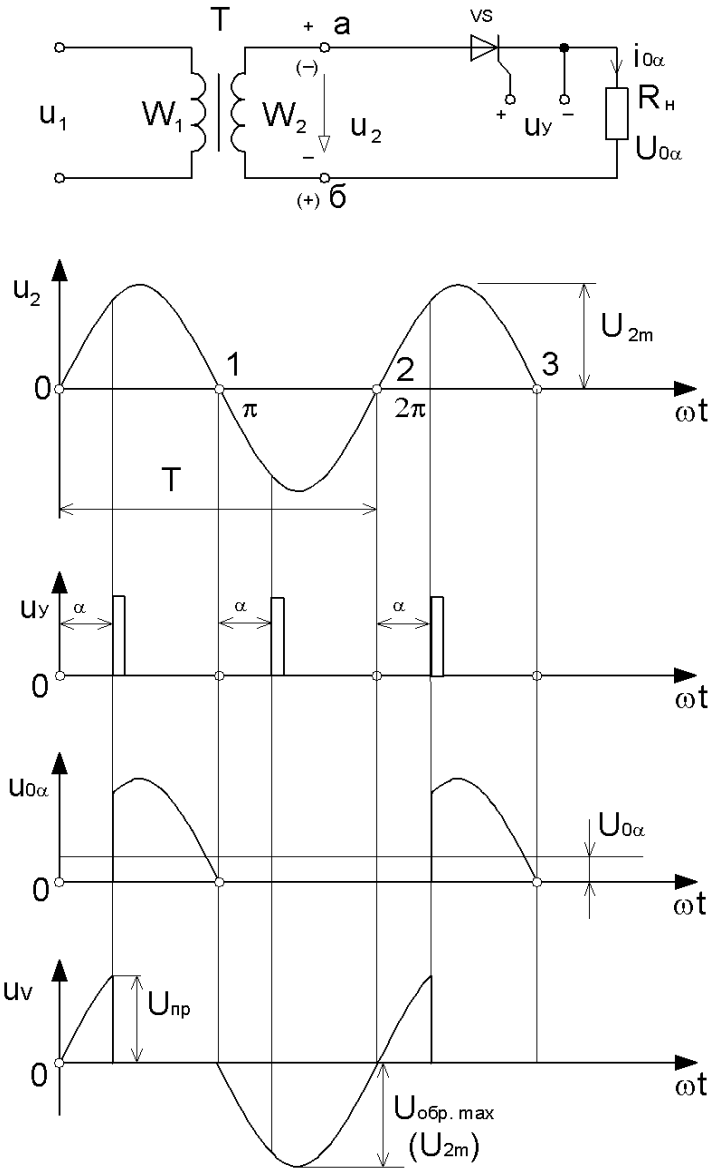


Рисунок 2.2 – Однофазна однонапівперіодна схема тиристорного випрямляча

Виходячи із завдань, що вирішуються системою управління, в її складі можна виділити три основні пристрої: вхідний, фазозсувний і вихідний.

Вхідний пристрій призначений для формування управляючого сигналу. За допомогою фазозсувного пристрою відбувається зміщення в часі (по фазі) управляючих сигналів на кут α відносно перетворюваної напруги. Вихідний пристрій формує і підсилює сигнал управління.

Залежність середнього значення випрямленої напруги від кута управління тиристорами при постійній напрузі мережі і незмінному характері навантаження називається регулювальною характеристикою тиристорного випрямляча:

$$U_{0\alpha} = f(\alpha) \text{ при} \qquad (2.1)$$

Регулювальну характеристику даної схеми тиристорного випрямляча можна записати у вигляді

$$U_{0\alpha} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{2m}\sin\omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi}(1+\cos\alpha) = \frac{1}{2}U_{0m}(1+\cos\alpha), \qquad (2.2)$$

де $U_{0m} = \frac{U_{2m}}{\pi}$ - середнє значення випрямленої напруги при $\alpha = 0$.

При зміні кута регулювання α від 0 до π середнє значення випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ змінюється від $U_{0\alpha}$ до 0. Як видно з рисунка 2.2, спотворення форми кривою випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ тим більше, чим більше кут регулювання α. Тому керовані випрямлячі вимагають вживання громіздкіших згладжуючих фільтрів, габарити і маса яких залежатимуть від вибраного кута регулювання при номінальному навантаженні.

Важливим параметром, що визначає якість вихідної напруги тиристорного випрямляча, є коефіцієнт пульсації *КП*, який є відношенням амплітуди змінною складової випрямленої напруги до середнєвипрямленного значення напруги:

$$K_{П} = \frac{U_{m\sim}}{U_{0\alpha}}. \qquad (2.3)$$

З достатньою для практики точністю *КП* можна визначити по формулі:

$$K_{П} = \frac{U_{m\sim}}{U_{0\alpha}} = \frac{\Delta u_{0\alpha}}{2U_{0\alpha}} = \frac{u_{0\max} - u_{0\min}}{2U_{0\alpha}}, \qquad (2.4)$$

де $u_{0\max}$ $u_{0\min}$ - максимальне і мінімальне значення випрямленої напруги $u_{0\alpha}$ відповідно. З обліком (2.2) вираження (2.4) можна представити у вигляді:

$$K_{П} = \frac{u_{0\max} - u_{0\min}}{U_{0m}(1+\cos\alpha)}. \qquad (2.5)$$

З (2.5) видно, що із збільшенням кута управління α коефіцієнт пульсації *КП* зростає, тобто якість вихідної напруги тиристорного випрямляча погіршується, і зростають вимоги до згладжуючого фільтру.

Однофазна мостова схема тиристорного випрямляча є

двонапівперіодною (двохтактною), оскільки струм у вторинній фазній обмотці трансформатора протікає протягом двох напівперіодів (тактів) перетворюваної напруги. Розглянемо роботу однофазної мостової схеми тиристорного випрямляча (рис. 2.3) на активне навантаження. На кожну з пар одночасно працюючих тиристорів (VS_1, VS_4 або VS_2, VS_3) по черзі подаються управляючі імпульси із зрушенням по фазі на кут 2π. Фазове зрушення управляючих імпульсів подаються на тиристори VS_1, VS_4 і VS_2, VS_3, складає величину π.

До моменту часу $\omega t = \alpha$ всі тиристори закриті і напруга на навантаженні $R_н$ дорівнює нулю. У момент $\omega t = \alpha$ відкриваються тиристори VS_1, VS_4і на навантаженні стрибком зміниться напруга від нудить до $U_{2m}sin\alpha$. Тиристори VS_2, VS_3 будуть закриті зворотною напругою. На інтервалі $\alpha < \omega t < \pi$ через тиристори VS_1, VS_4 і навантаження $R_н$, протікає струм $i_{0\alpha} = I_V$. При активному характері навантаження форми напруги $U_{0\alpha}$ і струму $i_{0\alpha}$ на цьому інтервалі відповідають формі перетворюваної напруги u_2. У момент $\omega t = \pi$ тиристори VS_1, VS_4 закриваються природним чином за рахунок зміни полярності перетворюваної напруги. На інтервалі $\pi+\alpha < \omega t < 2\pi$ струм $i_{0\alpha}$ протікатиме через навантаження $R_н$ і тиристори VS_2, VS_3, а тиристори VS_1, VS_4 будуть замкнуті зворотною напругою. Середнє значення випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ рівне

$$U_{0\alpha} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{2m}\sin\omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi}\left(1+\cos\alpha\right). \qquad (2.6)$$

Помноживши чисельник і знаменник (2.6) на 2, отримаємо вираження для регулювальної характеристики випрямляча:

$$U_{0\alpha} = \frac{1}{2}U_{0m}\left(1+\cos\alpha\right), \qquad (2.7)$$

де $U_{0m} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi}$ - значення U_{0m} при $\alpha = 0$.

Вигляд регулювальної характеристики залишається таким же, як і для однонапівперіодної схеми, за винятком величини U_{0m}.

Середнє значення випрямленого струму можна знайти із співвідношення:

$$I_{0\alpha} = \frac{1}{2}\frac{U_{0m}}{R_H}\left(1+\cos\alpha\right), \qquad (2.8)$$

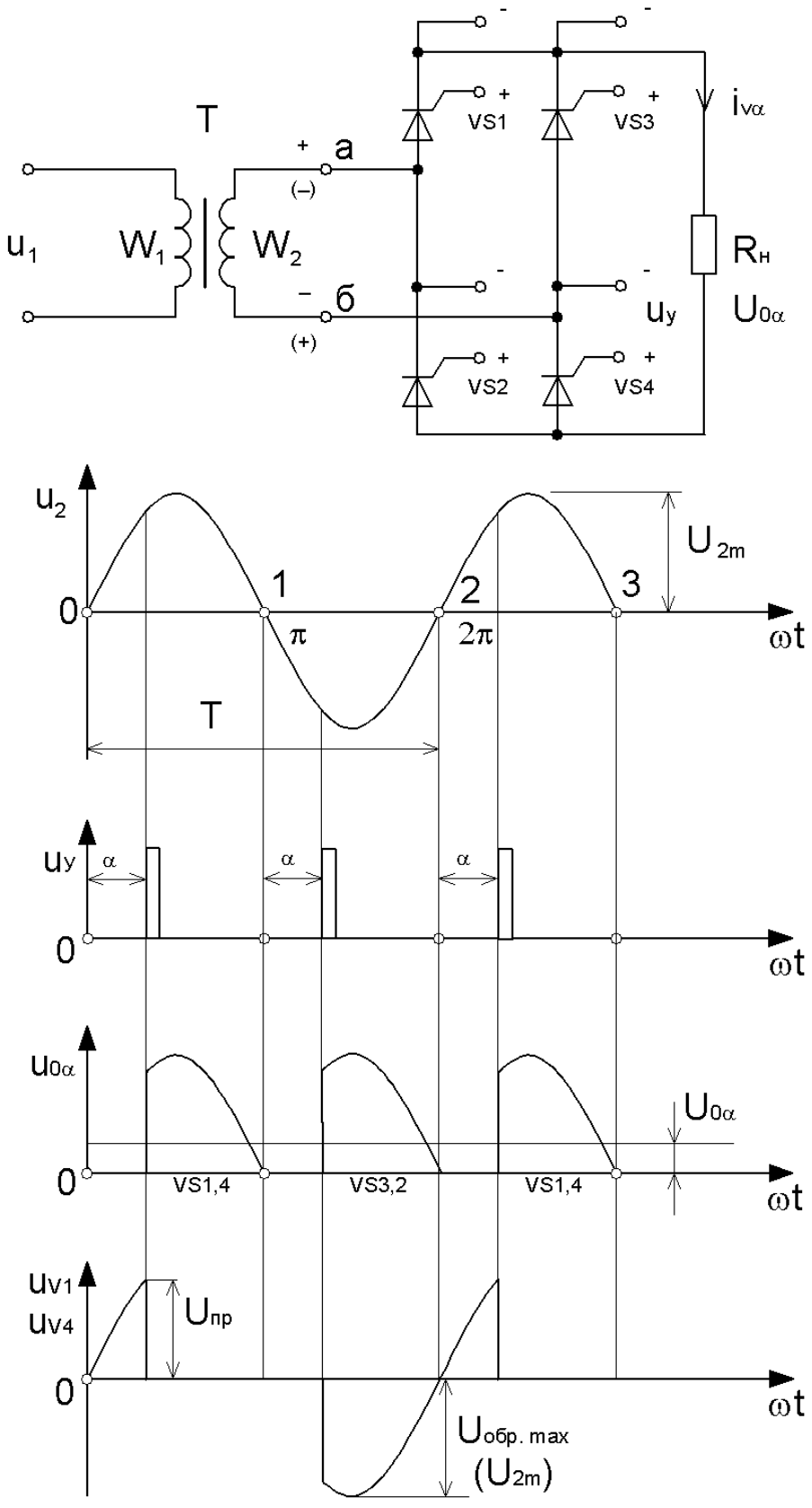


Рисунок 2.3 – Однофазна мостова схема тиристорного випрямляча

Середнє значення струму тиристора рівне:

$$I_{V0} = \frac{1}{2} I_{0\alpha}. \qquad (2.9)$$

Двофазна однотактна схема тиристорного випрямляча і графіки зміни напруги в різних точках схеми приведені на рис. 2.4. Схема є двома однонапівперіодними тиристорними випрямлячами, кожен з яких працює в свій напівперіод на загальне навантаження.

Трансформатор *T* виконує перетворення мережевої напруги не лише по величині, але і по числу фаз (трансформатор формує систему двох напруг $u_{2а}$ і $u_{2б}$ зрушених по фазі на 180°). Кожне з фазної напруги у відповідний напівперіод прикладається до опору навантаження $R_н$.

Особливість роботи схеми полягає в тому, що до моменту подачі імпульсу управління тиристор із зворотною напругою на ділянці анод-катод закритий фазною напругою напівобмотки трансформатора, в яку він включений, а в момент $\omega t = \alpha$ відбувається скачок зворотної напруги, оскільки замкнутий тиристор, виявляється підключеним тиристором іншої фази, що відкрився у цей момент, до напруги всієї вторинної обмотки трансформатора.

Аналіз виразів (2.2) і (2.7) показує, що регулювальні властивості всіх розглянутих схем випрямлячів тиристорів можна описати однією регулювальною характеристикою у відносному вигляді:

$$\frac{U_{0\alpha}}{U_{0m}} = \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha). \qquad (2.10)$$

Важливою характеристикою тиристорного випрямляча є зовнішня характеристика, яка визначає залежність середнєвипрямленого значення напруги на виході випрямляча від величини середнєвипрямленого струму при незмінних величинах перетворюваної напруги, кута управління і незмінному характері навантаження:

$$U_{0\alpha} = f(I_{0\alpha}) \text{ при} \qquad (2.11)$$

З (2.9) видно, що кут α робить вплив на параметри елементів схеми тиристорного випрямляча. Тому при проектуванні тиристорних випрямлячів розрахунок елементів робиться з умови роботи схеми із значенням кута α, відповідним максимальному значенню параметра елементу схеми.

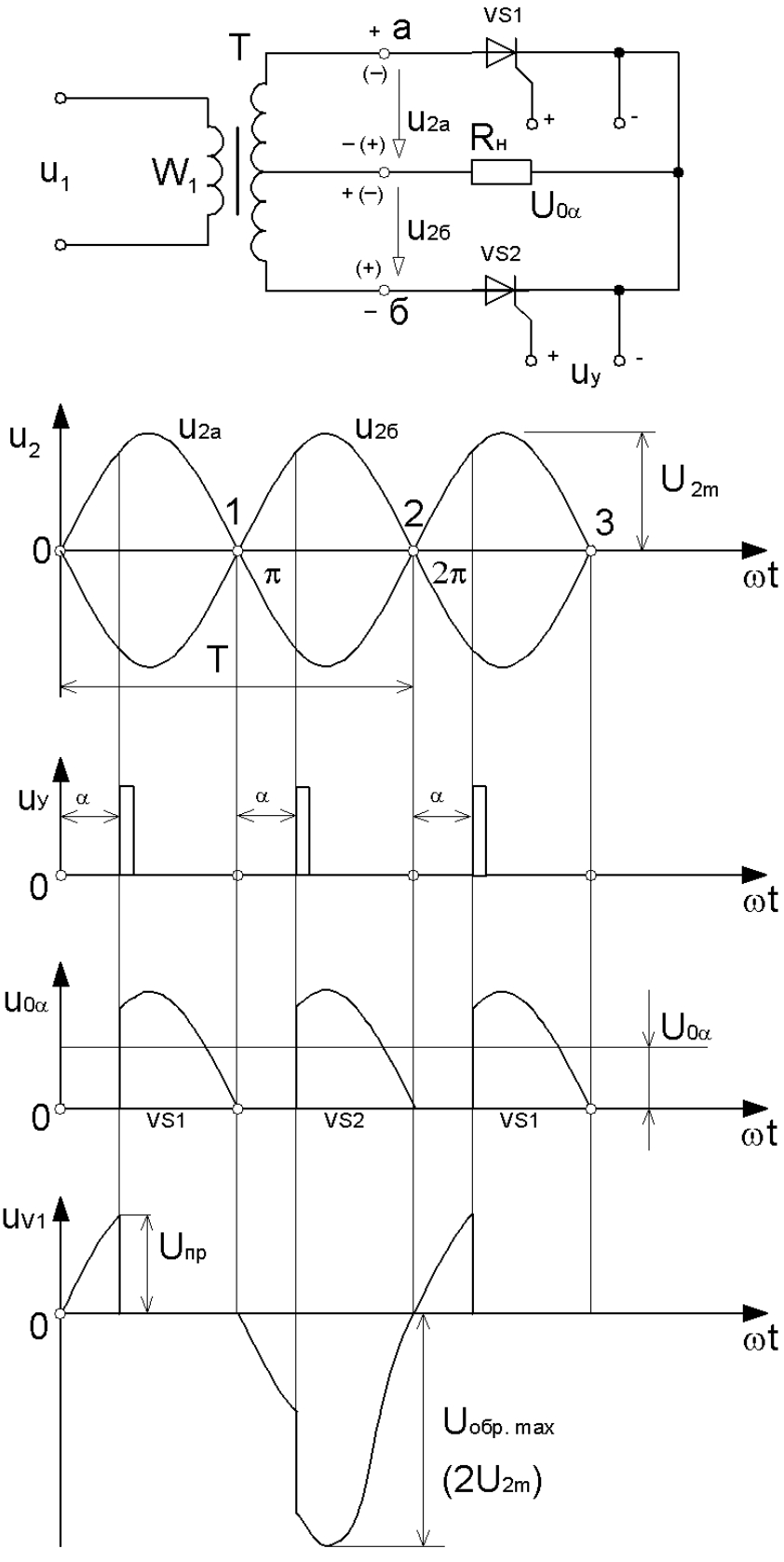


Рисунок 2.4 – Двофазна нульова схема випрямляча тиристора

5. Опис лабораторної установки

Принципова електрична схема установки, представлена на 2.5, складається з однофазного трансформатора T, блоку вентилів, утвореного тиристорами $VS_1...VS_4$, згладжуючого фільтру з елементами L і C_1, C_2, опори навантаження $R_н$, вимірювальних приладів (V_1, A_1, V_2, A_2) і системи управління тиристорами.

За допомогою комплекту перемичок і гнізд на набірному полі стенду можна зібрати будь-яку схему однофазного випрямляча тиристора, що підлягає дослідженню (рис. 2.2; 2.3; 2.4).

Для виміру значень фазної напруги U_2 і струму I_2 вторинної обмотки трансформатора використовуються вольтметр V_1 і амперметр A_1 відповідно. Для виміру с середнєвипрямлених значень напруги $U_{0\alpha}$ і струму $I_{0\alpha}$ використовуються вольтметр V_2 і амперметр A_2. Осцилограма напруги на тиристорі u_V знімається при підключенні вимірювального входу осцилографа до анода і катода працюючого тиристора

Вимикачі S_1 і S_2 призначені для підключення установки до мережі ~220В 50 Гц і подачі напруги на вхід досліджуваної схеми тиристорного випрямляча відповідно.

Потенціометр R_α призначений для зміни кута регулювання α.

6. Порядок проведення випробувань однофазних випрямлячів на тиристорах

1. Перевірити вихідний стан випробувального стенду. Воно повинне відповідати наступним вимогам:

- вимикач S_1 відключений;
- осцилограф повинен знаходитися на столі установки, вимірювальні входи підключені до опору навантаження $R_н$ (гнізда 01 і 02);
- всі перемички мають бути у відключеному положенні, стенд знеструмлений.

2. За допомогою перемичок (знаходяться в ящику лабораторного столу) на лицьовій панелі установки зібрати досліджувану схему випрямляча. Встановити наступні перемички залежно від схеми:

- однофазна нульова схема випрямлення (у роботі тиристор VS_2): 10-11, 18-19, 22-23, 24-25, 1-4;
- однофазна мостова схема випрямлення (у роботі тиристори VS_1, VS_2 і діоди VD_3, VD_4): 10-11, 5-6, 13-14, 7-8, 18-19, 22-23, 24-25, 3-4;
- двофазна нульова схема випрямлення (у роботі тиристори VS_1, VS_2): 10-11, 18-19, 22-23, 24-25, 1-2, 3-4, 5-6;

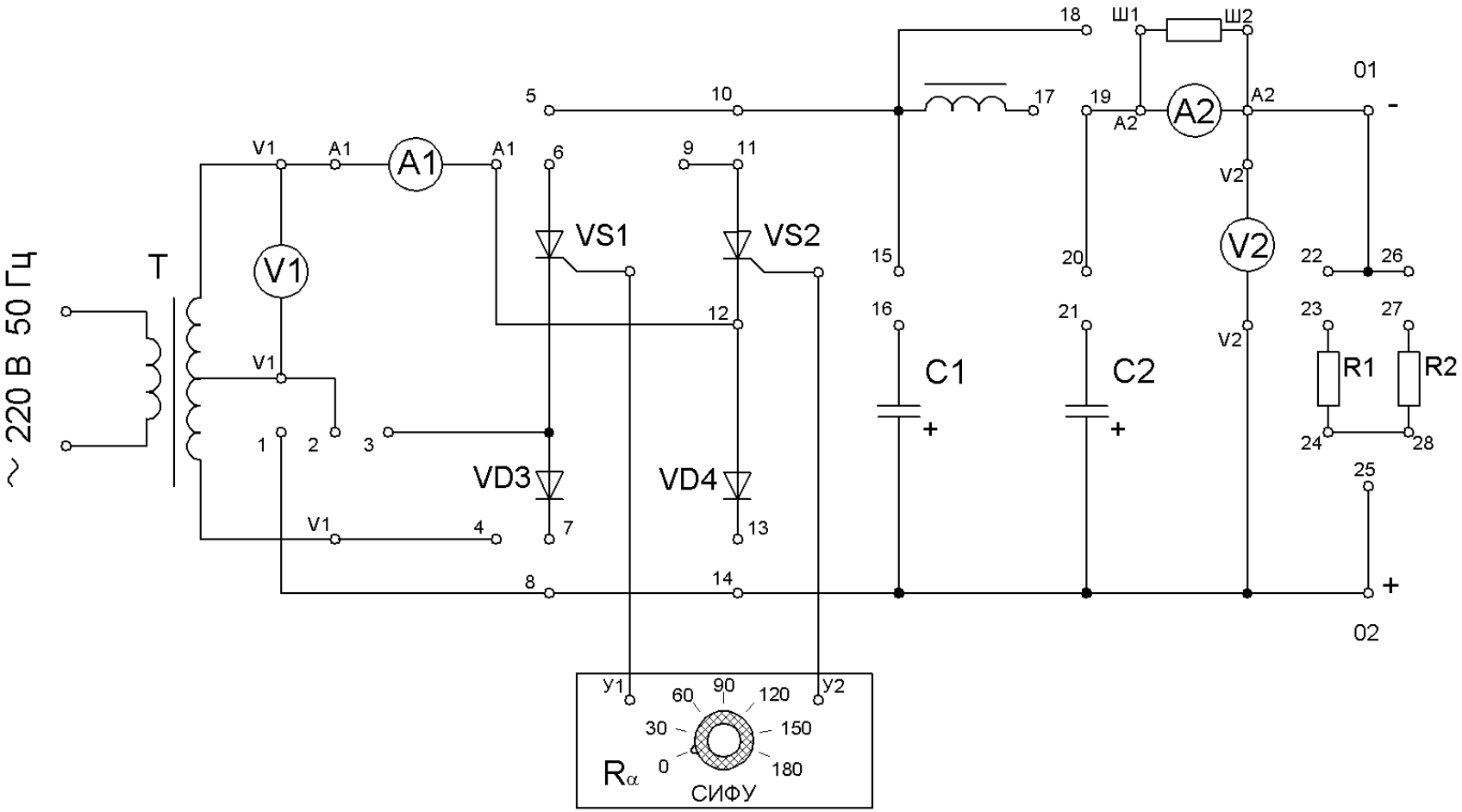


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема установки

Слід зазначити, що вищеперелічені схеми випрямлення при такому положенні перемичок працюватимуть на чисто активне навантаження $R_{н1}$, величина якого складе 50% від можливої. Для здобуття максимального навантаження необхідно встановити додаткову перемичку 26-27, а для зменшення струму навантаження до 25% у вузлі ступінчастого регулювання опору навантаження мають бути встановлені перемички 22-23, 25-27.

3. У гнізда A_1, V_1, A_2, V_2 підключити вимірювальні прилади (амперметри і вольтметри) для контролю діючих значень фазної напруги U_2 і струму I_2- прилади V_1 *і* A_1 відповідно; для виміру середнього значення випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ і струму $I_{0\alpha}$ прилади V_2 *і* A_2 відповідно. Представити зібрану схему для перевірки викладачеві.

4. На блоці живлення установки включити вимикач S_1.

5. Подати живлячу напругу на осцилограф і отримати розгортку на екрані електронно-променевій трубці (ЕПТ).

6. Підключити до живлячої мережі досліджувану схему тиристорного випрямляча, встановивши вимикач S_2, який розташований на лицьовій панелі випробувального стенду, у верхнє положення.

Проконтролювати загоряння сигнальної лампи на лицьовій панелі стенду і наявність свідчень всіх вимірювальних приладів і осцилограми випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ на екрані ЕПТ. Обертаючи ручку потенціометра R_α, переконатися в можливості регулювання вихідної напруги випрямляча по зміні свідчень вимірювальних приладів, зміні форми вихідної напруги $U_{0\alpha}$ на екрані ЕПТ.

7. Потенціометром Rá встановити кут регулювання α = 0 і використовуючи осцилограму випрямленої напруги $U_{0\alpha}$ виробити калібрування горизонтальної шкали ЕПТ відповідно до співвідношення

$$C = \frac{\pi}{n} = \frac{180}{n}, \left[\frac{град}{деление}\right], \qquad (2.12)$$

де C - ціна маленького ділення горизонтальної шкали ЕПТ;

π - інтервал провідності тиристора за період живлячої напруги;

n - кількість маленьких ділень горизонтальної шкали ЕПТ на інтервалі провідності тиристора.

Поточне значення кута регулювання α_i встановлювати в маленьких діленнях горизонтальної шкали ЕПТ потенціометром R_α. Число ділень горизонтальної шкали ЕПТ, відповідне необхідному куту α_i, обчислювати за формулою

$$n_i = \frac{\alpha_i}{C}, \qquad (2.13)$$

де n_i- число маленьких ділень горизонтальної шкали ЕПТ, відповідне потрібній в даному опиті величині кута регулювання α_i;

і - порядковий номер опиту.

9. Відповідно до вираження (2.1) зняти регулювальну характеристику випрямляча при зміні α у діапазоні від 0 до 120 електричних градусів, виконуючи середнєвипрямленого значення напруги по вольтметру V_2 через

кожних 30 градусів. Результати вимірів занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Задано		Виміряне			Обчислене				
№ опиту	α, град.	$U_{0\alpha}$, В			До опиту		Після опиту		
		однонапів періодна	нульова	мостова	cosα	$\frac{U_{0\alpha}}{U_{0m}} = \frac{1}{2}(1+\cos\alpha)$	$U_{0\alpha}/U_{0m}$		
							однонапів періодна	нульова	мостова
1.	0								
2.	30								
3.	60								
4.	90								
5.	120								

10. Відповідно до вираження (2.11) зняти зовнішні характеристики досліджуваного випрямляча при кутах регулювання α, рівних 0, 30, 60 електричним градусам. Для цього слід встановити необхідний кут регулювання α і змінювати опір навантаження випрямляча, оперуючи перемичками 22-28 на набірному полі випробувального стенду, заздалегідь відключивши вимикач S_2 і переконавшись за свідченнями приладів у відсутності напруги U_2 і $U_{0\alpha}$. Потім, підключивши необхідний рівень навантаження, продовжити дослідження, включивши вимикач S_2 і проконтролювавши наявність показань вимірювальних приладів. Залежність величини середнєвипрямленого напруги $U_{0\alpha}$ від величини середнєвипрямленого струму $I_{0\alpha}$ знімати за свідченнями вольтметра V_2 і амперметра A_2. Результати вимірів занести в таблицю 2.2. Відключити живлячу мережу від досліджуваної схеми випрямляча тиристора, встановивши вимикач S_2 в нижнє положення.

11. Відповідно до (2.10) для заданих значень кута управління α (2.1) розрахувати теоретичну регулювальну характеристику досліджуваних однофазних тиристорних випрямлячів. Результати розрахунку занести в таблицю 2.1 і побудувати графік розрахованої теоретичної регулювальної характеристики.

Таблиця 2.2

№ опиту	задано	Виміряне						$R_н$, %
	α, град.	однонапівперіодна		нульова		мостова		
		$U_{0\alpha}$, В	$I_{0\alpha}$, А	$U_{0\alpha}$, В	$I_{0\alpha}$, А	$U_{0\alpha}$, В	$I_{0\alpha}$, А	
1.	0							25
								50
								100
2.	30							25
								50
								100
3.	60							25
								50
								100

7.Обробка результатів дослідів

1. За результатами вимірів $U_{0\alpha}$ (таблиця 2.1) розрахувати відношення $U_{0\alpha}/U_{0m}$ і побудувати разом з теоретичною регулювальною характеристикою експериментальні регулювальні характеристики для кожної досліджуваної схеми. Зробити висновок про збіг цих характеристик, діапазон регулювання вихідної напруги, а також про величину середнєвипрямленої напруги $U_{0\alpha}$, яка при зміні кута регулювання α від 0 до π змінюється від $U_{0\alpha}$ до 0.

2. За результатами вимірів (таблиця 2.2) побудувати зовнішні характеристики для різних схем тиристорних випрямлячів при різних кутах управління α.

8. Зміст звіту

Звіт кожного здобувача освіти по роботі повинен містити:

- перелік вимірювальних приладів і їх характеристики;
- принципову електричну схему лабораторної установки;
- таблиці з результатами і розрахунків (таблиця. 2.1, 2.2);
- графіки теоретичних і експериментальних регулювальних характеристик досліджених випрямлячів, побудованих в одних осях координат;
- графіки зовнішніх характеристик тиристорних випрямлячів при різних кутах управління α;
- короткі виводи за результатами досліджень.

9. Перелік контрольних питань

7. Призначення, склад і принцип роботи тиристорного випрямляча.
8. Намалювати задану схему випрямлення (мал. 2.2, 2.3, 2.4) при активному характері навантаження, епюри напруги u_2, u_V, $u_{0\alpha}$, що пояснюють принцип її роботи.
9. Перерахувати основні характеристики тиристорних випрямлячів і дати їх визначення.
10. Привести формулу для визначення середнього значення випрямленої напруги тиристорного однофазного мостового випрямляча і дати визначення кута управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Вилучено з https://de.com.ua/uploads/0/1703-EnergyStratagy2030.pdf

2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Промислова електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги у постійну: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 342 с.

3. Сучасна перетворювальна техніка. Конспект лекцій для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.В. Рогоза, Н.Ю. Рухлова, Бородай В.А.; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2022. – 68 с.

4. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / Суходоля О. М.– К. : НІСД, 2022. – 49 с. – https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09.

5. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія / Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 300 с.

6. Рябенький В.М., Ушкаренко О.О., Островерхов М.Я., М.С. Махмуд Аль Суод. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричнихз кіл: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 462 с.

7. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.

8. ДСТУ 2815-94 Електричні та магнітні кола та пристрої.

9. ДСТУ 3120-95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин.

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Васюченко Павло Вікторович
Войтенко Сергій Миколайович
Пономаренко Олена Михайлівна

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня денної і заочної форм здобуття освіти за
спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 21.05.2026. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 2,92. Обсяг 1,141 Мб. Зам. № 239/26.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна