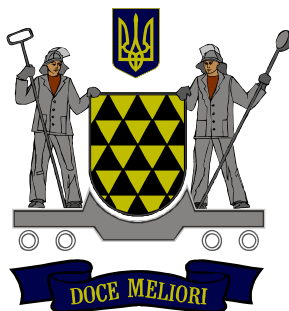


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ



РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Силові перетворювачі
автоматизованих електроприводів»
для студентів напряму
підготовки 6.050702 – електромеханіка

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Силові перетворювачі
автоматизованих електроприводів»
для студентів напряму
підготовки 6.050702 – електромеханіка

Затверджено
на засіданні Вченої ради
академії
Протокол №1 від 29.01.2013

Дніпропетровськ НМетАУ 2013

УДК 621.3

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів» для студентів напряму 6.050702 – електромеханіка./ Укл.: А.В. Ніколенко, В. В. Стьопкін, А.В. Безуглий. – Дніпропетровськ, НМетАУ, 2013.– 48 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів», література, пояснення до виконання контрольної роботи.

Призначена для студентів напряму 6.050702 – електромеханіка заочної форми навчання.

Друкується за авторською редакцією

Укладачі: А.В. Ніколенко, канд. техн. наук, доц.
В. В. Стьопкін, канд. техн. наук, доц.
А.В. Безуглий, ст. викл.

Відповідальний за випуск А.В. Ніколенко, канд. техн. наук, доц

Рецензент О.Ю. Потап, канд. техн. наук, доц. (НМетАУ)

Відповідальний за комп'ютерний набір В.В. Стьопкін

Підписано до друку 12.08.2013. Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір друк. Друк плоский.
Облік.-вид. арк.2,82 Умов. друк. арк.2,79. Тираж 100 пр. Замовлення №

Національна металургійна академія України
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

**1. РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ»**

1.1. Розподіл навчальних годин (заочна форма навчання)

	Усього	По семестрах	
		I	II
Усього годин за навчальним планом	108		108
у тому числі: аудиторні заняття	16		16
з них: лекції	12		12
лабораторні заняття	4		4
практичні заняття			
семінари			
самостійна робота	92		92
у тому числі при:			
підготовці до аудиторних занять			
підготовці до контрольних заходів			1кр
виконанні курсових проектів			
виконанні індивідуальних завдань			
опрацюванні розділів програми, які не викладаються на лекціях			
Підсумковий контроль			екзамен

1.2. Характеристика дисципліни

Навчальна дисципліна «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів» входить до циклу професійно-орієнтованих (за переліком) дисциплін.

Мета вивчення дисципліни – теоретична і практична підготовка бакалаврів в галузі електромеханіки, обслуговуванні цієї галузі електронними пристроями вимірювання, контролю та керування електроприводами.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен

знати:

- фізичні явища в напівпровідникових приладах;
- електричні характеристики і параметри напівпровідникових приладів;
- властивості пристроїв та систем, що ґрунтуються на використанні напівпровідникових приладів.

вміти:

- читати електронні схеми та користуватися літературними джерелами;
- експериментально визначати параметри і характеристики типових електротехнічних та електронних елементів і пристроїв;
- виконувати вимірювання основних електричних величин;
- обирати необхідні електротехнічні пристрої, правильно їх експлуатувати із дотриманням правил безпеки та складати технічні завдання на розробку електричних частин автоматизованих пристроїв та установок для керування електроприводами.

Критерії успішності – отримання позитивної оцінки при захисті контрольної роботи та складанні екзамену.

Засоби діагностики успішності навчання – комплект варіантів індивідуальних завдань контрольної роботи та тестових завдань до екзамену.

Зв'язок з іншими дисциплінами – викладання дисципліни базується на основі знання студентами таких дисциплін: Креслення (використовується вміння студентів читати креслення пристрою), Фізика (використовується матеріал розділів «Електрика і магнетизм», «Фізика твердого тіла»), Вища математика (використовується знання студентами комплексних чисел, диференційного та інтегрального числення, векторного аналізу).

Набуті знання і вміння використовуються при вивченні дисциплін: «Автоматизований електропривод», «Елементи автоматизованого електропривода».

1.3. Зміст дисципліни за темами, теоретичний курс

Тема 1. Способи регулювання напруги трансформаторів та електромашинні перетворювачі. Способи регулювання напруги трансформаторів. Механічні системи регулювання напруги. Тиристорно-механічні системи регулювання напруги. Системи безконтактного регулювання напруги трансформаторів. Електромашинні перетворювачі.

Тема 2. Випрямлячі та інвертори, ведені мережею. Призначення й класифікація силових перетворювачів для автоматизованого електропривода. Робота випрямлячів на активне навантаження. Робота випрямлячів на активно-індуктивне та активно-ємнісне навантаження. Інвертори, ведені мережею. Трифазний мостовий інвертор.

Тема 3. Імпульсні перетворювачі енергії та автономні інвертори. Імпульсні джерела живлення. Імпульсні перетворювачі постійного струму. Інвертори струму. Інвертори напруги. Безпосередні перетворювачі частоти. Перетворювачі частоти з ланкою постійного струму.

2. ЗМІСТ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЗА ТЕМАМИ ДИСЦИПЛІН

2.1. Тема 1. Способи регулювання напруги трансформаторів та електромашинні перетворювачі

2.1.1. Зміст та методичні вказівки до теми 1

Системи регулювання напруги трансформаторів розділяють на три основних групи:

1. Чисто механічні системи регулювання напруги:

а) ПБЗ – регулювання без збудження з повним відключенням трансформатора від первинної та вторинної електричних мереж на інтервал зміни коефіцієнта трансформації;

б) РПН – регулювання з перемиканням під навантаженням контактними пристроями, що забезпечують обмеження струму у контурах регулювання та гасіння дуги при перемиканнях регулювальних відгалужень обмоток.

2. Поєднання тиристорних та механічних систем регулювання, що забезпечують безпосереднє перемикання регулювальних відгалужень обмоток основного силового трансформатора або перемикання через додатковий вольтододатковий трансформатор.

3. Системи плавного безконтактного регулювання:

а) дискретного типу;

б) з фазовим регулюванням коефіцієнта трансформації;

в) з високочастотною комутацією регулювальних відгалужень обмоток силового трансформатора.

Основним засобом регулювання напруги в розподільних мережах є трансформатори районних підстанцій, оскільки вони можуть узгодити вимоги до напруги близьких і віддалених споживачів. Трансформатори можуть бути під'єднані в різних пунктах електричних мереж, в яких режим напруги заздалегідь, як правило, невідомий і, крім того, може змінюватись в процесі експлуатації мережі.

Норми якості електричної енергії визначаються ГОСТ 13109-67, згідно з яким для більшості електроприймачів відхилення напруги від номінального значення не повинні перевищувати $\pm 5\%$. Для ряду споживачів необхідна й більш точна стабілізація напруги близько $\pm 2,5\%$ і навіть $\pm 1\%$, що пов'язано зі специфікою роботи багатьох систем автоматики, радіоелектроніки і ЕОМ. Тому трансформатори мають, крім основних, ще й додаткові регулювальні відгалуження. Змінюючи ці відгалуження, можна змінювати коефіцієнт трансформації (в межах 10—20%).

За конструктивним виконанням розрізняють трансформатори двох типів:

1) з перемиканням регулювальних відгалужень без збудження, тобто з відключенням від мережі (скорочено - трансформатори з ПБЗ);

2) з перемиканням регулювальних відгалужень під навантаженням (скорочено - трансформатори з РПН).

Як правило, регулювальні відгалуження виконуються на боці високої напруги ВН трансформатора, яка має менший робочий струм. При цьому спрощується перемикаючий пристрій.

Трансформатори з ПБЗ. На сьогодні трансформатори з ПБЗ виготовляють з основним і чотирма додатковими відгалуженнями. Принципова схема такого трансформатора наведена на рис.2.1.

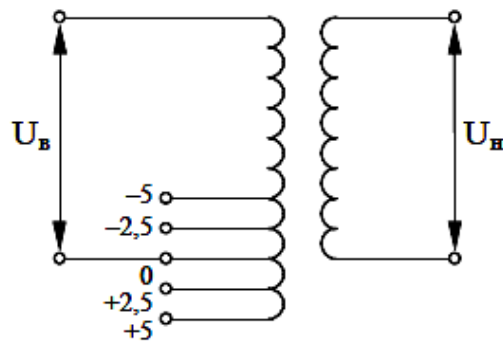


Рис.2.1. Принципова схема трансформатора з ПБЗ

Основне відгалуження має напругу, що дорівнює номінальній напрузі мережі, до якої приєднується даний трансформатор (6, 10, 20 кВ). При основному відгалуженні коефіцієнт трансформації трансформатора називають номінальним. При використанні чотирьох додаткових відгалужень коефіцієнт трансформації відрізняється від номінального відповідно на +5%, +2,5%, -2,5% і -5%.

Трансформатори з механічними пристроями РПН. Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням, тобто з вбудованим пристроєм РПН (рис.2.1, а) відрізняються від трансформаторів з ПБЗ наявністю спеціального перемикаючого пристрою, а також збільшеною кількістю ступенів регулювальних відгалужень і діапазоном регулювання.

На рис.2.2, б зображена принципова схема трансформатора з РПН. Обмотка високої напруги ВН даного трансформатора складається з двох частин – регульованої та нерегульованої. На регульованій частині є ряд відгалужень до нерухомих контактів 1-4. Відгалуження 1-2 відповідають частині витків, які

ввімкнуті узгоджено з витками основної обмотки (напря́м струму вказаний на рис. 1.2, б стрілками). При вмиканні відгалужень 1-2 коефіцієнт трансформації збільшується. Відгалуження 3-4 відповідають частині витків, які з'єднані зустрічно по відношенню до витків основної обмотки. Їх вмикання зменшує коефіцієнт трансформації, оскільки компенсує дію частини витків основної обмотки. Основним виводом обмотки ВН трансформатора є точка 0. Число витків, що діють узгоджено і зустрічно з витками основної обмотки, може бути неоднаковим.

На регульованій частині обмотки є перемикаючий пристрій, який складається з рухомих контактів в і г, контакторів К1 і К2 та реактора Р. Середина обмотки реактора з'єднана з нерегульованою частиною обмотки трансформатора. Зазначимо, що в сучасних пристроях РПН замість реактора використовуються активні опори. В нормальному режимі струм навантаження обмотки ВН розподіляється рівно між половинами обмотки реактора. Тому магнітний потік малий і втрати напруги в реакторі також малі.

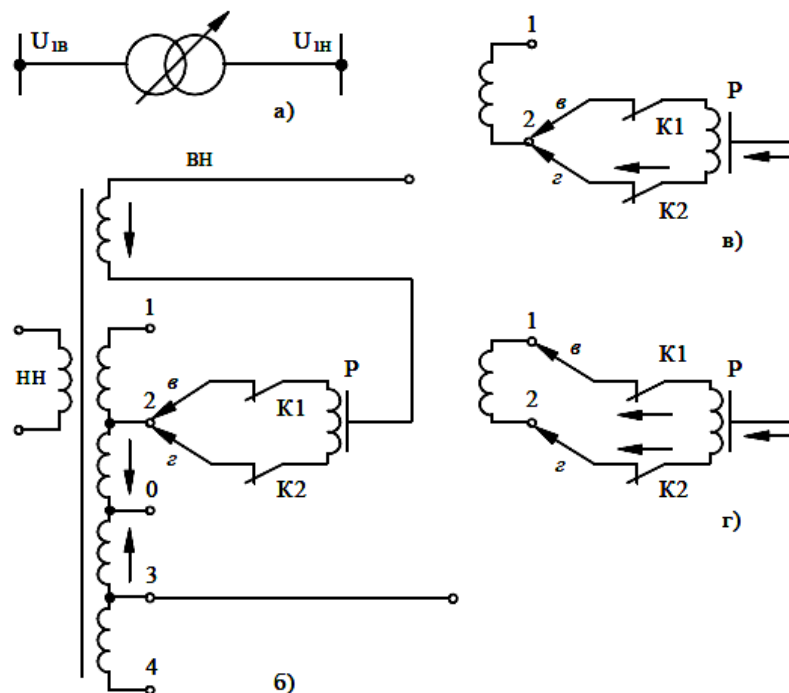


Рис.2.2. Трансформатор з РПН:

а – умовне позначення; б – принципова схема;

в, г – перемикання відгалужень

Припустимо, що необхідно переключити пристрій з відгалуження 2 на відгалуження 1. При цьому вимикають контактор К1 (рис.2.2, в), переводять рухомий контакт ϵ на відгалуження 1 і знов вмикають контактор К1 (рис.2.2, г). Таким чином, секція 1-2 обмотки виявляється замкнутою на обмотку реактора Р. Значна індуктивність реактора обмежує урівнюючий струм, який виникає внаслідок наявності напруги на секції 1-2 обмотки. Після цього вимикають контактор К2, переводять рухомий контакт ζ на відгалуження 1 і вмикають контактор К2.

За допомогою РПН можливо перемикає відгалуження, змінюючи тим самим коефіцієнт трансформації, під навантаженням, тобто впродовж доби. При цьому можливо вибрати в режимах найбільших і найменших навантажень необхідні відгалуження і з'єднати їх таким чином, щоб виконувались вимоги зустрічного регулювання.

Недоліками трансформаторів з РПН є їх висока вартість і обмежена кількість перемикачів, що знижує якість регулювання.

Системи безконтактного регулювання напруги трансформаторів. Пристрій РПН є елементом з обмеженим ресурсом перемикачів. До того ж час перемикачів відпайки ≥ 5 с. Цих недоліків не мають безконтактні пристрої РПН, в яких застосовуються напівпровідникові силові ключі. Трансформатори, обладнані такими пристроями, мають час перемикачів відпайки ≥ 10 мс, а саме перемикачів не супроводжується появою вищих гармонік, відповідно покращується динамічна стійкість системи регулювання напруги.

Розглянемо пристрій для регулювання змінної напруги, в якому для перемикачів відпайок використовуються напівпровідникові силові ключі. Функціональна схема пристрою наведена на рис.2.3.

В режимі мінімальних навантажень ключ 1 ввімкнений, а ключ 2 вимкнений. Напруга на вторинній обмотці трансформатора мінімальна. При максимальному навантаженні ключ 2 вмикають, а ключ 1 вимикають. Напруга на вторинній обмотці максимальна. В проміжних режимах необхідну напругу підтримують, змінюючи кути керування ключів 1 і 2.

Даний пристрій не забезпечує захист ключів від струмів коротких замикань. Також в проміжних режимах роботи в мережі з'являються вищі гармоніки.

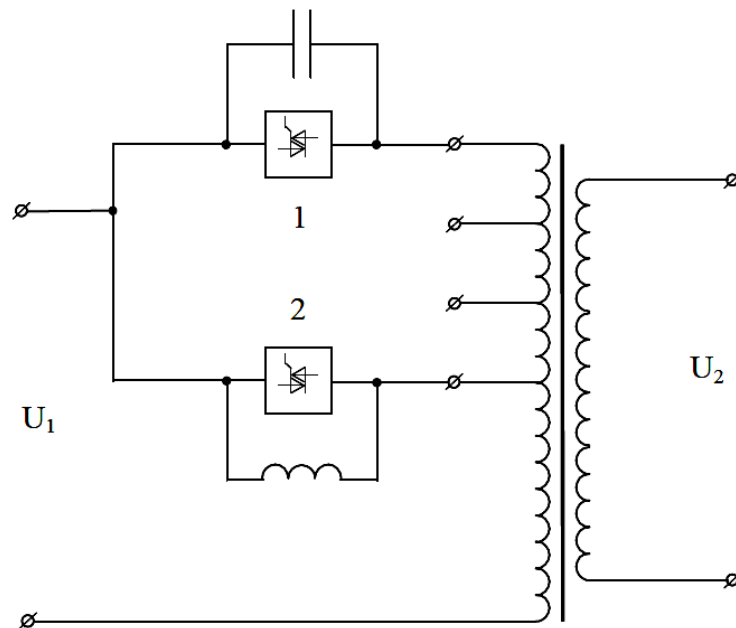


Рис.2.3. Функціональна схема пристрою для регулювання змінної напруги

Розглянемо пристрій для перемикання відгалужень силового трансформатора за допомогою симісторних ключів.

На рис.2.4 наведена функціональна схема вказаного пристрою, де 1 – система керування; 2, 3 – симісторні ключі; 4 – датчик струму короткого замикання; 5 – посилений симісторний ключ аварійного режиму; 6 – силовий трансформатор; 7 – варистор; 8 – формувач керуючих імпульсів для посиленого ключа аварійного режиму; 9 – навантаження.

При нормальній роботі пристрою система керування 1 подає імпульси на один з симісторних ключів 2, 3, 5, вмикаючи їх. При виникненні короткого замикання датчик 4 посилає системі керування 1 сигнал. Остання припиняє подачу імпульсів керування, працюючий симісторний ключ вимикається, варистор 7 починає пропускати струм, живлячи формувач 8, який видає сигнал на ключ 5, і той пропускає через себе аварійний струм. Після усунення короткого замикання система керування 1 знов вступає в роботу.

Недоліком даного пристрою є те, що в процесі регулювання не враховується струмова компенсація.

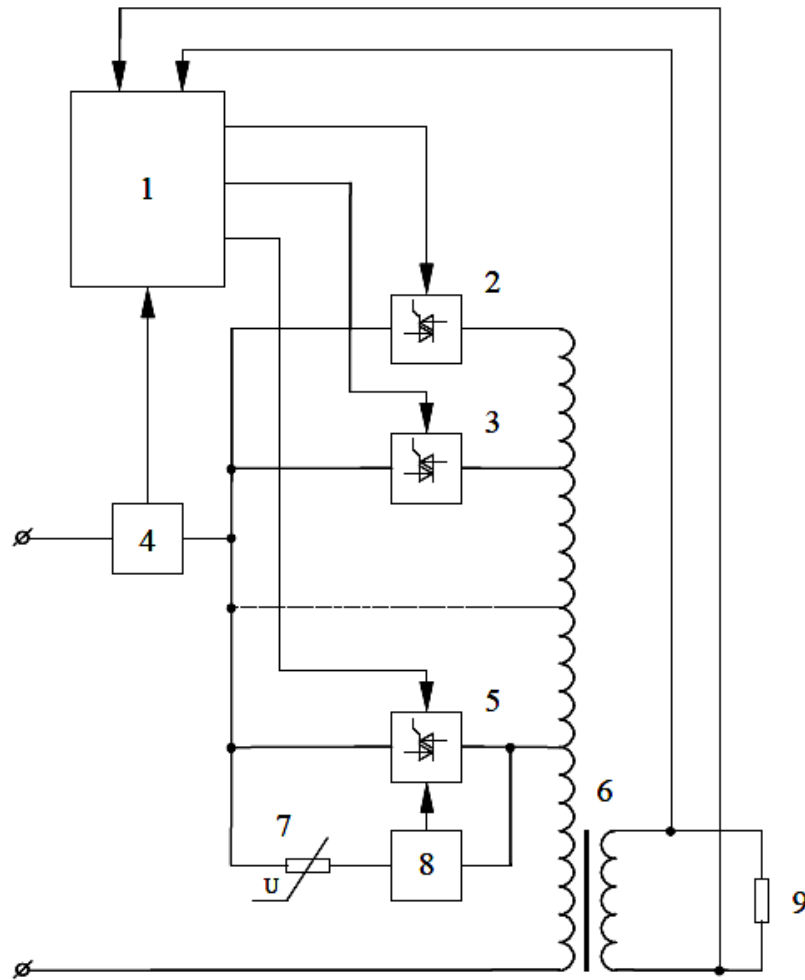


Рис.2.4. Функціональна схема пристрою для перемикання відгалужень силового трансформатора

Розглянемо пристрій, у якого для регулювання змінної напруги первинна обмотка силового трансформатора містить дві паралельні групи обмоток, кожна з яких виконана секціонованою (рис.2.5). Комутація проводиться за допомогою тиристорних ключів. Тут: 1 – силовий трансформатор, 2 – навантаження, 3, 35 – вхідні виводи, 4–11 – діоди, 12 – 19 – тиристири, 20 – 27 – регулювальні секції первинної обмотки трансформатора, 28 – 31 – запобіжники, 32, 33 – швидкодіючі вакуумні контактори, 34 – основна секція первинної обмотки трансформатора, 36 – датчик струму, 37 – амплітудний дискримінатор.

Для підвищення напруги на навантаженні 2 вмикають в довільний момент часу відповідного напівперіоду тиристири 16 і 12, що призводить до

шунтування регулювальної секції 24 в додатний напівперіод і секції 20 у від'ємний напівперіод. Для підвищення вихідної напруги ще на один ступінь додатково вмикають в довільний момент часу відповідного напівперіоду тиристири 17 і 13. При цьому в кожній групі обмоток трансформатора шунтуються вже по дві регулювальні секції 24 і 25 та 20 і 21 відповідно.

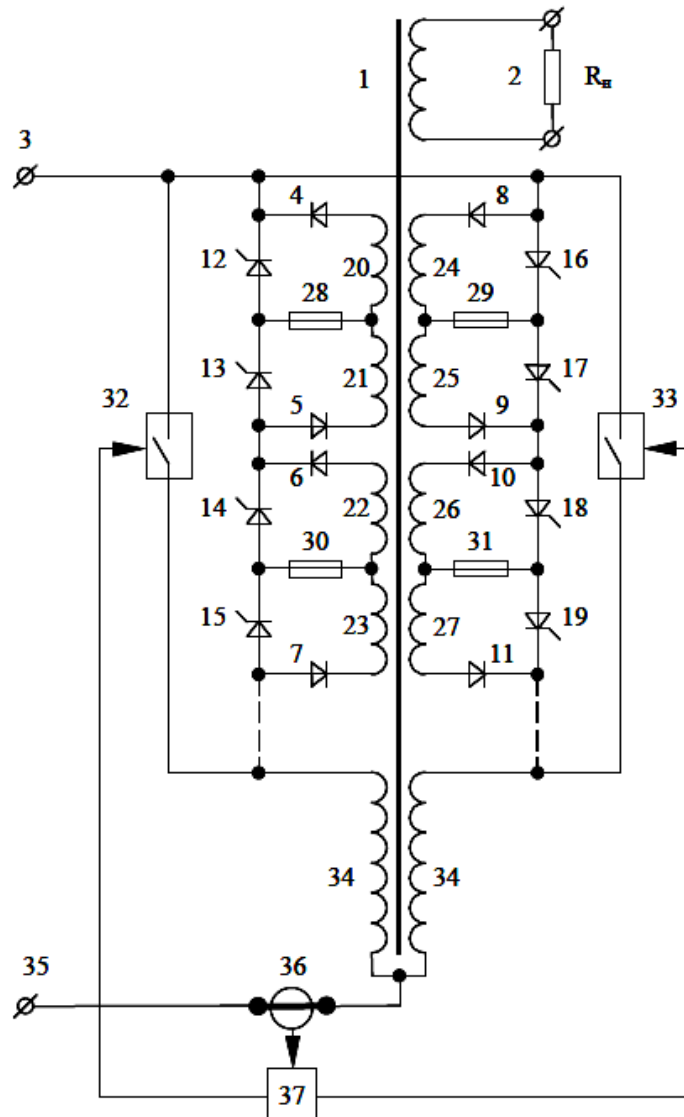


Рис.2.5. Пристрій для регулювання змінної напруги

Максимальна вихідна напруга на навантаженні 2 буде тоді, коли включені всі тиристири 12–19. При цьому всі регулювальні секції 20–27 виявляються зашунтованими, а напруга мережі живлення прикладена лише до основної обмотки.

В разі пробою будь-якого діода, наприклад, діода 8 або діода 4, запобіжник 29 або 28 відповідно захистить тиристири від виникнення

аварійного режиму роботи. При виникненні короткого замикання в колі навантаження 2 по сигналу амплітудного дискримінатора 37, пов'язаного з датчиком струму 36, спрацьовують швидкодіючі вакуумні контактори 32 і 33, захищаючи діоди та тиристори від ушкодження внаслідок різкого зростання струму навантаження.

Електромашинні перетворювачі. Наряду зі статичними перетворювачами, які не містять обертаючих частин (трансформаторами, напівпровідниковими перетворювачами), для перетворення електричної енергії одного виду у інший застосовуються електромашинні перетворювачі струму. Електромашинні перетворювачі струму зустрічаються у двох виконаннях: двоякірному та одноякірному.

Двоякірний перетворювач складається з двох машин, з'єднаних механічно, але електрично не пов'язаними між собою. Відомі також виконання, у яких обидві машини розташовані у одному корпусі, а їх ротори закріплені на одному валу. Оскільки при перетворенні одна з машин, що споживає енергію з первинної мережі, працює у режимі двигуна, а друга – у режимі генератора, двоякірний перетворювач називають також двигуном-генератором. Найбільшого розповсюдження отримали двоякірні перетворювачі змінного струму у постійний. У такому перетворювачі у якості двигуна використовується асинхронна або синхронна машина.

При підготовці до заходів поточного контролю рекомендовано використовувати таку літературу [1, С.280-294; 2, С.23-57; 3, С.7-32].

2.1.2. Контрольні запитання для самоперевірки

1. Які системи регулювання напруги трансформаторів Вам відомі?
2. Які системи плавного безконтактного регулювання напруги трансформаторів Вам відомі?
3. Дайте визначення чисто механічним системам регулювання напруги трансформатора?
4. Як можна змінювати коефіцієнт трансформації трансформатора при регулюванні напруги?
5. Для чого призначений реактор у пристроях РПН?
6. Для чого призначені активні опори у пристроях РПН?

7. Які недоліки мають трансформатори з РПН?
8. У яких межах знаходиться час перемикання відпайок пристрою РПН?
9. Які типи електромашинних перетворювачів струму Вам відомі?
10. Поясніть конструкцію та принцип дії двоякірного перетворювача змінного струму у постійний.
11. Якими перевагами володіють тиристорні безконтактні пристрої у порівнянні з контактними РПН?
12. Якими вихідними параметрами необхідно володіти для вибору та розрахунку засобів регулювання напруги трансформатора?
13. Наведіть схему роботи контактної пристрою РПН при симетричному вмиканні тиристорів.
14. Наведіть схему тиристорного перемикаючого пристрою з вольтододатковим трансформатором.
15. Наведіть схему регулятора напруги з багатократним перемиканням коефіцієнта трансформації та криві його вихідної напруги.

2.2. Тема 2. Випрямлячі та інвертори, ведені мережею

2.2.1. Зміст та методичні вказівки до теми 2

Призначення й класифікація силових перетворювачів для автоматизованого електропривода. Силові перетворювачі призначені для перетворення електричної енергії одного виду на інший. До них належать: випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти, імпульсні перетворювачі, перетворювачі числа фаз та перетворювачі форми кривої.

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення змінної напруги на постійну. Випрямляч складається з керованих або некерованих вентилів, включених за визначеною схемою для забезпечення протікання струму в колі навантаження та перетворення змінної напруги на пульсуючу.

На вході випрямляча в більшості випадків стоїть трансформатор для одержання необхідної величини вхідної напруги. Випрямляч може також підключатися вхідною ланкою до генератора змінного струму.

Для зменшення пульсацій випрямленої напруги на виході випрямляча ставлять електричний фільтр. Електричний фільтр для силових перетворювачів виконується на пасивних RLC-елементах.

Щоби суттєво не погіршився режим роботи випрямляча в стаціонарних та перехідних режимах, необхідно правильно вибрати схему та параметри фільтра. Для потужних випрямлячів не рекомендується використовувати фільтри з ємнісною вхідною ланкою, оскільки вони погіршують форму струмів у вентилях та обмотках трансформатора. У той же час для випрямлячів малої потужності, які мають значний внутрішній опір, ємнісні фільтри широко використовуються.

У залежності від числа фаз напруги живлення випрямлячі поділяються на однофазні та трифазні. Крім того, випрямлячі поділяються на однокатні та двокатні.

Якщо струм у вторинній обмотці трансформатора не змінює свій напрямок за період, то такий випрямляч називається однокатним.

У двокатних випрямлячах струм у вторинній обмотці трансформатора змінює свій напрямок за період два рази.

У залежності від навантаження, схеми фільтра та від особливостей його роботи розрізняють такі основні режими роботи випрямлячів: на активне навантаження; на активно-ємнісне навантаження; на активно-індуктивне навантаження; на проти-ЕРС.

Інвертори – це пристрої, що перетворюють потужність постійного струму на потужність змінного струму. Інвертори можна класифікувати за такими ознаками, як ступінь автономності (автономні й ведені мережею); властивості автономного інвертора, як джерела живлення (інвертори струму й інвертори напруги); кількістю фаз вихідної напруги (однофазні, трифазні, багатофазні) та ін.

Автономні інвертори – це пристрої, що перетворюють постійний струм на змінний із постійною чи регульованою частотою та мають автономне навантаження. В автономних інверторах (АІ), на відміну від інверторів, ведених мережею, процес комутації ключів ніяким чином не пов'язаний із напругою мережі живлення. Тому АІ може працювати з навантаженням, у складі якого немає джерела змінної напруги.

За способом комутації автономні інвертори можна розділити на декілька груп: інвертори з індивідуальною комутацією – комутуючий пристрій такого інвертора служить для запирання одного тиристора (вентильного плеча); інвертори з пофазовою комутацією – комутуючий пристрій інвертора служить

для почергового запирання тиристорів двох вентиляльних плечей, що належать до однієї фази інвертора; інвертори з груповою комутацією – для запирання всіх вентиляльних плечей однієї групи служить окремий комутуючий пристрій; інвертори із загальною комутацією – комутуючий пристрій є загальним для всіх вентиляльних плечей інвертора; інвертори з міжфазовою комутацією.

За способом керування інвертори поділяються на інвертори з самозбудженням і зовнішнім (незалежним) збудженням.

В інверторах із самозбудженням керуючі імпульси, що подаються на тиристори, формуються з вихідної напруги інвертора. Частота вихідної напруги визначається параметрами навантаження.

В інверторах із незалежним збудженням керуючі імпульси формуються зовнішнім генератором, що й задає частоту вихідної напруги. Зважаючи на те, що частота вихідної напруги не залежить від параметрів навантаження, цей тип інверторів отримав найбільш широке розповсюдження в перетворювальній техніці.

У залежності від особливостей протікання електромагнітних процесів автономні інвертори можна поділити на інвертори струму й інвертори напруги.

За способом керування вихідною частотою та напругою інвертори можна поділити на три види: з амплітудною модуляцією; з широтно-імпульсною модуляцією; з широтно-імпульсним регулюванням.

За типом керованих ключів інвертори поділяються на тиристорні та транзисторні.

Інвертори поділяються також за наступними основними схемами перетворення: одновентильні; однофазні з нульовим виводом; однофазні з нульовим виводом джерела живлення; однофазні мостові; трифазні мостові; трифазні з нульовим виводом.

Перетворювачі частоти призначені для перетворення потужності змінного струму однієї частоти на потужність змінного струму іншої частоти.

Перетворювачі частоти поділяються на два класи: перетворювачі частоти з ланкою постійного струму та безпосередні перетворювачі частоти. У свою чергу, безпосередні перетворювачі частоти поділяються: на безпосередні перетворювачі частоти з природною комутацією струму тиристорів (БПЧ з ПК); на безпосередні перетворювачі частоти з штучною комутацією струму тиристорів (БПЧ зШК).

Імпульсні перетворювачі постійного або змінного струму призначені для перетворення постійного або змінного струму однієї напруги на постійний або змінний струм іншої напруги. В імпульсних перетворювачах регулювання напруги при навантаженні відбувається за рахунок зміни параметрів вихідних імпульсів. За принципом регулювання напруги в навантаженні імпульсні перетворювачі поділяються на три види: із широтно-імпульсним регулюванням; із частотно-імпульсним регулюванням та з часо-імпульсним регулюванням.

У залежності від типу керованих ключів імпульсні перетворювачі поділяються на: тиристорні та транзисторні. Крім того, імпульсні перетворювачі поділяються на нереверсивні та реверсивні.

Склад випрямляча показаний на структурній схемі, що наведена на рис.2.6.

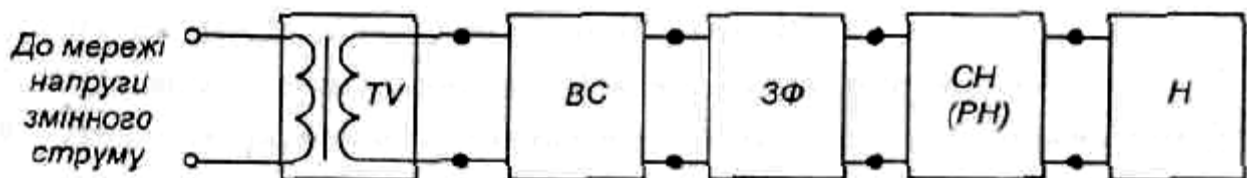


Рис.2.6. Структурна схема випрямляча:

TV – трансформатор напруги; ВС – вентильна схема;

ЗФ – згладжуючий фільтр; Н – навантаження;

СН(РН) – стабілізатор (регулятор) напруги

Як правило, випрямляч підмикається до розподільної мережі напруги змінного струму.

Трансформатор призначений для перетворення величини напруги мережі до величини, необхідної для роботи випрямляча. Він також забезпечує електричну (гальванічну) розв'язку мережі і навантаження.

Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену – пульсуючу однополярну. Вона може виконуватись на напівпровідникових ключах.

Згладжуючий фільтр перетворює випрямлену напругу в постійну. Фільтри виконуються на реактивних елементах, які мають властивість накопичувати електричну енергію: конденсаторах, дроселях. Такі фільтри називаються пасивними.

Для живлення радіоелектронних пристроїв часто використовують активні фільтри, які будуються на транзисторах, операційних підсилювачах та реактивних елементах.

Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні при змінах величини напруги мережі або величини навантаження у заданих межах.

При необхідності регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах використовують регулятори напруги. Стабілізатор також являє собою різновид регулятора, що забезпечує автоматичне регулювання за ознакою постійності величини напруги на навантаженні.

Регулятор (стабілізатор) може бути увімкненим і зі сторони змінної напруги (до трансформатора).

Параметри вузлів випрямляча та їх елементів, режими їх роботи повинні бути узгоджені із заданими умовами роботи навантаження. Навантаження також вважають елементом випрямляча, бо зміни його величини у процесі роботи впливають на режим роботи всього пристрою.

Згладжуючий фільтр, стабілізатор (регулятор), а іноді й трансформатор можуть не входити до складу випрямляча, коли в них немає необхідності.

Крім вказаних вузлів, випрямляч може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі та ін. (запобіжник, автоматичний вимикач, електронний пристрій захисту, елементи і вузли індикації наявності і величини напруги і струму, а також вузли діагностики працездатності).

Найширшого розповсюдження набули схеми випрямлячів, зображені на рис.2.7.

Основними експлуатаційними характеристиками є такі.

1. Величина середньої напруги на навантаженні U_d (див. рис.2.8) та його середнього струму I_d :

$$R_i = \frac{U_d}{I_d}. \quad (2.1)$$

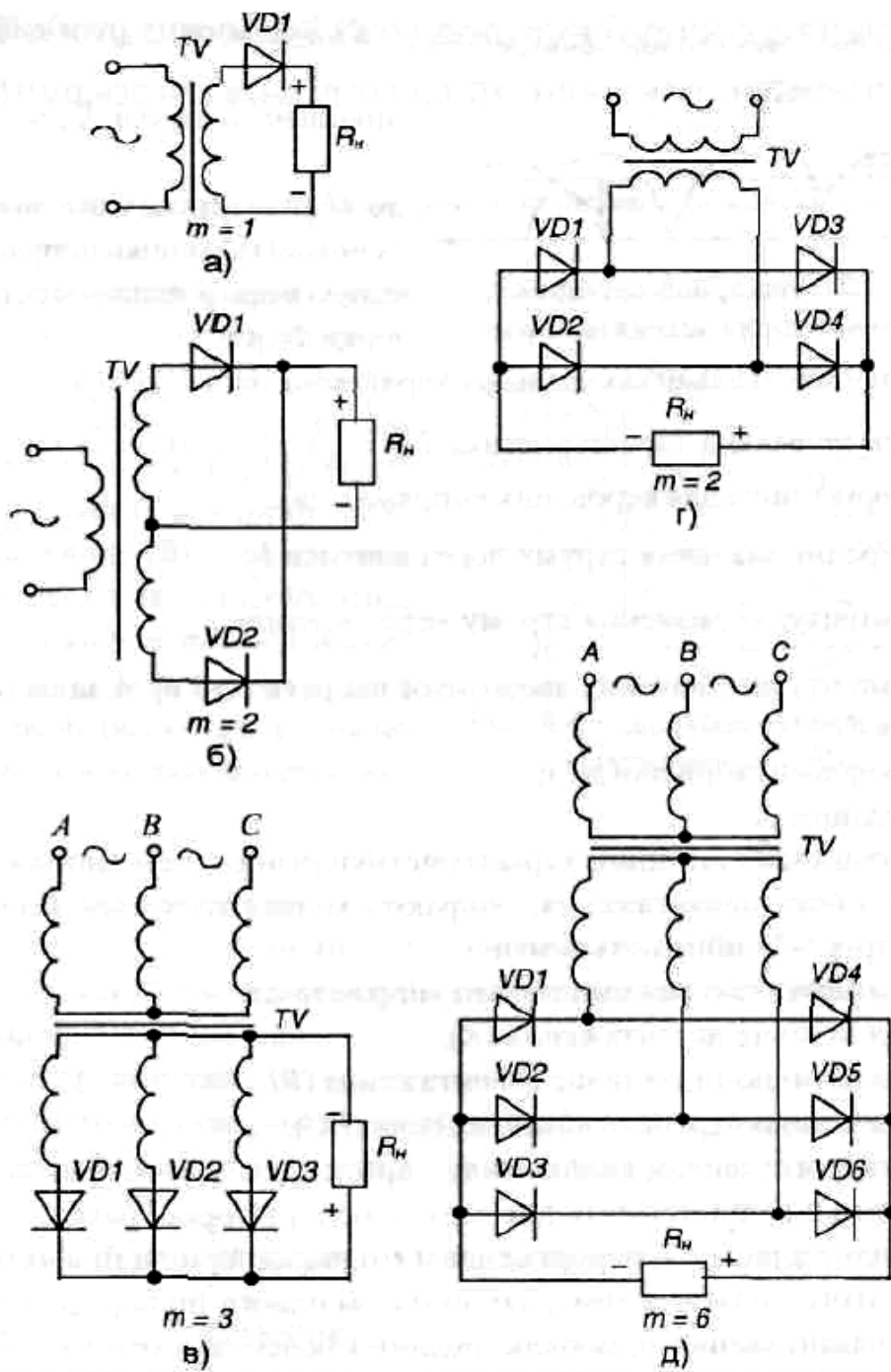


Рис.2.7. Випрямлячі:

- а-в) однофазні (з нульовим виводом);
- г, д) двохфазні (мостові);
- а) однофазна однопівперіодна;
- б) однофазна двопівперіодна з нульовим виводом;
- в) трифазна з нульовим виводом (схема Міткевича);
- г) однофазна мостова;
- д) трифазна мостова (схема Ларіонова)

2. Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги:

$$\hat{E}_r = \frac{U_{m(1)}}{U_d}, \quad (2.2)$$

де $U_{m(1)}$ – амплітудне значення основної гармоніки випрямленої напруги при розкладанні останньої в 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 прикладена до вентиля U_{am} .

8. Коефіцієнт корисної дії η .

9. Надійність.

Знаючи експлуатаційні характеристики різних схем випрямлячів і вимоги з боку навантаження, обирають конкретну схему. За параметрами 5-7 вибирають вентиля.

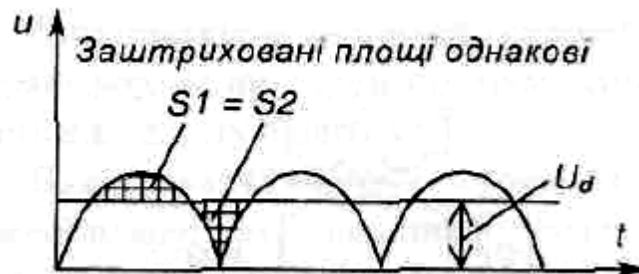


Рис.2.8. Ілюстрація середнього значення випрямленої напруги

Розрізняють такі режими роботи випрямлячів:

- на активне навантаження (R);
- на активно-індуктивне навантаження (RL);
- на активно-ємнісне навантаження (RC);
- на протиелектрорушійну силу – проти-е.р.с. (E) – наприклад, коли випрямляч використовують для заряду акумуляторної батареї.

Як видно з рис.2.7, найпростішим є однопівперіодний випрямляч, робота якого полягає в тому, що протягом одного півперіоду напруги мережі навантаження підімкнене діодним ключем до вторинної обмотки трансформатора, а протягом другого півперіоду відімкнене від неї. Показники

якості вихідної напруги та інші у цього випрямляча низькі, тому його застосовують дуже рідко.

Для живлення навантажень середньої і великої потужності використовують трифазні випрямні схеми, які мають порівняно з однофазними ряд переваг:

- краще використовуються вентиляції за струмом;
- суттєво нижчий коефіцієнт пульсацій;
- ефективне використання габаритної потужності трансформатора;
- більш ефективне використання згладжуючих фільтрів.

До мережі трифазні випрямлячі підключають через трифазні трансформатори, обмотки яких вмикаються зіркою або трикутником.

Найрозповсюдженішими є такі два типи схем трифазних випрямлячів:

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

Інвертори, ведені мережею. Інвертори, ведені мережею – це перетворювальні пристрої, які забезпечують передачу енергії від джерела постійної напруги у мережу змінної напруги, напруга та частота якої обумовлюються стороннім потужним джерелом напруги.

Ці пристрої виконують на основі керованих випрямлячів (до речі, останні також відносять до перетворювачів, ведених мережею).

На рис.2.9. наведена схема однофазного інвертора, на якій зображено керований випрямляч, до вихідного кола якого підімкнено джерело U_d із вказаною полярністю.

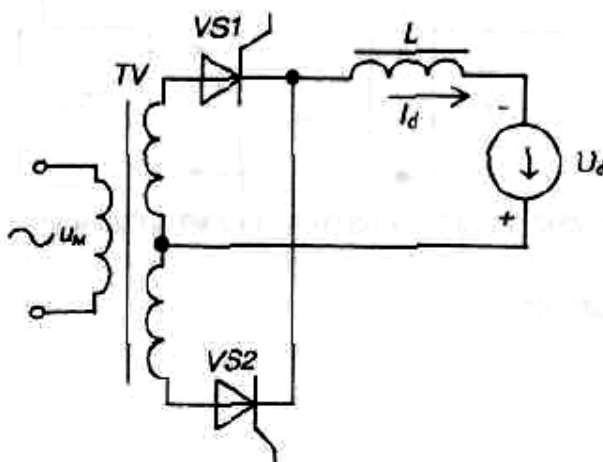


Рис.2.9. Однофазний ведений мережею інвертор

При цьому пристрій може виконувати дві функції:

- 1) керуваного випрямляча, якщо кут керування задавати у межах $0 < \alpha < \pi/2$;
- 2) інвертора, веденого мережею, якщо кут керування задавати у межах $\pi/2 < \alpha < \pi$.

На рис.2.10 зображені залежності напруги U_d від кута керування α та кута випередження:

$$\beta = \pi - \alpha.$$

Характеристика $U_{d\beta} = f(\beta)$ свідчить, що при різних β напруга $U_{d\beta}$ повинна бути меншою або дорівнювати за величиною U_{d0} :

$$U_{d\beta} \leq U_{d0}. \quad (2.3)$$

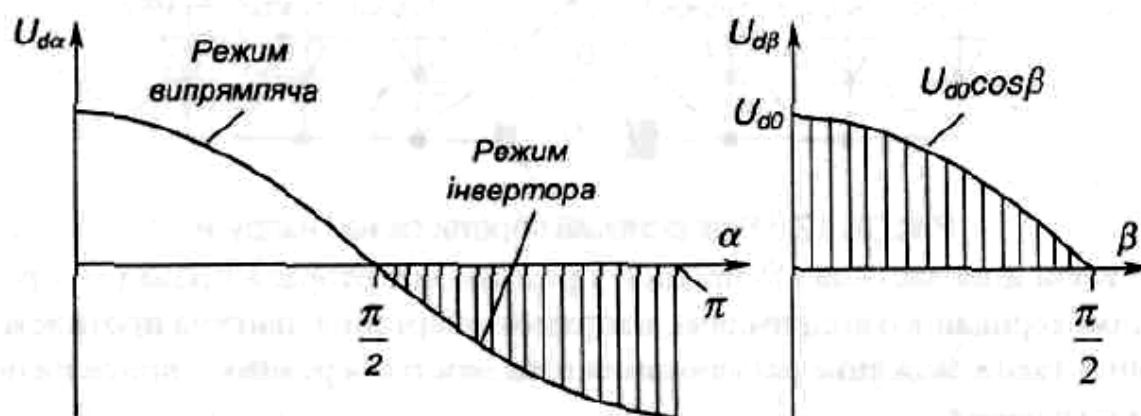


Рис.2.10. Регульовальні характеристики інвертора, веденого мережею, для режимів керуваного випрямляча й інвертора

Інвертори, ведені мережею, використовуються у таких випадках:

- 1) для плавного регулювання швидкості обертання двигунів (режим випрямляча);
- 2) для регульованого гальмування двигунів (режим інвертора).

На рис.2.11 зображена схема реверсивного перетворювача напруги, призначеного для регулювання швидкості обертання і реверсу (зміна напрямку обертання) двигуна постійного струму.

Коли ліва частина (1) схеми працює у режимі керуваного випрямляча, а права (2) у режимі інвертора, веденого мережею, двигун обертається в одному напрямку і можливе регулювання швидкості його обертання й прискорене його гальмування.

Коли ліва частина (1) працює у режимі інвертора, а права (2) у режимі керованого випрямляча, напрямок обертання двигуна протилежний і також можливе регулювання швидкості обертання і прискорене гальмування.

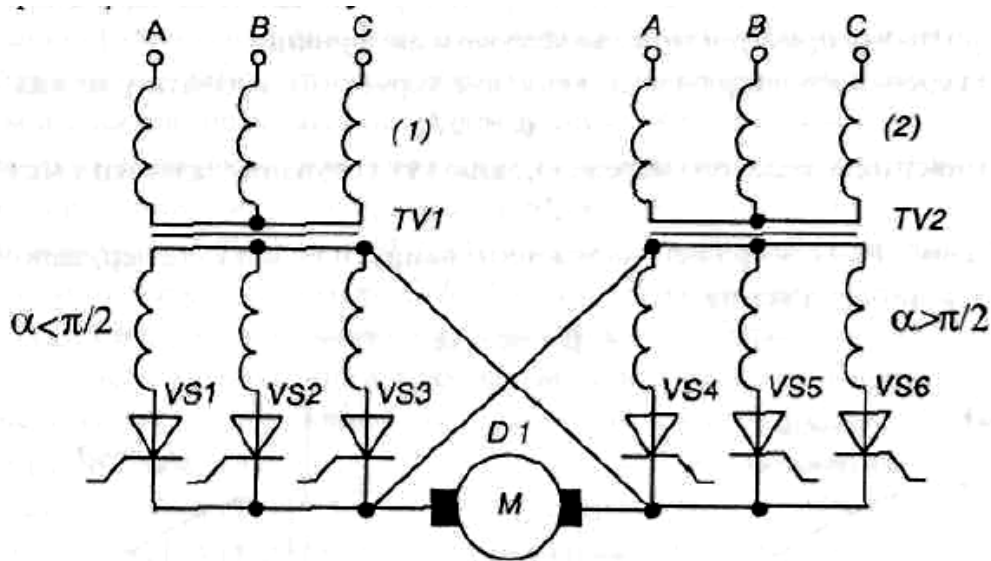


Рис.2.11. Реверсивний перетворювач напруги

Реверсивний перетворювач працює таким чином, що схема керування надсилає керуючі сигнали, наприклад, у частину (2), лише після припинення їх подачі у частину (1). Кут керування α задається так, щоб виконувати умову $U_{дв} = U_{д0}$.

При використанні такого пристрою, енергія двигуна в режимі гальмування не гаситься, як звичайно, у спеціальних потужних резисторах, а віддається у мережу живлення – рекуперується.

Отже, коли пристрій працює в режимі інвертора, джерелом енергії є двигун, а споживачем (навантаженням) – мережа змінного струму.

При підготовці до заходів поточного контролю рекомендовано використовувати таку літературу [4, С.315-392; 5, С.37-107; 6, С.188-216, С.266-268].

2.2.2. Контрольні запитання для самоперевірки

1. Що являє собою випрямляч?
2. Де використовуються випрямлячі?
3. Із чого складається випрямляч?
4. Що стоїть в більшості випадків на вході випрямляча?
5. Який випрямляч називається однофазним?

6. Який випрямляч називається двотактним?
7. Які основні режими роботи випрямлячів?
8. Чи використовуються фільтри з ємнісною вхідною ланкою для потужних випрямлячів?
9. Чи використовуються ємнісні фільтри для випрямлячів малої потужності?
10. Від чого залежить режим роботи випрямляча?
11. Що таке інвертор?
12. Як можна класифікувати інвертори за такими ознаками, як ступінь автономності?
13. Класифікувати автономні інвертори як джерела живлення.
14. Як можна класифікувати автономні інвертори за кількістю фаз вихідної напруги?
15. Для чого призначені перетворювачі частоти?
16. На які два класи поділяються перетворювачі частоти?
17. На які дві групи поділяються безпосередні перетворювачі частоти?
18. Для чого використовуються імпульсні перетворювачі?
19. Які принципи регулювання використовуються в імпульсних перетворювачах?
20. Як поділяються імпульсні перетворювачі в залежності від типу керування ключів?
21. Чи використовуються реверсивні імпульсні перетворювачі?
22. Що таке інвертор, ведений мережею? Коли використовують такі інвертори?
23. Які схеми випрямлячів Ви знаєте?
24. Що собою являє однофазна однонаправлена, однопульсна схема випрямляча?
25. Що собою являє однофазна схема випрямляча із середньою точкою?
26. Що собою являє однофазна мостова схема випрямляча?
27. Що собою являє трифазна схема випрямляча з нульовим виводом?
28. Що собою являє трифазна мостова схема випрямляча?
29. Яка схема випрямляча відома під назвою схеми Ларіонова?
30. Чи співпадають за фазою напруга та струм при використанні активного навантаження випрямляча?

31. Чи обов'язкова наявність трансформатора у схемі з середньою точкою?
32. Які пульсації напруги та струму в навантаженні випрямляча без фільтра?
33. Вказати недоліки схеми випрямляча з середньою точкою?
34. Вказати недоліки мостової схеми випрямляча.
35. Скільки вентилів працюють одночасно у схемі випрямляча з середньою точкою?
36. Скільки вентилів працюють одночасно в мостовій схемі випрямляча?
37. Де більші пульсації вихідної напруги: при використанні однофазної схеми випрямляча із середньою точкою чи однофазною мостовою?
38. Де більші пульсації вихідної напруги: при використанні трифазної схеми випрямляча з середньою точкою чи трифазною мостовою?
39. Для чого використовують електричний фільтр на вході випрямляча?
40. Де використовують індуктивні фільтри?
41. Чи рекомендується використовувати для потужних випрямлячів фільтри з ємнісною вхідною ланкою?
42. Для згладжування пульсацій якого вихідного параметра випрямлячів використовуються індуктивні фільтри?
43. Чи постійна напруга на ємнісному фільтрі після його зарядження?
44. Яку функцію виконує ємність на виході випрямляча?
45. Чи можуть інвертори, ведені мережею, працювати у режимі випрямляча?

2.3. Тема 3. Імпульсні перетворювачі енергії та автономні інвертори

2.3.1. Зміст та методичні вказівки до теми 3

Імпульсні джерела живлення. Виконання функціональних вузлів електронної апаратури на напівпровідникових приладах та інтегральних мікросхемах дало змогу істотно зменшити габаритні розміри і масу основних блоків апаратури. Крім того, для функціонування апаратури необхідна постійна напруга високої якості. У стаціонарних умовах живлення апаратури переважно здійснюється від мережі змінного струму промислової частоти. Використання традиційних методів побудови джерел живлення (низькочастотний силовий

трансформатор – випрямляч із згладжувальним фільтром – безперервний стабілізатор напруги) призводить до того, що габаритні розміри і маса живлення визначають масогабаритні показники апаратури в цілому. Використання для стабілізації напруги безперервних стабілізаторів, які мають ККД не більше, ніж 75%, призводить до великих втрат потужності на регульовальному елементі, що потребує застосування спеціальних засобів для відведення теплоти, яка виділяється, причому, ККД зменшується під час розширення меж зміни напруги мережі живлення.

Для поліпшення масогабаритних та енергетичних показників джерела живлення виконуються за схемою з високочастотним перетворенням електричної енергії. Габаритні розміри і маса силових трансформаторів на частотах десятки-сотні кілогерців значно менші, ніж у разі використання напруги промислової частоти. Елементи згладжувальних фільтрів на високих частотах мають значно менші номінальні значення, отже, і менші габаритні розміри та масу.

Використання для стабілізації напруги імпульсного режиму роботи регульовальних транзисторів дає змогу істотно зменшити втрати потужності в стабілізаторі й підвищити його ККД та джерела живлення в цілому до 80-90%, причому ККД зберігає ці значення в широкому діапазоні напруги мережі живлення. Такі джерела електроживлення називаються *імпульсними джерелами електроживлення*, або джерелами живлення з безтрансформаторним входом, оскільки вони не містять низькочастотного силового трансформатора. Схеми імпульсних джерел живлення складніші, ніж безперервних, але високі питомі масогабаритні та енергетичні показники визначили їх широке застосування.

Основним фактором, що дає змогу істотно зменшити габаритні розміри і масу джерела живлення, є виключення зі схеми джерела силового низькочастотного трансформатора. Напруга мережі змінного струму промислової частоти подається безпосередньо на випрямляч, вихідна напруга якого приблизно дорівнює амплітудному значенню напруги мережі. Отримана постійна напруга за допомогою транзисторного перетворювача перетворюється на змінну напругу прямокутної форми з частотою десятки кілогерців. Силовий трансформатор на таких частотах має невеликі габаритні розміри і масу, а число та значення необхідних напруг визначаються параметрами вторинних обмоток силового трансформатора.

Для одержання постійних напруг, напруга кожної вторинної обмотки випрямляється високочастотним випрямлячем з відповідним згладжувальним фільтром. Стабілізація вихідної напруги здійснюється або за допомогою імпульсного стабілізатора напруги, або за допомогою регульованого (стабілізувального) перетворювача. Тому багатоканальні імпульсні джерела живлення мають таку структурну схему (рис.2.12).

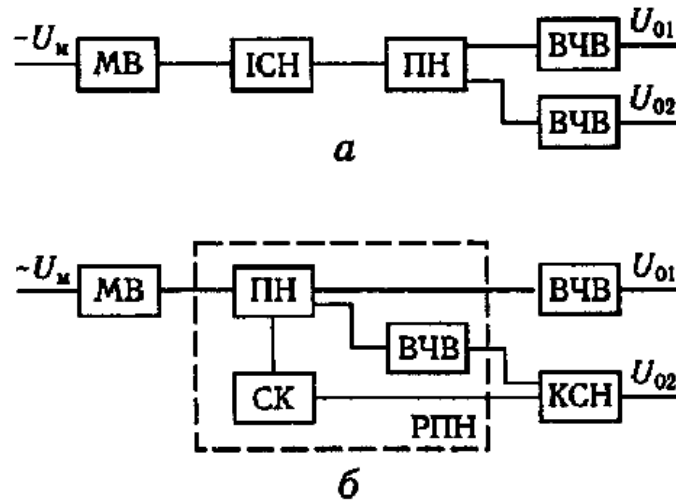


Рис.2.12. Структурні схеми імпульсних джерел живлення:

МВ – мережний випрямляч; ІСН – імпульсний стабілізатор напруги; ПН – перетворювач напруги; РПН – регульований перетворювач напруги; СК – схема керування;

ВЧВ – високочастотний випрямляч; КСН – компенсаційний стабілізатор напруги.

Джерела живлення за схемою на рис.2.12,а містять у своєму складі імпульсний стабілізатор напруги (ІСН) як окремий функціональний блок, що виконує дві важливі функції: по-перше, ІСН знижує вихідну напругу мережного випрямляча (МВ), яка становить сотні вольтів, до значення, більш прийняттого для роботи перетворювача напруги (ПН); по-друге, він стабілізує напругу живлення ПН, при цьому стабілізуються напруги на всіх вторинних обмотках силового трансформатора ПН. Вихідна напруга ПН у схемі на рис.2.12,а має форму прямокутних різнополярних імпульсів зі шпаруватістю, що дорівнює двом. Така форма напруги є оптимальною для роботи високочастотного випрямляча з погляду якості випрямленої напруги.

Основним блоком джерел живлення, виконаних за схемою на рис.2.12,б, є регульований перетворювач напруги (РПН), який здійснює одночасно функції перетворення постійної напруги на змінну та стабілізації випрямленої напруги

(вихідної напруги ВЧВ). Стабілізація напруги здійснюється завдяки тому, що напруги на вторинних обмотках силового трансформатора мають форму прямокутних імпульсів з «паузою на нулі» і під час зміни напруги живлення РПН тривалість імпульсу змінюється так, що середнє значення змінної напруги за половину періоду залишається приблизно постійним.

Імпульсні перетворювачі постійного струму. В електроприводах постійного струму необхідно плавно змінювати напругу на обмотках електродвигуна. Таку функцію виконує імпульсний перетворювач постійної напруги. В імпульсному перетворювачі за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) безперервна напруга контактної мережі перетворюється на послідовні імпульси, ширина яких змінюється в залежності від того, яку напругу необхідно мати на обмотках електродвигуна. Розглянемо роботу імпульсного перетворювача в складі електропривода постійного струму на принциповій схемі в режимі пуску (рис.2.13).

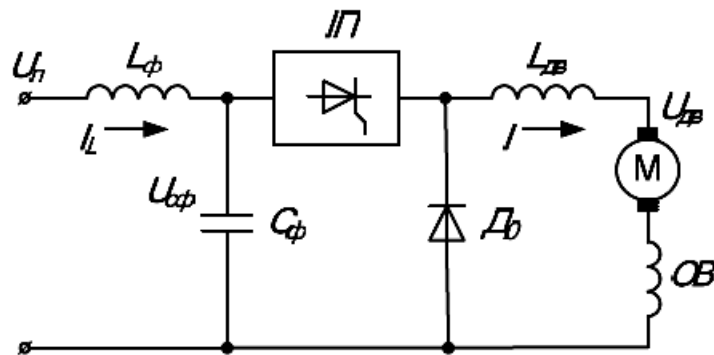


Рис.2.13. Принципова схема імпульсного регулювання напруги на обмотках електродвигуна за рахунок ШІМ у режимі пуску

У даній схемі вхідний індуктивно-ємнісний фільтр L_ϕ , C_ϕ служить для обмеження перенапруги на імпульсному перетворювачі при його запиранні, а також для згладжування пульсацій струму у контактній мережі.

Графіки струму і напруги при імпульсному регулюванні напруги на обмотках електродвигуна за рахунок ШІМ наведені на рис.2.14.

Напруга на електродвигуні змінюється періодичним вмиканням і вимиканням імпульсного перетворювача. Протягом часу імпульсу t_i імпульсний перетворювач відкритий і до кола електродвигуна прикладена напруга $U_{сф}$, середнє значення якої можна прийняти таким, що дорівнює напрузі джерела живлення:

$$U_{\text{н0}} = U_{\text{а}} .$$

За рахунок ШІМ, якщо зневажити порівняно малим падінням напруги в омичному опорі дроселя L_f . При цьому струм у електродвигуні зростає за експонентою від I_{\min} до I_{\max} і енергія з контактної мережі й конденсатора C_f витрачається не тільки для виконання роботи електродвигуна й подолання втрат за час t_i , але й запасується в індуктивностях, а потім витрачається на виконання роботи електродвигуна і на втрати під час паузи t_p . При запиранні імпульсного перетворювача струм у колі електродвигуна зменшується, в його обмотках і дроселі L_d виникає ЕРС самоіндукції, під дією якої струм у електродвигуні продовжує протікати, замикаючись через нульовий діод VD.

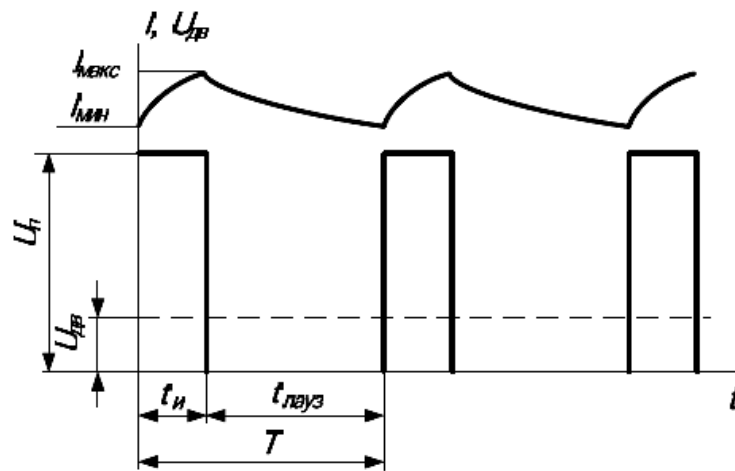


Рис.2.14. Графіки струму і напруги при імпульсному регулюванні напруги на обмотках електродвигуна

Середнє значення вихідної напруги імпульсного перетворювача дорівнює:

$$U_{сф} = (t_i/T) * U_p, \quad (2.4)$$

де T – період, який не змінюється в часі.

При постійному середньому струмі через електродвигун $I = \text{const}$ – має місце пряmlinійна залежність між кутовою швидкістю електродвигуна ω і коефіцієнтом заповнення λ , який дорівнює:

$$\lambda = t_i/T. \quad (2.5)$$

При значеннях $\lambda=0$ і $\lambda=1$, що визначають межі імпульсного регулювання, маємо:

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = 0. \quad (2.6)$$

Перша межа ($\lambda=0$) не має практичного значення. Формально її одержують при $t_i = 0$. Друга межа ($\lambda=1$) настає при виході на автоматичну

характеристику електродвигуна, коли імпульсний перетворювач відкритий весь час.

Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком. Розглянемо як відбувається зміна частоти в однофазному перетворювачі з безпосереднім зв'язком (рис.2.15,а). Схема містить трансформатор із середнім виводом на первинній обмотці та дві групи біполярно ввімкнених тиристорів. Це забезпечує роботу перетворювача в додатні та від'ємні півперіоди вхідного сигналу. В додатний півперіод напруги живлення u_1 працюють тиристори VS2 і VS3, а у від'ємний – VS1 і VS4, тривалість роботи яких визначається моментами подання імпульсів керування.

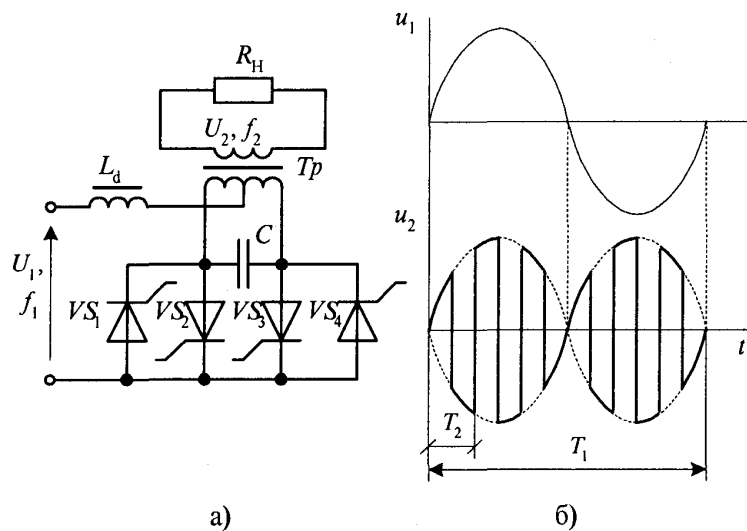


Рис. 2.15. Однофазний безпосередній перетворювач частоти з примусовою комутацією:
а) схема; б) часова діаграма

Якщо під час додатної півсинусоїди вхідної напруги відкрити тиристор VS2, то струм проходить через ліву півобмотку трансформатора, якщо ж потім відкрити тиристор VS3, то тиристор VS2 закривається, а струм проходить вже через праву півобмотку трансформатора. Завдяки протилежній спрямованості струмів у цих півобмотках на вторинній обмотці трансформатора отримується змінна напруга u_2 (рис.10.1,б). Аналогічно формується вихідна напруга трансформатора і під час від'ємної півсинусоїди вхідної напруги u_1 . Частота вихідної напруги перетворювача залежить від тривалості вмикання тиристорів.

Для закриття тиристорів використано комутувальний конденсатор, який і є вузлом примусової комутації. Під час комутації тиристорів відбувається

перезаряд конденсатора, внаслідок чого струм тиристора, що виходить з роботи, дорівнює нулю.

В перетворювачах з примусовою комутацією частоту вихідної напруги f_2 можна регулювати вгору і вниз від частоти f_1 .

Такі перетворювачі частоти мають високу надійність роботи, оскільки при зриві інвертора в період від'ємної півсинусоїди напруги джерела живлення відкрита пара тиристорів автоматично закривається, так як до анодів тиристорів прикладено від'ємний потенціал.

Перетворювачі частоти з проміжною ланкою. Схеми перетворювачів частоти з проміжною ланкою містять автономні інвертори, які перетворюють постійний струм в змінний. Процес перетворення постійного струму в змінний називається інвертуванням і є оберненим до випростування струму. Під час цього процесу потік енергії спрямований з кола постійного струму в коло змінного струму. Якщо в колі змінного струму є джерело напруги, то процес інвертування можливий тільки за умови, що напрям струму буде протилежним до напрямку напруги цього джерела. Залежно від умов інвертування, схеми поділяються на автономні інвертори та інвертори, ведені мережею. В автономних інверторах в колі змінного струму, куди інвертор пересилає енергію, відсутнє джерело змінної напруги і періодичність цієї напруги задається конкретною схемою інвертора. Для цього за допомогою керованих вентилів здійснюється комутація струму джерела постійної напруги, яка підтримується додатковими елементами (переважно конденсаторами або конденсаторами з індуктивністю).

Структурну схему перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму зображено на рисунку 2.16.

Такі перетворювачі складаються з керованого випростувача В, фільтра та автономного інвертора АІ. Регулювання частоти f_2 вихідної напруги в такій схемі здійснюється інвертором за допомогою системи керування СКІ, а величини напруги U_2 – керованим випростувачем з використанням системи керування СКВ. В окремих випадках регулювання частоти і величини вихідної напруги здійснюються тільки інвертором, випростувач виконується некерованим. Частота вихідної напруги регулюється в широкому діапазоні як вниз, так і вгору від частоти джерела живлення.

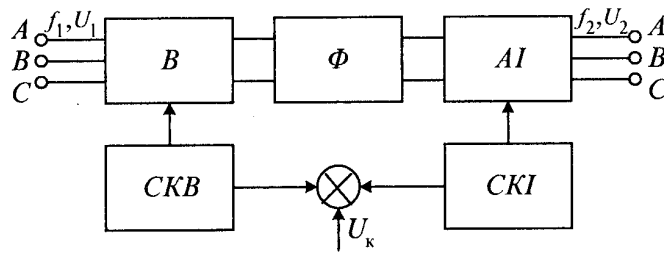


Рис. 2.16. Структурна схема перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму

Недоліком перетворювачів з проміжною ланкою постійного струму є подвійне перетворення енергії, що приводить до зниження ККД перетворювача, збільшення його встановленої потужності і маси. Проте, такі перетворювачі простіші за будовою у порівнянні з перетворювачами з безпосереднім зв'язком.

Перетворювачі частоти з проміжною ланкою змінного струму складаються з таких компонентів (рис.2.17): випростувач, який перетворює змінну напругу в постійну В; автономний інвертор, який перетворює постійну напругу в змінну напругу проміжної частоти АІ; перетворювач частоти, який формує вихідну напругу заданої регульованої частоти або нерегульованої частоти ПЧ.

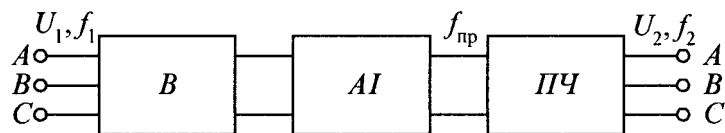


Рис.2.17. Структурна схема перетворювача частоти з проміжною ланкою змінного струму

Недоліком перетворювачів частоти з проміжною ланкою змінного струму є потрійне перетворення енергії, що відбивається на зниженні ККД перетворювача, складності силової схеми та системи керування.

Регулювання частоти в перетворювачах може здійснюватись дискретно та плавно. В перетворювачах частоти з природною комутацією частота вихідної напруги регулюється тільки вниз від частоти джерела живлення і визначається за виразами: для дискретного регулювання частоти $f_2 = (f_1 \cdot m_1) / (2 \cdot n + m_1)$; для плавного регулювання частоти $f_2 = (f_1 \cdot m_1 \cdot \pi) / ((2 \cdot n + m_1) \cdot \pi + \varphi_1 \cdot m_1)$. Тут m_1 – кількість фаз джерела живлення; $\varphi_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t_1$ – пауза між вимкненням однієї (анодної) та увімкненням другої (катодної) груп тиристорів; $n = 0, 1, 2, \dots$

Плавність регулювання частоти в перетворювачах з проміжною ланкою змінного струму залежить від відношення проміжної частоти до вихідної $f_{\text{ПР}} / f_2$. Чим більше це відношення, тим вища плавність регулювання частоти, рівномірніше навантаження тиристорів, легше забезпечується синусоїдна форма вихідної напруги.

При підготовці до заходів поточного контролю рекомендовано використовувати таку літературу [6, С.252-265; 7, С.327-363].

2.3.2. Контрольні запитання для самоперевірки

1. Яке призначення перетворювачів частоти?
2. Назвіть основні компоненти перетворювача частоти.
3. У чому полягає інвертування сигналів?
4. Поясніть принцип роботи інвертора, веденого мережею живлення.
5. Яка особливість автономних інверторів?
6. За якими ознаками класифікуються перетворювачі частоти?
7. Назвіть переваги та недоліки перетворювачів частоти з ланкою постійного струму.
8. Поясніть принцип роботи перетворювача частоти з ланкою постійного струму.
9. У чому особливості роботи безпосереднього перетворювача частоти з примусовою комутацією?
10. Які переваги та недоліки перетворювача частоти з проміжною ланкою змінного струму?
11. У яких випадках використовують імпульсні перетворювачі постійної напруги?
12. За рахунок якого параметра регулюється напруга в навантаженні імпульсного перетворювача при використанні ШІМ?
13. Які типи імпульсних перетворювачів постійної напруги Ви знаєте?
14. За якою схемою виконується реверсивний імпульсний перетворювач?
15. Поясніть принцип дії імпульсного стабілізатора напруги.

3. ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

3.1. Загальні вказівки

Контрольну роботу, необхідно виконувати в окремому зошиті, на обкладинці якого вказати: найменування дисципліни, прізвище, ім'я, по батькові, номер навчального шифру (номер залікової книжки), факультет та курс.

Розрахунки, формули та пояснювальний текст слід писати чітко і розбірливо, залишаючи на сторінці праворуч поля шириною близько 3 см; схеми та графіки необхідно виконувати на комп'ютері або кульковою ручкою, використовуючи креслярські інструменти (ксерокси графіків не приймаються). Умовні графічні позначення усіх елементів схем креслити згідно до вимог ДСТУ.

У ході виконання контрольної роботи важливо також навчитися вибирати за довідниками типи елементів електричних схем. Деякі довідникові дані наведені у прикладі розрахунку контрольної роботи.

3.2. Контрольна робота

Метою контрольної роботи є набуття досвіду розрахунку тиристорних регуляторів напруги.

3.2.1. Теоретичні відомості, що необхідні для виконання розрахунку

Для виконання розрахунку необхідно знати принцип дії та основні параметри тиристорів, а також принцип дії та методику розрахунку регуляторів напруги змінного струму на тиристорах.

3.2.2. Вихідні дані

Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) U_m, B – діюче значення напруги мережі живлення;

- 2) f_m , Гц – частота мережі живлення;
- 3) R_n , Ом – опір навантаження;
- 4) α , ел.град – кут керування тиристорів;
- 5) $U_{дж}$, В – напруга джерела живлення системи керування тиристорами.

Варіанти вихідних даних наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні дані для розрахунку регулятора напруги

Цифри номера залікової книжки		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	U_m , В	127	220	380	660	127	220	380	660	220	380
f_m , Гц		50									
	R_n , Ом	6,3	10	18	30	3,1	5,1	9,1	15	4,7	8,2
α , ел.град		10	20	35	40	50	65	70	80	95	100
$U_{дж}$, В		9	12	15	17	9	10	12	17	9	12

Приклад вибору варіанта для номера залікової книжки 77732:

- 1) з колонки 3 маємо – $f_m = 50$ Гц, $\alpha = 40$ ел.град, $U_{дж} = 40$ В;
- 2) з колонки 2 – $U_m = 380$ В, $R_n = 18$ Ом.

3.2.3. Зміст контрольної роботи

3.2.3.1. Теоретичні пояснення

Регулятори змінного струму є електронними ключами, що дозволяють вмикати або вимикати навантаження у колі змінного струму або регулювати потужність, що виділяється у навантаженні. Вони можуть бути класифіковані залежно від способу керування, кількості фаз, схеми з'єднання, виду навантаження та ін. Найбільш загальна їх класифікація ґрунтується на способі керування та включає наступні типи регуляторів:

- 1) електронний ключ типу контактора;
- 2) керований електронний ключ;
- 3) регульований електронний ключ.

Електронний ключ типу контактора, як і електромеханічний контактор, служить лише для вмикання або вимикання навантаження. Після вмикання напруга на навантаженні дорівнює напрузі мережі живлення.

Керований електронний ключ відрізняється від контактора тим, що для зниження величини перехідних струмів, які супроводжують процес вмикання, подача напруги на навантаження здійснюється поступово від нуля до значення напруги мережі живлення. Це реалізується зменшенням кута керування від найбільшої величини до найменшої з наперед встановленою швидкістю.

Регульований ключ являє собою електронний тиристорний ключ, у якого може здійснюватися регулювання за необхідним законом кута керування, а значить, і потужності, що віддається у навантаження. При цьому форма кривої напруги на навантаженні відрізняється від форми кривої мережі живлення, за рахунок чого і напруга, і струм містять в собі багато гармонік. Основна гармоніка має ту ж частоту, що й частота напруги живлення. Струм основної гармоніки відстає від напруги за фазою. Величина кута відставання залежить від виду навантаження і величини кута керування, але навіть за активного навантаження кут відставання не дорівнює нулю: пристрої з такими ключами завжди споживають реактивну потужність.

Регулятори всіх трьох типів мають одну й ту ж схему силового тиристорного вузла й відрізняються побудовою системи керування, яка повинна реалізовувати потрібний закон зміни напруги на навантаженні.

В якості силових елементів у тиристорних регуляторах використовують, в основному, тиристири, симістори та діоди. Із властивостей тиристора впливає, що сигнал керування вмикає регулятор напруги змінного струму практично без затримки, після чого струм у колі навантаження припиниться лише при переході його через нуль за умови відсутності при цьому сигналу керування.

Найрозповсюдженіша схема тиристорного регулятора та діаграми його роботи за активного навантаження наведені на рис.3.1. Навантаження тут підімкнене до мережі з напругою u_m за допомогою ключа, що є двома увімкненими зустрічно-паралельно тиристорами: VS1 та VS2.

Умовами протікання струму через тиристор є наявність на ньому прямої напруги та подачі напруги на керуючий електрод – напруги керування. Якщо її подача на тиристор здійснюється симетрично в обох півперіодах, то напруга на навантаженні не має постійної складової.

З часових діаграм, наведених на рис.3.1,б видно, що, змінюючи кут керування тиристорів α від 0^0 до 180^0 , можна змінювати (регулювати) напругу на навантаженні від U_m до 0.

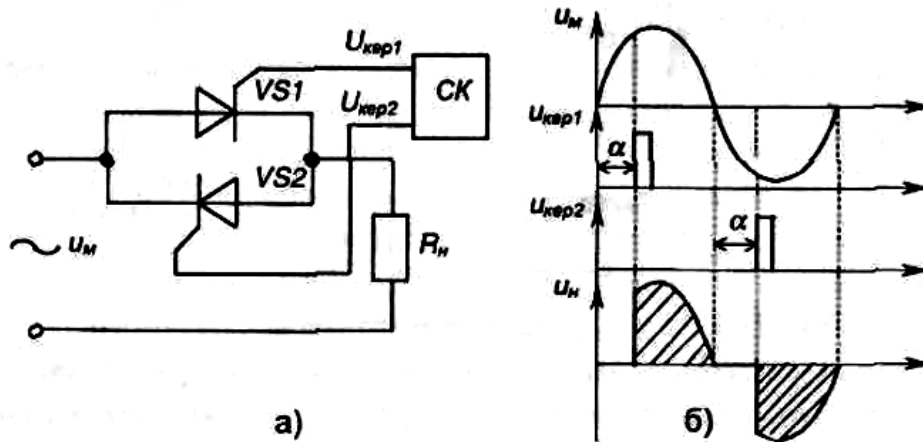


Рис.3.1. Однофазний регулятор:

а) електрична схема; б) часові діаграми роботи

Через тиристор VS1 струм протікає під час додатного півперіода, а через тиристор VS2 – під час від'ємного. Завдяки симетричності керування середнє I_a та діюче I_T значення струмів двох тиристорів однакові та становлять:

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{R_n} \cdot \sin \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{2\pi R_n} (1 + \cos \alpha); \quad (3.1)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_m}{R_n} \right)^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \frac{U_m}{R_n} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)}, \quad (3.2)$$

де $\vartheta = \omega t = 2\pi f_m t$.

Діюче значення струму навантаження становить:

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_m}{R_n} \right)^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \frac{U_n}{R_n} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = \sqrt{2} I_T. \quad (3.3)$$

Проектування силової схеми регулятора змінного струму є комплексною задачею, бо навіть у режимі, що встановився, струм через тиристори та напруга на них мають квазістаціонарний характер.

При виборі вентилів перетворювача (наприклад, тиристорів) за струмом та напругою, втрати потужності в них знаходять, виходячи з форми кривої струму, що протікає через напівпровідниковий прилад. Втрати у вентилі практично дорівнюють втратам від прямого струму. Графічні залежності, що називаються характеристиками керування, показують залежність від кута

керування струмів окремих вентилів, діючих струму та напруги навантаження у режимі, що встановився.

Регулятори змінного струму у якості ключів типу контактора застосовують, наприклад, для керування нагрівальними приладами (печі опору, побутові електронагрівачі і т.п.), для комутації одно та трьохфазних електродвигунів.

Керовані електронні ключі можуть бути застосовані, наприклад, для повільного вмикання або вимикання освітлення театральної зали, для такого ж запуску електродвигуна із забезпеченням при цьому понижених значень пускових струмів.

Повністю керовані регулятори використовують в регуляторах (стабілізаторах) напруги, для регулювання яскравості потужних джерел освітлення та ін.

3.2.3.2. Приклад розрахунку однофазного регулятора напруги

Вихідні дані:

Виконаємо розрахунок регулятора, електрична схема якого наведена на рис.3.1,а (розрахунок системи керування СК в завдання даної роботи не входить).

Вихідними даними є:

- 1) діюче значення напруги мережі живлення $U_M = 380\text{В}$;
- 2) опір навантаження $R_H = 7,5\text{Ом}$;
- 3) кут керування тиристора $\alpha = 45^\circ$;
- 4) частота мережі живлення $f_M = 50\text{Гц}$;
- 5) напруга живлення системи керування тиристора $U_{ж} = 12\text{В}$;
- 6) охолодження тиристорів – повітряне природне;
- 7) температура оточуючого середовища 25°С ;
- 8) рекомендується застосовувати тиристори типу Т10.

Необхідно визначити:

- 1) параметри тиристора;
- 2) режими роботи силової схеми регулятора (струм, напруги, коефіцієнт форми струму навантаження);

3) залежності діючої напруги на навантаженні, середнього струму тиристора та коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування (представити у вигляді графіків);

4) втрати потужності в тиристорах та ступінь їх перегріву.

Порядок розрахунку

Знайдемо необхідні значення параметрів тиристорів.

Амплітуда зворотної напруги на тиристорі:

$$U_{am} = \sqrt{2} \cdot U_a \cdot K_3 = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,25 = 669,75 \text{ В}, \quad (3.4)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що враховує можливі перенапруги (зазвичай приймають $K_3 = 1,25$).

Знайдемо значення середнього та амплітудного струмів, що протікають через тиристор.

Для будь-якої величини кута керування величину середнього струму можна знайти за формулою (3.1). При цьому максимальне значення струму, на яке повинен бути розрахований тиристор I_{a0} , відповідає $\alpha = 0$. Тоді:

$$I_{a0} = \frac{\sqrt{2}U_m}{R_n \pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5 \cdot \pi} = 22,75 \text{ А}. \quad (3.5)$$

Амплітудне значення:

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{R_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5} = 71,44 \text{ А}. \quad (3.6)$$

Вибираємо тиристор, що відповідає вимогам:

$$U_{\pi} > U_{am},$$

$$I_{ro} > I_{a0},$$

де U_{π} – допустима напруга на тиристорі, що повторюється (амплітудне значення);

I_{ro} – середнє значення допустимого граничного струму тиристора з типовим охолоджувачем в умовах природного повітряного охолодження.

З таблиці 3.2, у якій наведено параметри тиристорів типу Т10, вибираємо тиристор Т10-80, що має наступні параметри:

- $U_{\pi} = 700 \text{ В} > 669,75 \text{ В};$

- $I_{ro} = 25 \text{ А} > 22,75 \text{ А};$

- вмикаючий струм керування $I_k = 0,15 \text{ А};$

- вмикаюча напруга керування $U_k = 4 \text{ В}$;
- порогова напруга $U_0 = 1,02 \text{ В}$;
- динамічний опір у відкритому стані $R_d = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$;
- встановлений тепловий опір $R_T = 3,4 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт}$.

Таблиця 3.2

Основні параметри тиристорів типу Т10

Параметр	Позначення	Тиристор						Умови режиму
		Т10-10	Т10-16	Т10-25	Т10-40	Т10-63	Т10-80	
Повторювана напруга, В (для всіх тиристорів)	U_p	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						
Граничний струм (середнє значення), А	I_T	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження; температура корпусу 85°C
Граничний струм з типовим охолоджувачем (середнє значення), А	I_{T0}	8	10	12	14	20	25	Охолодження природне повітряне; температура оточуючого середовища 25°C
Ударний струм, А	$I_{уд}$	240	240	600	960	1300	1500	Тривалість імпульсу 10мс
Порогова напруга, В	U_0	1,64	1,44	1,26	1,16	1,094	1,02	
Динамічний опір у відкритому стані, мОм	R_d	10	7	6,4	4,4	1,8	1,7	
Відмикаючий струм керування, не більше, А	I_k	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	При прямій напрузі на тиристорі
Відмикаюча напруга керування, не більше, В	U_k	3	3	3	4	4	4	
Загальний встановлений тепловий опір, $^\circ\text{C} / \text{Вт}$	R_T	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем при природному повітряному охолодженні

Знаходимо середнє значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування з формули (3.1):

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{2 \cdot \pi \cdot 7,5} \cdot (1 + \cos 45^\circ) = 19,42 \text{ А.}$$

Користуючись формулою (3.1), можна побудувати залежність середнього струму тиристора від кута керування. Результати розрахунків подані в таблиці 3.3, а графік залежності – на рис. 3.2.

Знайдемо значення діючого струму тиристора для $\alpha = 45^\circ$ за формулою (3.2):

$$I_r = \frac{380}{7,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin 1,57}{2 \cdot \pi}\right)} = 34,15 \text{ А.}$$

Примітка. Оскільки формули наведено для кута α , поданого у радіанах, то при використанні для розрахунків калькулятора, не забудьте перевести значення кута в радіани і встановити режим обчислень калькулятора у радіанах.

Таблиця 3.3

Середній струм тиристора для різних значень кута керування

Кут керування, ел. градусів	α	0	30	60	90	120	150	180
Середній струм тиристора, А	I_a	22,75	21,22	17,06	11,38	5,69	1,54	0
Відносне значення струму тиристора	I_a / I_{a0}							

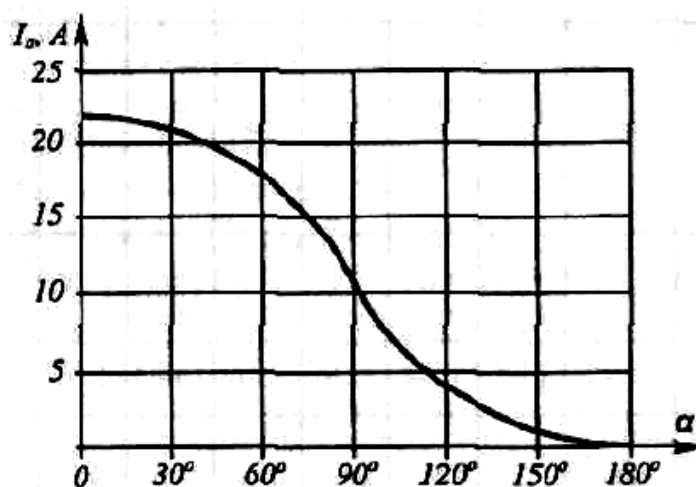


Рис.3.2. Залежність середнього струму тиристора від величини кута керування

Використовуючи формули (3.1, 3.2), знаходимо вираз для коефіцієнта форми струму тиристора:

$$F_i(\alpha) = \frac{I_r}{I_a} = \frac{\pi \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{1 + \cos \alpha} \quad (3.7)$$

Звідси для $\alpha = 45^\circ$ маємо:

$$F_i(\alpha) = \frac{\pi \cdot \sqrt{1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin 1,57}{2 \cdot \pi}}}{1 + \cos 0,785} = 1,76.$$

Знайдемо залежність коефіцієнта форми тиристора від кута керування, для чого заповнимо таблицю 3.4 та за її значеннями побудуємо графік – рис.3.3.

Таблиця 3.4

Коефіцієнт форми струму тиристора для різних значень кута керування

Кут керування, ел. градусів	α	0	30	60	90	120	150	180
Коефіцієнт форми	$F_i(\alpha)$							

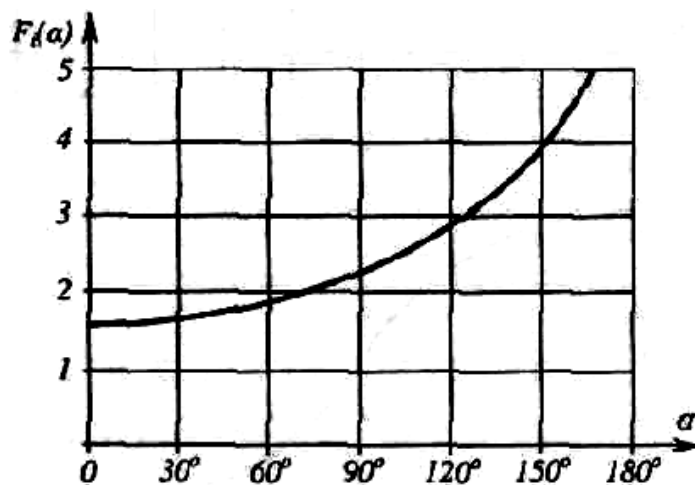


Рис.3.3. Залежність коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування

Знаходимо діюче значення струму навантаження для кута керування $\alpha = 45^\circ$, з формули (3.3):

$$I_H = \sqrt{2} \cdot 34,15 = 48,15 \text{ А.}$$

Знайдемо вираз для розрахунку значень діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування. Використовуючи формулу (3.2), маємо:

$$U_n(\alpha) = I_n \cdot R_n = U_m \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}} \quad (3.8)$$

Для $\alpha = 45^\circ$ маємо:

$$U_n = 48,15 \cdot 7,5 = 361,13 \text{ В.}$$

За формулою (3.8) знайдемо залежність діючої напруги на навантаженні регулятора від кута регулювання, для чого заповнимо таблицю 3.5. та побудуємо графік – рис.3.4.

Таблиця 3.5

Діючі значення напруги на навантаженні за різних кутів керування

Кут керування, ел. градусів	α	0	30	60	90	120	150	180
Діюче значення напруги на навантаженні, В	$U_n(\alpha)$							
Відносне значення	$U_m / U_n(\alpha)$							

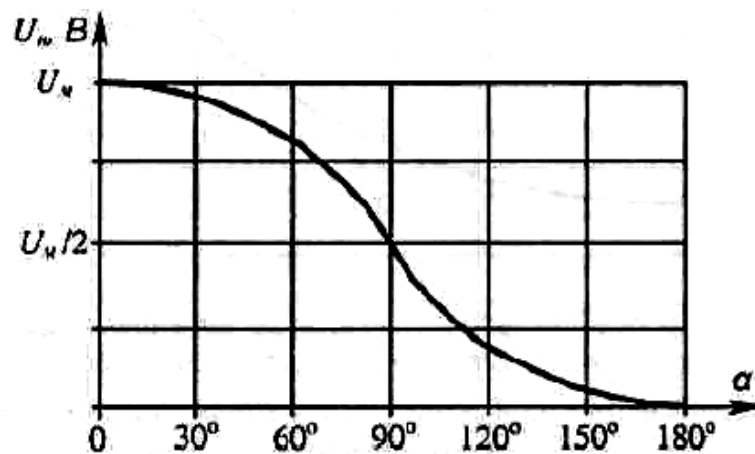


Рис.3.4. Залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування

Аналізуючи графік з рис.3.4., можна дійти висновку, що найефективніше регулювання величини напруги на навантаженні тиристорного регулятора має місце при значеннях кута керування від 30° до 150° .

Знайдемо потужність, що віддається у навантаження при заданому значенні кута керування $\alpha = 45^\circ$:

$$P_n = I_n \cdot U_n = 48,15 \cdot 361,13 = 17388 \text{ Вт} \approx 17,4 \text{ кВт.}$$

Знаходимо втрати потужності на тиристорі при заданому куті керування (45°).

Математичний вираз для лінійної апроксимації робочої ділянки вольтамперної характеристики тиристора має вигляд:

$$u_T = U_0 + i_T \cdot R_d, \quad (3.9)$$

де u_T – миттєві значення напруги на тиристорі,

$$i_T = \frac{\sqrt{2} \cdot U_m}{R_n} \cdot (\sin \alpha + \vartheta) \text{ для } 0 < \vartheta < \pi, \quad (3.10)$$

$$i_T = 0 \text{ для } \pi < \vartheta < 2\pi. \quad (3.11)$$

Тоді втрати потужності в одному тиристорі складуть:

$$\Delta P = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_T \cdot i_T \cdot d\vartheta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_0 \cdot i_T \cdot d\vartheta + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} R \cdot i_T^2 \cdot d\vartheta. \quad (3.12)$$

Звідки:

$$\Delta P = U_0 \cdot I_a + R_d \cdot I_T^2. \quad (3.13)$$

Отже для $\alpha = 45^\circ$:

$$\Delta P = 1,02 \cdot 19,42 + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 34,12^2 = 21,78 \text{ Вт}. \quad (3.14)$$

При цьому втратами потужності в колах керування нехтуємо.

Знаходимо перегрів тиристора при заданому $\alpha = 45^\circ$:

$$\Delta P_n = R_T \cdot \Delta P = 3,4 \cdot 21,78 = 74,05 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.15)$$

Тоді найбільша температура напівпровідникової структури тиристора складе:

$$T_{\max} = T_c + \Delta T = 25 + 74,05 = 99,05 \text{ }^\circ\text{C} < T_{\max \text{ доп}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (3.16)$$

де T_c – температура оточуючого середовища;

$T_{\max \text{ доп}}$ – максимально допустима температура нагріву кремнієвої напівпровідникової структури.

Знаходимо величину опору додаткового резистора у колі керування тиристора:

$$R_{\text{дод}} = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{к}}}{I_{\text{к}}} = \frac{12 \cdot 4}{0,15} = 53,53 \text{ Ом}. \quad (3.17)$$

З таблиці 3.6. вибираємо найближче стандартне значення – 51 Ом.

Потужність, що розсіюється в цьому резисторі:

$$P_{\text{дод}} = R_{\text{дод}} \cdot I_{\text{к}}^2 = 51 \cdot 0,15^2 = 1,15 \text{ Вт}.$$

З таблиці 3.7 вибираємо резистор типу С2-33 потужністю 2Вт.

Ряди номінальних значень резисторів

Індекс ряду	Позиції ряду	Допустиме відхилення від номінальної величини, %
E6	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8	± 20
E12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2	± 10
E24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1	± 5

Електричну принципову схему розрахованого регулятора наведено на рис.3.5.

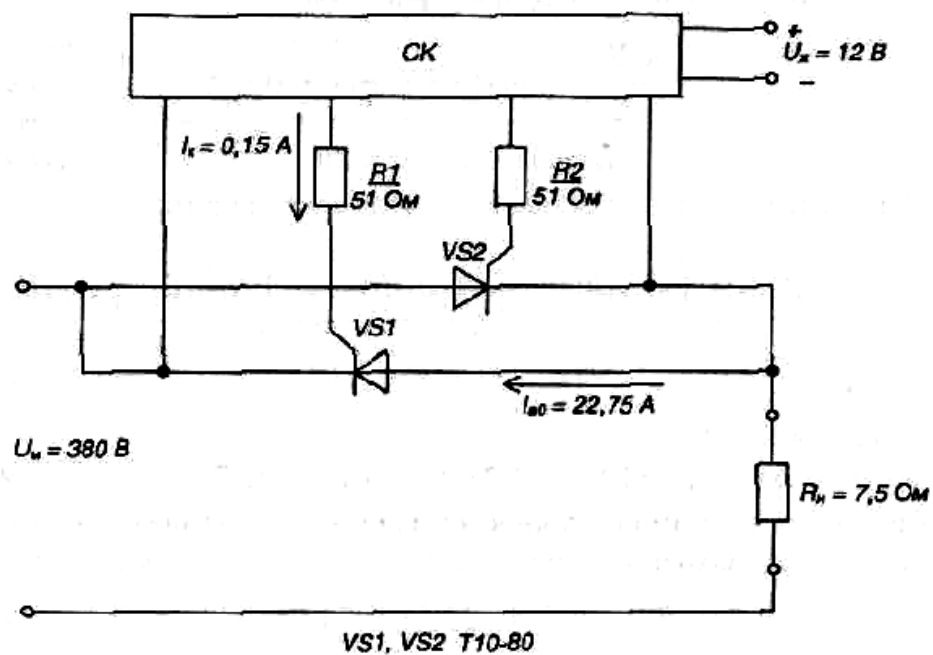


Рис.3.5. Однофазний регулятор змінної напруги.
Схема електрична принципова

Постійні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1Ом – 3,01МОм	0,125
	1Ом – 5,1МОм	0,25; 0,5
	1Ом – 10МОм	1; 2
С2-33	1Ом – 3МОм	0,125
	1Ом – 5,1МОм	0,25
	0,1Ом – 5,1МОм	0,5
	1Ом – 10МОм	1
	1Ом – 22МОм	2

3.3. Контрольні запитання для самоперевірки

1. Поясніть, для чого призначені тиристорні регулятори напруги змінного струму та як їх класифікують.
2. Поясніть, за якими параметрами вибирають тиристори для регуляторів змінної напруги.
3. Поясніть подібність форми кривих графіків залежностей струму тиристора та напруги на навантаженні від величини кута керування.
4. Поясніть, чим визначаються втрати потужності у відкритому тиристорі.
5. Поясніть, для чого у коло керування тиристора вводиться додатковий резистор.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сергеенков Б.Н. и др. Электрические машины: Трансформаторы: Учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б.Н. Сергеенков, В.М. Киселев, Н.А. Акимова; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.
2. Михеев Г.М. Ресурсосберегающая диагностика переключающих устройств силовых трансформаторов: учеб. пособие для вузов / Г.М. Михеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 184 с.
3. Грабко В.В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
5. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 431 с.
6. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.
7. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 366 с.

ЗМІСТ

1. РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ».....	3
1.1 Розподіл навчальних годин (заочна форма навчання).....	3
1.2 Характеристика дисципліни.....	4
1.3 Зміст дисципліни за теми, теоретичний курс.....	5
2. ЗМІСТ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЗА ТЕМАМИ ДИСЦИПЛІН.....	5
2.1 Тема 1. Способи регулювання напруги трансформаторів та електромашинні перетворювачі.....	5
2.1.1 Зміст та методичні вказівки до теми 1.....	5
2.1.2 Контрольні запитання для самоперевірки.....	13
2.2 Тема 2. Випрямлячі та інвертори, ведені мережею.....	14
2.2.1 Зміст та методичні вказівки до теми 2.....	14
2.2.2 Контрольні запитання для самоперевірки.....	23
2.3 Тема 3. Імпульсні перетворювачі енергії та автономні інвертори.....	25
2.3.1 Зміст та методичні вказівки до теми 3.....	25
2.3.2 Контрольні запитання для самоперевірки.....	33
3. ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	34
3.1 Загальні вказівки.....	34
3.2 Контрольна робота.....	34
3.2.1 Теоретичні відомості, необхідні для виконання розрахунку.....	34
3.2.2 Вихідні дані.....	34
3.2.3 Зміст контрольної роботи.....	35
3.2.3.1 Теоретичні пояснення.....	35
3.2.3.2 Приклад розрахунку однофазного регулятора напруги.....	38
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки.....	46
ЛІТЕРАТУРА.....	47