

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

**М. Я. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс**

**ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА  
НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЗМІННОЇ  
НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ**

**Навчальний посібник**

Київ  
Видавництво Ліра-К  
2021

Рецензенти:

*Резцов В.Ф.*, член-кореспондент НАН України, д-р. техн. наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту відновлювальної енергетики НАН України

*Юрченко О.М.*, д-р. техн. наук, старший науковий співробітник, начальник відділу Інституту електродинаміки НАН України

Відповідальний редактор

*Бойко В.С.*, д-р. техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 2 від 01.10.2020 р.)*

*за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики  
(протокол № 10 від 24.06.2020 р.)*

**Промислова електроніка: Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги в постійну** : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М. Я. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2021. – 342 с.  
ISBN 978-617-520-113-8

У навчальному посібнику розглянуто некеровані та керовані випрямлячі однофазного та трифазного струму, згладжувальні фільтри, джерела безперебійного електропостачання, безперервні стабілізатори напруги та струму, транзисторні перетворювачі напруги з самозбудженням. Матеріал посібника супроводжується прикладами розрахунків основних силових схем і контрольними запитаннями.

Призначено для здобувачів ступеня бакалавр спеціальності 141 «Електротехніка та електромеханіка» факультету електроенерготехніки та автоматики.

ISBN 978-617-520-113-8

© М. Я. Островерхов, В.І. Сенько,  
В.І. Чибеліс, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

© Видавництво Ліра-К, 2021

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b> .....	5
<b>Вступ</b> .....	7
<b>Розділ 1. ВИПРЯМЛЯЧІ</b>	
1.1. Загальні відомості .....	9
1.2. Однофазні випрямлячі .....	14
1.2.1. Робота випрямлячів на активне навантаження .....	15
1.2.2. Згладжувальні фільтри .....	34
1.2.3. Вплив згладжувальних фільтрів на роботу випрямляча .....	43
1.3. Трифазні випрямлячі .....	87
1.3.1. Трифазний випрямляч з середньою точкою .....	88
1.3.2. Шестифазний випрямляч з середньою точкою .....	101
1.3.3. Шестифазний випрямляч зі з'єднанням вторинних обмоток трансформатора зірка – обернена зірка зі зрівняльним реактором (дроселем) .....	106
1.3.4. Трифазний мостовий випрямляч .....	112
1.3.5. Компенсаційні випрямлячі .....	130
1.4. Керовані випрямлячі з ступеневим регулюванням вторинної напруги .....	136
1.5. Керовані випрямлячі із зустрічно-паралельним ввімкненням тиристорів у первинну обмотку трансформатора .....	142
1.6. Випрямлячі, що живлять двигуни постійного струму .....	146
1.7. Складені (багатофазні еквівалентні) випрямлячі .....	155
1.8. Випрямлячі на повністю керованих вентилях .....	167
1.9. Випрямлячі, що живляться від джерел з прямокутною напругою .....	190
Приклади .....	196
Контрольні запитання .....	237
<b>Розділ 2. ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ</b>	
2.1. Класифікація джерел вторинного електроживлення електронної апаратури .....	240
2.2. Загальні вимоги до джерел вторинного електроживлення електронної апаратури .....	243
2.3. Джерела первинного електроживлення .....	246
2.3.1. Системи автономного електроживлення .....	246

2.3.2. Хімічні джерела живлення . . . . .	248
2.3.3. Деякі інші джерела живлення . . . . .	251
2.4. Джерела безперебійного електропостачання . . . . .	253
2.5. Транзисторні згладжувальні фільтри . . . . .	255
2.5.1. Фільтри типу ФК . . . . .	256
2.5.2. Фільтри типу ФЕ . . . . .	261
2.5.3. Фільтри типу ФШ . . . . .	265
2.6. Безперервні (лінійні) напівпровідникові стабілізатори напруги та струму . . . . .	269
2.6.1. Загальні відомості . . . . .	269
2.6.2. Параметричні стабілізатори напруги . . . . .	273
2.6.3. Компенсаційні лінійні стабілізатори напруги . . . . .	279
2.6.4. Стабілізатори на інтегральних мікросхемах . . . . .	289
2.7. Транзисторні перетворювачі напруги з самозбудженням . . . . .	304
Приклади . . . . .	311
Контрольні запитання . . . . .	334
Список літератури . . . . .	336

## ПЕРЕДМОВА

Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами: частотою, регульованою напругою, іншим числом фаз ніж у джерел енергії. Тому між джерелом енергії та споживачем необхідні перетворювачі електроенергії.

Створення напівпровідникових приладів великої потужності, які працюють у ключових режимах, мають повну керованість і високу швидкодію, дозволило дискретно керувати потоками електричної енергії великої потужності на підвищених частотах за потрібними законами. Пристрої, побудовані на цих приладах, застосовуються в різних областях техніки і мають при передачі та споживанні електроенергії нові функціональні можливості, менші втрати електроенергії, дозволяють підвищити її якість, а також успішно вирішувати екологічні питання.

Повсюдне розповсюдження пристроїв силової електроніки в енергоємних областях (електропривод, електротехнології) вимагає підготовки спеціалістів з силової електроніки. Проте сучасної літератури з основ силової електроніки, орієнтованих на підготовку інженерно-технічних працівників електроенергетичних, електротехнічних, електромеханічних і електронних спеціальностей, розробників та дослідників самих пристроїв силової електроніки в Україні немає. З метою поліпшення ситуації в цій царині і була написана ця книга.

Навчальний посібник «Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги в постійну» призначений для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямами «Електронні пристрої та системи», «Електротехніка та електротехнології» та «Електромеханіка». Зміст книги відповідає типовим навчальним програмам підготовки бакалаврів і магістрів відповідних спеціальностей.

У книзі подання теоретичного матеріалу супроводжується типовими задачами з розв'язаннями. Така побудова книги повинна сприяти більш активному засвоєнню і закріпленню теоретичного навчального матеріалу та прищеплюванню вмінь і навичок розрахунку та аналізу електронних пристроїв. У кінці кожного розділу наведені контрольні запитання.

У списку літератури наведені використані та рекомендовані для подальшого вивчення книги.

Авторський колектив при підготовці навчального посібника використав багаторічний досвід методичної та викладацької роботи, накопичений ним при читанні дисциплін «Електронні, мікропроцесорні та перетворювальні пристрої», «Промислова електроніка», «Основи електроніки», «Електроніка та мікросхемотехніка», «Перетворювальна техніка», «Енергетична електроніка», «Пристрої перетворювальної техніки», «Силові електронні системи», «Системи електроживлення електронної апаратури», «Додаткові розділи силової електроніки» студентам у Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Велику вдячність автори виражають члену-кореспонденту НАН України, доктору технічних наук, професору Резцову В.Ф. (Інститут відновлювальної енергетики НАН України) і доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику Юрченку О.М. (Інститут електродинаміки НАН України) за уважне рецензування рукопису та рекомендації щодо поліпшення його розділів, які були ураховані при доопрацюванні рукопису.

## ВСТУП

Електрична енергія існує в різному вигляді: змінного струму з частотою 50 Гц (країни СНД, Західна Європа) або 60 Гц (США, Канада, частина країн центральної та Південної Америки та ін), змінного струму підвищеної частоти (400, 800, 1200 Гц та вище, автономні системи електропостачання), постійного струму (акумулятори, сонячні та теплові елементи, МГД-генератори). Це в основному визначається різноманітністю і специфікою споживачів електроенергії.

Для більш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають використання електричної енергії з нестандартними параметрами: частотою, регульованою напругою, іншим числом фаз.

У розвинутих країнах близько 40 % електроенергії, що виробляється, перед споживанням зазнає перетворення.

Прогрес більшості областей сучасної техніки нерозривно пов'язаний з успіхами силової електроніки. Силова електроніка охоплює методи та засоби, які забезпечують регулювання параметрів електричної енергії за допомогою електронних вентилів: некерованих (діодів) і керованих (транзисторів, тиристорів). Зміна параметрів електричної енергії з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) здійснюється без значних втрат як у статичному, так і динамічному режимах завдяки силовим вентилям з повним керуванням, малим часом вмикання та вимикання, керуванням малопотужними сигналами (див. том 1).

Розвиток силової електроніки весь час націлений на зменшення габаритів і маси пристроїв, на підвищення надійності та ефективності за рахунок поліпшення характеристик приладів силової електроніки — силових вентилів — і зменшення вартості виробництва.

У наш час силові перетворювальні пристрої широко використовують у кольоровій металургії та хімічній промисловості, на залізничному та міському транспортах, для живлення контактних мереж гірничорудного та інших видів промислового транспорту, у різних галузях промисловості: для регульованих електроприводів, збудження електричних машин, для зарядження акумуляторів, електрозварювання, гальвано-техніки, електроерозійної обробки металів, пристроїв електротермії, для високовольтних ліній електропередач постійного струму, у джерелах вторинного електроживлення електронної апаратури та ін.

Основним областями застосування пристроїв силової електроніки, в яких вони дають найбільший економічний ефект, зараз є: засоби регулювання виробності технологічних кіл ТЕС і ГЕС (скорочення енергоспоживання на власні потреби, що призводить до зниження собівартості 1 кВт·год); промисловий електропривод, який керується за допомогою напівпровідникового перетворювача електроенергії; комунальне господарство,

вуличне освітлення натрієвими лампами високого тиску з електронною пускорегулювальною апаратурою, освітлення громадських приміщень компактними люмінесцентними лампами з електронним баластом; підвищення ефективності джерел вторинного електроживлення за рахунок використання імпульсних способів перетворення електроенергії; автомобільна електроніка (системи гальмування, керування двигуном, система стартер-генератор); побутова техніка (кондиціонери, холодильники, пральні машини, індукційні пічі, пиłosоси, світильники).

Всі можливі види перетворювачів електричної енергії поділяються на базові пристрої:

1. Випрямлячі, які перетворюють змінний струм у постійний (*AC-DC* — *Alternative Current - Direct Current*).

2. Інвертори, які перетворюють постійний струм у змінний (*DC-AC*).

3. Перетворювачі частоти, які перетворюють змінний струм однієї частоти у змінний струм іншої частоти, можливо і з іншим числом фаз (*AC-AC*).

4. Регулятори постійного струму (електронні трансформатори), які перетворюють постійний струм однієї напруги у постійний струм іншої напруги (*DC-DC*).

5. Регулятори змінної напруги, які перетворюють змінну напругу в регульовану змінну напругу тієї ж частоти.

6. Перетворювачі числа фаз, які перетворюють змінний струм з одним числом фаз у змінний струм тієї ж частоти з іншим числом фаз.

7. Помножувачі частоти, які перетворюють змінний струм однієї частоти у змінний струм іншої частоти, яка відрізняється у фіксоване число раз  $M$  від вхідної частоти.

8. Регульовані джерела реактивної (неактивної) потужності (ДРП), які дозволяють вводити в систему електропостачання додаткові (до реактивних потужностей споживачів) реактивні потужності зсуву, спотворення, несиметрії з метою компенсації відповідних потужностей неякісних споживачів і поліпшення таким чином якості електроенергії в системі електропостачання.

Наведені вище базові пристрої характеризуються однократністю перетворення електроенергії. Для розширення властивостей перетворювачів електроенергії їх можна конструювати з базових, створюючи структури, які характеризуються багатократним (дво-, трикратним) перетворенням виду електроенергії на її шляху від входу до виходу перетворювача. Наприклад, випрямлення без регулювання, потім перетворення напруги, знову випрямлення без регулювання та ін.



## РОЗДІЛ 1

### ВИПРЯМЛЯЧІ

#### 1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Випрямляч — це пристрій, призначений для перетворення змінної напруги в постійну. У загальному випадку структурна схема випрямляча має вигляд, показаний на рис. 1.1. Вона складається з вхідного та вихідного фільтрів ( $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ ), вхідного трансформатора  $TV$ , вентильного блока  $VS$ , системи керування СК вентилями блока  $VS$ , на входи якої при необхідності надходять сигнали з датчиків напруг і струмів з виходу та входу випрямляча.

Вхідний трансформатор  $TV$  узгоджує потрібний рівень вихідної напруги із заданим рівнем напруги живильної мережі (змінює величину напруги), перетворює кількість фаз (як правило збільшує) змінної напруги на вторинній стороні, створює гальванічне (кондуктивне) розв'язування (ізоляцію) вхідного та вихідного кіл випрямляча. Остання обставина, забезпечуючи безпровідний зв'язок (тільки через електромагнітне поле трансформатора) вхідних і вихідних кіл випрямляча, виключає можливість небезпечного потрапляння напруги зі сторони, що має високий потенціал, на сторону з більш низьким потенціалом при відмиканні трансформатора на одній з сторін.

Вентильний блок  $VS$ , що складається з вентилів з нелінійними вольт-амперними характеристиками ВАХ і які можуть знаходитися тільки у двох станах — ввімкненому(провідному, відкритому) або вим-

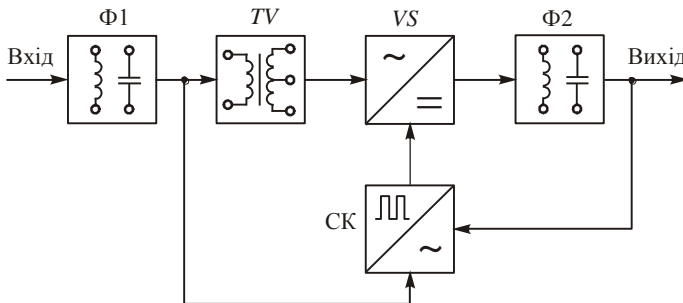


Рис. 1.1

кненому (закритому), — перетворює змінну напругу в пульсуючу. У результаті як споживання енергії вентиляним блоком з живильної мережі, так і передача її на вихід блока споживачу відбуваються дискретно, що призводить до зниження якості електроенергії як перетворюваної, так і перетвореної. Для ослаблення та згладжування наслідків дискретності процесу перетворення енергії призначені фільтри на вході та виході вентиляного блока. Іншими словами, ці фільтри забезпечують електромагнітну сумісність перетворювального блока з живильною мережею та навантаженням. Як відомо, під електромагнітною сумісністю в електротехніці розуміють здатність різних електротехнічних пристроїв, зв'язаних мережами електропостачання та електророзподілу, одночасно функціонувати в реальних умовах експлуатації при наявності непередбачених завад інших пристроїв, що приєднані до них.

За числом фаз первинної обмотки трансформатора випрямлячі поділяються на однофазні та трифазні.

Розрізняють два типи випрямлячів: однокатні (однопівперіодні) та двокатні (двопівперіодні). Однокатні схеми використовують для випрямлення (відбирання потужності з мережі змінного струму) тільки однієї півхвилі змінної напруги з двох у кожному її періоді, тобто струм у вторинній обмотці трансформатора тече один раз за період в одному напрямку. До таких схем відносяться схеми з середньою (нульовою) точкою трансформатора (крім найпростішого однопівперіодного випрямляча). Двокатні схеми використовують для випрямлення обох півхвиль у кожному періоді вхідної змінної напруги, тобто струм у вторинній обмотці трансформатора тече двічі за період, причому у різних напрямках. До них належать мостові схеми.

Для характеристики числа півхвиль вхідної напруги, що використовуються, вводиться таке поняття як пульсність випрямляча (періодичність випрямленої напруги)  $m_{\text{п}}$ , яка визначає число пульсацій випрямленої напруги за період напруги живлення. Для однокатних схем  $m_{\text{п}} = m_2$  ( $m_2$  — число вторинних обмоток), для двокатних схем  $m_{\text{п}} = 2m_2$ .

Випрямлячі розрізняють: за потужністю — малопотужні (до 1 кВт), середньої потужності (до 100 кВт), потужні (більше 100 кВт); за напругою — низької (до 250 В), середньої (до 1000 В) та високої (вище 1000 В).

Окремо виділяють клас випрямлячів з багатофазною схемою випрямлення (шість, дванадцять і більше фаз вторинної обмотки трансформатора). Проте виготовлення багатофазних трансформаторів пов'язано з конструктивними та технологічними труднощами, тому в більшості випадків багатофазні схеми одержують шляхом послідовного або паралельного ввімкнення трифазних випрямлячів, які мають різні схеми з'єднання обмоток трансформаторів. Такі схеми називають багатофазними еквівалентними або складеними.

Особливості роботи випрямлячів залежать від параметрів трансформатора  $x_a$  та  $r_a$ , де  $x_a = \omega_m L_a = \omega_m (L'_{1s} + L_{2s})$  — індуктивний опір обмоток, розташованих на одному стрижні трансформатора;  $r_a = r'_1 + r_2$  — активний опір обмоток, розташованих на одному стрижні в анодному колі вентиля;  $r'_1 = K_T^2 r_1$ ,  $r_2$  — відповідно зведений до вторинної обмотки активний опір первинної обмотки та опір вторинної обмотки;  $L_a$  — індуктивність в анодному колі вентиля;  $L'_{1s} = K_T^2 L_{1s}$  — зведена до вторинної обмотки індуктивність, яка обумовлена потоками розсіювання первинної обмотки;  $L_{2s}$  — індуктивність, обумовлена потоками розсіювання вторинної обмотки;  $K_T = w_2/w_1 = e_2/e_1 = i_1/i_2$  — коефіцієнт трансформації.

Для випрямлячів малої потужності виконується умова  $x_a/r_a \leq 0,3$ . Тому при наближених розрахунках величиною  $x_a$  нехтують, що значно спрощує розрахунки. Ураховувати  $x_a$  в малопотужних випрямлячах треба при підвищеній частоті мережі живлення (400 Гц, 1000 Гц).

Для випрямлячів великої потужності виконуються умова  $x_a/r_a \geq 3 \div 5$ . Тому при наближених розрахунках можна враховувати тільки параметр  $x_a$ , нехтуючи величиною  $r_a$ .

У випрямлячах середньої потужності  $x_a$  та  $r_a$  сумірні за величиною, тому при розрахунках треба враховувати обидва параметри.

У режимі випрямляча, що характеризується віддачею потужності в коло навантаження, напруга вторинної обмотки трансформатора та анодний струм вентилів мають однаковий напрямок (це відповідає роботі мережі змінного струму в якості генератора електричної енергії), а

напруга та струм у колі навантаження протилежні за напрямком (це відповідає роботі мережі постійного струму в якості споживача енергії).

Випрямлячі можуть бути побудовані на керованих вентилях (тиристорах, транзисторах) і некерованих (діодах). Вихідні параметри випрямляча, діапазон регулювання, умови роботи вентилів і трансформатора за струмом і напругою суттєво залежать від характеру реакції навантаження, яка визначається типом навантаження або першим елементом згладжувального фільтра. Розрізняють наступні режими роботи випрямляча: а) на активне навантаження; б) на активно-індуктивне навантаження; в) на проти ЕРС; г) на активно-ємнісне навантаження.

Режим роботи та параметри окремих елементів випрямляча узгоджуються із заданими умовам роботи споживача постійного струму. Тому основна задача теорії випрямних пристроїв зводиться до визначення розрахункових співвідношень, які дозволяють за заданим режимом роботи споживача визначити електричні параметри елементів випрямляча та вибрати ці елементи з довідника або, у разі необхідності, розрахувати їх.

Для вибору вентиля треба знати:

1. Середнє значення анодного (прямого) струму  $I_a$ .
2. Максимальне значення напруги, що прикладається до вентиля в закритому (вимкненому) стані  $U_{зв\max}$ .
3. Діюче значення струму вентиля  $I_{ад}$ .
4. У деяких випадках треба знати максимальне значення струму вентиля  $I_{amax}$ .

Для вибору (розрахунку) трансформатора треба знати:

1. Коефіцієнт трансформації  
 $K_T = w_2/w_1 = U_2/U_1 = I_1/I_2$ .
2. Діюче значення струмів обмоток трансформатора  $I_1, I_2$  (за діючими значеннями струмів розраховується діаметр проводу обмоток трансформатора, ураховуючи допустиму густину струму  $j = 3 \div 5 \text{ А/мм}^2$ ).
3. Типову (розрахункову) потужність трансформатора, яка визначається як півсума потужностей всіх обмоток трансформатора

$$S_T = \sum_{i=0}^{\infty} S_i / 2,$$

де  $S_i = U_i I_i$  — потужність кожної обмотки трансформатора,  $i$  — кількість обмоток.

При розрахунку випрямляча звичайно задані:

1. Потрібне значення напруги на навантаженні  $U_d$  (середнє значення).
2. Середнє значення струму навантаження  $I_d$ .
3. Діюче значення електрорушійної сили ЕРС (напруги) живильної мережі змінного струму  $E_1(U_1)$ .
4. Якщо мережа змінного струму має нестандартну частоту (відмінну від 50 Гц), то вона теж зазначається.

Всі величини, що підлягають розрахунку, виражаються у функціях струму  $I_d$  та напруги  $U_d$  навантаження.

Крім того, визначаються експлуатаційні характеристики випрямляча:

1. Зовнішня характеристика випрямляча  $U_d = f(I_d)|_{U_1=\text{const}}$  — залежність напруги на виході випрямляча від струму навантаження.
2. Регульовальна характеристика випрямляча  $U_{d\alpha} = f(\alpha)|_{U_1=\text{const}}$  — залежність випрямленої напруги від кута керування.
3. Коефіцієнт корисної дії випрямляча

$\eta = P_d / (P_d + \sum \Delta P)$ , де  $P_d$  — активна потужність у колі випрямленого струму;  $\sum \Delta P$  — сумарні втрати потужності у випрямлячі, які враховують втрати в обмотках трансформатора, вентилях, фільтрі, системі керування, а також у допоміжних пристроях.

4. Коефіцієнт потужності випрямляча  $\lambda = v \cos \varphi_{(1)}$ , де  $v = I_{1(1)} / I_1$  — коефіцієнт спотворення струму, який характеризує гармонічний склад струму первинної обмотки трансформатора і дорівнює відношенню діючого значення першої гармоніки струму до діючого значення струму первинної обмотки;  $\varphi_{(1)}$  — кут зсуву фази першої гармоніки

струму первинної обмотки по відношенню до прикладеної синусоїдальної напруги живильної мережі;  $\cos \varphi_{(1)}$  — коефіцієнт зсуву.

5. Коефіцієнт пульсацій  $K_{п(q)} = U_{m(q)} / U_d$  — відношення амплітуди гармоніки з номером  $q$  до середнього значення випрямленої напруги. Коефіцієнт пульсацій характеризує гармонічний склад випрямленої напруги.

У подальшому будемо розглядати роботу керованих випрямлячів на тиристорах, а робота випрямлячів на діодах представлена як окремий випадок при  $\alpha = 0$ .

## 1.2. ОДНОФАЗНІ ВИПРЯМЛЯЧІ

Однофазні випрямлячі як правило малопотужні та живляться від однофазної мережі змінної напруги 220 В. В якості випрямлячів використовуються наступні схеми: однопівперіодний випрямляч, двопівперіодний випрямляч з нульовим виводом (з середньою точкою) вторинної обмотки трансформатора, однофазний мостовий.

Проведемо аналіз роботи цих схем при роботі їх на активне навантаження та з різними типами згладжувальних фільтрів.

Як було відмічено вище, випрямляч може бути побудований як на некерованих вентилях (діодах), так і на керованих (тиристорах). У загальному випадку, якщо керований випрямляч побудований на неповністтю керованих (звичайних тиристорах) вентилях, можливі два способи регулювання середнього значення випрямленої напруги: фазове регулювання та релейне регулювання.

При фазовому регулюванні імпульс керування, який надходить на відкриття тиристора, зсувається за фазою відносно моменту проходження живильної напруги через нуль на кут  $\alpha$ .

При релейному (циклічному) алгоритмі керування напруга на виході випрямляча за період керування (період циклу) приймає два значення: максимальне випрямлене (при  $\alpha = 0$ ) або нульове.