

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ
ФАХІВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ ЗАСОБІВ
ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ НАВЧАЛЬНИХ ДОСЯГНЕНЬ З ТЕМИ
«НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу,
групи ЗЕА-ПОЕн23мг
спеціальності: 015.33 Професійна освіта.
(Енергетика, електротехніка та електромеханіка)

(код і найменування спеціальності)

_____ / Юлія ВТЮРІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Руслан БАГАЧ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 015.33 Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Енергетика)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к. т. н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступень, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу)
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Юлії ВТЮРІНОЇ

1. Тема: «Удосконалення професійної підготовки майбутніх фахівців енергетичної галузі шляхом розробки засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму»»

Затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від 12.10.2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи: «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

1. Актуальність професійної підготовки фахівців енергетичної галузі з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

2. Характеристика об'єкту перетворювальної техніки «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму» та його елементної бази.

3. Методика професійної підготовки фахівців енергетичної галузі для об'єкту «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання: «12» жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Юлія ВТЮРІНА

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи)**

з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Систематизація матеріалів про діяльність об'єкту дослідження	18.10.2024	
2	Вивчення теоретичного матеріалу, написання першого розділу роботи	01.11.2024	
3	Аналіз діяльності об'єкту дослідження, написання другого розділу	11.11.2024	
4	Розробка та написання третього розділу	25.11.2024	
5	Завершення висновків, формування анотації, впорядкування списку літератури	05.12.2024	
6	Оформлення дипломної роботи та представлення її на кафедрі	10.12.2024	

Здобувач

(підпис)

Юлія ВТЮРІНА

Нормоконтроль

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить: с. 90, рис. 28, табл. 4, посилань 9.

Мета дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні і розробці засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму», яка входить до складу дисципліни «Перетворювальна техніка енергетичних систем».

Об'єкт дослідження – процес професійної підготовки майбутніх фахівців енергетичної галузі.

Предмет дослідження – засоби поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

Методи дослідження – аналіз психолого-педагогічної, електротехнічної, електроенергетичної та науково-методичної літератури з проблеми дослідження для встановлення стану її наукової розробленості; аналіз професійної підготовки фахівців енергетичної галузі; аналіз та узагальнення педагогічного досвіду, анкетування, тестування для визначення ефективності професійної підготовки фахівців енергетичної галузі.

Завдання дослідження:

1. Здійснити аналіз психолого-педагогічної, електротехнічної, електроенергетичної та науково-методичної літератури для визначення основних аспектів діяльності фахівців електроенергетичної галузі щодо застосування пристроїв силової електроніки в електроприводі постійного струму.

2. Провести аналіз сучасного стану професійної підготовки фахівців електроенергетичної галузі і визначити проблему дослідження.

3. Теоретично обґрунтувати й розробити засоби поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

Наукова новизна одержаних результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробці засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму» на основі системної покрокової реалізації основних положень когнітивної теорії навчання (послідовний контроль на кроках сприйняття, запам'ятовування, мислення).

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у подальшій конкретизації основних положень когнітивної теорії навчання для розробки засобів контролю навчальних досягнень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у впровадженні у процес професійної підготовки майбутніх фахівців енергетичної галузі розроблених засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму», що підвищило якість професійної підготовки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ЕЛЕМЕНТНА БАЗА, ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ПРОФЕСІЙНА ПІДГОТОВКА, МАЙБУТНІ ФАХІВЦІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ, ПОТОЧНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ.

ABSTRACT

The work contains: p. 90, fig. 28, table. 4, references 9.

The purpose of the research is to theoretically substantiate and develop means of current control of educational achievements on the topic "Semiconductor converters for direct current electric drives", which is part of the discipline "Conversion technology of energy systems".

The object of the study is the process of professional training of future specialists in the energy industry.

The subject of the study is the means of current control of educational achievements on the topic "Semiconductor converters for direct current electric drives".

Research methods – analysis of psychological and pedagogical, electrical engineering, electrical energy and scientific and methodological literature on the research problem to establish the state of its scientific development; analysis of professional training of energy industry specialists; analysis and generalization of pedagogical experience, questionnaires, testing to determine the effectiveness of professional training of energy industry specialists.

Research objectives:

1. To analyze psychological and pedagogical, electrical engineering, electrical power and scientific and methodological literature to determine the main aspects of the activities of specialists in the electrical power industry regarding the use of power electronics devices in a direct current electric drive.

2. To analyze the current state of professional training of specialists in the electrical power industry and determine the research problem.

3. To theoretically substantiate and develop means of current control of educational achievements on the topic "Semiconductor converters for direct current electric drives".

The scientific novelty of the obtained results lies in the theoretical substantiation and development of means of current control of educational achievements on the topic "Semiconductor converters for direct current electric

drives" based on the systematic step-by-step implementation of the basic provisions of the cognitive theory of learning (sequential control at the steps of perception, memorization, thinking).

The theoretical significance of the results obtained lies in the further specification of the main provisions of the cognitive theory of learning for the development of means of monitoring educational achievements.

The practical significance of the results obtained lies in the introduction into the process of professional training of future specialists in the energy industry of the developed means of current monitoring of educational achievements on the topic "Semiconductor converters for direct current electric drives", which increased the quality of professional training.

KEY WORDS: SEMICONDUCTOR CONVERTERS, ELEMENTARY BASE, DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE, VOCATIONAL TRAINING, FUTURE ENERGY INDUSTRY SPECIALISTS, CURRENT CONTROL, TEST TASKS.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АІМ – амплітудноімпульсна модуляція;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ВП – вентиляний перетворювач;

ЕРС – електрорушійна сила;

НП – напівпровідник;

ПТ – перетворювальна техніка;

ФІМ – фазово-імпульсна модуляція;

ЧІМ – частотно-імпульсна модуляція;

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ З ТЕМИ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»	14
1.1. Напівпровідникові перетворювачі в електроприводі постійного струму	14
1.2. Особливості підготовки майбутніх енергетиків з питань застосування напівпровідникових перетворювачів в електроприводі	16
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	18
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ» ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТНА БАЗА	19
2.1. Елементна база перетворювальних пристроїв	19
2.2. Експлуатаційні характеристики силових вентилів перетворювальних пристроїв	28
2.3. Керовані вентиля та особливості їх роботи у складі перетворювальних пристроїв	33
2.4. Перетворювальні пристрої в електроприводі постійного струму та їх експлуатаційні характеристики	41
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	70
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ДЛЯ ОБ'ЄКТУ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»	71
3.1. Постановка оперативних цілей поточного контролю	71

3.2. Визначення типу поточного контролю і форми його проведення	74
3.3. Проектування основної частини елементів поточного контролю	76
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	87
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	88
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	90

ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується все зростаючою тенденцією застосування в виробничому процесі силових напівпровідникових пристроїв і побудови на їх основі елементів перетворювальної техніки, освоєння сучасної елементної бази, пошуком нових структурних рішень при проектуванні та експлуатації енергетичного обладнання. При цьому вирішуються задачі підвищення надійності роботи, зменшення габаритних розмірів, зниження потужності, що споживається, підвищення швидкодії, підвищення рівня автоматизації технологічних процесів виробництва, зниження собівартості напівпровідникових пристроїв, які застосовуються в електроприводі постійного струму.

На сьогодні професіоналізм фахівця електроенергетичної галузі визначається передусім за його здатністю професійно розв'язувати свої завдання згідно з посадовими обов'язками, шукати нові рішення, творчо діяти на підставі аналізу технологічних процесів і явищ, що відбуваються в умовах переобладнання енергетичної галузі.

На необхідності підвищення професійного та загальнокультурного рівня випускників закладів фахової передвищої та вищої освіти наголошується в Законах України «Про освіту», «Про вищу освіту», «Про професійну (професійно-технічну) освіту».

Удосконалення професійної підготовки фахівців електроенергетичної галузі буде сприяти професійній спрямованості майбутніх фахівців, їхньому позитивному ставленню до професії, розвитку професійно важливих якостей. У зв'язку з процесами адаптації майбутніх фахівців в сучасній енергетичній галузі, постає необхідність удосконалення професійної підготовки фахівців, яка стає обов'язковим складником їхньої професійної підготовки у будь-якій галузі, зокрема енергетичній.

Головною метою удосконалення вищої фахової освіти є підвищення професійної підготовки фахівців, які були б здатні вирішувати виробничі та наукові завдання у тісному зв'язку із завданнями збереження та збагачення

людських цінностей. Особливо актуальною ця проблема стає в умовах сучасних викликів, які стоять перед енергетичною галуззю, зокрема в контексті глобальної енергетичної трансформації, впровадження відновлюваних джерел енергії та роботизації виробничих процесів.

Серед ключових завдань сьогодення ефективна підготовка фахівців електроенергетичної галузі передбачає розвиток таких компетентностей, як:

–здатність до адаптації в умовах швидких технологічних змін;

–вміння працювати із сучасним модернізованим обладнанням і програмним забезпеченням;

–розуміння принципів сталого розвитку галузі та енергозбереження природних ресурсів.

Інтеграція освіти, науки і виробництва є критично важливою для досягнення цих цілей. Акцент на практичній підготовці, стажуваннях у провідних електроенергетичних компаніях та залучення здобувачів вищої освіти до реальних виробничих проєктів дозволить підвищити рівень їхньої професійної готовності та сприятиме формуванню конкурентоспроможних фахівців.

Мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні і розробці засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму», яка входить до складу дисципліни «Перетворювальна техніка енергетичних систем».

Для досягнення мети в дипломній роботі визначено такі **завдання**:

1. Здійснити аналіз психолого-педагогічної, електротехнічної, електроенергетичної та науково-методичної літератури для визначення основних аспектів діяльності фахівців електроенергетичної галузі щодо застосування пристроїв силової електроніки в електроприводі постійного струму.

2. Провести аналіз сучасного стану професійної підготовки фахівців електроенергетичної галузі і визначити проблему дослідження.

3. Теоретично обґрунтувати й розробити засоби поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

Об'єкт дослідження – процес професійної підготовки майбутніх фахівців енергетичної галузі.

Предмет дослідження – засоби поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

Для розв'язання поставлених завдань були застосовані такі **методи**:

–аналіз психолого-педагогічної, електротехнічної, електроенергетичної та науково-методичної літератури з проблеми дослідження для встановлення стану її наукової розробленості; аналіз професійної підготовки фахівців енергетичної галузі;

–аналіз та узагальнення педагогічного досвіду, анкетування, тестування для визначення ефективності професійної підготовки фахівців енергетичної галузі.

Застосування цих методів дозволить отримати всебічну інформацію про сучасний стан професійної підготовки фахівців електроенергетичної галузі та визначити напрями її вдосконалення.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробці засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму»,на основі системної покрокової реалізації основних положень когнітивної теорії навчання (послідовний контроль на кроках сприйняття, запам'ятовування, мислення).

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у подальшій конкретизації основних положень когнітивної теорії навчання для розробки засобів контролю навчальних досягнень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у впровадженні у процес професійної підготовки майбутніх фахівців електроенергетичної

галузі розроблених засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму», що підвищило якість професійної підготовки.

Структура та загальний обсяг роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків та рекомендацій, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ З ТЕМИ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

1.1. Напівпровідникові перетворювачі в електроприводі постійного струму

Перетворювальні пристрої призначені для перетворення напруги змінного струму стандартного значення (380 або 220 В) у напругу змінного або постійного струму необхідного значення, яке забезпечує функціонування технологічного обладнання, електричних машин та апаратів.

У якості силових елементів в потужних перетворювальних пристроях використовуються керовані і некеровані електронні ключі або вентиля. В основному це тиристори, симістори, діоди і рідше повністю керовані напівпровідникові прилади (двоопераційні тиристори, потужні біполярні та польові транзистори). Тому пристрої перетворювальної техніки часто називають вентилями перетворювачі (ВП).

Напівпровідникові перетворювальні пристрої мають високі регулювальні характеристики і енергетичні показники, мають малі габарити та масу, прості і надійні в експлуатації, забезпечують безконтактну комутацію струмів в силових електричних колах, а також регулювання струму та напруги в широкому діапазоні [2].

Завдяки вказаним перевагам, перетворювальні пристрої набувають все більш широкого застосування в різних галузях промислового виробництва.

Серед найбільш поширених пристроїв можна відмітити:

- випрямлячі, які перетворюють одно- або трифазний змінний струм в постійний;
- інвертори, які перетворюють постійний струм в одно- або трифазний струм незмінної або регульованої частоти;

- перетворювачі частоти, які перетворюють одно- і трифазний струми однієї частоти в одно- і трифазні струми другої частоти – незмінної або регульованої;

- широтно-імпульсні перетворювачі постійної та змінної напруги, які перетворюють постійну або змінну напругу одного рівня в постійну або змінну напругу другого рівня - незмінного або регульованого;

- перетворювачі числа фаз, які перетворюють одно- або трифазний струм заданої частоти в три- або однофазний струм тієї ж частоти.

Випрямлячі знаходять широке застосування в кольоровій металургії, хімічній промисловості, електроприводі постійного струму, електрозварюванні, гальванотехніці, при електрохімічній обробці металів, зарядці акумуляторних батарей, в радіоелектронній апаратурі і в автоматичі. Крім того, випрямлячі є складовим елементом перетворювачів частоти з природною комутацією.

Інвертори застосовуються для живлення споживачів змінного струму при первинному джерелі у вигляді акумуляторної батареї; при використанні нових джерел електроенергії, які виробляють постійний струм, в системах передачі електроенергії постійного струму. Крім того, інвертори є складовим пристроєм перетворювачів частоти з ланкою постійного струму.

Перетворювачі частоти застосовуються в електроприводах змінного струму, в електротермії, для живлення світлотехнічних приладів, в радіоелектронній апаратурі, тощо.

Широтно-імпульсні перетворювачі постійної і змінної напруг застосовуються для стабілізації та регулювання напруги в підйомно-транспортних пристроях, тягових електроприводах гірничої промисловості, в електромобілях, в міському електрифікованому транспорті, тощо.

Перетворювачі числа фаз застосовуються для перетворення однофазної напруги в трифазну.

Напівпровідникові перетворювальні пристрої знаходять також широке застосування в електроенергетиці і використовуються якості комутаційної апаратури в статичних регуляторах реактивної потужності [7].

В сучасних умовах широкий розвиток отримали автономні системи електропостачання порівняно невеликої потужності. Їх розвиток іде в напрямку створення відновлюваних джерел електричної енергії (вітряки, сонячні батареї) з високими масо габаритними характеристиками. В таких умовах передбачається максимальне суміщення функцій в окремих блоках системи, що скорочує кількість функціональних блоків та елементів.

1.2. Особливості підготовки майбутніх енергетиків з питань застосування напівпровідникових перетворювачів в електроприводі

Електрична енергія виробляється в основному на змінному струмі при частоті 50 Гц. Разом з тим має місце тенденція до збільшення частки електроенергії, яка споживається на постійному струмі або на змінному струмі нестандартної частоти. Тому інтенсивно розробляються і впроваджуються в різні галузі виробництва потужні перетворювальні пристрої на базі силових напівпровідникових вентилів, які призначені для використання в електротехнологічному устаткуванні, електроприводі на транспорті та ін. Набуває подальшого розширення галузей застосування пристроїв перетворювальної техніки, в тому числі і в електроенергетиці – для створення оптимальних умов генерування, передачі та розподілу електричної енергії.

Виконуючи своє основне призначення, вентильні перетворювачі разом з тим завантажують електричні мережі значною реактивною потужністю з вищими гармоніками струму, приводить до коливань напруги в мережах по амплітуді і спотворенням її форми, зменшенню пропускної спроможності мереж, збільшенню втрат, що негативно позначається на роботі інших споживачів, які живляться від цих мереж. Тому при виборі або проектуванні перетворювальних пристроїв необхідно не тільки забезпечити якість

електричної енергії, яку вимагає споживач, але намагатися звести до мінімуму погіршення якості напруги мережі, що виникає за рахунок роботи перетворювальних пристроїв.

Для вирішення виявленої проблеми необхідне підвищення рівня професійної підготовки фахівців шляхом розробки методичного забезпечення для проведення поточного контролю з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Для майбутніх фахівців енергетичної галузі, які спеціалізуються в напрямку проектування та експлуатації електричних мереж та систем актуальним є підвищення їх рівня професійної підготовки з таких розділів перетворювальної техніки як випрямлячі середньої та великої потужності, автономні інвертори, регулятори змінного струму, інвертори ведені мережею та перетворювачі частоти. З цього виходить, що головна ціль даної теми не стільки навчити майбутнього фахівця розробляти ті чи інші функціонально закінчені перетворювальні пристрої, скільки навчити його розуміти принцип дії цих пристроїв, вміти грамотно експлуатувати їх і формулювати завдання на розробку нового пристрою.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ» ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТНА БАЗА

2.1. Елементна база перетворювальних пристроїв

Напівпровідникові діоди – це напівпровідникові (НП) прилади, що виготовляються на основі двошарових структур і використовують властивості $p-n$ переходу.

Дія напівпровідникових діодів ґрунтується на вентильних властивостях $p-n$ переходу, що дозволяє струму проходити лише в одному напрямку. У прямому напрямку діод проводить струм, а у зворотному – блокує його, забезпечуючи випрямлення змінного струму.

Найбільш поширеними є випрямні діоди, які використовуються для перетворення змінного струму в постійний. Основою напівпровідникових діодів є кремній (Si), германій (Ge) або інші напівпровідникові матеріали з відповідними домішками.

Структура та умовне позначення діода, його гідравлічна модель, а також ВАХ потужного випрямного діода наведені на рисунку 2.1.

Для наочного розуміння принципу роботи випрямного діода можна використати гідравлічний пружинний клапан (вентиль). Подібно до діода, клапан пропускає рідину лише в одному напрямку, залежно від напрямку прикладеного тиску. Це відображає вентильні властивості діода, який пропускає струм у прямому напрямку і блокує його у зворотному.

В силовій електроніці випрямні діоди використовуються для перетворення змінного струму в постійний, особливо для струмів низької частоти.

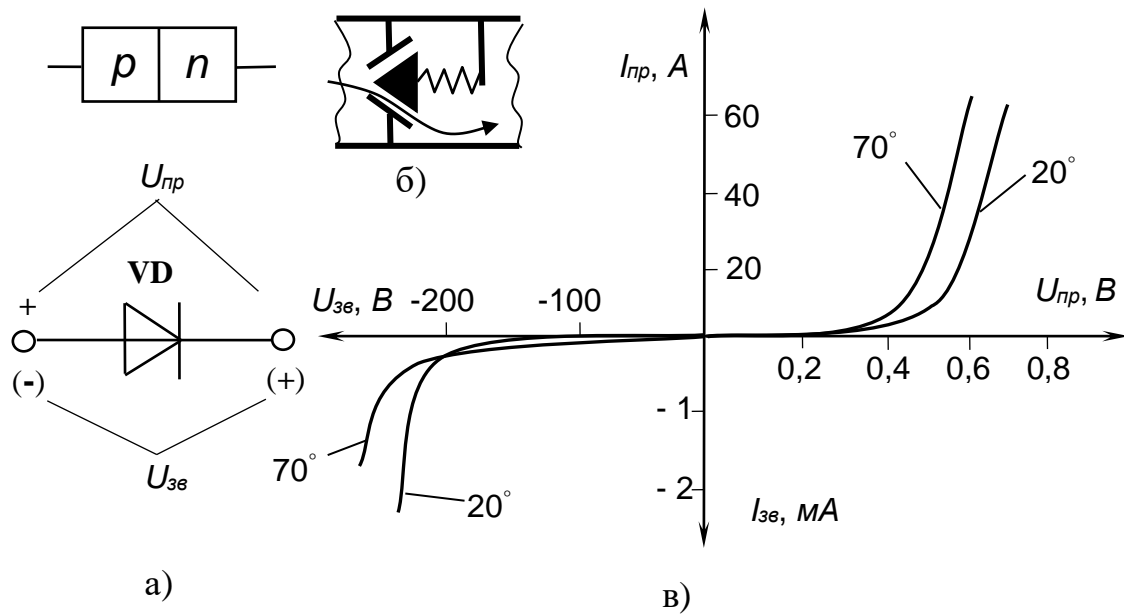


Рисунок 2.1 – Структура та умовне позначення (а), гідравлічна модель (б) і ВАХ (в) випрямного діода

Основні параметри випрямних діодів приведені в довідниках [7]:

1. Середній прями́й стру́м діода $I_{сер}$ або I_{FAV} . Максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку за умов належного охолодження. Для сучасних діодів: $I_{сер} = (0,1 \div 6200) \text{ A}$.

2. Максимально допустимий прями́й імпульсний стру́м $I_{пр max}$ (I_{FSM}) або I_{FSM} . Граничний стру́м під час короткотривалих імпульсів зазвичай становить $(10 \div 50)I_{сер}$.

3. Прямє падіння напруги $U_{сер}$. Середнє значення напруги на діоді при граничному прямому струмі $I_{сер}$. Для кремнієвих діодів: $U_{сер} = (0,6 \div 1,0) \text{ В}$.

4. Максимально допустима зворотна напруга $U_{зв max}$ (U_{RRM}) або U_{RRM} . Максимальне амплітудне значення зворотної напруги, яке діод може витримати без пошкодження за визначених умов охолодження.

Для сучасних діодів: $U_{зв max} = (50 \div 10000) \text{ В}$.

Основний матеріал, з якого виготовляють випрямні діоди це кремній але досить перспективним є арсенід галію, що має вищу термостійкість та ефективність.

Схема найпростішого однофазного випрямляча змінної напруги з використанням випрямного діода представлена на рисунку 2.2.

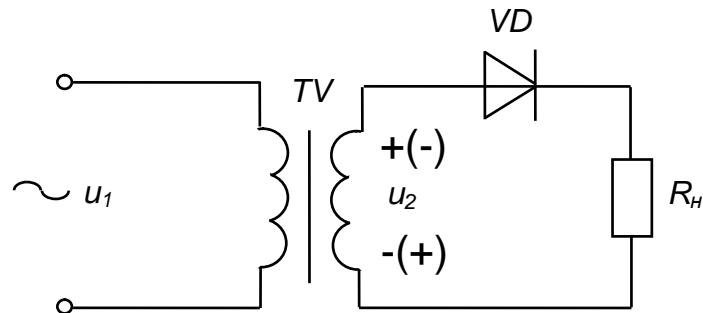


Рисунок 2.2 – Найпростіша схема випрямлення напруги

Тут діод діє як автоматичний ключ з односторонньою провідністю, стан якого визначається полярністю прикладеної до нього напруги.

У таблиці 2.1 наведені основні параметри випрямних діодів середньої та великої потужності, а у таблиці 2.2 основні параметри їх теплових характеристик, причому останні є загальними для усіх типів НП ключів.

Діоди Шоттки – це тип напівпровідникових діодів, у яких використовується не $p-n$ перехід, а перехід між напівпровідником і металом (наприклад, молібденом або алюмінієм). У діодах Шоттки перехід виникає між напівпровідником типу n і металом, завдяки переміщенню електронів з напівпровідника в метал. У приграничному шарі між металом і напівпровідником іони донорної домішки створюють позитивний потенціал, який призводить до виникнення контактної різниці потенціалів. При подачі зовнішньої напруги цей перехід веде себе подібно до $p-n$ переходу: пропускає струм у прямому напрямку і блокує його у зворотному.

Завдяки відсутності накопичення заряджених часток у переході, діоди Шоттки мають дуже низький час відгуку, що робить їх ідеальними для високочастотних застосувань.

Таблиця 2.1 – Основні параметри випрямних діодів

Параметр	Позначення у довідковій літературі	Змістовне значення*
Пряме падіння напруги, В	V_F	Напруга на діоді у відкритому стані
Пробивна напруга, В	V_{BR}	Зворотна напруга, за якої відбувається пробій
Зворотна повторювана імпульсна напруга, В	V_{RRM}	Найбільше миттєве значення зворотної напруги, яке діод може витримувати при короткочасній повторюваній дії (на робочій частоті)
Порогова напруга, В	V_{T0}	Значення прямої напруги, що визначається точкою перетину лінії прямолінійної апроксимації прямої характеристики з віссю напруги
Диференціальний прямий опір (динамічний опір), мОм	r_T	Значення опору, що визначається за нахилом лінії прямолінійної апроксимації прямої характеристики
Максимальний прямий середній струм, А	I_{FAV}	Максимально допустиме середнє значення прямого струму, усереднене за всім періодом
Діючий прямий струм, А	I_{FRMS}	Діюче значення прямого струму за весь період
Ударний прямий струм, що не повторюється, А	I_{FSM}	Струм, при протіканні якого перевищується максимально допустима температура переходу, але який виникає одноразово в аварійних режимах і не призводить до виходу діоду з ладу
Захисний показник, $A^2 \cdot c$	$\int i^2 dt$	Значення інтегралу від квадрату струму в аварійному режимі (використовується для вибору запобіжника)
Зворотний струм, А	i_R	Струм витоку в закритому стані
Час зворотного відновлення, мкс	t_{rr}	Час, починаючи з моменту переходу струму через нуль при вимиканні діода до закінчення процесу відновлення приладу
Заряд зворотного відновлення, Кл	Q_{rr}	Заряд, що віддається діодом при його вимиканні

*Змістовне значення не є точним визначенням. Точне визначення параметрів є в національних та міжнародних стандартах на напівпровідникові прилади.

Таблиця 2.2 – Основні параметри за тепловими характеристиками діода (загальні для усіх типів напівпровідникових ключів)

Параметр	Позначення у довідковій літературі	Змістовне значення*
Ефективна еквівалентна температура переходу (температура структури), °C	T_j	Теоретична температура, що ґрунтується на спрощеній уяві про теплові та електричні властивості ключа
Температура корпусу, °C	T_c	Температура в даній конкретній точці на корпусі ключа
Температура оточуючого середовища, °C	T_a	Температура в даній зовнішній контрольній точці середовища, яке охолоджує ключ
Тепловий опір перехід-середовище, °C/Вт	R_{thja}	Відношення різниці температури переходу та температури оточуючого середовища до потужності втрат у ключі в усталеному режимі
Тепловий опір перехід-корпус, °C/Вт	R_{thjc}	Відношення різниці температури переходу та температури корпусу до потужності втрат у ключі в усталеному режимі
Перехідний тепловий опір перехід-середовище, °C/Вт	$Z_{(th)tja}$	Відношення зміни різниці між температурою переходу та температурою оточуючого середовища наприкінці інтервалу часу до зміни стрибком потужності втрат, яка викликала зміну температури, на початку того самого інтервалу часу
Перехідний тепловий опір перехід-корпус, °C/Вт	$Z_{(th)tjc}$	Відношення зміни різниці між температурою переходу та температурою корпусу ключа наприкінці інтервалу часу до зміни стрибком потужності втрат, яка викликала зміну температури, на початку того самого інтервалу часу

Низьке пряме падіння напруги. Діоди Шоттки мають менше пряме падіння напруги (зазвичай 0,2-0,4 В), що робить їх ефективними у низьковольтних схемах.

Низьке зворотне утримання. Оскільки у діодах Шоттки відсутні заряджені області у межах переходу, вони мають низьке зворотне утримання, що зменшує ймовірність їхнього пошкодження при високих зворотних напругах.

Діоди Шоттки є популярним вибором для застосувань, де потрібна висока швидкодія, низьке падіння напруги і високий коефіцієнт ефективності. Завдяки своїм характеристикам вони знаходять широке застосування в сучасних електронних пристроях.

1. Високочастотні пристрої, наприклад, в радіочастотних фільтрах і мікрохвильових пристроях.
2. Схеми випрямлення у низьковольтних електронних пристроях.
3. Системи енергозбереження завдяки високій ефективності.

НП діод, у якому напруга в зоні електричного пробою майже не залежить від струму, називається стабілітроном. Як постає з ВАХ, наведеної на рисунку 2.3, у зоні пробою напруга на стабілітропі майже не залежить від струму через нього I_{cm} .

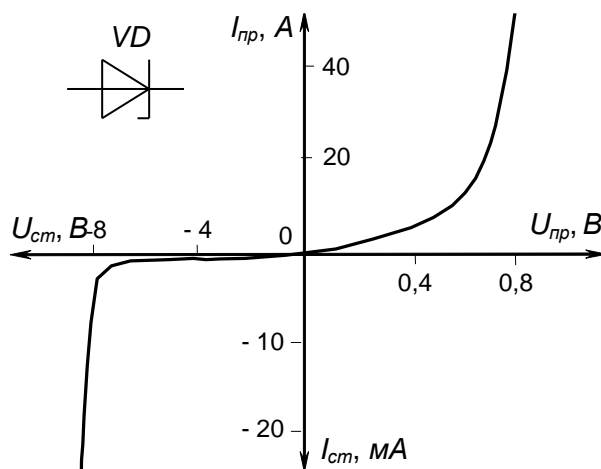


Рисунок 2.3 – Умовне позначення та ВАХ стабілітрона

Стабілітрони використовують для стабілізації напруги. Щоб запобігти тепловому пробою, їхня конструкція забезпечує ефективне відведення тепла від кристалу.

Основними параметрами стабілітрону є:

- напруга стабілізації U_{cm} , що становить від 1 до 1000 В;
- динамічний опір на ділянці

стабілізації (характеризує зміну величини напруги на приладі зі змінами струму у ньому) (1 – 100) Ом;

$$R_{\partial} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}, \quad (2.3)$$

- мінімальний струм стабілізації $I_{cm \min}$ – мінімальний струм, при якому прилад гарантовано знаходиться у режимі стабілізації (одиниці мА);

- максимальний струм стабілізації $I_{cm \max}$ – максимально допустимий струм через прилад, (0,02 ÷ 1,5) А.

Найпростіша схема стабілізації наведена на рисунку 2.4.

Тунельний діод – це НП прилад, в якому специфічний тунельний ефект призводить до появи на ВАХ при прямій напрузі ділянки з негативною провідністю – переривчаста лінія на рисунку 2.5 (там же наведено умовне позначення приладу). Як робоча використовується пряма ділянка ВАХ.

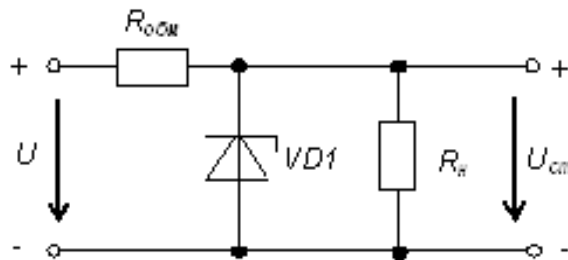


Рисунок 2.4 – Схема елементарного стабілізатора напруги

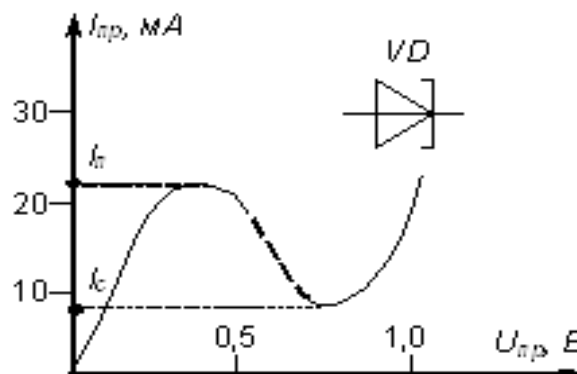


Рисунок 2.5 – Умовне позначення та ВАХ тунельного діода

Основними параметрами тунельного діода є:

- струм піку I_n , (0,1 ÷ 100) мА;
- відношення струму піку I_n до струму спаду I_c :

Тунельні діоди і фотодіоди є важливими типами напівпровідникових приладів, кожен з яких має специфічні властивості та застосування:

Тунельні діоди – це швидкодіючі напівпровідникові прилади, які застосовуються в генераторах високочастотних коливань і швидкодіючих імпульсних перемикачах. Вони працюють на частотах до сотень мегагерц, де важлива інерційність діода, пов'язана з процесами накопичення і розсмоктування зарядів у зоні p - n переходу.

У тунельних діодах використовується принцип тунельного переходу, при якому електрони проникають крізь енергетичний бар'єр завдяки квантовій механіці. Це дозволяє їм швидко проходити через перехід, що робить діоди ідеальними для імпульсних застосувань. Вони також мають невелику інерцію, що забезпечує короткі тривалості перехідних процесів при замиканні і розмиканні ключа.

Фотодіоди є фотоелектричними приладами, в яких під дією світлової енергії відбувається іонізація атомів основної речовини і домішки. Це призводить до збільшення струму при зворотному включенні діода.

Фотодіоди використовуються для детектування світлових сигналів, що дозволяє їх застосовувати в системах освітлення, оптичних комунікаціях і датчиках освітленості.

Світлодіоди (LED) перетворюють енергію електричного поля в оптичне випромінювання, коли через напівпровідниковий матеріал проходить струм. Рекомбінація носіїв заряду в напівпровіднику призводить до виділення квантів світла, що формує різні кольори випромінювання (червоний, зелений, жовтий, синій).

Світлодіоди використовуються в широкому спектрі додатків, включаючи індикатори, підсвічування дисплеїв, автомобільні фари, ліхтарі, освітлення приміщень, рекламні щити і світлофори. Потужні світлодіоди

мають високий рівень інтенсивності випромінювання і тривалий термін служби, що робить їх економічно вигідним вибором для освітлювальних приладів.

Ці прилади мають різні характеристики і застосування, що робить їх незамінними в сучасних технологічних рішеннях.

Тунельні діоди, фотодіоди і світлодіоди мають специфічні властивості і застосовуються у різних сферах, де важлива швидкодія, фотодетекція або світлова інтенсивність. Завдяки своїм унікальним характеристикам вони знаходять широке застосування в сучасних технологіях та електроніці.

Варикапи – це напівпровідникові діоди, ємність яких змінюється в залежності від зворотної напруги. Це робить їх корисними для застосувань, де потрібно контролювати ємність в реальному часі.

Варикапи використовуються в схемах, де важлива зміна ємності, наприклад, для автоматичного налаштування радіоприймачів або телевізорів на потрібну частоту або канал.

Вони забезпечують ефективне налаштування частотних контурів, оскільки зміна зворотної напруги на варикапі призводить до змін в його ємності, що дозволяє змінювати резонансну частоту контуру.

Це часто використовується в автоматичних тюнерах, а також в системах фазової модуляції (FM) для точного налаштування частоти.

У схемах варикап, як правило, позначають спеціальним символом, що нагадує традиційний діодний символ, але з додатковими елементами, що вказують на змінну ємність. Це дозволяє чітко відрізнити його від звичайних діодів. Умовні позначення фото-, світлодіода та варикапа наведені на рисунку 2.6.

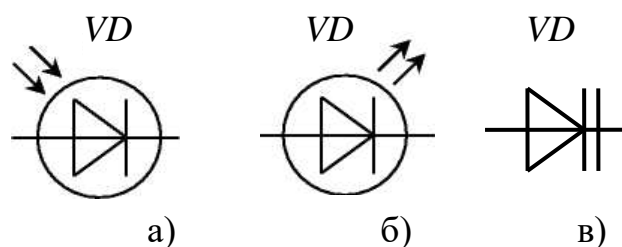


Рисунок 2.6 – Умовні позначення фотодіода (а), світлодіода (б), варикапа (в)

2.2. Експлуатаційні характеристики силових вентилів перетворювальних пристроїв

Динамічний режим роботи напівпровідникових (НП) ключів є важливою складовою електронних систем, де ці ключі використовуються для перемикання між увімкненим і вимкненим станом.

Динамічний режим – це перехідний режим, коли ключ змінює свій стан. У цьому режимі важливо враховувати час, протягом якого ключ переходить із вимкненого стану в увімкнений (і навпаки), а також супутні зміни напруги та струму.

Статичний (усталений) режим. В цей час ключ знаходиться в одному з двох станів – увімкненому або вимкненому, і параметри системи (наприклад, струм чи напруга) не змінюються або змінюються дуже повільно. Статичний режим є більш стабільним і передбачуваним.

Динамічні процеси в діодах. При роботі на високих швидкостях зміни струму (наприклад, при перемиканні на високих частотах), діоди та інші напівпровідникові компоненти зазнають значних впливів, таких як зарядка і розрядка ємностей, що може призвести до спотворень сигналів або нагріву елементів. Це особливо важливо, коли струм або напруга змінюються дуже швидко.

Особливості високошвидкісної роботи. Під час переходів між станами потрібно враховувати такі характеристики, як час відновлення, час перемикання і затримки в перемиканні, які визначають ефективність роботи НП ключів на високих швидкостях. Погане проектування може призвести до неповного переходу між станами, що викликає втрати енергії, шум і навіть пошкодження компонентів.

Ці фактори критичні для високочастотних перетворювачів, випрямлячів та перемикачів у різних електронних і силових системах, де швидкість і точність переходів мають велике значення для загальної ефективності.

Тому розглянемо динамічні характеристики діода при вмиканні чи вимиканні детальніше.

Вмикання діоду. Припустимо, що діод вимкнений дією зворотної напруги u_R (рисунок 2.7). Послідовно з діодом включена індуктивність L , що обмежує швидкість наростання струму при вмиканні діода. У цьому стані $p-n$ перехід діода характеризується ємністю, що називається бар'єрною і заряджена з полярністю, що відповідає полярності зворотної напруги.

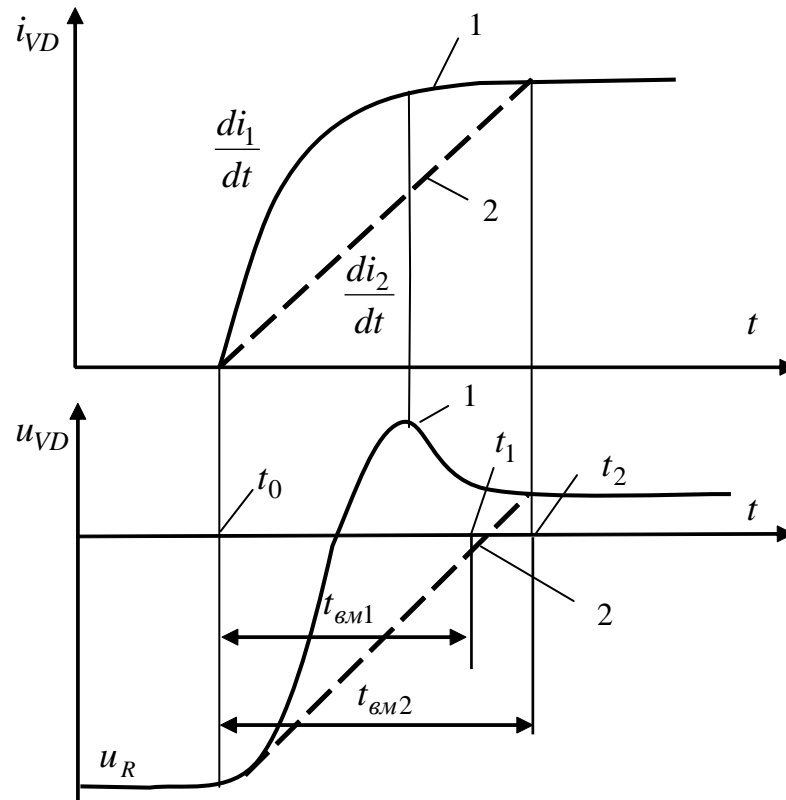


Рисунок 2.7 – Діаграми струму та напруги діода при вмиканні

При підведенні прямої напруги в момент часу $t = t_0$ діод вмикається. Початок процесу характеризується розрядом бар'єрної ємності та збільшенням струму зі швидкістю, що обмежена індуктивністю L . Вмикання закінчується у момент часу $t = t_1$, коли напруга між анодом і катодом стає усталеною, що відповідає прямому струму.

При високій швидкості зростання прямого струму $\frac{di_1}{dt}$ (крива 1, рисунок 2.7) через наявність власної індуктивності виводів діоду можливе

деяке перебільшення прямої напруги на діоді над ustalеним значенням. При зниженні швидкості зростання прямого струму (крива 2, рисунок 2.7) сплеск прямої напруги відсутній, загальний час вмикання збільшується і процес завершується у момент часу $t = t_2$.

Вимикання діода – це процес, при якому діод, що перебуває в увімкненому стані, переходить у вимкнений, коли на нього подається зворотна напруга. Це викликає зміну напрямку струму в колі, і через діод починає протікати зворотний струм, який поступово спадає до нуля (рисунок 2.8).

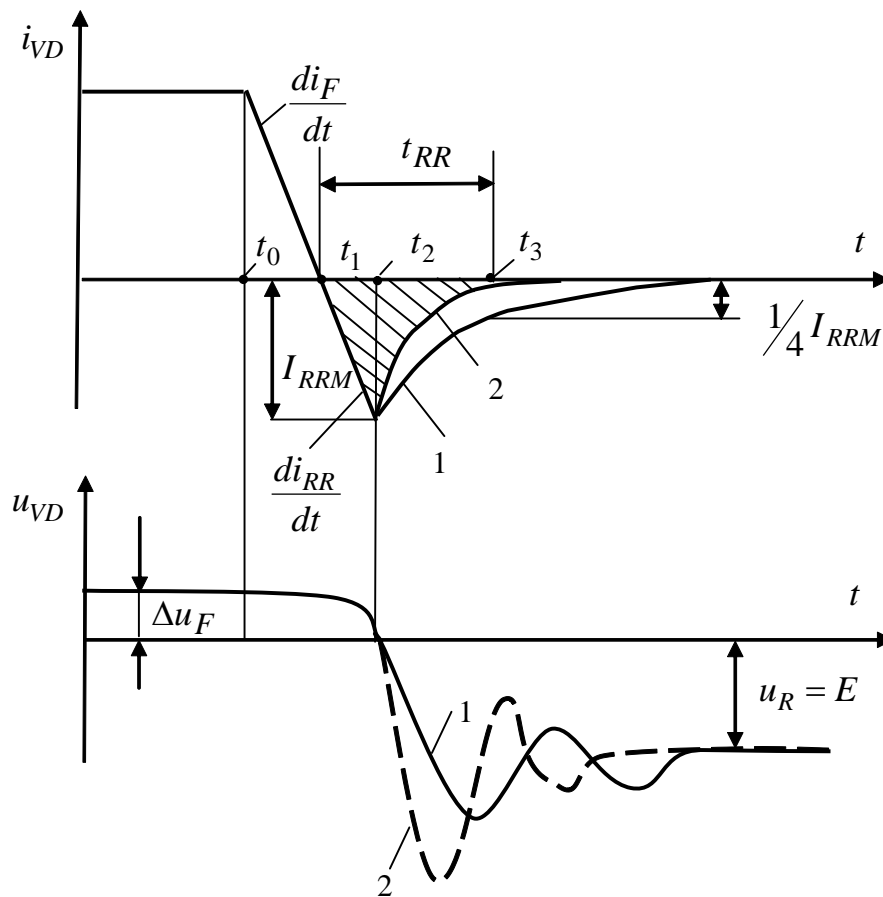


Рисунок 2.8 – Діаграми струму та напруги діода при вимиканні

Коли на діод подається зворотна напруга, цей діод припиняє проводити струм, оскільки в зворотному напрямку утворюється електричне поле, яке блокує потік носіїв зарядів.

При переході діода в вимкнений стан струм, що протікав через діод під час його увімкненого стану, починає спадати. Швидкість цього процесу залежить від індуктивності в колі, яка чинить опір змінам струму.

У колах, що містять індуктивні елементи (наприклад, котушки індуктивності), зміни струму будуть більш плавними, оскільки індуктивність намагається підтримувати струм стабільним. Тому процес вимикання буде не миттєвим, а тривалим, поки індуктивність не "поглине" весь енергійний запас у колі, і струм не зменшиться до нуля.

Коли діод вимикається, струм, який через нього протікав, зменшується до нуля. Оскільки індуктивність чинить опір швидким змінам струму, він спадає поступово, вивільняючи енергію, накопичену в індуктивності. У результаті виникає так званий перехідний процес, який залежить від характеристик кола.

Цей процес можна спостерігати в схемах, де використовуються діоди для випрямлення струму чи у швидкісних перемикачах, а також у тих випадках, коли важливо правильно керувати зворотною напругою для запобігання пошкодженню компонентів схеми.

До підключення джерела зворотної напруги у момент часу $t = t_0$ діод знаходився у провідному стані і в ньому було накопичено надлишкове число носіїв заряду. Починаючи з моменту часу $t = t_0$ струм у діоді зменшується зі швидкістю $\frac{di_F}{dt}$. У момент часу $t = t_1$ струм проходить через нуль і в діоді починає протікати зворотний струм i_{RR} , що викликаний накопиченим у структурі діода зарядом зворотного відновлювання Q_{RR} .

У момент часу $t = t_2$, коли діод відновлює свої властивості після вимкнення, він блокує протікання зворотного струму i_{RR} . Це означає, що діод починає діяти як запірний елемент для зворотного струму, що призводить до зменшення цього струму до нуля.

Відновлення властивостей діода. Коли на діод подається зворотна напруга після того, як він був увімкнений у прямому напрямку, він «відновлюється», тобто починає блокувати струм, який раніше протікав через нього.

Спадання зворотного струму. Як тільки діод заблокував зворотний струм, цей струм починає спадати. Це спадання може бути плавним або різким, залежно від типу діода та його характеристик.

Плавне спадання струму (крива 1, рисунок 2.8). У цьому випадку, якщо діод має повільніше відновлення або має менший параметр рекомбінативної втрати носіїв зарядів, зворотний струм буде спадати поступово.

Це характерно для повільних діодів або діодів з низьким рівнем відновлення.

Різде спадання струму (крива 2, рисунок 2.8). В інших випадках, при дуже швидкому вимиканні або використанні швидкодіючих діодів (наприклад, у високочастотних або імпульсних схемах), струм спадає різко. Це зазвичай характерно для діодів, що працюють на високих частотах або з високими швидкостями зростання струму.

Визначення швидкості спадання струму. Швидкість спадання зворотного струму, як вже зазначалося, залежить від типу діода. Для деяких діодів швидкість відновлення може бути достатньо високою, що призводить до майже миттєвого блокування зворотного струму. Для інших, особливо для діодів, що мають більш складну структуру (наприклад, діоди з додатковими шарами або високошвидкісні діоди), процес може бути більш м'яким і плавним.

Спад зворотного струму через наявність індуктивності L кола комутації викликає появу перенапруг на діоді, що вимикається. Коли зворотний струм зменшиться до $\frac{1}{4}$ свого максимального значення I_{RRM} , прийнято вважати процес відновлення властивостей до запирання діоду закінченим (момент часу $t = t_3$). Інтервал часу $t_{RR} = t_3 - t_1$ є часом зворотного відновлення діода.

Потім зворотний струм спадає до усталеного значення, коли $\frac{di_{RR}}{dt} = 0$, а зворотна напруга дорівнює напрузі джерела живлення E .

Заряд зворотного відновлення Q_{RR} відповідає площі, що обмежена миттєвими значеннями зворотного струму (див. рис. 2.8). Зв'язок між значеннями Q_{RR} , I_{RRM} , t_{RR} та швидкістю $\frac{di_{RR}}{dt}$ можна оцінити, якщо апроксимувати область протікання зворотного струму лінійними залежностями та знехтувати інтервалом спаду зворотного струму $t_2 - t_3$:

$$\left. \begin{aligned} Q_{RR} &\approx \frac{t_{RR}^2}{2} \cdot \frac{di_{RR}}{dt}; \\ I_{RRM} &= \sqrt{2Q_{RR} \frac{di_{RR}}{dt}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Для детальніших розрахунків необхідно враховувати умови роботи та параметри конкретного типу діоду.

2.3. Керовані вентиля та особливості їх роботи у складі перетворювальних пристроїв

Тиристор – це напівпровідниковий прилад, який має багатошарову структуру і характерний тим, що його вольт-амперна характеристика (ВАХ) містить ділянку з негативним опором. Це дає йому можливість працювати як перемикач струму, дозволяючи проводити струм або блокуючи його в залежності від умов управління. Тиристори широко використовуються в схемах, де потрібне керування великими струмами чи напругами, наприклад, у випрямлячах, регуляторах, пристроях захисту та інших електронних системах [8].

Тиристори можуть бути двоелектродними (діодні або динистори) і триелектродними (тріодні або триністори), що визначає їх конструкцію і принцип роботи.

Диністри – це тиристри з двома електродами, які працюють на основі двостороннього пробою. Вони мають спеціальну вольт-амперну характеристику з негативним опором. Диністри використовуються в схемах для імпульсного керування і можуть бути застосовані для створення імпульсних джерел напруги або в системах, де потрібне швидке включення або вимикання елементів.

Тиристри – це електронні пристрої з трьома електродами: анодом, катодом і керуючим електродом. Така структура дозволяє здійснювати керування включенням тиристора шляхом подачі на керуючий електрод певного сигналу. Ці пристрої застосовуються у схемах для регулювання потужності та управління енергетичними потоками.

Тиристри зазвичай мають чотири шари напівпровідникового матеріалу, що створюють три $p-n$ переходи (анодний, катодний і керувальний).

Тиристри здатні працювати в умовах високих напруг та струмів, і завдяки своїй структурі можуть бути використані для керування енергією та захисту в різних електронних і електричних пристроях.

Отже, на відміну від диністора окрім силового кола “анод-катод” він має ще й коло керування “керуючий електрод-катод”. Структура та умовне позначення тиристора наведені на рисунку 2.9.

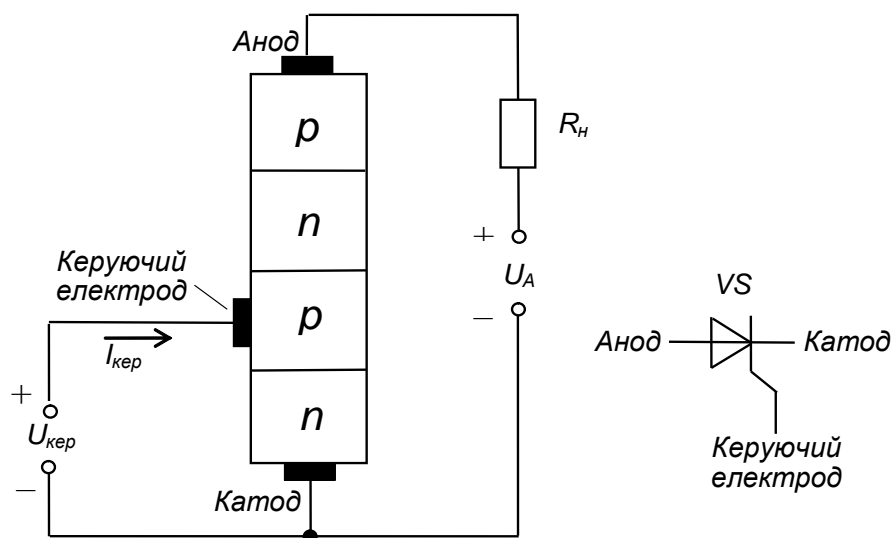


Рисунок 2.9 – Структура та умовне позначення тиристора

Подаючи між керуючим електродом та катодом пряму напругу на $p-n$ перехід, що працює у прямому напрямку (змінюючи струм керування), можна регулювати значення напруги вмикання $U_{вм}$. Цю властивість тиристора демонструє його ВАХ, наведена на рисунку 2.10. Слід зазначити, що практично застосовують режим вмикання, що відповідає струму керування $I_{кер4}$ на рисунку 2.10. Працює тут тиристор наступним чином.

Коли на керуючий електрод тиристора подається імпульс прямої напруги, цей імпульс активує тиристор і запускає процес його вмикання.

Як тільки тиристор увімкнеться, він переходить в провідний стан, тобто струм може вільно текти від анода до катода, і керувальний імпульс більше не потрібен для утримання тиристора в цьому стані.

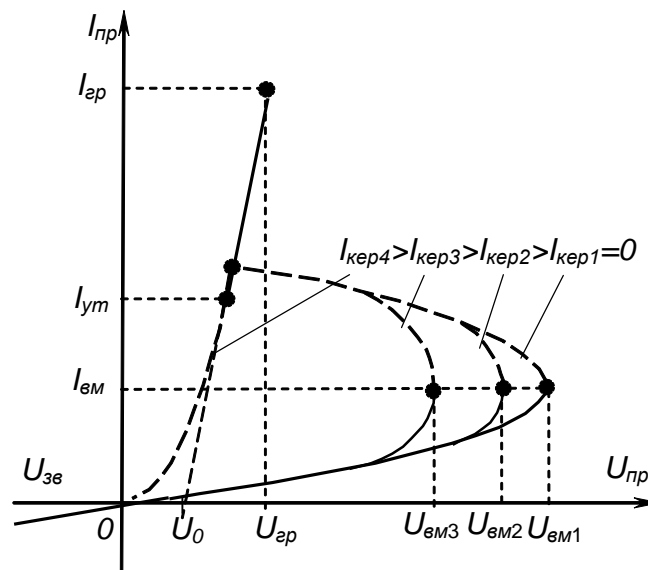


Рисунок 2.10 – ВАХ тиристора

Це відбувається завдяки внутрішньому позитивному зворотному зв'язку в тиристорі, коли процес включення підтримується самою структурою пристрою. Тобто, після подачі керуючого імпульсу тиристор залишається увімкненим навіть після зняття керуючого сигналу.

Тиристор можна вимкнути тільки шляхом зниження струму в анодному колі нижче певного рівня, що називається струмом утримання.

Струм утримання – це мінімальний струм, при якому тиристор залишається увімкненим. Якщо струм падає нижче цього рівня, позитивний зворотний зв'язок в тиристорі перестає діяти, і він вимикається.

Схема вмикання тиристора зображена на рисунку 2.11.

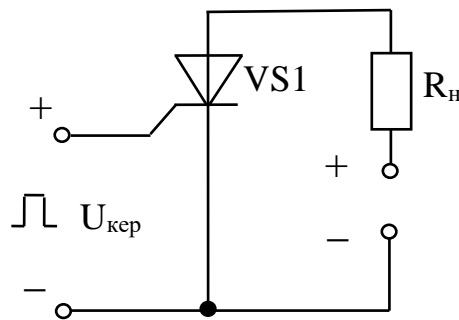


Рисунок 2.11 – Найпростіша схема вмикання тиристора

В колах постійного струму тиристор можна вимкнути, за допомогою вмикання попередньо зарядженого конденсатора, який підключається паралельно тиристорі. Конденсатор повинен бути зарядженим зворотною напругою відносно тиристора, тобто його полярність протилежна до полярності живлення тиристора. Така комутація називається примусовою.

У колах змінного струму, де струм змінюється за синусоїдним законом, тиристор автоматично вимикається при проходженні струму через нуль. Така комутація тиристора називається невимушеною.

Тому у колах змінного струму тиристри зазвичай працюють як напівкеровані перемикачі, де вмикання контролюється за допомогою керуючого сигналу, а вимикання відбувається природно при проходженні струму через нуль. Це робить тиристри ідеальними пристроями для використання при регулюванні струму в споживачах, зокрема в системах живлення електроприводів.

На рисунку 2.12 наведено спрощену схему однофазного регулятора та часові діаграми його роботи. Змінюючи затримку подачі сигналу керування

відносно переходу напруги мережі u_m через нуль – кут регулювання α – від 0 до π , можна регулювати напругу на навантаженні u_n від нуля до максимуму.

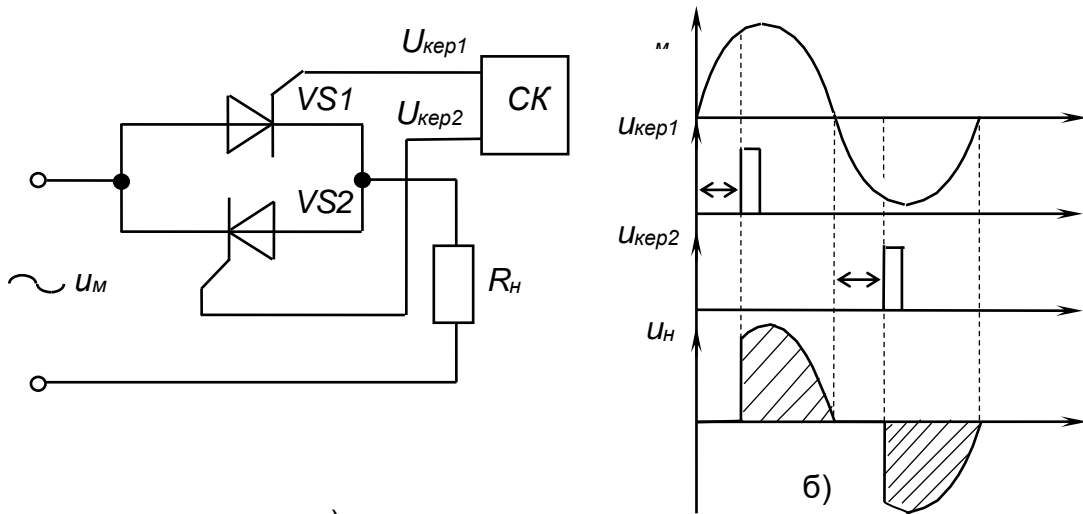


Рисунок 2.12 – Однофазний регулятор: а) електрична схема;
б) часові діаграми роботи

Тиристри мають біля ста параметрів. Наведемо основні з них.

1. Статичні параметри:

- струм вмикання $I_{вм}$ (I_L) - номінальний струм аноду, при якому тиристор утримуються у відкритому стані відразу після вмикання (0,01 ÷ 0,5) А;
- струм утримання $I_{ут}$ (I_H) (мінімальний прямий струм увімкненого тиристора за розімкненого кола керування, при подальшому зниженні якого тиристор переходить у непровідний стан), становить (0,01 ÷ 0,4) А;
- порогова напруга U_0 , сягає до 1 В.

2. Граничні параметри:

- максимально допустиме значення середнього струму через тиристор за певних умов охолодження, що не призводить до перевищення температури тиристора допустимого рівня $I_{сер}$, (I_{TAV}), складає (0,1 ÷ 3200) А;
- максимальний діючий струм $I_{діюч}$, (I_{TAMS}), складає (0,1 ÷ 4200) А;
- імпульсна напруга у закритому стані, що повторюється, U_n (V_{DRM}), складає (100 ÷ 10000) В;

- струм робочого перевантаження, сягає $3I_{сер}$;
- ударний струм у відкритому стані, що не повторюється, $I_{удар}$, (I_{TSM}), сягає $20I_{сер}$;
- допустима середня потужність втрат у відкритому стані P_A .

3. Динамічні параметри:

- час вмикання $t_{вм}$ (t_{gt}) (час переходу тиристора з непровідного стану у провідний), що становить $(1 \div 10)$ мкс;

- час вимикання $t_{вим}$ (t_q) (мінімальний проміжок часу між проходженням через нуль прямого струму та повторним прикладанням напруги до тиристора (рисунку 2.13), що не викликає самовільного вмикання приладу – час відновлення запірних властивостей), становить $(10 \div 500)$ мкс;

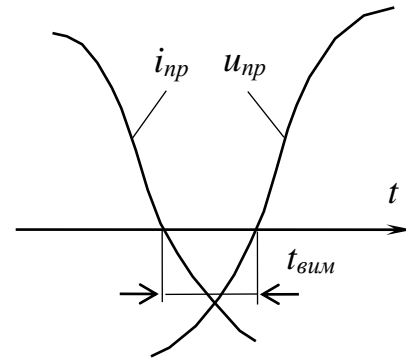


Рисунок 2.13 – Часова діаграма вимикання тиристора

- допустима швидкість зростання відновлюваної напруги на тиристорі, що не призводить до його самовільного вмикання за рахунок ємнісного струму зміщення структури (що являє собою паразитний конденсатор) та внутрішнього позитивного зворотного зв'язку $(du/dt)_{крит}$ ($(du/dt)_{crit}$), становить $(20-1000)$ В/мкс (для гарантованого забезпечення неперевищення її допустимого значення паралельно з тиристором зазвичай вмикають захисне RC-коло – снабер);

- допустима швидкість зростання прямого струму, що не призводить до виходу тиристора з ладу за рахунок локального перегріву структури $(di/dt)_{крит}$ ($(di/dt)_{crit}$), становить $(10 \div 70)$ А/мкс (для гарантованого забезпечення неперевищення її допустимого значення послідовно з тиристором вмикають невелику індуктивність – захисний дросель).

4. Параметри кола керування – це значення постійного та імпульсного струмів та напруги кола керування при напрузі джерела у ньому 12 В (для потужних тиристорів $I_{кер}$, (I_G), становить $(0,3 \div 0,7)$ А, $U_{кер}$, (V_G), становить

(5 ÷ 7) В.

Слід зазначити, що тривалість імпульсу керування повинна бути більшою за час вмикання тиристора – зазвичай складає (15 ÷ 20) мкс для активного навантаження.

Вмикання звичайного тиристора здійснюється при подачі імпульсу струму у коло керування. На рисунку 2.14 наведені часові діаграми струму та напруги тиристора при його вмиканні. Час вмикання складається з часу затримки t_{gd} та часу наростання струму i_A . Час затримки визначається від моменту часу $t = t_0$ подачі струму керування i_G (на рисунку 2.14 цей імпульс має ідеально крутий фронт) до початку спаду напруги анод-катод тиристора u_{AC} до 10 % початкового значення.

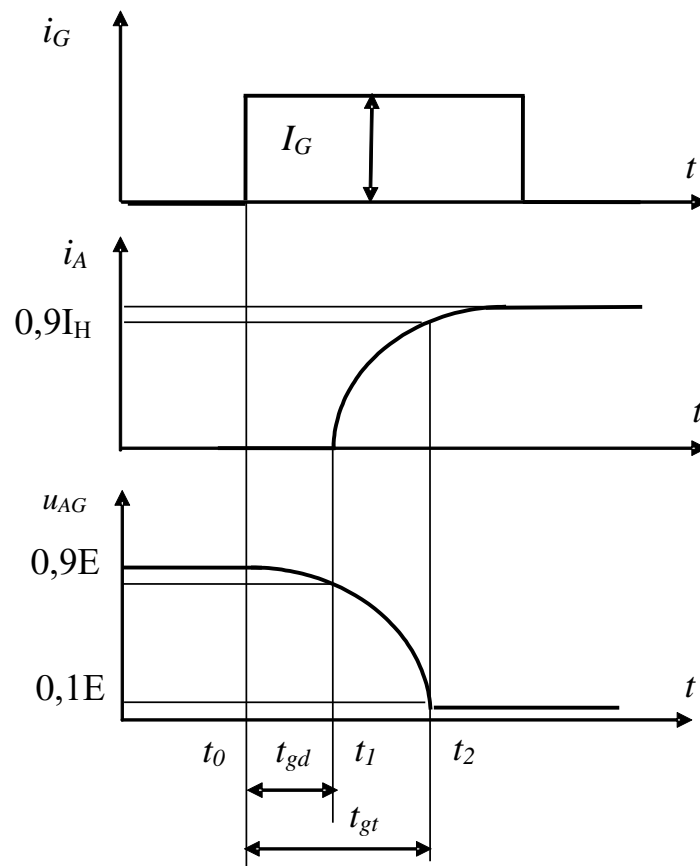


Рисунок 2.14 – Діаграми процесів вмикання тиристора

Наростання струму тиристора i_A закінчується у момент часу $t = t_2$, коли напруга u_{AC} спаде до 10 % початкового значення, а струм i_A досягне 90 % від сталого значення.

На тривалість перехідного процесу значний вплив має характер навантаження (активний, індуктивний та ін.), амплітуда та швидкість наростання імпульсу струму керування i_G , напруга, струм навантаження та температура. У колі, що містить тиристор, не повинно з'являтися недопустимих значень швидкості наростання прямої напруги du_{AC}/dt , при яких може відбуватися несанкціоноване вмикання тиристора при відсутності сигналу керування та швидкості наростання струму di_A/dt , при перевищенні якої струм аноду не встигає розповсюдитися по всьому об'єму кристалу тиристора, що викликає локально пропалювання структури.

Обидва ці параметри наводяться у паспортних даних конкретних тиристорів. У той же час крутизна фронту сигналу керування повинна бути високою.

Процеси вмикання тиристора та діода подібні. На рисунку 2.15 наведені часові діаграми вмикання тиристора під впливом зворотної напруги анод-катод u_{ACR} з подальшою дією прямої напруги анод-катод u_{ACF} .

На початку прямий струм знижується за визначеною параметрами комутуємого кола швидкістю di_A/dt до нуля. Потім йде процес зворотного відновлення за час t_{RR} , коли протікає зворотний струм відновлення i_{RR} . У подальшому відбувається рекомбінація надлишкових носіїв за час t_S .

Час вмикання – $t_q = t_{RR} + t_S$. Після закінчення цього часу тиристор спроможний витримувати у закритому стані пряму напругу, що наростає зі швидкістю du_{ACF}/dt , що не перебільшую допустиме значення. Якщо до тиристора буде прикладена пряма напруга u_{ACF} раніше часу t_S , то тиристор перейде у провідний стан без подачі імпульсу керування, що у більшості випадків призведе до збою у роботі схеми (несанкціоноване вмикання). На

час вимикання t_q впливають температура, швидкість спаду прямого струму та наростання прямої напруги та інші параметри [8].

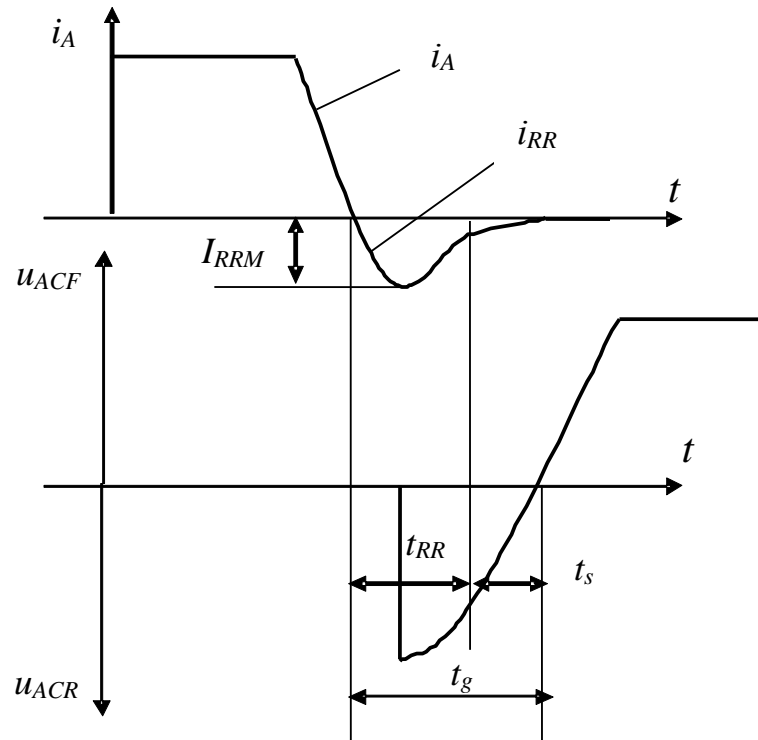


Рисунок 2.15 – Діаграми процесів вимикання тиристора

2.4. Перетворювальні пристрої в електроприводі постійного струму та їх експлуатаційні характеристики

На сьогодні ВП найбільш поширені в електроприводах, особливо в таких галузях, як металургія (насамперед у механізмах прокатних станів), машинобудування (верстати з числовим програмним керуванням та промислові роботи), електротранспорт (магістральний та міський). Окрім електропривода, вентильні перетворювачі досить широко використовуються: в електротехнології (електроліз, електрозварювання, електрохімічна та електрофізична обробка металів, сушіння деревини, термообробка та плавлення металів) [5].

Що стосується електроенергетики та електропостачання, то ВП знайшли своє застосування в таких напрямках:

- перетворювальні підстанції для електротранспорту;
- зарядні пристрої та джерела безперебійного живлення систем автоматики електричних станцій;
- лінії електропередач постійного струму та змінного струму нестандартної частоти;
- системи збудження турбо- та гідрогенераторів на електростанціях.

Робота напівпровідникових випрямлячів у складі електропривода має специфічні особливості, що зумовлені наявністю індуктивності та ЕРС в обмотках електричних машин, що може призвести до імпульсних перенапруг при перемиканні вентилів під навантаженням.

Також необхідно враховувати, що в електроприводах з регульованою швидкістю часто потрібна двобічна передача енергії, тобто можливість як передачі енергії від джерела до навантаження, так і від навантаження до джерела (наприклад, при гальмуванні електричної машини).

Регулювання вихідної напруги та частоти є основною вимогою для електроприводів, де потрібно забезпечити зміну швидкості двигуна в залежності від навантаження.

Електроприводи, як правило, мають навантаження, що змінюються у широких межах. Наприклад, на виробничих лініях чи у транспортних системах може бути необхідність змінювати швидкість обертання або зупиняти двигун під час перевантажень.

Враховуючи ці вимоги, важливо забезпечити можливість короткочасних перевантажень без шкоди для елементів електропривода.

Вентильні перетворювачі класифікують за різними критеріями, в залежності від їх конструкції, принципу дії та застосування. Основними типами перетворювачів електричної енергії є:

1. Випрямлячі

- в залежності від числа фаз напруги живлення розрізняють однофазні та трифазні випрямлячі;
- в залежності від умов роботи – однокітні або двокітні;

- в залежності від типу вентилів - тиристорні або діодні;
- по режиму роботи в залежності від виду навантаження: активне, активно-індуктивне, з проти-ЕРС, активно-ємнісне;
- за конфігурацією схеми: однофазний однопівперіодний, однофазний з середньою точкою, однофазний мостовий, трифазний з середньою точкою, трифазний мостовий, двійний трифазний з зрівняльним реактором.

2. Інвертори ведені мережею

- однофазний;
- однофазний з середньою точкою;
- трифазний з середньою точкою;
- трифазний мостовий;
- реверсивні: з перехресною схемою, зустрічно паралельна схема з зрівняльним реактором, зустрічно паралельна схема без зрівняльного реактора.

3. Широтно-імпульсні перетворювачі постійної напруги

- в залежності від типу вентилів: на повністю керованих вентилях (транзистори або двоопераційні тиристори), на тиристорах;
- за функціональними можливостями; нереверсивні та реверсивні;
- за характером роботи: паралельні та послідовні.

4. Широтно-імпульсні перетворювачі змінної напруги

- однофазні:
- трифазні:
- трансформаторні:
- без трансформаторні:
- з повним або частковим регулюванням потоку потужності;
- з природною або штучною комутацією.

5. Автономні інвертори

- за числом фаз: однофазні та трифазні;
- за конфігурацією схеми: з середньою точкою, мостові та напівмостові;

- за характером електромагнітних процесів: інвертори струму, інвертори напруги та резонансні інвертори.

Оскільки існує багато варіантів реалізації перетворювачів енергії, важлива можливість їх порівняння за показниками якості. Використовують різні критерії оцінки якості ВП як елементу електроенергетичного об'єкту. Його можна розглядати як: джерело живлення, елемент системи автоматичного керування та регулювання, як електротехнічний пристрій загального призначення. Розглядаючи ВП як споживача електричної енергії та як джерела живлення для інших електротехнічних пристроїв, на перший план виходять такі критерії [6]:

- ступінь наближення форми вихідної напруги (струму) до ідеальної (синусоїдної для ВП змінного струму та гладкої, з мінімумом пульсацій, для ВП постійного струму);

- ступінь ідеальності форми споживаного з мережі струму;

- коефіцієнт потужності;

- спотворення форми вихідної напруги.

Не ідеальність параметрів електроенергії збільшує втрати енергії у споживачів та викликає такі негативні явища в електроприводі як коливання моменту та частоти обертання двигунів, впливає на лінійність та жорсткість зовнішніх характеристик.

Для ВП як елемента системи автоматичного керування більш характерні такі критерії:

- швидкодія (здатність відпрацювання зміни в системі без порушення законів керування при наявності впливів, що швидко змінюються);

- діапазон регулювання вихідних параметрів: напруги, струму, частоти;

- завадостійкість (відсутність істотних коливань вихідних параметрів, здатних порушити роботу системи автоматичного керування або регулювання);

- лінійність регулювальних характеристик, яка забезпечує якість роботи системи.

І нарешті, як для будь якого електротехнічного, так і для перетворювального пристрою мають важливе значення критерії загального характеру:

- габарити та маса;
- вартість;
- надійність;
- рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- ремонтпридатність та простота обслуговування;
- шум та вібрації.

Одними з найпоширеніших перетворювальних пристроїв у складі промислового обладнання, в тому числі і в енергетичній галузі, є випрямлячі.

Випрямлячі – це електротехнічні пристрої, призначені для перетворення енергії джерела напруги змінного струму в енергію напруги постійного струму. Для надійної роботи споживачів постійного струму необхідно щоб випрямлячі виконували перетворення напруги змінного струму стандартного значення у напругу постійного струму необхідного значення. Таким чином до складу випрямляча крім вентильної схеми повинні входити трансформатор, згладжувальний фільтр та система стабілізації або регулювання напруги [9].

Робота випрямляча фактично полягає у тому, що навантаження за допомогою ключів так підключається до джерела енергії напруги змінного струму, щоб за час кожного півперіоду його напруги (додатного і від'ємного) струм у навантаженні протікав у одному напрямку. Виходячи з цього, найважливішим вузлом випрямляча є вентильна схема – схема випрямлення.

Найширшого розповсюдження набули схеми випрямлячів, зображені на рисунку 2.16. Виходячи з того, що в якості вентилів, які показані на схемах використано діоди – маємо некеровані випрямлячі. Але, якщо їх замінити тиристорами, отримаємо схеми керованих випрямлячів.

Розрахунок випрямлячів зводиться до застосування аналітичних виразів, що зв'язують відомі параметри напруги і навантаження з невідомими

параметрами, які характеризують роботу вентиляційної схеми. На підставі цього робиться вибір типу вентилів для конкретної схеми випрямляча та розрахунок його вузлів.

На рисунку 2.16 *а, б, г* приведені схеми однофазних випрямлячів, на рисунку 2.16 *в, д* – схеми трифазних випрямлячів.

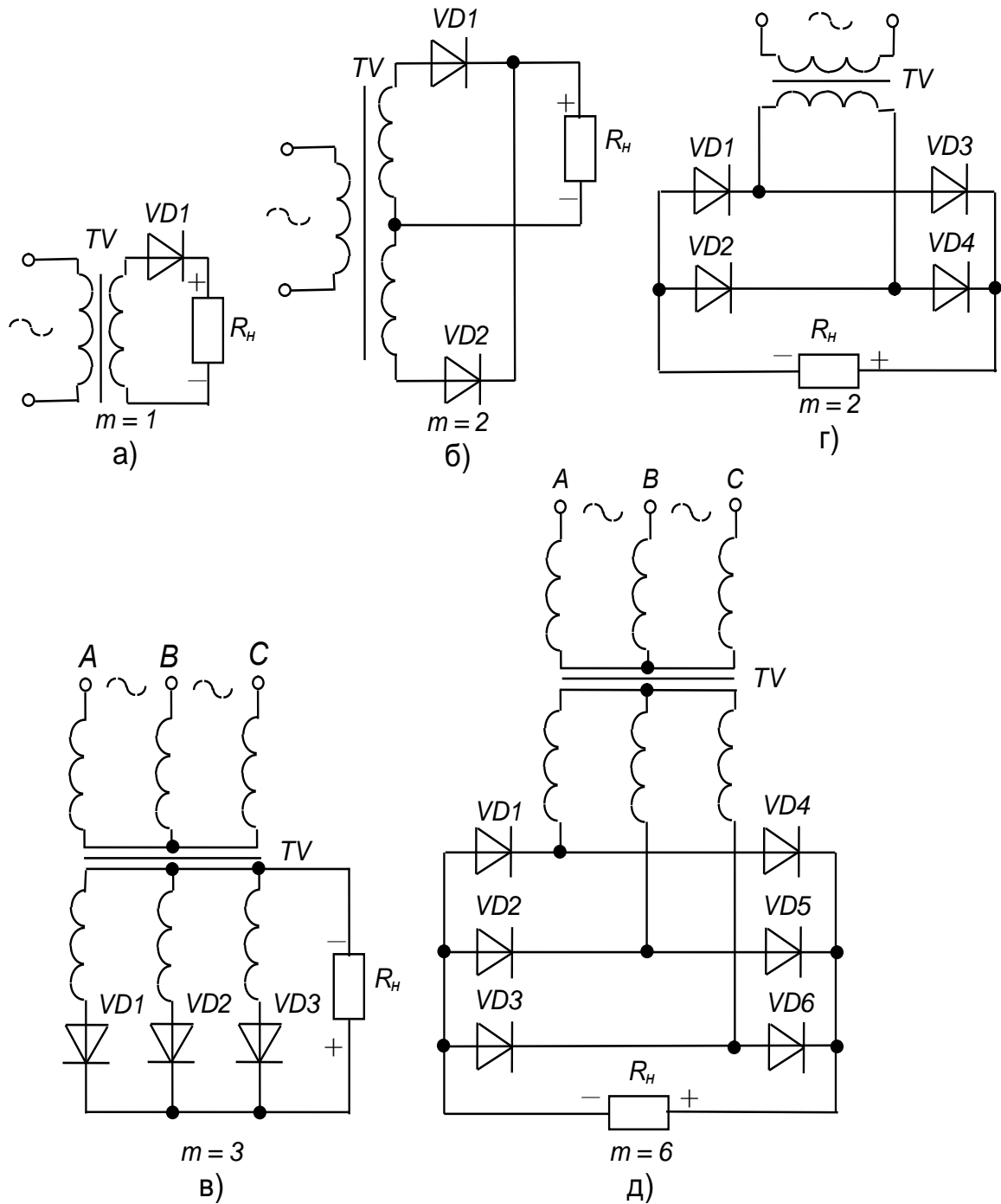


Рисунок 2.16 – Схеми випрямлячів змінного струму

Найпростішою є схема однофазного однопівперіодного випрямляча (рисунок 2.16 а), робота якого полягає у тому, що протягом одного півперіоду напруги мережі навантаження підключається через діод V_{D1} до вторинної обмотки трансформатора, а протягом другого півперіоду відімкнене від неї. Показники якості вихідної напруги та інші у цього випрямляча вкрай низькі. Тому його застосовують дуже рідко.

Розглянемо експлуатаційні параметри та характеристики випрямлячів.

1. Одними з основних експлуатаційних параметрів випрямляча є середня напруга на навантаженні U_d та середній струм навантаження I_d .

Ці два параметри є важливими для проектування та експлуатації випрямлячів, оскільки вони визначають, чи зможе випрямляч ефективно живити навантаження в межах допустимих значень струму та напруги.

Тоді опір навантаження становить

$$R_n = \frac{U_d}{I_d},$$

а його потужність

$$P_n = U_d I_d.$$

2) Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $K_n = \frac{U_{m(1)}}{U_d}$,

де $U_{m(1)}$ - амплітудне значення основної гармоніки випрямленої напруги при розвиненні останньої у ряд Фур'є.

3) Зовнішня (навантажувальна) характеристика $U_d = f(I_d)$.

4) Регульовальна характеристика $U_d = f(\alpha)$, де α - кут керування тиристорів (лише для керованих випрямлячів).

5) Середнє значення струму через вентиль I_a .

6) Амплітудне значення струму через вентиль I_{am} .

7) Амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається до вентиля $U_{\text{вм}}$.

8) Коефіцієнт корисної дії η .

9) Надійність.

Правильний вибір схеми випрямляча та вентилів залежить від ряду факторів, серед яких: експлуатаційні характеристики випрямляча, параметри, що визначають вибір вентилів, тип вентилів [9].

Основні режими роботи випрямлячів:

- на активне навантаження (R);
- на активно-індуктивне навантаження (RL);
- на активно-ємнісне навантаження (RC);
- на протиелектрорушійну силу – проти-ЕРС (E) – наприклад, коли випрямляч використовують для заряду акумуляторної батареї або для живлення двигуна постійного струму.

Для живлення малопотужних споживачів постійного струму зазвичай застосовують однофазні випрямлячі з двопівперіодним випрямленням.

Розглянемо роботу однофазного двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом, схема якого зображена на рисунку 2.17.

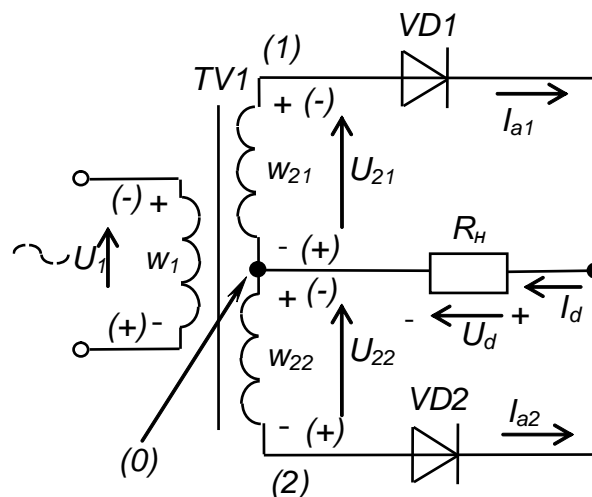


Рисунок 2.17 – Схема однофазного випрямляча з нульовим виводом

За схемою він являє собою два однопівперіодних випрямляча, які

підключені до навантаження паралельно. Вторинна обмотка його трансформатора має вивід від її середини - нульовий вивід (0). Тобто вона складається з двох півобмоток, кількості витків яких однакові: $w_{21}=w_{22}=w_2$. Тоді напруги, що в них трансформуються, відносно нульової точки також однакові, але протилежні за фазою, тобто $|u_{21}| = |u_{22}|$.

Коефіцієнт трансформації трансформатора становить $n = w_1 / w_2$ де w_1 , w_2 - кількість витків первинної та половини вторинної обмоток відповідно.

Робота схеми проходить у такій послідовності.

За позитивної полярності напруги на обмотці w_{21} у провідному стані знаходиться діод $VD1$ і через нього тече струм $i_{a1} = \frac{u_{21}}{R}$ (прямим спадом напруги на діоді нехтуємо – вважаємо його за ідеальний).

На навантаженні з'являється позитивна півхвиля напруги. Діод $VD2$ при цьому закритий зворотною напругою $u_{zв} = 2u_2 (|u_2| = |u_{21}| = |u_{22}|)$ - зі схеми видно, що при цьому анодом він підключений до точки (2), а катодом через діод $VD1$ (замкнутий ключ) до точки (1).

За негативної півхвилі напруги (на рисунку 2.17 - у дужках) у провідному стані знаходиться діод $VD2$. Через нього тече струм $i_{a2} = \frac{u_{22}}{R}$, діод $VD1$ закритий подвійною зворотною напругою $2u_2$.

Таким чином, за час періоду напруги мережі струм через навантаження протікає у одному напрямку і безперервно. Досягається це в два прийоми, у один з яких навантаження через перший діод підключається до першої півобмотки трансформатора, у другий – через другий діод підключається до другої півобмотки.

Роботу цього випрямляча ілюструють часові діаграми, зображені на рисунку 2.18.

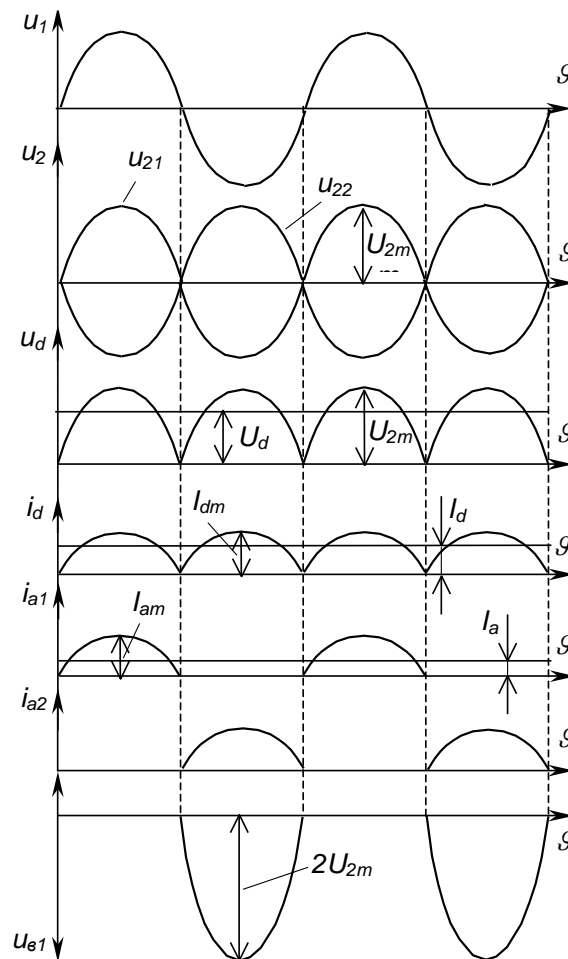


Рисунок 2.18 – Схема однофазного випрямляча з нульовим виводом

При розрахунку випрямляча вихідними даними є:

I_d , U_d , U_1 (напруга мережі),

$$R_n = \frac{U_d}{I_d}, \quad P_d = U_d I_d, \quad f_m.$$

Треба визначити:

- 1) параметри схеми, необхідні для вибору діодів - I_a , I_{am} , $U_{см}$;
- 2) параметри, необхідні для вибору (розрахунку) трансформатора - U_2 , I_1 (струм первинної обмотки), I_2 (струм вторинної обмотки), n , S_T (габаритна потужність трансформатора);
- 3) параметри, необхідні для розрахунку фільтра.

Зробимо припущення:

- 1) діод ідеальний: його опір у відкритому стані $R_{np}=0$, а у закритому

$$R_{3\phi} = \infty;$$

2) опір обмоток трансформатора дорівнює нулю.

Тоді матимемо такі формули для розрахунку:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9U_2; \quad \vartheta = 2\pi f_m t = \omega t \quad (2.1)$$

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = 1,11U_d \quad (2.2)$$

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{1,11U_d} \quad (2.3)$$

$$I_a = \frac{I_d}{2}; \quad I_{am} = I_d \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{2} = \frac{\pi}{2} I_d = 1,57I_d \quad (2.4)$$

$$U_{\text{см}} = 2\sqrt{2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = \pi U_d \quad (2.5)$$

Знаючи значення I_a , I_{am} та $U_{\text{см}}$, обирають тип діода, параметри якого перевищують отримані розрахункові.

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(I_d \frac{\pi}{2}\right)^2 \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_d \pi}{2\sqrt{2}} = I_d \frac{\pi}{4}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$I_1 = \frac{I_d \frac{\pi}{2\sqrt{2}}}{n} = 1,11 \frac{I_d}{n}. \quad (2.7)$$

Габаритна потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}, \quad (2.8)$$

де S_1 - потужність первинної обмотки трансформатора;

S_2 - потужність вторинної обмотки трансформатора.

$$S_1 = I_1 U_1 = 1,11 \frac{I_d}{n} U_1 = 1,11 \frac{I_d}{n} U_2 n = 1,11 I_d 1,11 U_d = 1,23 I_d U_d = 1,23 P_d; \quad (2.9)$$

$$S_2 = 2I_2U_2 = 2I_d \frac{\pi}{4} 1,11U_d = 1,74I_dU_d = 1,74P_d; \quad (2.10)$$

$$S_T = \frac{1,23P_d + 1,74P_d}{2} = 1,48P_d = 1,48I_dU_d. \quad (2.11)$$

Бачимо, що S_T перевищує P_d у півтора рази. Це в основному тому, що півобмотки трансформатора працюють не безперервно, а по черзі через кожні півперіоду.

За величинами S_T , I_1 , I_2 , n , U_2 вибирається стандартний трансформатор або розраховується спеціальний.

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги:

$$K_n = \frac{U_{m(1)}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,67 \quad (2.12)$$

де $U_{m(1)} = \frac{2U_d}{m^2 - 1}$, бо, згідно з розвиненням у ряд Фур'є, амплітуда i -тої

гармоніки становить:

$$U_{m(i)} = \frac{2U_d}{(mi)^2 - 1}. \quad (2.13)$$

Знаючи K_n , можна розрахувати згладжувальний фільтр.

Розглянемо роботу однофазного мостового випрямляча [9]. Схема випрямляча приведена на рисунку 2.19.

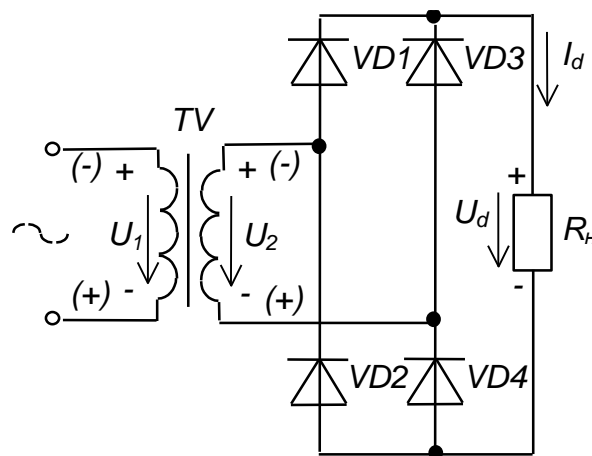


Рисунок 2.19 – Схема однофазного мостового випрямляча

Випрямляч складається з трансформатора, що має одну вторинну обмотку, та чотирьох випрямних діодів, з'єднаних у мостову схему.

Мостова схема містить дві групи діодів. Діоди $VD1$, $VD3$ складають катодну групу, $VD2$, $VD4$ – анодну (за назвою з'єднаних між собою електродів). При цьому в одну діагональ моста (діагональ постійного струму) увімкнено навантаження, а до другої діагоналі (діагоналі змінного струму) підключена вторинна обмотка трансформатора.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди - один із анодної і один із катодної груп.

За полярності напруги первинної обмотки, вказаної без дужок, це діоди $VD1$, $VD4$, а діоди $VD2$, $VD3$ при цьому закриті. За полярності, вказаної у дужках – навпаки. Через навантаження струм завжди тече у одному напрямку.

Часові діаграми роботи випрямляча зображені на рисунку 2.20.

Для цієї схеми придатні практично усі розрахункові співвідношення однофазного випрямляча з нульовим виводом за винятком:

$$U_{вт} = \frac{\pi}{2} U_d;$$

$$I_2 = 1,11 I_d;$$

$$S_T = 1,23 P_d.$$

Як бачимо амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається до вентилля та потужність вторинної обмотки трансформатора менші ніж у попереднього випрямляча.

Аналізуючи схеми обох вищерозглянутих випрямлячів, можна зазначити деякі переваги мостового випрямляча порівняно з випрямлячем з нульовим виводом. Зокрема те, що за однакових U_d зворотна максимальна напруга на діоді у два рази нижча, краще використовується потужність трансформатора, простіша його конструкція.

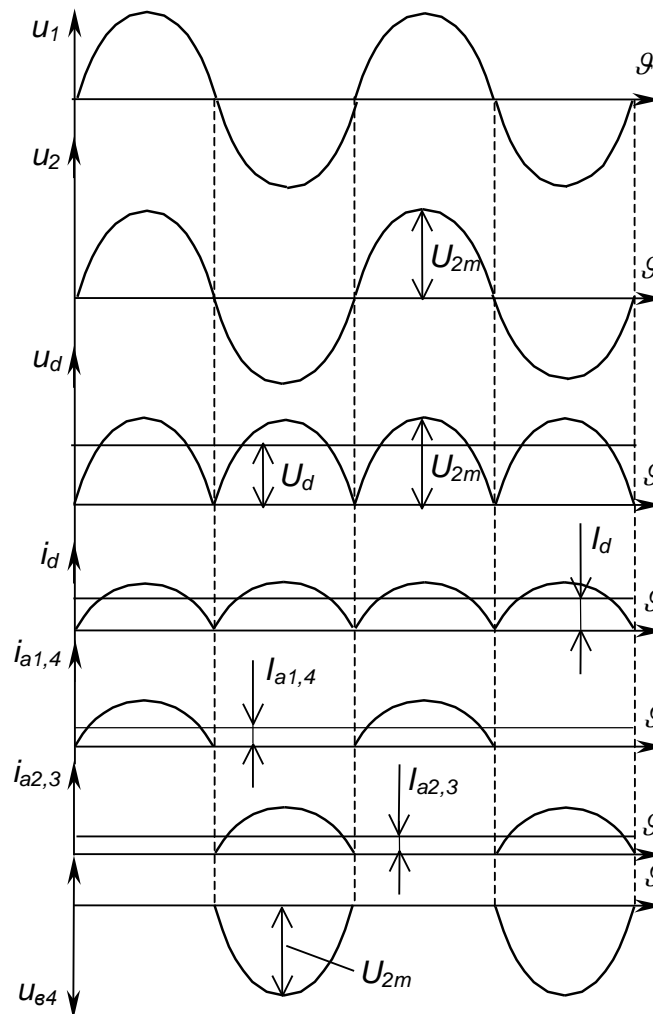


Рисунок 2.20 – Часові діаграми роботи однофазного мостового випрямляча

Недоліком мостової схеми є подвійна кількість випрямних діодів, що, як правило, несуттєво завдяки незначним габаритам діодів та їхній відносно низькій вартості.

Тільки при випрямленні малих напруг (до 10 В) важливим є те, що у мостовій схемі струм завжди протікає через два діоди, а у схемі з нульовим виводом через один. Тому тут падіння на ключах (до одного вольт на одному діоді) у два рази менше: маємо більший к.к.д.

Для живлення електроенергетичного обладнання середньої та великої потужності зазвичай використовують трифазні випрямлячі. У порівнянні з однофазними вони мають ряд переваг:

- краще використовуються вентиляції за струмом;

- суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій;
- ефективне використання габаритної потужності трансформатора;
- більш ефективне використання згладжувальних фільтрів.

До мережі трифазні випрямлячі підключаються через трифазні трансформатори, обмотки яких вмикаються зіркою або трикутником. На практиці частіш за все обмотки трансформаторів з'єднуються зіркою.

Найбільш поширеними серед трифазних випрямлячів є два типи схем:

- однопівперіодна з нульовим виводом (схема Міткевича);
- двопівперіодна мостова (схема Ларіонова).

Розглянемо однопівперіодну схему з нульовим виводом (схему Міткевича) [8], зображену на рисунку 2.21.

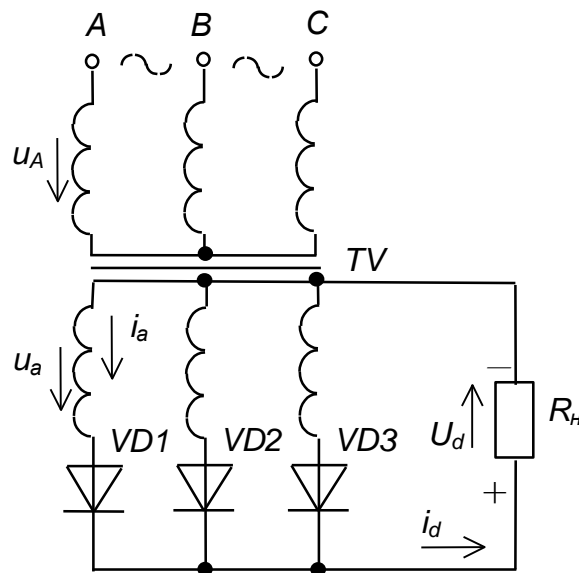


Рисунок 2.21 – Схема трифазного випрямляча
з нульовим виводом

Ця схема складається із трифазного трансформатора VT , випрямних діодів $VD1$ - $VD3$ та навантаження R_n , що вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів.

Фактично ця схема являє собою три однофазних однопівперіодних випрямлячі, увімкнені паралельно. Тому первинні обмотки трансформатора можуть з'єднуватись як зіркою, так і трикутником (забезпечуючи, наприклад, підключення до мережі з фазною напругою 220 чи 127 вольт), а вторинні – лише зіркою.

Випрямні діоди працюють по черзі. За період напруги живлення кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду, причому проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільша позитивна фазна напруга. Роботу схеми трифазного випрямляча з нульовим виводом ілюструють часові діаграми, наведені на рисунку 2.22.

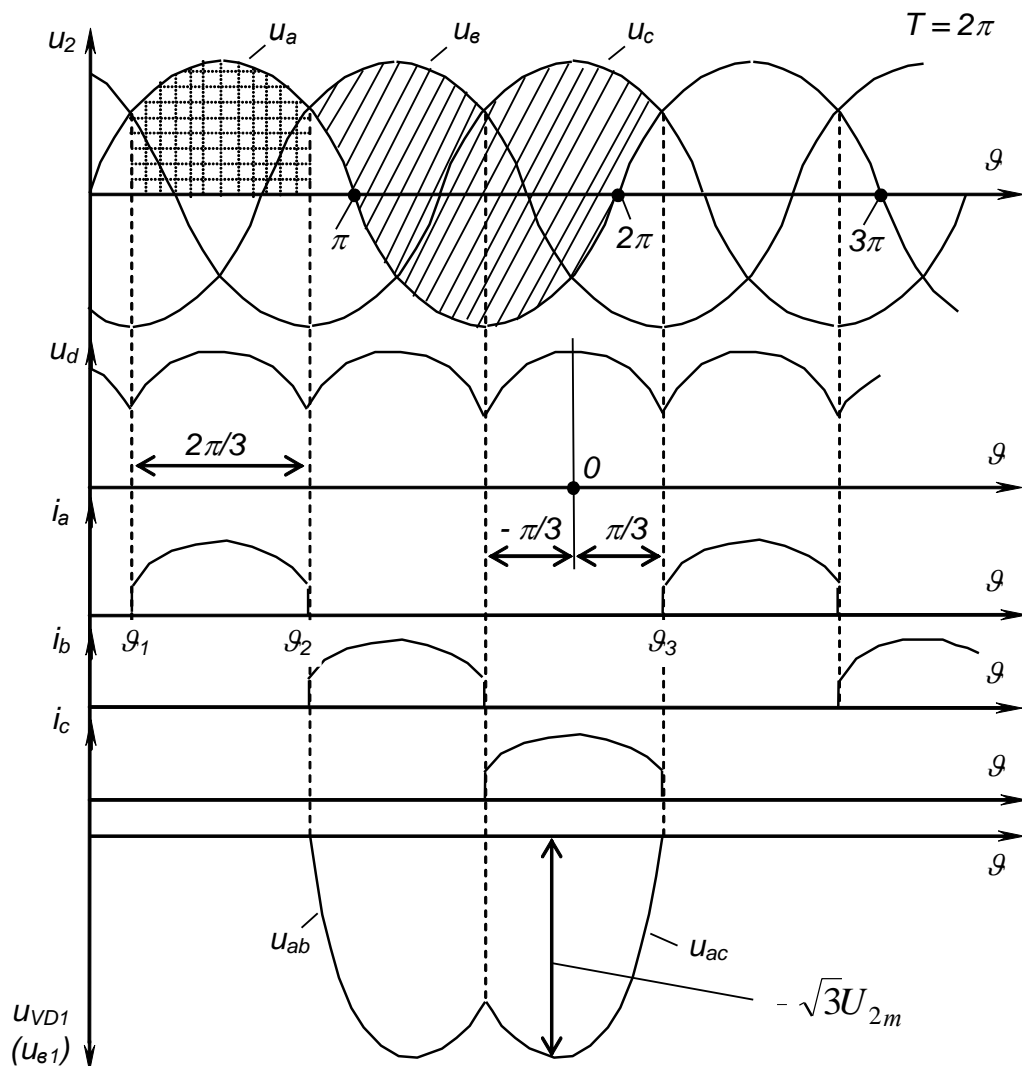


Рисунок 2.22 – Часові діаграми роботи трифазного випрямляча з нульовим виводом

Як впливає із діаграм, наприклад, на інтервалі $\vartheta_1 - \vartheta_2$ найбільша позитивна напруга є на вторинній обмотці фази трансформатора a , тому у провідному стані тут знаходиться діод $VD1$. Зате на інтервалі $\vartheta_2 - \vartheta_3$ він закритий лінійною напругою u_{ab} або u_{ac} (даний інтервал відповідає заштрихованій скісними лініями ділянці діаграми u_2): анод має потенціал фази u_a , а катод – потенціал фази, що знаходиться у провідному стані - u_b або u_c .

Виведемо основні розрахункові співвідношення для схеми на рисунку 2.21, для чого розглянемо діаграму напруги на навантаженні u_d на інтервалі $(-\pi/3) \div 0 \div (+\pi/3)$.

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} \sqrt{2} U_{2\phi} \cos \vartheta d\vartheta = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \sqrt{3} = 1,17 U_{2\phi}$$

де $U_{2\phi}$ - фазна напруга вторинної обмотки трансформатора.

Фазна напруга вторинної обмотки трансформатора

$$U_{2\phi} = 0,85 U_d$$

Максимальна напруга на діоді:

$$U_{em} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\phi} = 2,45 U_{2\phi}$$

Середнє значення струму через діод:

$$I_a = \frac{I_d}{3}$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$n = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1\phi}}{0,85 U_d}$$

де $U_{1\phi}$ - фазна напруга первинної обмотки трансформатора.

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (при $m=3$):

$$k_n = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,25$$

$$S_T = 1,35P_d$$

У даній схемі частота пульсації випрямленої напруги втричі перевищує частоту мережі, що є її характерною рисою.

Недоліки схеми:

1. Наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора. Це пов'язано з тим, що схема належить до одноктних.

У таких схемах струм у вторинній обмотці трансформатора протікає лише один раз за період і завжди в одному напрямку. Внаслідок цього з'являється постійна складова струму, яка викликає підмагнічування магнітопроводу.

2. Необхідність у трансформаторі з більшим перерізом магнітопроводу:

Для компенсації підмагнічування потрібен трансформатор із збільшеним перерізом осердя. Це підвищує встановлену потужність трансформатора та його вартість.

Хоча схема дозволяє досягти вищої частоти пульсації випрямленої напруги, її недолік у вигляді постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора вимагає використання більш потужних і дорогих трансформаторів. Це обмежує її ефективність у порівнянні з альтернативними схемами випрямлення.

Потік вимушеного підмагнічування може бути виключено введенням додаткових обмоток (тобто ускладненням трансформатора) на вторинній стороні та з'єднанням вторинних обмоток за спеціальними схемами. Однак кращі результати дає застосування трифазної мостової схеми. Вона не має потоку вимушеного підмагнічування і має ряд інших переваг у зрівнянні з трифазною схемою з нульовим виводом.

Розглянемо трифазну мостову схему (схему Ларіонова) [8], яка представлена на рисунку 2.23.

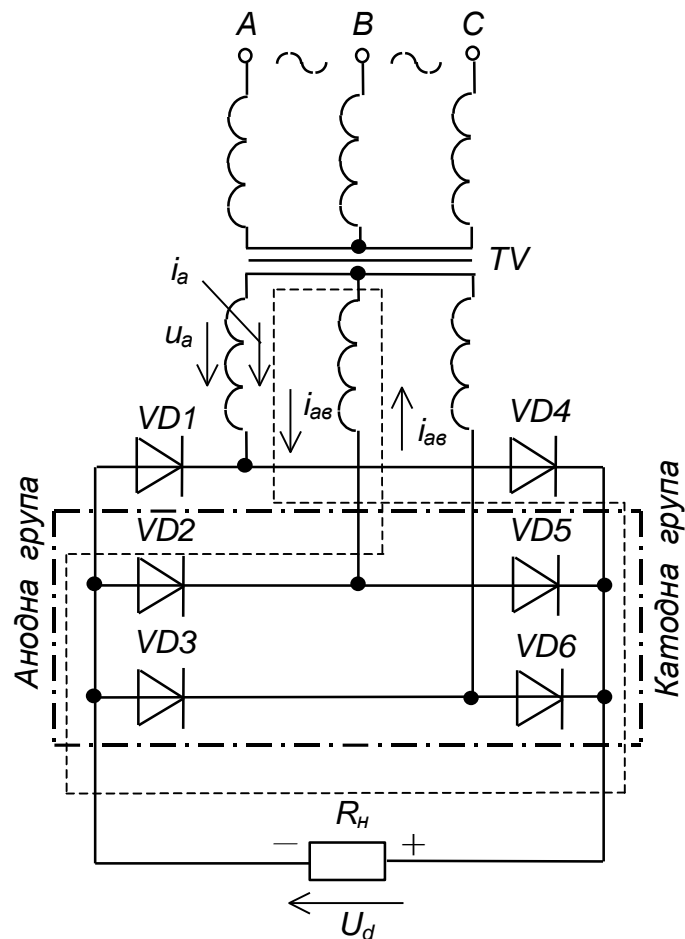


Рисунок 2.23 – Схема трифазного мостового випрямляча

У цій схемі і первинна, і вторинна обмотки трансформатора можуть вмикатися як зіркою, так і трикутником. Можливість вмикання вторинної обмотки двома способами забезпечує можливість отримання двох різних вихідних напруг випрямляча, значення яких відрізняються у $\sqrt{3}$ раз.

Надалі будемо розглядати схему при вмиканні первинних і вторинних обмоток у зірку.

Тут шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему, утворюють дві групи: анодну – $VD1, VD2, VD3$ та катодну – $VD4, VD5, VD6$.

Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів. Можна виділити три однофазних мости, підключених до лінійних (у даному разі) вторинних напругі паралельно до навантаження.

Один із таких мостів на схемі обведено штрих-пунктирною лінією.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди: один із анодної групи і один з катодної. Причому струм в схемі протікає від фази з найбільш позитивною на даний момент напругою до фази з найбільш негативною напругою, як, наприклад, струм i_{a6} у момент часу, що відповідає ϑ_1 , показаний на часових діаграмах, які ілюструють роботу схеми і наведені на рисунку 2.24.

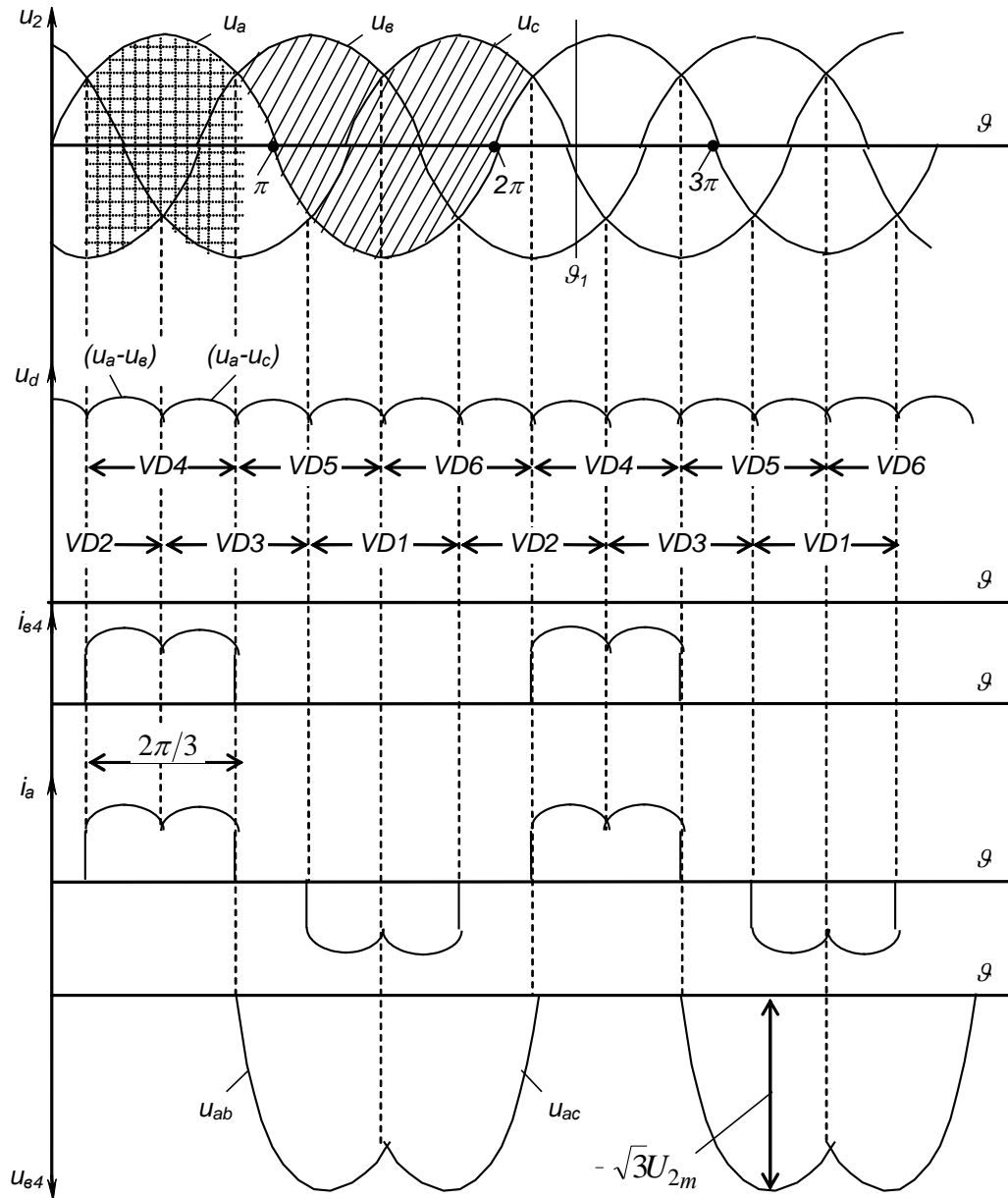


Рисунок 2.24 – Часові діаграми роботи схеми трифазного мостового випрямляча

На діаграмі u_d також вказано проміжки, на яких у провідному стані знаходяться відповідні діоди.

Час протікання струму через кожний із діодів відповідає $2\pi/3$. Струм навантаження в даній схемі визначається лінійною напругою. Часова діаграма випрямленої напруги приведена на рисунку 2.25.

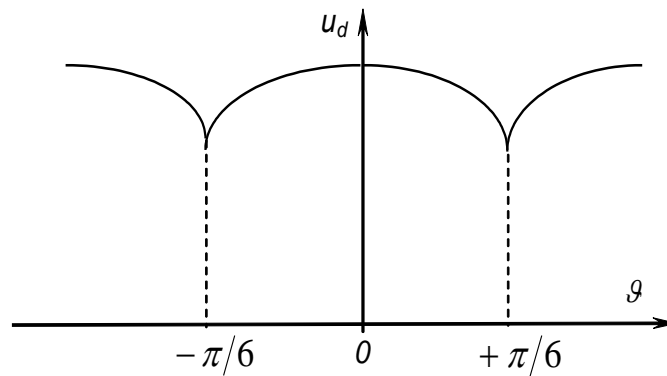


Рисунок 2.25 – Часова діаграма випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча

Аналізуючи часову діаграму, отримаємо основні розрахункові залежності

$$U_d = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} \sqrt{3}\sqrt{2}U_{2\phi} \cos \vartheta d\vartheta = 2,34U_{2\phi}$$

$$U_{2\phi} = 0,425U_d$$

$$U_{sm} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_{2\phi}$$

$$I_a = \frac{I_d}{3}$$

$$K_n = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{35} \approx 0,057$$

Коефіцієнт пульсацій визначено для $m = 6$. Тому частота пульсації випрямленої напруги перевищує частоту мережі у шість разів.

Встановлена потужність трансформатора:

$$S_T = 1,05P_d.$$

У схемі Ларіонова підмагнічування магнітопроводу трансформатора відсутнє, оскільки у вторинному колі кожної обмотки струм протікає двічі за період напруги мережі, причому у різних напрямках (див. діаграму на рисунку 2.24).

Переваги схеми Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича:

1. Вищий середній рівень випрямленої напруги

За рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги в схемі Ларіонова вдвічі вище. Це дозволяє використовувати меншу кількість витків у вторинних обмотках трансформатора, що спрощує його конструкцію.

2. Низький коефіцієнт пульсацій

Коефіцієнт пульсацій менше 6%, що дозволяє у багатьох випадках обходитися без додаткових фільтрів.

3. Краще використання потужності трансформатора

Відсутність підмагнічування осердя підвищує ефективність використання трансформатора, зменшуючи його втрати та розміри.

Особливості: схема Ларіонова потребує вдвічі більше діодів, ніж схема Міткевича; однак на сучасному етапі це не є суттєвою проблемою, оскільки діоди є відносно дешевими; навпаки, вартість трансформатора, що використовується у схемі Міткевича, може бути на 40% більшою через необхідність збільшення його потужності.

Схема Ларіонова забезпечує кращі техніко-економічні показники у більшості випадків завдяки підвищеній ефективності, зниженню вимог до фільтрації пульсацій та оптимальному використанню трансформатора. Використання більшої кількості діодів є виправданим, оскільки це незначно впливає на загальну вартість конструкції.

У складі випрямлячів широко застосовують зглажувальні фільтри, які використовуються для зниження рівня пульсації випрямленої напруги до такого, що забезпечує нормальну роботу навантаження [9].

Найширше використання мають пасивні згладжувальні фільтри, що будуються на реактивних елементах, які мають властивість накопичувати електричну енергію - дроселях і конденсаторах. Кількість накопиченої енергії відповідно становить

$$W_L = \frac{LI^2}{2}; \quad W_C = \frac{CU^2}{2}.$$

Індуктивний фільтр – це дросель, який підключається послідовно з навантаженням. Його основна функція полягає у фільтрації змінних складових струму. Він разом із навантаженням утворює частотно-залежний дільник напруги. Ефект фільтрації досягається за умови, що опір дроселя ωL для змінної складової струму з найнижчою частотою значно перевищує активний опір навантаження R_H .

Ємнісний фільтр – це конденсатор, який підключається паралельно до навантаження. Його основне призначення – зменшення змінних складових напруги. Конденсатор забезпечує шунтування змінного струму, зменшуючи його вплив на навантаження. Для досягнення ефекту фільтрації опір конденсатора $1/\omega C$ для складових пульсуючого струму з найнижчою частотою повинен бути значно меншим за активний опір навантаження R_H .

Порівняльні характеристики фільтрів приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння фільтрів

Характеристика	Індуктивний фільтр	Ємнісний фільтр
Підключення	Послідовно навантаженням	Паралельно до навантаження
Робота з постійною складовою	Не впливає на постійну напругу	Не впливає на постійний струм
Фільтрація змінної складової	Згладжує струм	Згладжує напругу
Ефективність фільтрації	$\omega L \gg R_H$	$1/\omega C \ll R_H$

Схеми цих фільтрів зображені на рисунку 2.26.

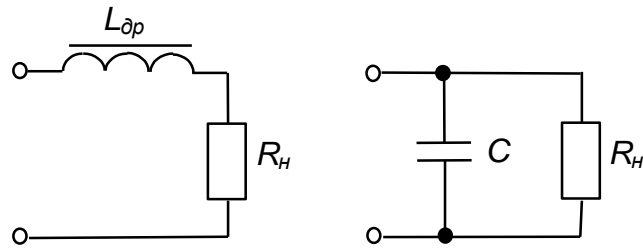


Рисунок 2.26 – Індуктивний та ємнісний фільтри

Поряд із простими фільтрами використовуються складні, що являють собою сполучення певним чином увімкнених дроселів та конденсаторів.

Найширшого використання набули Г-подібні LC -фільтри (одноланкові або багатоланкові), зображені на рисунку 2.27.

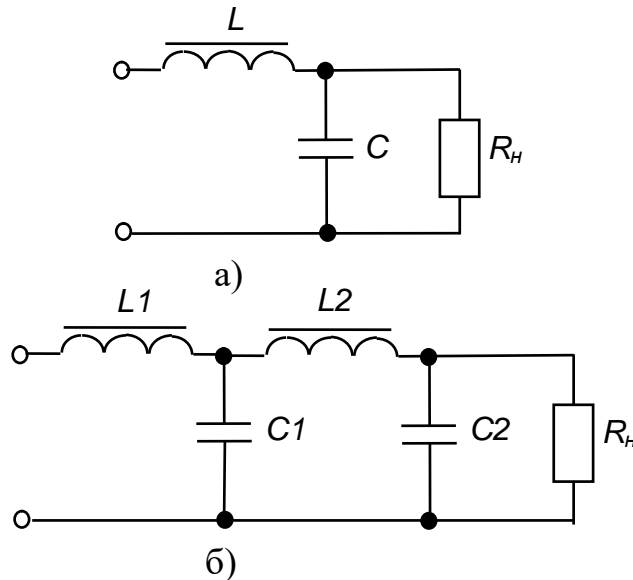


Рисунок 2.27 – Г-подібні LC -фільтри, а) одноланковий, б) дволанковий

На рисунку 2.28 зображена схема П-подібного LC -фільтра.

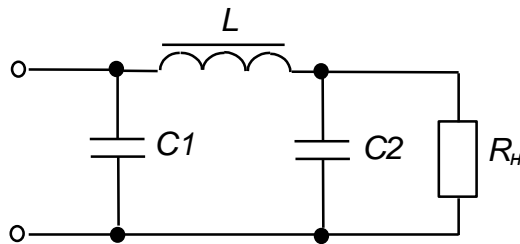


Рисунок 2.28 – П-подібний LC -фільтр

Фільтри можуть мати індуктивні або ємнісні входи, залежно від того який елемент фільтру підключено до виходу вентиляційної схеми.

Ефективність роботи фільтра визначається коефіцієнтом згладжування:

$$K_{зг} = \frac{K_{вх}}{K_{вих}},$$

що показує, наскільки зменшується пульсація на виході фільтра $K_{вих}$ відносно пульсації на його вході $K_{вх}$.

При застосуванні фільтрів необхідно враховувати властивості елементів, які входять до їх складу та їх характеристики при різних умовах експлуатації. Розглянемо деякі особливості роботи фільтрів у складі пристроїв перетворювальної техніки.

Так ємнісний фільтр відзначається своєю простотою і дешевизною. Проте у нього, як наслідок переривчастого струму заряду конденсатора, присутнє імпульсне перевантаження за струмом вентилів і обмоток трансформатора у робочому режимі випрямляча.

Імпульсне споживання струму від мережі живлення додає гармонічні складові в електричну мережу. Це створює необхідність використання додаткових входних фільтрів, які забезпечують електромагнітну сумісність споживачів, знижуючи взаємні завади.

Ємнісні фільтри зазвичай використовуються для малопотужних випрямлячів, оскільки вони компактні та економічні. Проте у випадку потужних випрямлячів їх використання є недоцільним через обмежену здатність підтримувати електромагнітну сумісність.

Індуктивні фільтри, хоч і громіздкі та дорогі, забезпечують безперервність струму, що споживається з мережі, і автоматично відповідають вимогам електромагнітної сумісності. Втім, ці фільтри мають недолік: у режимах різких змін навантаження (наприклад, при раптовому вмиканні чи вимиканні його частини) виникають перехідні процеси.

Проблеми індуктивного фільтра:

1. Перехідні процеси: згідно з першим законом комутації струм через індуктивність не може змінюватись стрибкоподібно. Тому при вмиканні навантаження спостерігається провал напруги, доки дросель накопичує енергію. При вимиканні має місце різке зростання напруги, оскільки дросель витрачає накопичену енергію, намагаючись підтримувати незмінний струм.

2. Різкі зміни напруги можуть спричинити збої у роботі навантаження або навіть його вихід з ладу через перенапругу.

Для запобігання цим явищам доцільно використовувати Г-подібний фільтр, який об'єднує переваги індуктивних та ємнісних компонентів:

1. Конденсатор зменшує провали та викиди напруги, оскільки, відповідно до другого закону комутації, напруга на ньому змінюється плавно.

2. Завдяки цьому вихідна напруга залишається більш стабільною, що покращує загальну ефективність роботи фільтра та знижує ризики для підключеного навантаження.

Таким чином, враховуючи результати проведеного аналізу особливостей застосування перетворювальних пристроїв у складі електрообладнання енергетичної галузі, можна зробити певні висновки, вказавши на переваги та недоліки силових вентильних перетворювачів [9].

Переваги вентильних перетворювачів [5]:

1. Висока швидкодія – швидке реагування на зміни умов роботи.

2. Широкий діапазон регулювання – можливість точного налаштування напруги та частоти.

3. Високий коефіцієнт корисної дії (ККД) – ефективне перетворення енергії з мінімальними втратами.

4. Безконтактність – відсутність механічного зносу елементів.

5. Мінімальний рівень шуму та вібрацій – забезпечує комфортну експлуатацію.

6. Відсутність потреби у фундаменті – зменшує витрати на монтаж і спрощує встановлення.

Недоліки вентильних перетворювачів:

1. Вищі гармоніки в споживаному струмі – знижують якість електроенергії, що споживається з мережі, та призводять до низького коефіцієнта потужності (особливо у перетворювачах з фазово-імпульсною модуляцією).

2. Неідеальна форма вихідної напруги та струму – може впливати на якість живлення підключеного обладнання.

3. Генерація електромагнітних завад – вимагає заходів для забезпечення електромагнітної сумісності.

4. Високі вимоги до кваліфікації персоналу – потреба у спеціалізованих знаннях для обслуговування та ремонту.

Тому для удосконалення параметрів та характеристик елементів перетворювальної техніки і забезпечення умов електромагнітної сумісності перетворювачів і споживачів енергетичної галузі необхідне підвищення рівня професійної підготовки фахівців шляхом розробки методичного забезпечення для проведення поточного контролю з дисципліни «Перетворювальна техніка енергетичних систем».

При аналізі електромагнітних процесів в схемах випрямлячів, які працюють у сукупності з електричними машинами, необхідно дотримуватись наступних принципів.

При практичному використанні випрямлячів в системах електроприводу постійного струму навантаження (коло якоря електричного двигуна) містить проти-ЕРС. Якщо в якості обмежувачого елементу, який обмежує пульсуючий струм застосовується резистор, то при постійній проти-ЕРС в колі навантаження випрямляч слід розглядати як такий що працює на активно-ємнісне навантаження з конденсатором великої ємності.

Коли для згладжування струму в колі навантаження з проти-ЕРС використовується індуктивність, то розрахунок випрямляча необхідно проводити з урахуванням пульсацій струму в навантаженні.

В багатофазних випрямлячах (схема Міткевича), які живлять коло якоря двигуна постійного струму, тобто коло з проти-ЕРС, необхідно розрізнити два режими роботи кола навантаження:

- режим з переривчастим струмом:
- режим з неперервним струмом.

В режимі з переривчастим струмом кожна фаза з вентилем працює незалежно від других як однофазний однопівперіодний випрямляч. Струми у фазах протікають на протязі часу, що визначається кутом, меншим за $2\pi/m$, де m – число фаз. В колі навантаження струми всіх фаз підсумовуються. Для цього режиму застосовується методика аналізу однопівперіодного випрямляча.

В режимі з неперервним струмом тривалість протікання струму через кожний вентиль на протязі періоду більша, ніж $2\pi/m$. Струм в колі навантаження (результат накладення фазних струмів) містить постійну і змінну складові.

Найбільшого поширення в електроприводах постійного струму набули тиристорні перетворювачі. Вони мають можливість плавного регулювання напруги від нуля до максимального значення, а також змінення полярності випрямленої напруги та струму. По використанню ці перетворювачі розділяються на реверсивні та неревверсивні, по призначенню – для живлення кіл якорів або обмоток збудження електричних машин, по способу підключення до мережі живлення – через силовий трансформатор або реактор, по способу керування – з роздільним або сумісним управлінням.

Силові схеми визначаються потужністю перетворювача.

Для перетворювачів малої потужності частіш за все застосовують однофазні мостові схеми. В тих випадках, коли немає необхідності в інверторному режимі і допускаються підвищені пульсації, застосовують напівкеровані однофазні мостові схеми.

В перетворювачах середньої потужності найбільш розповсюджені мостові повністю керовані, хоча застосовують але значно рідше і напівкеровані трифазні мостові схеми і трифазні нульові.

В реверсивних перетворювачах застосовують тільки повністю керовані мостові схеми, при чому найбільше розповсюдження отримала економічна схема зустрічно-паралельного з'єднання мостів з живленням від двообмотувального трансформатора. В перетворювачах підвищеної потужності найбільш суттєвими є як енергетичні характеристики електропривода, так і його вплив на мережу живлення. В цьому випадку при побудові головних кіл електропривода використовують різні комбінації багатофазних мостових схем. Так, для зменшення пульсацій випрямленої напруги і струму застосовують схеми, які забезпечують еквівалентні 12 фазні пульсації.

Для підвищення коефіцієнта потужності застосовують послідовне з'єднання мостів з почерговим керуванням.

Для зменшення дії пульсуючої складової напруги випрямляча в агрегатах середньої та підвищеної потужності в коло постійного струму встановлюють згладжуючі реактори, які обмежують пульсуючу складову струму двигуна і покращують його комутацію.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Врахування параметрів та характеристик елементів перетворювальної техніки в процесі експлуатації напівпровідникових пристроїв і забезпечення умов електромагнітної сумісності перетворювачів і споживачів енергетичної галузі обумовило необхідність підвищення рівня професійної підготовки майбутніх фахівців шляхом розробки засобів поточного контролю навчальних досягнень з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму».

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ ДЛЯ ОБ'ЄКТУ «НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

3.1. Постановка оперативних цілей поточного контролю

Вимоги сучасного ринку праці зумовлюють підвищення рівня підготовки випускника, ставлять завдання формування таких якостей, як здатність самостійно формулювати завдання і визначати способи їх рішень у межах професійних компетенцій, здатність аналізувати свою професійну діяльність, працювати з інформацією в команді, налагодження соціальних зв'язків, безперервна самоосвіта, вирішення професійних завдань, спрямованих на підвищення продуктивності праці, тощо [1].

Оперативна мета навчання повинна бути сформована у формі знань і умінь, які необхідно сформувані в майбутньому фахівця в ході вивчення дисципліни.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач повинен знати:

- визначення та сутність понять електроенергетична система, режим роботи електроенергетичної системи;
- параметри елементів електроенергетичних систем;
- визначення та сутність понять і категорій роботи вентильних перетворювачів;
- принципи побудов вентильних перетворювачів;
- принципи дії вентильних перетворювачів;
- режими роботи вентильних перетворювачів;
- електромагнітні процеси, у схемах з вентильними перетворювачами.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач повинен вміти:

- розраховувати параметри перетворювачів. Здобувач повинен знати, як правильно розраховувати основні параметри електричних перетворювачів, такі як напруга, струм, потужність, коефіцієнт корисної дії, частота та інші

параметри, що визначають роботу перетворювачів. Визначати їх режим роботи. Здобувач повинен мати навички аналізу роботи перетворювачів у різних режимах, зокрема при різних навантаженнях, при змінних умовах експлуатації, що дозволяє оптимізувати роботу пристроїв.

– вибирати існуючі схеми під конкретну задачу. Здобувач повинен уміти обирати та адаптувати схеми перетворювачів відповідно до конкретних вимог завдання, враховуючи ефективність, стабільність, технічні можливості та економічні чинники.

– реалізовувати системи керування випрямлячів, регуляторів та стабілізаторів. Здобувач повинен мати практичні навички розробки та впровадження систем керування для різних типів електричних пристроїв, забезпечуючи їх стабільну роботу у заданих параметрах.

– проводити дослідження реальних перетворювачів, інтерпретувати отримані дослідним шляхом дані та співвідносити їх з наявними теоретичними даними. Здобувач повинен уміти виконувати експериментальні дослідження перетворювачів, проводити вимірювання та аналізувати результати, співвідносячи їх з теоретичними розрахунками для оцінки ефективності та правильності роботи систем.

– використовувати отримані знання при вирішенні конкретних задач на практиці. Здобувач повинен мати здатність застосовувати здобуті теоретичні та практичні знання для розв'язання реальних інженерних задач, у тому числі в процесі проектування, тестування та експлуатації електричних перетворювачів.

Ці вміння забезпечують здатність здобувача ефективно працювати з різноманітними електричними системами та вирішувати інженерні задачі в галузі електротехніки та енергетики.

Орієнтуємося на високий рівень сформованості продуктивної діяльності, тому що тип контролю передбачає творчий підхід здобувачів освіти до вирішення навчальних завдань [3].

До стратегічних цілей підготовки можна віднести:

- здатність розробляти засоби контролю знань здобувачі (методичні, інформаційні, математичні, алгоритмічні, технічні та програмні);
- здатність до проєктування базових та локальних засобів контролю знань;
- здатність проводити технічне проєктування;
- здатність здійснювати організацію та інформаційне забезпечення засобів контролю, їхнє технічне оснащення, розміщення комп'ютерного обладнання.

Цілі поточного контролю зазначені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Цілі поточного контролю

Дидактична мета поточного контролю	Рівень цілі	Умови досягнення цілі	Результат у вигляді дій, які здобувачі освіти повинні продемонструвати в результаті виконання поточного контролю, та їх характеристика	Розвиваюча мета проведення поточного контролю.
Сформувати вміння у здобувачів освіти визначати, характеризувати, аналізувати особливості функціонування перетворювальних пристроїв з теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму» надавати рекомендації щодо їх впровадження	IV рівень	Сформовані знання про засоби контролю знань, технологію їх розробки та впровадження	Сформоване вміння у здобувачів освіти визначати, характеризувати, аналізувати особливості комплексу засобів контролю для теми «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму» надавати рекомендації щодо їх впровадження	Розвиток творчих здібностей. Розвивати логічне мислення, просторову уяву, увагу, пам'ять, розумову активність, інтуїцію, пізнавальну самостійність, пізнавальний інтерес, потребу в самоосвіті, ініціативу, творчість, обґрунтованість суджень.

3.2. Визначення типу поточного контролю і форми його проведення

Одним із способів визначення кількісних та якісних параметрів технології навчання виступає контроль, як один із невід'ємних компонентів процесу діагностування знань студентів [4].

Поточний контроль знань здобувачів проводиться на поточних заняттях у межах навчального часу, що відведений на відповідну навчальну дисципліну, як традиційними, так і інноваційними методами, включаючи комп'ютерні технології, інтернет-тестування. Поточний контроль освоєння здобувачами програмного матеріалу навчальних дисциплін та їх складових (міждисциплінарних курсів) може мати такі види: вхідний, оперативний та рубіжний контроль.

Досить зручною формою контролю є тестовий контроль.

Тести можна класифікувати за різними ознаками, зокрема за характером відповіді, і це визначає тип тестових завдань та їх конструкцію. Основними типами тестів є «закриті» та «відкриті» завдання.

«Закриті» тести. У таких завданнях надається набір можливих відповідей, серед яких лише одна є правильною. Здобувач повинен вибрати правильний варіант. Ці тести є більш структурованими, оскільки варіанти відповідей уже сформульовані, і завдання полягає в тому, щоб правильно вибрати серед них.

Простий тип таких тестів - це питання типу «так – ні» або «вірно – невірно», де потрібно лише підтвердити правильність твердження.

Складніший тип - вибір серед кількох варіантів відповідей, що дозволяє точніше перевірити знання та вміння здобувача.

«Відкриті» тести. У таких завданнях здобувач самостійно формулює відповідь, без варіантів, наданих у завданні. Це дає можливість оцінити рівень розуміння та здатність застосовувати знання, а не просто вибирати серед запропонованих варіантів.

Форма запитань може бути різною: питальна форма, завдання на доповнення, виключення зайвого, систематизація тощо.

Це вимагає більш детальних знань та вміння аргументувати відповіді.

Різновиди питань:

- Питання з вибором відповіді. Здобувач має вибрати правильний варіант серед кількох запропонованих. Це зручна форма для контролю знань.

- Питання на співвідношення. Здобувач має зіставити елементи з двох груп, наприклад, відповідність між термінами та їх визначеннями або між причинами та наслідками. Це може бути корисним для більш глибокого засвоєння матеріалу, але менш ефективно для підсумкової перевірки через обмежений час.

- Альтернативні питання (наприклад, «так/ні»). Дають здобувачу можливість вгадувати правильну відповідь, що може бути корисним на етапі закріплення матеріалу, але менш ефективним на підсумкових етапах.

Принципи складання тестових завдань:

- Питання повинні відповідати рівню знань, що перевіряються, і не повинні бути надто складними або, навпаки, занадто простими.

- У завданнях із вибором правильних варіантів не повинно бути очевидних підказок або заплутаних варіантів, що можуть сприяти вгадуванню.

- Завдання на співвіднесення дають змогу перевірити здатність здобувача бачити взаємозв'язки та логіку між поняттями.

Таким чином, класифікація тестів та принципи їх складання дозволяють ефективно перевіряти різні аспекти знань здобувачів і забезпечують різні способи оцінювання на етапах навчання.

Тому, враховуючи результати проведеного аналізу типів поточного контролю знань здобувачів, визначимо тестовий контроль, як одну з найбільш зручних форм поточного контролю.

3.3. Проектування основної частини елементів поточного контролю

Проектування елементів поточного контролю зосередимо на розробці тестових завдань двох типів: відкритих і закритих.

До тестів відкритого типу відносяться два види - завдання-доповнення та завдання вільного викладу. В даному проєкті ми застосовуємо завдання вільного викладу. Вони припускають вільні відповіді здобувачів по змісту

завдання. На відповіді не накладаються обмеження. Однак формулювання завдань повинні забезпечувати наявність лише однієї правильної відповіді.

Застосуємо також тестові завдання закритого типу, у яких кожне питання супроводжується готовими варіантами відповідей, з яких необхідно вибрати одну правильну.

Матеріали для поточного контролю
з дисципліни «Перетворювальна техніка енергетичних систем»

Тести відкритого типу
Змістовий модуль 1.

Керовані випрямлячі та інвертори ведені мережею. Напівпровідникові
прилади перетворювальної техніки.

1. Як класифікують напівпровідникові електронні прилади?
2. Поясніть основні властивості напівпровідникових резисторів. Наведіть їх умовні позначення.
3. Поясніть принцип дії випрямного діоду, стабілітрону, фото- та світлодіоду, вариконду. Наведіть їх умовні позначення.
4. Що таке біполярний транзистор? Поясніть його будову та принцип дії. Наведіть умовні позначення.
5. Як можна вмикати біполярний транзистор і який вигляд при цьому мають його вольт-амперні характеристики?
6. Що таке h -параметри біполярного транзистора?
7. Як будується динамічна характеристика транзистора? В яких режимах може працювати транзистор?
8. Поясніть будову і принцип дії одноперехідного транзистора.
9. Що таке польовий транзистор? Які є різновиди польових транзисторів? Поясніть їх будову і принцип дії, наведіть умовні позначення.
10. Що таке тиристор, диністор, триністор, симістор, оптронний тиристор, двопозиційний тиристор? Наведіть їх умовні позначення.

11. Наведіть і поясніть структуру і вольт-амперні характеристики диністора. Що таке зона від'ємного опору ВАХ?
12. Як увімкнути і як вимкнути тиристор?
13. У чому полягає принцип регулювання напруги змінного струму тиристорним регулятором?
14. Що таке інтегральна мікросхема? Які види інтегральних мікросхем Ви знаєте?
15. У чому полягають переваги інтегральних мікросхем перед електронними пристроями на дискретних елементах?
16. Вкажіть переваги електростатичних тиристорів та запірних тиристорів з МОН-керуванням.
17. Що таке інтегральна мікросхема? Які види інтегральних мікросхем Ви знаєте?
18. У чому полягають переваги інтегральних мікросхем перед електронними пристроями на дискретних елементах?
19. Поясніть, у чому полягають особливості роботи випрямних діодів, транзисторів і резисторів у динамічному режимі.
20. Що таке силові інтегральні модулі? Проаналізуйте їхні техніко-економічні показники та покажіть перспективи їхнього розвитку.
21. Проаналізуйте тенденції розвитку силових напівпровідникових ключів, інтегральних мікросхем.
22. Поясніть, що таке випрямляч? Для чого призначені випрямлячі?
23. Наведіть структурну схему випрямляча і поясніть призначення його функціональних вузлів.
24. Назвіть ознаки, за якими класифікують випрямлячі.
25. Наведіть найбільш розповсюджені схеми випрямлячів, поясніть їх побудову.
26. Які експлуатаційні характеристики і параметри притаманні випрямлячам?
27. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного

двопівперіодного випрямляча з нульовим виводом при роботі на активне навантаження.

28. Наведіть схему і поясніть принцип дії однофазного мостового випрямляча при роботі на активне навантаження.

29. Наведіть схеми і поясніть роботу двополярного випрямляча і подвоювача напруги.

30. Наведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних випрямлячів.

31. Поясніть, у яких випадках застосовують трифазні випрямлячі?

32. Наведіть схему Міткевича і поясніть принцип її роботи.

33. Наведіть схему Ларіонова і поясніть принцип її роботи. На схемі вкажіть анодну і катодну групи вентилів, покажіть контур протікання струму для будь-якого моменту часу.

34. Порівняйте схему Міткевича зі схемою Ларіонова. В яких випадках яка з них більш придатна і чому?

35. Що таке згладжувальний фільтр? Для чого використовуються згладжувальні фільтри і на чому основана їх дія?

36. Які різновиди згладжувальних фільтрів Ви знаєте?

37. Поясніть специфіку роботи випрямляча на активно-ємнісне і активно-індуктивне навантаження.

38. Поясніть, в яких випадках застосовують переважно ємнісні або індуктивні фільтри? Як підвищити ефективність індуктивного фільтра? Що таке багатоланковий фільтр?

39. Поясніть специфіку роботи фільтрів у перехідних процесах.

40. Що таке зовнішня характеристика випрямляча? Які параметри випрямляча можна з неї отримати?

41. Поясніть, що таке стабілізатор напруги постійного струму? Для чого призначені і в яких випадках застосовуються стабілізатори?

42. Наведіть схему, поясніть принцип дії і порядок розрахунку параметричного стабілізатора.

43. Які види компенсаційних стабілізаторів Ви знаєте? Поясніть специфіку їх роботи.
44. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора, поясніть призначення елементів і принцип її дії.
45. Коли застосовують стабілізатори струму? Наведіть схему простого транзисторного стабілізатора струму і поясніть, на чому основана його дія.
46. Поясніть принцип роботи індуктивно-ємнісного стабілізатора струму.
47. Вкажіть методи регулювання напруги постійного струму, поясніть їх особливості.
48. Поясніть специфіку побудови і роботи імпульсних регуляторів напруги постійного струму, а також їх переваги перед регуляторами безперервної дії.
49. Вкажіть переваги широтно-імпульсного методу регулювання перед іншими імпульсними методами.
50. Наведіть схему імпульсного регулятора напруги постійного струму, поясніть принцип її дії.
51. Поясніть, на чому оснований принцип дії тиристорних керованих випрямлячів?
52. Поясніть роботу керованого однофазного двопівперіодного тиристорного випрямляча з нульовим виводом.
53. Поясніть форму напруги на тиристорі керованого однофазного двопівперіодного тиристорного випрямляча з нульовим виводом при роботі на активне навантаження.
54. Наведіть регулювальну характеристику тиристорного керованого випрямляча і поясніть характер її залежності при лінійних змінах кута керування.
55. Поясніть специфіку роботи керованого тиристорного випрямляча на активно-індуктивне навантаження.
56. Що таке система імпульсно-фазного керування (СІФК)? Для чого

застосовують такі системи? Які види СІФК Ви знаєте?

57. Наведіть структурну схему і поясніть принцип роботи СІФК з горизонтальним керуванням.

58. Поясніть, у чому полягає принцип дії СІФК з вертикальним керуванням? Наведіть структурну схему такої СІФК і поясніть призначення її вузлів.

59. На основі яких типових електронних пристроїв може бути побудована СІФК з вертикальним керуванням?

60. Поясніть специфіку побудови і принцип дії СІФК з цифровим керуванням.

61. Вкажіть переваги цифрової СІФК перед СІФК аналогової дії.

Змістовий модуль 2.

Силові вентилі та перетворювачі для систем живлення промислового електроприводу.

1. Поясніть призначення регуляторів (переривачів) струму і наведіть їх класифікацію.

2. У чому полягають особливості проектування електронного ключа як силового елемента регулятора.

3. Наведіть часові діаграми, що ілюструють роботу однофазних регульованих електронних ключів змінного струму за активного й активно-індуктивного навантажень.

4. Поясніть, що означають параметри α , $\alpha_{кр}$, $\alpha_{вим}$, λ .

5. Виведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних регульованих електронних ключів при роботі на активне й активно-індуктивне навантаження.

6. Виведіть аналітичні вирази для визначення втрат потужності у тиристорі при його використанні у регульованому електронному ключі.

7. Поясніть принцип дії трифазних електронних ключів змінного струму з нульовим проводом і без нього. Які є відмінності у їхній роботі?

8. Запишіть вихідні диференційні рівняння для розрахунку трифазних електронних ключів змінного струму без нульового проводу.

9. Що таке характеристики керування регульованих електронних ключів змінного струму? Поясніть їхнє призначення на прикладі характеристик керування трифазного регульованого електронного ключа без нульового проводу.

10. Поясніть, як вибрати тиристри для електронного ключа за струмом і напругою?

11. Поясніть призначення схем запуску керованих напівпровідникових приладів в електронних ключах і вкажіть основні вимоги до них.

12. Наведіть основні варіанти схем запуску тиристорів (симісторів). Яким чином враховується технологічний розкид параметрів кіл керування тиристорів?

13. Наведіть схеми запуску електронних ключів, виконаних на основі підсилювачів-формуваців. Який порядок їхнього розрахунку?

14. Наведіть схеми запуску, у яких для створення керуючих імпульсів використовується анодна напруга силового тиристора. Яка методика їхнього розрахунку?

15. Приведіть приклади схем запуску для керування потужними біполярними та польовими транзисторами. Поясніть їхній принцип дії.

16. Які схеми запуску використовують для керування потужними БТІЗ?

17. Вкажіть області застосування різних схем запуску. Дайте короткий аналіз цих схем.

18. Що являють собою мікроелектронні драйвери, призначені для використання у схемах запуску силових напівпровідникових приладів?

19. Поясніть, що таке автономний інвертор? Коли застосовують автономні інвертори?

20. Вкажіть різницю між інверторами струму і інверторами напруги.

21. Наведіть схему трансформаторного інвертора струму і поясніть її роботу. Як в ньому забезпечується вимкнення тиристорів, що працюють на

постійному струмі?

22. Наведіть схему півмостового інвертора напруги і поясніть її роботу. Як в ньому забезпечується вимкнення тиристорів, що працюють на постійному струмі?

23. Вкажіть переваги застосування у перетворювачах новітніх вентильних напівпровідникових приладів в порівнянні з одно операційними тиристорами.

24. Наведіть схему однофазного інвертора напруги на IGBT-транзисторах і поясніть специфіку її роботи при активно-індуктивному навантаженні.

25. Поясніть принцип дії синусоїдної ШІМ та покажіть, які переваги отримують автономні інвертори при її використанні.

26. Наведіть схему трифазного інвертора напруги і поясніть принцип його роботи.

27. Наведіть схему резонансного інвертора, поясніть специфіку його роботи.

28. Поясніть будову і переваги випрямлячів з багатократним перетворенням.

29. Що таке інвертор, ведений мережею? Коли використовують такі інвертори?

30. Поясніть призначення і роботу реверсивного перетворювача напруги.

31. Для чого і як забезпечують електромагнітну сумісність перетворювачів з мережею живлення?

32. Наведіть приклади застосування інверторів.

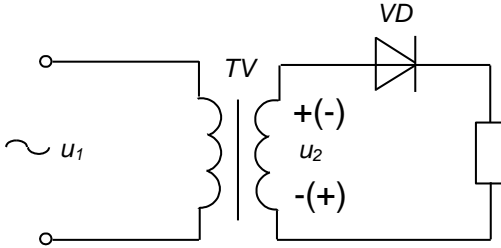
33. Поясніть принцип дії перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму та з безпосереднім зв'язком (циклоконвертори).

Тести закритого типу

Приклади тестових завдань для проведення поточного контролю з дисципліни «Перетворювальна техніка енергетичних систем»

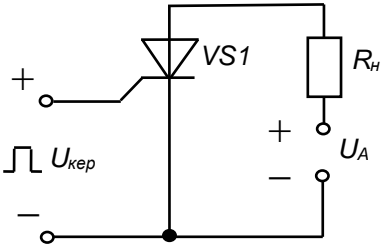
Тест № 1

Напівпровідникові прилади перетворювальної техніки

№ з/п	Питання	Відповіді
1	Який елемент електричного кола відноситься до електронних пристроїв?	1. Реле, 2. Конденсатор, 3. Діод, 4. Контакттор.
2	Середнє значення напруги на кремнієвому діоді при граничному прямому струмі становить:	1. (0,6÷1,0) В, 2. (0,01÷0,05) В, 3. (10,0÷12,0) В, 4. (4,5÷5,0) В.
3	 <p>За якою формулою визначається середнє значення випрямленої напруги?</p>	1. $U_d = 2,3U_2$, 2. $U_d = 1,16U_2$, 3. $U_d = 0,91U_2$, 4. $U_d = 0,45U_2$.
4	Скільки діодів одночасно працюють в мостовій схемі трифазного випрямляча?	1. Один, 2. Два, 3. Чотири, 4. Шість.

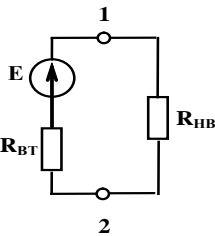
Тест № 2

Напівпровідникові прилади перетворювальної техніки

№ з/п	Питання	Відповіді
1	Що являє собою тиристор?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Підсилювач напруги, 2. Керований діод, 3. Перетворювач частоти, 4. Вимикач.
2	Для чого у складі випрямлячів застосовують згладжуючі фільтри?	<ol style="list-style-type: none"> 1. Для зменшення зворотної напруги на вентилях, 2. Для зменшення втрат потужності в схемі, 3. Для зменшення пульсацій вихідної напруги, 4. Для зменшення типової потужності трансформатора.
3	 <p>Для вмикання тиристора необхідно:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зменшити опір R_H до нуля, 2. Подати тільки напругу $U_{кер}$, 3. Подати напруги $U_{кер}$, і U_A, 4. Подати тільки напругу U_A.
4	Для якого випрямляча можна визначити напругу вторинної обмотки трансформатора за формулою $U_2 = 1,1 U_d$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Однофазний з мостовою схемою, 2. Однофазний однопівперіодний, 3. Трифазний мостовий, 4. Трифазний з нульовим виводом.

Тест № 3

Напівпровідникові прилади перетворювальної техніки

№ з/п	Питання	Відповіді
1	За якою формулою визначається потужність активного навантаження випрямляча ?	1. $P_n = U_d I_d \cos \varphi$, 2. $P_n = U_d I_d$, 3. $P_n = U_d I_d \cos \alpha$, 4. $P_n = U_2 I_2$.
2	Чому дорівнює напруга на навантаженні однофазного випрямляча з нульовим виводом, якщо напруга мережі 380 В, коефіцієнт трансформації 10.	1. 38,0 В, 2. 52,2 В, 3. 41,8 В, 4. 48,5 В.
3	 <p>В електричному колі ЕРС джерела живлення $E = 120$ В, а внутрішній опір $R_{вт} = 2$ Ом. Визначити напругу на затискачах 1,2 якщо опір навантаження $R_{нв} = 4$ Ом.</p>	1. 80 В, 2. 60 В, 3. 100 В, 4. 120 В.
4	За якою формулою визначається потужність трансформатора в трифазній мостовій схемі	1. $S_T = 1,05P_d$ 2. $S_T = 1,35P_d$, 3. $S_T = 1,23P_d$, 4. $S_T = 1,48P_d$.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Першочергова мета удосконалення вищої освіти полягає в підготовці висококваліфікованих фахівців. Це включає не тільки професійні навички та знання, необхідні для виконання виробничих і наукових завдань, але й орієнтацію на збереження та збагачення людських цінностей.

Можна також зазначити, що таке удосконалення вищої освіти передбачає:

- Адаптацію навчальних програм до сучасних вимог ринку праці та розвитку науки.

- Поглиблення зв'язку освіти і практики, що дозволяє фахівцям отримувати актуальні знання, які вони можуть використовувати для вирішення реальних проблем.

- Розвиток соціальних та етичних компетентностей, що сприяє формуванню у здобувачів вищої освіти гуманістичних цінностей і високої моральної відповідальності.

- Інтеграцію з міжнародними стандартами, щоб забезпечити конкурентоспроможність майбутніх фахівців на глобальному рівні.

Це сприяє не тільки підвищенню якості професійної підготовки, але й забезпеченню гармонійного розвитку особистості, готової до викликів сучасного світу.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Серед завдань, які потребують сьогодні першочергового розв'язання, виходить на перший план ефективна підготовка та підвищення рівня професійної підготовки фахівців енергетичної галузі.

Проблема підвищення якості навчання здобувачів з дисциплін фахового напрямку полягає в наближенні навчального матеріалу до конкретної предметної галузі.

Це стосується і такої важливої для фахівців енергетичної галузі дисципліни як «Перетворювальна техніка енергетичних систем», та однієї з головних її тем «Напівпровідникові перетворювачі для електроприводу постійного струму». Так, виконуючи своє основне призначення, вентильні перетворювачі разом з тим завантажують електричні мережі значною реактивною потужністю з вищими гармоніками струму, приводить до коливань напруги в мережах по амплітуді і спотворенням її форми, зменшенню пропускної спроможності мереж, збільшенню втрат, що негативно позначається на роботі інших споживачів, які живляться від цих мереж. Тому, при виборі або проектуванні перетворювальних пристроїв, необхідно не тільки забезпечити якість електричної енергії, яку вимагає споживач, але намагатися звести до мінімуму погіршення якості напруги мережі, що виникає за рахунок роботи перетворювальних пристроїв.

Одним із способів визначення кількісних та якісних параметрів технології навчання виступає контроль, як один із невід'ємних компонентів процесу діагностування знань здобувачів.

Поточний контроль знань здобувачів проводиться на поточних заняттях у межах навчального часу, що відведений на відповідну навчальну дисципліну, як традиційними, так і інноваційними методами.

Проведено аналіз типів і форм поточного контролю знань здобувачів з навчальної дисципліни. Визначено, що найбільш перспективним є тип

тестового контролю, який передбачає застосування різних форм тестових завдань.

Були сформульовані оперативні цілі поточного контролю, обраний тип та форми проведення контролю, визначений перелік питань, які входять до складу тестових завдань, проаналізовані проблеми, що виникають при проведенні контрольних заходів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Белова О. К., Брюханова Н. О. Методичні вказівки з виконання методичної частини дипломних робіт. – Харків : УПА, 2017. – 54 с.
2. Гончаров Ю. П., Будьонний О. В., Морозов В. Г., Панасенко М. В., Руденко В. С., Ромашко В. Я. Перетворювальна техніка. Частина II. Харків : Фоліо, 2000. – 360 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків : УПА, 2019. – 204 с.
4. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н. В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 174 с.
5. Козачковский М. М. Керовані випрямлячі. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 1999. 229 с. 11
6. Козачковский М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти. Навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. 196 с.
7. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищих навч. закладів: /За ред. А.Г.Соскова. – К.: Каравела, 2009. – 384 с.
8. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. / За ред. А.Г.Соскова, 2-е вид. - К.: Каравела, 2004. – 432 с.
9. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка: Підручник. / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2015. – 496 с.