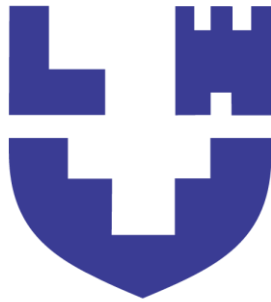


**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет**



ЕЛЕКТРОНІКА ТА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

методичні вказівки до виконання самостійної роботи
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
галузі знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

До друку

Голова вченої ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій
_____ І. С. Кондіус

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій
ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ С. С. Бакуменко

Затверджено вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних
технологій ЛНТУ, протокол № _____ від _____ 2025 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій
ЛНТУ, протокол № _____ від _____ 2025 року.

Завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій _____
В. Ю. Заблоцький

Укладач: _____ М. М. Євсюк, к.т.н., доцент кафедри електроніки
(підпис) та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: _____ В. І. Волинець, к.т.н., доцент кафедри електричної
(підпис) інженерії ЛНТУ

Відповідальний В. Ю. Заблоцький, к.т.н., завідувач кафедри
за випуск: _____ електроніки та телекомунікацій ЛНТУ
(підпис)

Е50 **Електроніка та перетворювальна техніка:** методичні вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / уклад. М. М. Євсюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 49с.

Методичне видання складене відповідно до навчальної програми дисципліни «Електроніка та перетворювальна техніка» містить перелік тем для самостійної роботи та комплекс самостійних завдань (КПЗ) для закріплення теоретичних знань, отриманих під час аудиторних занять.

ЗМІСТ

Передмова	4
Перелік тем для самостійної роботи	5
Комплексне практичне індивідуальне завдання	12
Перелік використаних джерел	42
Додатки	43

ПЕРЕДМОВА

Електроніка та перетворювальна техніка – галузь науки і техніки з сучасних інформаційних технологій, аналогової та цифрової електроніки, мікроконтролерів і мікропроцесорів, пристроїв силової (перетворювальної) електроніки.

Мета вивчення дисципліни – формування у здобувачів освіти знань з розрахунків електронних і мікропроцесорних пристроїв, а також для успішного вивчення суміжних дисциплін зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Для формування необхідного об'єму знань і навичок у здобувачів освіти важливу роль в навчальному процесі відіграє самостійна робота, що включає опанування необхідної інформації з науково-технічної літератури, базах даних та інших джерелах інформації, оцінювання її релевантності та достовірності

Методичні вказівки орієнтовані на засвоєння тематичних знань, які здобувачі освіти отримують під час аудиторних занять та інтенсифікацію їх самостійної роботи шляхом додаткового опрацювання матеріалу, який доступний в бібліотеці, мережі Інтернет тощо.

Представлений матеріал охоплює три змістовні модулі дисципліни: базові пристрої електроніки; мікропроцесорна техніка в електротехнічних системах; перетворювальні пристрої в електротехнічних системах.

Знання і навички, набуті у процесі виконання пропонованих практичних робіт будуть корисні й необхідні майбутнім спеціалістам у галузі електричної інженерії та забезпечують набуття фахових компетентностей, представлених у освітній програмі спеціальності.

ПЕРЕЛІК ТЕМ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Змістовий модуль 1. Елементна база електроніки. Підсилювачі електричних сигналів. Імпульсні пристрої

Тема 1. Напівпровідникові прилади.

Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу (*p-n* переходу). Розшифрування маркування номіналів резисторів. Складені транзистори. Одноперехідний транзистор. Біполярні транзистори з ізольованим затвором. Електростатичні тиристри. Запірний тиристор з МОН-керуванням. Фотоелектронні прилади. Оптиелектронні прилади. Інтегральні мікросхеми.

Запитання для самоконтролю:

1. Що таке *p-n* перехід? Поясніть поведінку *p-n* переходу за прямого і зворотного вмикання.
2. Вкажіть властивості *p-n* переходу, які використовують для напівпровідникових електронних приладів.
3. Поясніть основні властивості напівпровідникових резисторів. Наведіть їх умовні позначення.
4. Поясніть принцип дії одноперехідного транзистора. Наведіть його умовне позначення.
5. Поясніть принцип дії біполярного транзистора з ізольованим затвором. Наведіть його умовне позначення.
6. Поясніть принцип дії фото- та світлодіода. Наведіть умовне позначення.
7. Поясніть принцип дії електростатичного тиристора. Наведіть його умовне позначення.
8. Наведіть умовні графічні позначення електростатичного тиристора, запірного тиристора з МОН-керуванням.
9. Що називають оптроном? Яка його конструкція?
10. Які види оптронів Вам відомі? Де вони застосовуються?
11. Що являє собою оптична лінія зв'язку? Наведіть і охарактеризуйте її структурну схему?
12. Яка конструкція волоконно-оптичної лінії зв'язку?

Література: [1], [2], [3].

Тема 2. Підсилювачі електричних сигналів.

Принципи побудови багато-каскадних підсилювачів. Режими роботи підсилювачів. Кола зміщення підсилюючих каскадів. Каскади попереднього підсилення. Підсилювачі постійного струму прямого підсилення. Суматори на операційному підсилювачі.

Питання для самоконтролю:

1. Як будують багатокаскадні підсилювачі? Поясніть особливості їх роботи за допомогою амплітудної характеристики і АЧХ.
2. Як забезпечується зв'язок між каскадами багатокаскадних підсилювачів?
3. У чому полягають особливості роботи вихідних каскадів підсилення? Наведіть схеми і поясніть принцип дії трансформаторних і безтрансформаторних вихідних каскадів.
4. Наведіть схему, ВАХ і поясніть принцип дії вибіркового підсилювача.
5. Поясніть, які проблеми виникають при підсиленні сигналів постійного струму? Що таке дрейф нуля підсилювача постійного струму?
6. На чому ґрунтується принцип дії балансного підсилювача постійного струму? Наведіть схему такого підсилювача.
7. Як працює підсилювач постійного струму з подвійним перетворенням?
8. Наведіть схему і поясніть принцип дії перетворювача струму у напругу на операційному підсилювачі.
9. Наведіть схему і поясніть принцип дії інвертуючого та неінвертуючого суматорів на операційному підсилювачі.
10. Як забезпечити підсилення сигналів змінної напруги за допомогою операційного підсилювача при однополярному живленні?
11. Як можна збільшити потужність вихідного сигналу операційного підсилювача?

Література: [1], [2], [3].

Тема 3. Імпульсні пристрої

Мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками в автоколивальному режимі. Одновібратор з колекторно-базовими зв'язками (чекаючий мультивібратор). Блокінг-генератори.

Питання для самоконтролю:

1. Наведіть схему, поясніть будову і роботу мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками в автоколивальному і чекаючому режимах.
2. Наведіть схему мультивібратора на ОП, поясніть специфіку роботи ОП. Що таке тригер Шмітта?
3. Наведіть схему і поясніть роботу чекаючого мультивібратора на ОП.
4. Поясніть, що таке блокінг-генератор?
5. Наведіть схеми і поясніть будову і роботу автоколивального і чекаючого блокінг-генераторів, двотактного блокінг-генератора.

Література: [1], [2], [3].

Змістовий модуль 2. Мікропроцесорна техніка в електротехнічних системах

Тема 4. Логічні елементи. Тригери на логічних елементах

Форми представлення булевих функцій. Мінімізація булевих функцій. симетричний тригер з лічильним запуском.

Питання для самоконтролю:

1. Поясніть, на чому базується аналіз роботи цифрових пристроїв.
2. Вкажіть, як оцінюють подію у алгебрі логіки.
3. Поясніть, як можна моделювати події алгебри логіки.
4. Поясніть, що таке логічна (двійкова) змінна, логічна функція.
5. Наведіть можливі способи реалізації простих логічних функцій за допомогою електронних пристроїв.
6. Поясніть, у чому специфіка реалізації логічних елементів залежно від обраної елементної бази.

Література: [3], [4].

Тема 5. Комбінаційні та послідовні пристрої в мікропроцесорних системах

Шифратори. Дешифратори. Мультиплексори. Демультимплексори. Лічильники імпульсів. Регістри. Аналого-цифрові перетворювачі. Цифро-аналогові перетворювачі.

Питання для самоконтролю:

1. Поясніть різницю між двійковим і двійково–десятковим дешифраторами.
2. Що таке мультиплексор/демультимплексор? Наведіть його таблицю істинності і логічну функцію, яку він виконує.
3. Наведіть схему, умовне позначення і поясніть роботу чотири-розрядного підсумовуючого послідовного двійкового лічильника імпульсів, виконаного на комбінованих RST-тригерах.
4. Поясніть, як із підсумовуючого послідовного двійкового лічильника можна отримати двійково – десятковий.
5. Для чого призначені регістри, які вони бувають залежно від способу запису і видачі інформації?
6. Наведіть структурну схему двоступеневого 8-розрядного АЦП перетворювача і за її допомогою поясніть принцип роботи перетворювача.
7. Наведіть структурну схему конвеєрного АЦП перетворювача і за її допомогою поясніть принцип роботи перетворювача.
8. Наведіть структурну схему ЦАП на операційному підсилювачі і поясніть його роботу.

9. Наведіть структурну схему АЦП на основі ЦАП, лічильника імпульсів і компаратора та поясніть її роботу.

Література: [3], [4]

Тема 6. Мікропроцесори. Мікроконтролери в електротехнічних системах
Архітектура комп'ютерних систем в електроенергетиці. Мікроконтролери.
Програмовані логічні контролери. Характеристика основних етапів створення пристроїв керування на основі цифрових автоматів з жорсткою логікою і програмованих. Сигнальні мікропроцесори.

Питання для самоконтролю:

1. Що таке мікропроцесорний комплект?
2. Наведіть структурну схему мікропроцесорного комплекту (МПК) та дайте коротку характеристику його елементів.
3. Які шини використовуються в МПК? Охарактеризуйте їх.
4. Призначення блоку пам'яті в МПК? Поняття про оперативно-запам'ятовуючий пристрій, постійно-запам'ятовуючий пристрій.
5. Що відносять до периферійного обладнання МПК?
6. Як виконується мнемонічна форма запису команд?
7. Мікроконтролери. Програмовані логічні контролери.
8. Способи адресації команд мікропроцесора?
9. Класифікація команд мікропроцесора?
10. Характеристика сигнального мікропроцесора.
11. Цифрові автомати з жорсткою логікою на мікропроцесорах
12. Процес виконання команди в мікропроцесорі / мікроконтролері?

Література: [3], [4].

Змістовий модуль 3. Перетворювальні пристрої в електротехнічних системах

Тема 7. Некеровані випрямлячі однофазного та трифазного струму

Робота однофазних двопівперіодних випрямлячів на активно-індуктивне навантаження. Робота однофазних двопівперіодних випрямлячів на активно-ємнісне навантаження.

Питання для самоконтролю:

1. Наведіть схему та поясніть принцип її роботи схеми однофазного некерованого випрямляча з нульовим виводом на активно-індуктивне навантаження?
2. Наведіть схему та поясніть принцип її роботи схеми однофазного некерованого мостового випрямляча на активно-індуктивне навантаження?

3. Наведіть схему та поясніть принцип її роботи схеми однофазного некерованого випрямляча з нульовим виводом на активно-ємнісне навантаження?

4. Наведіть схему та поясніть принцип її роботи схеми однофазного некерованого мостового випрямляча на активно-ємнісне навантаження?

5. Яка із схем однофазних двопівперіодних випрямлячів має найкращі електротехнічні параметри? Відповідь обґрунтуйте

Література: [1], [2].

Тема 8. Згладжуючі фільтри

Фільтро-компенсуючі пристрої. Активні фільтро-компенсуючі пристрої.

Питання для самоконтролю:

1. Які різновиди фільтро-компенсуючих пристроїв застосовуються в електроенергетиці?

2. На чому ґрунтується принцип дії фільтро-компенсуючих пристроїв?

3. Поясніть, в яких випадках застосовують ємнісні фільтри, а яких індуктивні?

4. Застосування активних фільтро-компенсуючих пристроїв в електроенергетиці?

5. Поясніть специфіку роботи фільтрів під час перехідних процесів?

Література: [1], [2].

Тема 9. Стабілізатори струму і напруги

Параметричні стабілізатори напруги. Побутові стабілізатори напруги.

Питання для самоконтролю:

1. Дайте визначення параметричного стабілізатора постійної напруги? Який основний елемент схеми забезпечує стабільну напругу на навантаженні?

2. Принцип дії параметричних стабілізаторів постійної напруги?

3. Застосування параметричних стабілізаторів напруги в електроенергетиці?

4. Наведіть пипову електричну схему параметричного стабілізатора напруги та вкажіть призначення її складових?

5. Поясніть принцип роботи активно-ємнісного стабілізатора напруги?

6. Побутові стабілізатори напруги змінного струму

Література: [1], [2].

Тема 10. Керовані випрямлячі. Системи керування вентилями

Системи керування вентилями. Методи покращення якості постійної напруги залежно від виду навантаження.

Питання для самоконтролю:

1. Вкажіть системи регулювання, які застосовуються в схемах керованих випрямлячів?
2. Особливості роботи системи із горизонтальним керуванням?
3. Особливості роботи системи із вертикальним керуванням?
4. Особливості роботи системи із цифровим керуванням?
5. Наведіть регулювальну характеристику для різних режимів роботи керованого випрямляча: активного, індуктивного, активно-індуктивного? Поясніть вигляд її характеристик.

Література: [1], [2].

Тема 11. Регулятори змінного струму

Схеми запуску керованих напівпровідникових приладів у регуляторах напруги.

Питання для самоконтролю:

1. Поясніть, як вибрати керований вентиль для регулятора напруги за струмом і напругою?
2. Поясніть призначення схеми запуску керованих напівпровідникових приладів в електронних ключах?
3. Вкажіть основні вимоги до схем запуску керованих напівпровідникових приладів?
4. Наведіть схему запуску електронних ключів, виконаних на основі підсилювачів-формуваців?
5. Наведіть схеми запуску, у яких для створення керуючих імпульсів використовується анодна напруга силового тиристора?

Література: [1], [2].

Тема 12. Інвертори

Однофазний інвертор струму з трансформаторним виходом. Реверсивні інвертори. Інвертори напруги DC/AC.

Питання для самоконтролю:

1. Яка різниця між інверторами струму і інверторами напруги?
2. Наведіть схему трансформаторного інвертора струму і поясніть її роботу?
3. Яким чином у схемах трансформаторного інвертора струму передбачають їх вимкнення при постійному струмі?
4. Вкажіть, які типи напівпровідникових приладів застосовують для побудови інвертора струму?

Література: [1], [2].

Тема 13. Перетворювачі частоти

Схемотехнічне виконання однофазно-однофазного та трифазно-однофазного БПЧ.

Питання для самоконтролю:

1. Наведіть електричну схему мостового однофазно-однофазного перетворювача частоти та поясніть принцип роботи?

2. Наведіть електричну схему мостового трифазно-однофазного перетворювача частоти та поясніть принцип роботи?

3. Яким чином забезпечується регулювання частоти вихідної напруги в перетворювачах?

4. Застосування перетворювачів частоти в електротехніці?

Література: [1], [2].

КОМПЛЕКСНЕ ПРАКТИЧНЕ ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Комплексне практичне індивідуальне завдання передбачає такі тематики:

1. Підсилювачі електричних сигналів: «Розрахунок транзисторного однокаскадного підсилювача змінного струму низької частоти».
2. Цифрові мікропроцесорні пристрої: «Побудова та аналіз роботи комбінаційного логічного пристрою за заданою функцією»
3. Керовані випрямлячі. Системи керування вентилями: «Розрахунок і вибір елементів схеми силової частини керованого випрямляча».
4. Регулятори змінного струму: «Розрахунок і вибір елементів схеми тиристорного регулятора змінної напруги».

При виконанні КПЗ здобувачі вищої освіти повинні показати:

- вміння самостійно вчитися, знаходити необхідну інформацію в науково-технічній літературі, базах даних та інших джерелах інформації, оцінювати її релевантність та достовірність;
- вміння застосовувати прикладне програмне забезпечення.

КПЗ виконується упродовж семестру, оцінюється за 100-бальною шкалою і є одним із обов'язкових залікових модулів для отримання позитивної підсумкової оцінки з дисципліни.

Завдання 1

Розрахунок транзисторного однокаскадного підсилювача змінного струму
низької частоти

Мета роботи: опрацювання методики розрахунку транзисторного однокаскадного підсилювача змінного струму низької частоти та вибору елементів схеми.

Теоретичні відомості

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричного сигналу без спотворень його форми і частоти.

Розрахунок каскаду транзисторного підсилювача розпочинають з вибору класу роботи цього підсилюючого каскаду (*A*, *B*, *C* чи їх комбінацій). Клас роботи визначається режимом спокою, тобто режимом роботи транзистора за постійним струмом, що і визначає ККД, коефіцієнт нелінійних спотворень, інші параметри каскаду.

Підсилювальні властивості підсилювача оцінюються коефіцієнтами підсилення:

- для схеми СЕ: $K_U \gg 1$, $K_I \gg 1$, $K_P \gg 1$;
- для схеми СК: $K_U \leq 1$, $K_I \gg 1$, $K_P \gg 1$;

- для схеми СБ: $K_U \gg 1$, $K_I \leq 1$, $K_P \gg 1$.

Всі ці ознаки накладають специфічні вимоги до побудови конкретних схем підсилювачів.

Практичне завдання

Виконайте аналітичний розрахунок підсилювача низької частоти на транзисторі зображеного на рисунку 1 за такими вихідними даними: h – параметри транзистора; параметри робочої точки транзистора у стані спокою; опір навантаження підсилювача R_H ; опір резистора у колі колектора R_K ; найменша (нижня) гранична частота підсилення f_H ; падіння напруги на резисторі R_E , яке вибирається відповідно до вимог температурної стабільності підсилювача.

Розрахувати: параметри інших елементів схеми, напругу на цих елементах і струми, що проходять через них, коефіцієнти підсилення за напругою, струмом і потужністю.

Вихідні дані підсилювача наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані

Номер за списком		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	R_K , кОм	2	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,91	0,82
	U_{0E} , В	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
	U_{KE} , В	5	6	7	8	9	10	5	6	7	8
	I_{0K} , мА	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	h_{11E} , Ом	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950
	h_{21E} , -	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
	f_H , Гц	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
	R_H , кОм	0,2	0,22	0,24	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39	0,43	0,47
	h_{12E} , $\times 10^{-3}$	4	4,5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
	U_{0B} , В	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
	h_{22E} , $\times 10^{-6}$ Ом ⁻¹	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

Порядок розрахунку

Визначаємо падіння напруги на колекторному резисторі у стані спокою:

$$U_{0K} = I_{0K} \cdot R_K.$$

Розраховуємо струм бази транзистора у стані спокою:

$$I_{0B} = \frac{I_{0K}}{h_{21E}}.$$

Струм дільника, що проходить у резисторах R_1, R_2 приймаємо рівним:

$$I_D = 5I_{0B}.$$

Розраховуємо напругу живлення схеми як суму трьох напруг:

$$E_K = U_{KE} + U_{0K} + U_{0E}.$$

Визначаємо падіння напруги на резисторі R_2 дільника як суму двох напруг:

$$U_D = U_2 = U_{0E} + U_{0B}.$$

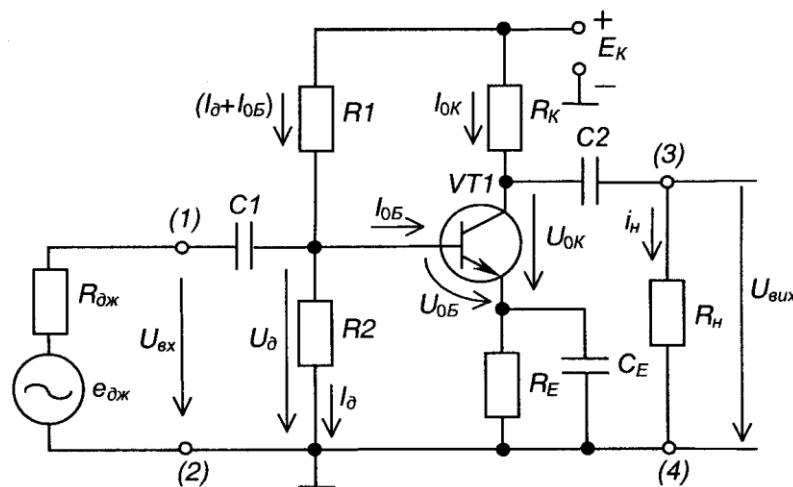


Рисунок 1 – Підсилюючий каскад зі спільним емітером. Схема електрична принципова

Визначаємо падіння напруги на резисторі R_1 :

$$U_1 = E_K - U_2.$$

Розраховуємо опір резистора R_2 :

$$R_2 = \frac{U_2}{I_D}.$$

При розрахунку опору резистора R_1 потрібно врахувати, що через нього протікає сума струмів:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_D + I_{0B}}.$$

Знаходимо вхідний опір підсилювача R_{BX} як еквівалентний опір трьох паралельно ввімкнених опорів: R_1 , R_2 , h_{11E} .

Розраховуємо опір резистора R_E :

$$R_E = \frac{U_{0E}}{I_{0K} + I_{0B}}.$$

Із табл. Д1 приймаємо стандартні значення опорів R_E , R_1 , R_2 .

Розраховуємо потужність, що розсіюється на прийнятих резисторах:

$$P = I^2 \cdot R_{Cm}$$

Із табл. Д3 вибираємо тип резисторів за опором і потужністю.

Визначаємо ємність шунтуючого конденсатора C_E в емітерному колі за наближеною формулою:

$$C_E \geq \frac{1}{2\pi f_H r_E},$$

де $r_E = \frac{2h_{12E}}{h_{22E}}.$

Визначаємо ємність роздільного конденсатора на вході схеми за наближеною формулою:

$$C_B \geq \frac{1}{f_H R_{BX}}.$$

Ємність роздільного конденсатора колекторного кола визначаємо за формулою:

$$C_K \geq \frac{1}{f_H R_H}.$$

Визначаємо робочу напругу на конденсаторах за формулою:

$$U_{C_B} = U_{C_K} = 1,5E_K;$$

$$U_{C_E} = R_E \cdot (I_{0K} + I_{0B}).$$

З табл. Д10 за обчисленою ємністю та робочою напругою вибираємо тип конденсаторів C_E , C_B , C_K .

Визначаємо коефіцієнти підсилення:

- за напругою:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{h_{21E} R_K}{h_{11E} (1 + h_{22E} R_K)};$$

- за струмом:

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \frac{h_{21E} R_B}{(R_B + h_{11E})(1 + h_{22E} R_K)};$$

- за потужністю:

$$K_P = K_U K_I.$$

Завдання 2

Побудова та аналіз роботи комбінаційного логічного пристрою за заданою функцією

Мета роботи: опрацювання методики побудови комбінаційного логічного пристрою та аналіз цього роботи за допомогою часових діаграм

Теоретичні відомості

Комбінаційні цифрові пристрої – це клас цифрових пристроїв електроніки, які не мають внутрішніх запам'ятовуючих елементів, і тому стан вихідних сигналів у кожний момент часу однозначно визначений набором (комбінацією) вхідних сигналів, які надходять на його входи у цей момент.

Комбінаційна логіка використовується в обчислювальних схемах для формування вхідних сигналів і для підготовки даних, які підлягають збереженню. На практиці обчислювальні пристрої зазвичай поєднують комбінаційну логіку (наприклад, арифметико-логічний пристрій (АЛП) для математичних обчислень містить комбінаційні вузли). Математику комбінаційної логіки забезпечує булева алгебра, базовими операціями якої є: кон'юнкція (множення), диз'юнкція (додавання) і заперечення (інверсія). У комбінаційних схемах використовуються логічні елементи: кон'юнктор (І), диз'юнктор (АБО), інвертор (НЕ), а також похідні елементи: І-НЕ, АБО-НЕ і «Рівнозначність» (виключаюче АБО). Найбільш відомі комбінаційні пристрої електроніки це суматор, напівсуматор, шифратор, дешифратор, мультиплексор і демультиплексор.

Практичне завдання

Побудувати комбінаційний логічний пристрій, що реалізує логічну функцію, яка має такий загальний вигляд:

$$y = f1[f2(a1, a2), f3(a3, a4)],$$

де $f1, f2, f3$ – елементарні логічні функції;

$a1, a2, a3, a4$ – логічні змінні.

Для реалізації логічної функції потрібно:

- побудувати схему комбінаційного пристрою, що реалізує задану логічну функцію;

- скласти таблицю істинності заданої функції;

- побудувати часові діаграми роботи комбінаційного пристрою.

Для побудови пристрою застосовувати двовходові логічні елементи: $2I$, $2I-HE$, $2АБО$, $2АБО-HE$ та інвертор HE . Вважати, що на входи логічного пристрою надходять лише прямі сигнали вхідних змінних $x1, x2, x3, x4$. Вихідні дані для розрахунку наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Номер за списком		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
дес.	один.										
	a1	$\overline{x1}$	$x1$	$\overline{x1}$	$x1$	$\overline{x1}$	$x1$	$\overline{x1}$	$x1$	$\overline{x1}$	$x1$
a2		$\overline{x2}$	$\overline{x2}$	$x2$	$x2$	$\overline{x2}$	$\overline{x2}$	$x2$	$x2$	$\overline{x2}$	$\overline{x2}$
	a3	$x3$	$\overline{x3}$	$\overline{x3}$	$\overline{x3}$	$x3$	$x3$	$x3$	$\overline{x3}$	$\overline{x3}$	$\overline{x3}$
a4		$\overline{x4}$	$x4$	$x4$	$\overline{x4}$	$x4$	$x4$	$\overline{x4}$	$x4$	$x4$	$\overline{x4}$
	f1	I	A	I-Н	A-Н	3	B-A	I-Н	A-Н	3	B-A
	f2	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н
	f3	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н	I-Н	A-Н

Примітка. У таблиці 2 прийняті такі позначення: «А» – логічний елемент «АБО»; «I» – логічний елемент «I»; «А-Н» – логічний елемент «АБО-HE»; «I-Н» – логічний елемент «I-HE»; «B-A» – логічний елемент «виключаюче АБО»; «3» – логічний елемент «ЗАБОРОНА».

Приклад розрахунку

Вихідні дані: $a1 = \overline{x1}, a2 = x2, a3 = 0, a4 = x4.$
 $f1 = I - HE, f2 = I - HE, f3 = АБО - HE.$

Розв'язування

Логічна функція, яку потрібно реалізувати, має вигляд:

$$y = \overline{\overline{x1 \cdot x2 \cdot (0 + x3)}}.$$

Оскільки $x3 = 0$, то $f3 = \overline{x3}$. Отже, отримаємо:

$$y = \overline{\overline{x1 \cdot x2 \cdot x3}}.$$

Для реалізації отриманої логічної функції потрібні такі логічні елементи:

- два інвертори для інверсних змінних $\overline{x1}$, $\overline{x3}$;

- два елементи 2I-HE для реалізації функцій:

$$f2 = \overline{x1 \cdot x2}, \quad f1 = \overline{f2 \cdot f3}.$$

Логічна схема комбінаційного пристрою, що реалізує наведену функцію має вигляд:

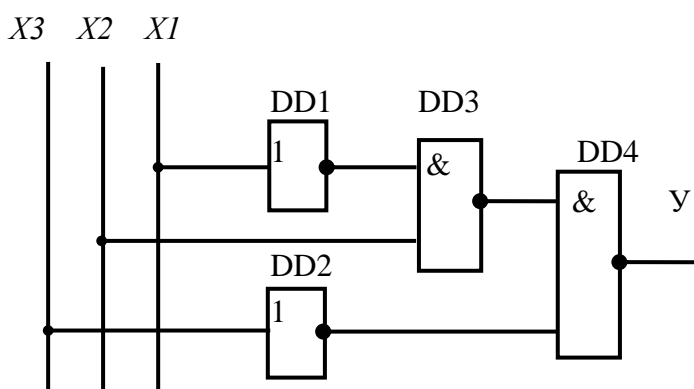


Рисунок 2.1 – Комбінаційний пристрій. Схема логіки.

Логічні елементи, що реалізують комбінаційний пристрій:

DD1: $\overline{x1}$;

DD2: $f2 = \overline{x1 \cdot x2}$;

DD3: $f3 = \overline{x3}$;

DD4: $f1 = \overline{f2 \cdot f3} = \overline{\overline{x1 \cdot x2} \cdot \overline{x3}} = y$.

Таблиця 2.2 – Таблиця істинності логічної функції

Комб. вх. змінних	x3	x2	x1	$f3 = \overline{x3}$	$\overline{x1}$	$f2 = \overline{x1 \cdot x2}$	$f1 = \overline{f2 \cdot f3} = y$
0	0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
2	0	1	0	1	1	0	1
3	0	1	1	1	0	1	0
4	1	0	0	0	1	1	1
5	1	0	1	0	0	1	1
6	1	1	0	0	1	0	1
7	1	1	1	0	0	1	1

З аналізу таблиці істинності та часових діаграм видно, що логічна функція (9.2) істинна ($y = 1$) за комбінації вхідних змінних 2 та 4-7.

УВАГА У прикладі для побудови логічної функції використовується 3 логічні входи ($a_3 = 0$), у заданих варіантах їх 4, тому табличка ваша буде мати вигляд:

Таблиця 2.3 – Таблиця істинності логічної функції з 4-ма змінними

Кількість комбінацій 2^x	X_4	X_3	X_2	X_1	f_3	f_2	$f_1=Y$
0	0	0	0	0			
1	0	0	0	1			
2	0	0	1	0			
3	0	0	1	1			
4	0	1	0	0			
5	0	1	0	1			
6	0	1	1	0			
7	0	1	1	1			
8	1	0	0	0			
9	1	0	0	1			
10	1	0	1	0			
11	1	0	1	1			
12	1	1	0	0			
13	1	1	0	1			
14	1	1	1	0			
15	1	1	1	1			

Завдання 3

Розрахунок і вибір елементів схеми силової частини керованого випрямляча

Мета роботи: опрацювання методики розрахунку елементів схеми силової частини керованого випрямляча

Теоретичні відомості

Тиристорні перетворювачі – універсальні перетворювачі. При виконанні визначених умов один і той же керований перетворювач може працювати як перетворювач змінного струму в постійний – випрямлювальний режим, так і перетворювач постійного струму у змінний – інверторний режим. Незалежно від режиму роботи, схема з'єднання силових кіл тиристорного перетворювача залишається без змін. У наш час широко використовуються як однофазні так і багатофазні схеми випрямлячів. Кожна зі схем володіє певними техніко-економічними показниками, які і визначають необхідність використання кожної із них. Найбільш розповсюдженими схеми тиристорних перетворювачів наведені на рисунку 3.1.

Потрібно зазначити, що крім вказаних схем, в перетворювальній техніці використовуються і комбіновані схеми з послідовним або паралельним з'єднанням трифазних мостових схем, а також паралельне підключення трифазних нульових схем через зрівнювальні реактори.

Вибір конкретної схеми визначається потужністю споживача, необхідною якістю (пульсністю) випрямленої напруги, габаритом і вартістю згладжуючого фільтра.

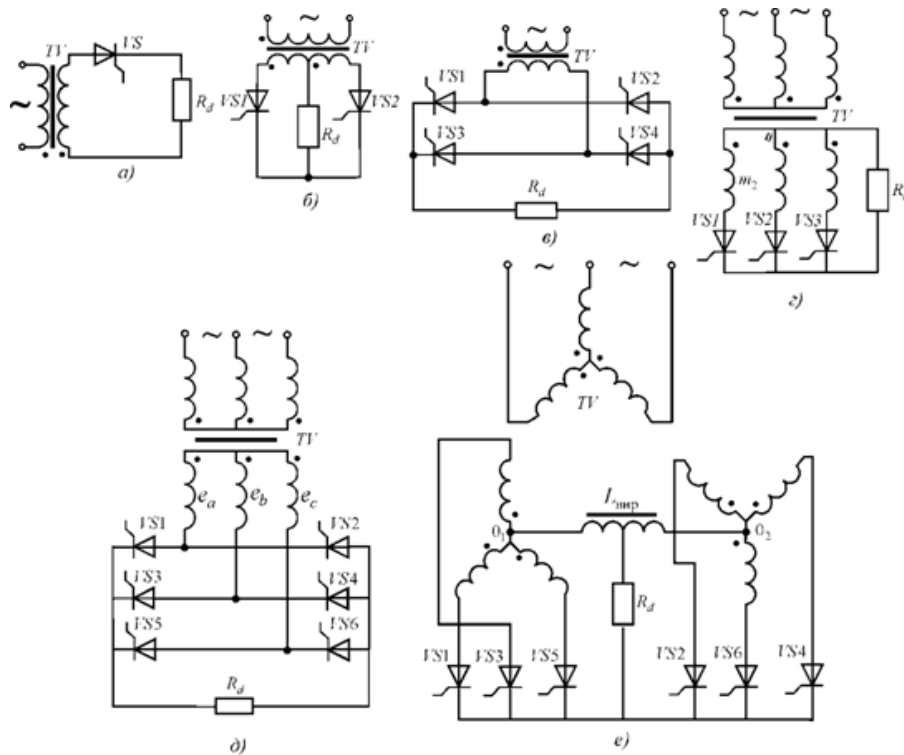


Рисунок 3.1 – Схеми керованих випрямлячів на тиристорах:

- а) однофазна однопівперіодна; б) однофазна двопівперіодна з нульовою (середньою) точкою трансформатора; в) однофазна мостова; г) трифазна схема з нульовою точкою трансформатора (схема Міткевича); д) трифазна мостова схема (схема Ларіонова); е) трифазна нульова схема зі з'єднанням вторинної обмотки зигзаг.

Співвідношення між електричними величинами в тиристорному перетворювачі визначаються кількістю фаз, схемою з'єднання анодного трансформатора та схемою підключених до нього вентилів (таблиця 3.1).

Будь-яку із наведених схем можна подати складеною з однієї або двох ідентичних вентиляльних груп, які з'єднані певним чином. Фазність m кожної вентиляльної групи визначається кількістю комутацій струму між вентилями одної групи за період живлячої напруги. Виходячи із цього схему Міткевича і схему зигзаг потрібно вважати складеною з одної трифазної ($m=3$) групи, а схему Ларіонова – з двох трифазних груп ($m=6$), ввімкнених послідовно відносно навантаження. Кожну з двох однофазних двопівперіодних схем можна розглядати як складену з однієї двофазної вентиляльної групи ($m=2$), тільки в однофазній нульовій схемі комутуючі вентиля живляться від двох вторинних

обмоток ($n=2$), а в мостовій схемі – від однієї вторинної обмотки ($n=1$). Нижче наведені співвідношення між електричними величинами для узагальненої схеми випрямлення для умови, коли індуктивний опір у колі випрямленого струму $X_d = \infty$. Ці співвідношення також справедливі і для реального значення індуктивності X_d , але при цьому випрямлений струм має бути безперервним і повинно виконуватися співвідношення: $X_d \geq (3 \div 4)R_d$ (R_d - активний опір навантаження), що часто має місце в більшості практичних випадків.

Таблиця 3.1 – Розрахункові коефіцієнти схем випрямлячів

Коефіцієнти	1-фазна з середньою точкою тр-ра	1-фазна мостова	3-фазна нульова	3-фазна зигзаг з нулем	3-фазна мостова
$K_u = U_{do} / U_{2\phi}$	0,9	0,9	1,17	1,17	2,34
$K_{i.cp} = \frac{I_a}{I_d}$	1/2	1/2	1/3	1/3	1/3
$K_{i\delta} = \frac{I_{a\delta}}{I_d}$	0,707	0,707	0,577	0,577	0,577
$K_{i2} = I_2 / I_d$	0,707	1	0,577	0,577	0,816
$K_{i1} = K_{mp} \cdot I_1 / I_d$	1	1	0,471	0,471	0,816
$K_{u_{max}} = \frac{U_3 \mathcal{E}_{max}}{U_{do}}$	3,14	1,57	2,09	2,09	1,045
$K_{S2} = S_2 / P_d$	1,57	1,11	1,48	1,71	1,045
$K_{S1} = S_1 / P_d$	1,11	1,11	1,21	1,21	1,045
$K_S = S_m / P_d$	1,34	1,11	1,35	1,46	1,045
кількість фаз першої обмотки m_1	1	1	3	3	3
Фазність схеми m	2	2	3	3	3
Кратність пульсації m_n	2	2	3	3	6
кількість вторинних обмоток n	2	1	3	6	3
Тривалість протікання струму вентиля λ	π	π	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$
Кількість послідовних груп q	1	1	1	1	2

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти схеми

Схема випрямляча	$K_x = \frac{qm}{2\pi}$	$K_R = q$	$A = \frac{K_x}{K_u \cdot K_{i1}}$	$v_0 = \frac{I_{I(1)}}{I}$
однофазна з середньою точкою трансформатора	0,318	1	0,35	0,9
однофазна мостова	0,318	1	0,35	0,9
трифазна нульова	0,478	1	0,87	0,826

трифазний зигзаг з нулем	0,478	1	0,87	0,826
трифазна мостова	0,955	2	0,5	0,955

де v_0 – коефіцієнт спотворень первинного струму.

Практична частина

Відповідно до заданого варіанту за даними таблиці 3.3 провести розрахунок параметрів і вибір елементів схеми силового кола неререверсивного тиристорного перетворювача для живлення якірного кола двигуна, а також розрахувати та побудувати основні характеристики перетворювача. При цьому потрібно враховувати, що момент навантаження двигуна є активним, тому можлива робота перетворювача в інверторному режимі.

Для цього необхідно:

1. На основі аналізу різних схем з'єднання вентиляльних перетворювачів пояснити і вибрати для заданої потужності двигуна схему силового кола неререверсивного тиристорного перетворювача.

2. Для вибраної схеми силового кола перетворювача за заданими параметрами двигуна розрахувати параметри анодного трансформатора і вибрати з довідникової літератури типовий трансформатор.

3. Визначити параметри тиристорів, вибрати їх із довідника та здійснити перевірку, визначивши вид їх охолодження. При необхідності визначити число вентилів, включених на паралельну або послідовну роботу.

4. Побудувати для перетворювача зовнішню характеристику $U_{da} = f(I_{da})$.

5. Побудувати для перетворювача регульовальну характеристику $U_d = f(\alpha)$ для випрямлювального режиму роботи.

6. Нарисувати розраховану схему вентиляльного перетворювача.

У таблиці 3.3 прийняті такі позначення: $P_n, \text{кВт}$ – номінальна потужність двигуна; $U_n, \text{В}$ – номінальна потужність електродвигуна постійного струму; $I_n, \text{А}$ – номінальний струм двигуна; $N_n, \text{об/хв.}$ – номінальна швидкість обертання ротора двигуна; $U_m, \text{В}$ – напруга мережі живлення електродвигуна.

Методичні вказівки до розв'язування задачі

1. Порівняльна оцінка і вибір схем тиристорних перетворювачів.

Вибір схеми з'єднання трансформатора і вентилів заснований на порівняльній оцінці техніко-економічних показників різних схем перетворювачів. Він полягає у варіантному порівнянні з врахуванням вимог, що пред'являються до установки, її потужності, величини випрямленої напруги і напруги живлячої мережі, а також з урахуванням можливості використання стандартних анодних трансформаторів, типу вентилів і т.п.

Порівняльна оцінка різних схем випрямлення здійснюється за такими показниками:

1. Режим роботи трансформатора і його відносна типова потужність, що характеризується коефіцієнтом підвищення розрахункової потужності.
2. Ефективність використання вентилів за напругою та струмом.
3. Гармонійний склад випрямленої напруги.
4. Вплив перетворювача на живлячу мережу.

Таблиця 3.3 – Варіанти завдань

№ вар.	Тип двигуна	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	N_n , об/хв	U_m , В
1	П80	17	110	187	750	380
2	П114	150	220	700	1500	380
3	П102	55	110	578	750	380
4	П32	4,5	110	48,5	3000	380
5	П110	100	220	511	1000	660
6	П151	40	110	384	600	380
7	П52	5,5	110	55	1500	380
8	П82	25	110	268	1000	380
9	П111	160	440	400	1500	660
10	П102	6	220	33,5	1500	380
11	П62	14	110	147	1500	380
12	П18	80	440	185	1355	660
13	П92	42	220	219	1000	380
14	П58	6,3	64	105	1500	380
15	П81	32	110	342	1500	380
16	П92	75	440	192	1500	660
17	П71	11	110	126	1000	380
18	П112	85	220	436	750	380
19	П111	160	220	809	1500	660
20	П112-2	19	220	63	1000	380
21	П153-5	4,5	110	52	750	380
22	П42	8	110	85	3000	380
23	П72	25	220	132	1500	380
24	П102	125	440	316	1000	660
25	П171-5	90	220	429	500	660
26	П91	55	220	287	1500	380
27	П108	95	440	240	1000	660
28	П82	42	440	107	1500	660
29	П41	6	110	68,5	3000	380
30	П81	32	220	166	1500	660
31	П61	11	220	60	1500	660
32	П81-1	19	110	210	1000	220
33	П101	100	440	256	1500	660
34	П91	55	440	143	1500	660
35	П153-8	40	115	384	600	660

Перед тим, як здійснити аналіз і оцінку різних тиристорних перетворювачів, слід зауважити, що вибір схеми перетворювача, в першу чергу, полягає у виборі кількості числа фаз вторинної обмотки анодного трансформатора.

При бажанні отримати мінімальні пульсації випрямленої напруги необхідно збільшувати кількість фаз вторинної обмотки. В цьому випадку можна вимкнути зі схеми згладжуючий катодний дросель, або звести його габарити до мінімуму. Збільшення кількості фаз вторинної обмотки покращує гармонійний склад первинного струму анодного трансформатора і тим самим зменшує вплив перетворювача на живлячу мережу.

Від кількості фаз вторинної обмотки і схеми підключення вентилів залежить ступінь використання обмоток трансформатора, його габарити, вага, а також ступінь використання і габарити вентилів.

Ступінь використання обмоток і трансформатора в цілому характеризується коефіцієнтами підвищення розрахункових потужностей, в якості яких виступають схемні коефіцієнти K_{s1} , K_{s2} , K_s (наведені в таблиці 3.1). Із таблиці 3.1 видно, що найефективніше використовуються обмотки трансформатора в тих схемах, у яких по вторинним обмоткам протікає струм в обидва півперіоди.

Ефективність використання вентилів за напругою та струмом оцінюється за величиною максимального значення зворотної напруги, що прикладається до вентилів у даній схемі, і по величині середнього та діючого значення струмів через вентилі, а також їх кількістю, необхідною для отримання заданого значення струму I_d .

Вентилі використовуються ефективніше, якщо для забезпечення заданих значень випрямленої напруги і струму необхідна менша кількість вентилів при менших значеннях допустимого прямого струму і зворотної напруги.

Гармонійний склад випрямленої напруги і струму характеризується кратністю пульсацій порівняно з частотою живлячої мережі, наведеної в таблиці 3.2, у вигляді параметра m_n .

Зі збільшенням кратності пульсації порядок вищих гармонік, що наявні у випрямленій напрузі і струмі зростає, а їх амплітуда зменшується.

Вплив перетворювачів на живлячу мережу оцінюється за гармонійним складом первинного струму анодного трансформатора і може бути охарактеризований коефіцієнтом спотворень первинного струму v_0 , який наведений для різних схем у таблиці 3.2.

Якщо порівняти між собою однофазні схеми, то з точки зору використання трансформатора вигіднішою є мостова схема, ніж нульова ($K_{SM}=1,11$, $K_{SN}=1,34$). Використання вентилів за струмом однакове для обох схем, але за напругою вентилі використовуються краще в мостовій схемі, оскільки зворотна

напруга у двічі менша, але використана у двічі більша кількість вентилів. Тому у перетворювачах з низькою випрямленою напругою доцільно використовувати однофазну нульову схему. За пульсаціями випрямленої напруги обидві схеми однакові.

Хоча однофазні схеми мають доволі непогане використання трансформатора, але значні пульсації випрямленої напруги і струму, а також сильний вплив на живлячу мережу обмежують їх використання для перетворювачів на рівні, не вищому декількох кіловат для живлення обмоток збудження машин, де пульсації не відіграють суттєвої ролі. Враховуючи це, використання однофазних схем доцільне для потужностей приблизно до 10кВт.

Багатофазні схеми випрямлення мають ряд переваг перед однофазними:

- симетричне навантаження живлячої мережі;
- менші споживання первинного струму ($v_0 \rightarrow 1$);
- менші пульсації випрямленої напруги і, відповідно, необхідний менший габарит згладжуючого дроселя;
- добре використання трансформатора і вентилів.

Серед багатофазних схем найпростіша є схема Міткевича і схема зигзаг. При їх порівнянні слід враховувати таке: за використанням вентилів, за пульсаціями випрямленої напруги і за впливом на живлячу мережу обидві схеми однакові. Використання ж трансформатора, як бачимо з таблиці 6.1, краще в схемі Міткевича. Але потрібно врахувати, що в схемі Міткевича існує постійний напрямлений потік вимушеного намагнічування трансформатора і, як результат, для запобігання насичення сердечника трансформатора штучно збільшують габарити та вагу його. Тому дійсний коефіцієнт підвищення розрахункової потужності на 20-30% вище вказаного в таблиці 3.1. У схемі зигзаг у порівнянні з нульовою відсутній потік вимушеного підмагнічування, але вона потребує подвійного комплексу вторинних обмоток, за рахунок чого збільшується габарит трансформатора.

До недоліків трифазних нульових схем належать: значні пульсації випрямленої напруги, значні діючі значення анодних струмів, великі спотворення первинних струмів.

Враховуючи це, використання трифазних нульових схем доцільне для потужностей приблизно від 10 до 100 кВт. Причому всередині цього діапазону (у зв'язку з реальними значеннями коефіцієнтів підвищення розрахункової потужності) перевага схемі Міткевича надається при менших потужностях (до 50 кВт), схемі зигзаг – при більших потужностях 50÷100кВт.

Найдосконалішою з точки зору використання трансформатора і вентилів є трифазна мостова схема (Ларіонова).

Порівнянні з нульовими схемами, мостова схема має суттєві переваги: меншу у двічі зворотну напругу на вентилях, менший нахил зовнішньої

характеристики, дуже добре використання і просте виконання трансформатора; менші пульсації випрямленої напруги, значно менше значення ерс вторинної обмотки трансформатора, можливість використання в безтрансформаторному виконанні.

Поряд із перевагами схема Ларіонова має такі недоліки: необхідність подвійного комплекту вентилів, погане використання вентилів за струмом, так як середнє та діюче значення струму через вентиль такі ж самі, як і в трифазних нульових схемах, а кількість вентилів подвійна, зниження ККД внаслідок подвійного падіння напруги на вентилях (струм проводять послідовно завжди два вентиля). Проте, точно вказати сфери використання цієї або іншої схеми перетворювача неможливо, це вирішується тільки шляхом техніко-економічних порівнянь варіантів для конкретних умов.

Для правильного вибору стандартного обладнання і проектування нового виникає необхідність у розрахунку основних необхідних параметрів елементів силового кола тиристорного перетворювача. Для нереверсивних перетворювачів до таких елементів належать анодний трансформатор, вентиля і згладжуючий (катодний) реактор.

Розрахунок параметрів схеми живлення здійснюється залежно від значення струму навантаження I_d і забезпечення необхідної величини випрямленої напруги U_d .

Перед тим, як розпочати розрахунок параметрів елементів схеми, необхідно визначити розрахункові значення I_d , U_d . Вибір цих елементів залежить від характеру навантаження. У випадку роботи перетворювача на якір двигуна в якості розрахункових величин потрібно приймати номінальні значення напруги і струму двигуна, тобто:

$$U_d = U_n, \quad I_d = I_n. \quad (3.1)$$

2. Розрахунок параметрів і вибір анодного трансформатора. Анодний трансформатор вибирається за потужністю і за напругою вторинної і первинної обмоток.

Розрахункова потужність вторинної і первинної обмоток трансформатора:

$$S_2 = Ks_2 \cdot P_d \quad (3.2)$$

$$S_1 = Ks_1 \cdot P_d \quad (3.3)$$

$$P_d = U_d \cdot I_d, \quad (3.4)$$

де P_d – середнє значення випрямленої потужності.

Типова потужність анодного трансформатора:

$$S_m = K_s \cdot P_d, \quad (3.5)$$

де K_{s1}, K_{s2}, K_s – коефіцієнти схеми (табл. 3.1)

Діюче значення струму у вторинних обмотках трансформатора дорівнює:

$$I_2 = Ki_2 \cdot I_d, \quad (3.6)$$

де Ki_2 – коефіцієнт схеми (табл. 3.1).

Мінімальне значення вторинної фазної напруги:

$$U_{2\phi} = K_3 \frac{U_n + \Delta U_a + (1,1 \div 1,2) K_R \cdot R_{mp} \cdot I_n}{K_u \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100}\right) \cos \alpha_{min} - \frac{K_x \cdot U_\kappa\%}{Ki_1 \cdot 100}}, B, \quad (3.7)$$

де $K_3=(1,05 \div 1,1)$ – коефіцієнт запасу, що враховує можливу несиметрію кутів відкривання тиристорів по фазах і дає запас напруги для забезпечення номінальної швидкості двигуна в системі автоматичного регулювання;

ΔU_a – падіння напруги на тиристорах, яке приймається попередньо рівним $1B$ для нульових схем і $2B$ для мостових схем;

$K_u, K_x, K_R, Ki_1, K_{s1}, m_1$ – коефіцієнти, що приймаються з таблиць 6.1, 6.2 для вибраної схеми випрямляча;

$\Delta U\%$ – допустиме максимальне падіння напруги, для розрахунку можна прийняти $\Delta U\% = (1 \dots 2,5)\%$;

$U_\kappa\% = (3 \div 12)\%$ - напруга КЗ трансформатора, величина якої може бути попередньо взята з каталогу для трансформатора, потужність якого визначається за виразом (3.5); нижня межа стосується трансформаторів потужністю декілька десятків kBA , а верхня – декілька тисяч kBA ;

α_{min} – мінімальне значення кута регулювання, яке для нереверсивної схеми слід приймати рівним 0 ($\cos \alpha_{min} = 1$);

R_{mp} – активний опір обмотки трансформатора:

$$R_{mp} = \frac{1,1 K_{s1}}{m_1 Ki_1^2} \cdot \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{\Delta P_M\%}{100}, \text{ Ом} \quad (3.8)$$

де $\Delta P_M\% = (1 \div 3)\%$ – втрати в міді трансформатора. Нижня межа стосується потужних, а верхня – малопотужних трансформаторів.

Значення $\Delta P_M\%$ приймається по каталогу для трансформатора потужність якого визначена за формулою (3.5).

Діюче значення первинного фазного струму трансформатора I_1 визначається за формулою:

$$I_1 = \frac{1}{K_{mp}} \cdot Ki_1 I_d \quad (3.9)$$

де $K_{mp} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}$ - коефіцієнт трансформації анодного трансформатора.

$U_{1\phi}, U_{1л}$ - відповідно діючі значення фазної та лінійної напруги живлячої мережі.

X_{mp} - приведений до первинної обмотки індуктивний опір однієї фази трансформатора:

$$X_{mp} = \frac{U_{1н}}{K_{mp}^2 \cdot I_{1н}} \cdot \frac{U_{к\%}}{100} \quad (3.10)$$

де $U_{к\%} = (3 \div 12)\%$ - напруга короткого замикання трансформатора, нижня межа якої стосується трансформаторів, потужністю декілька десятків kVA .

У тих випадках, коли розрахункове значення U_2 , що визначається за (3.7) близьке до значення відповідної напруги мережі живлення, але дещо менше останньої, може бути використаний безтрансформаторний варіант мостової схеми (в установках не вище 100кВт). У цьому випадку анодний трансформатор відсутній і випрямлювальний міст під'єднується до живильної мережі. При живленні перетворювачів від потужних джерел з метою обмеження струмів КЗ і зменшення впливу перетворювача на мережу між мережею живлення і випрямлювальним мостом у фази вмикаються струмообмежуючі реактори (один для однофазної, три для трифазної схеми).

Необхідна величина індуктивного опору цього реактора X_p повинна бути такою ж, як у силового трансформатора, який потрібно було б встановити для заданої потужності перетворювача.

Тому величина X_p може бути визначена за формулою:

$$X_p = X_{mp} = \frac{U_2}{Ki_1 I_n} \cdot \frac{U_{к\%}}{100}, \text{ Ом} \quad (3.11)$$

приймавши коефіцієнти трансформації $K_{mp} = 1$.

У подальших розрахунках враховується X_p замість X_{mp} .

Струмообмежуючі реактори для того, щоб вони не насичувалися струмами КЗ, виконуються повітряними (без залізного сердечника).

Вибираються вони за умов:

$$L_{p.n} \geq L_p = \frac{X_p}{\omega}; \quad (3.12)$$

$$I_{p.n} \geq I_a \quad (3.13)$$

3. Розрахунок параметрів і вибір тиристорів

Тиристори вибираються за середнім значенням анодного струму, зворотною напругою і перевіряються на перевантажувальну здатність у відповідності з нормами, що наводяться у довідниках. В останньому випадку максимальне значення струму через клапан на протязі певного часу має бути не більше допустимого.

3.1. Попередній вибір тиристорів

Середнє значення струму через клапан:

$$I_a = \frac{I_n}{m} = K_{i_{cp}} \cdot I_n, A \quad (3.14)$$

Величина максимальної зворотної напруги на тиристорі визначається з врахуванням коефіцієнту запасу:

$$U_{zv_{max}} = K_{zn} K_{u_{max}} E_{do}, B \quad (3.15)$$

де $K_{zn} = 1,25$ – коефіцієнт запасу;

$U_{do} = E_{do} = K_u U_2$ – середнє значення випрямленої *e.p.c* за $\alpha = 0$.

За значеннями, отриманими з (3.14), (3.15) з довідника вибираємо тиристор за умови:

$$I_a \leq I_{an} \quad , \quad (3.16)$$

$$U_{zv_{max}} \leq U_{zv_{дон}} \quad (3.17)$$

При визначенні номінального значення струму клапана потрібно врахувати умови його охолодження (природне, штучне) і схему в якій він працює.

Якщо не можна підібрати клапан на необхідний номінальний струм, то необхідно використати паралельне з'єднання клапанів з меншим номінальним струмом, величина якого визначається за виразом:

$$n_{нар} = \frac{I_a}{I_{aH}} + \Delta n \quad (3.18)$$

де $n_{нар}$ – число паралельно увімкнених вентилів;

I_{aH} – номінальний струм вибраного з каталогу вентиля;

Δn – доданок до ближнього цілого числа.

Після вибору кількості паралельно підключених керованих вентилів слід перевірити умову:

$$I_{ан} \geq \frac{I_a}{n_{нар} \cdot K_{снi}}, A \quad (3.19)$$

де $K_{снi} = 0,7 + \frac{0,3}{n_{нар}}$ - коефіцієнт зниження навантаження для струму.

Якщо умова (3.19) для вибраного тиристора не виконуються, треба вибрати потужніший тиристор, або збільшити їх кількість на один.

Для рівномірного розподілу прямого струму потрібно послідовно з кожним тиристором увімкнути додатковий резистор (долі Ома, на порядок менший за прямий диференційний опір тиристора, рис. 1.2).

Величина допустимої зворотної напруги визначається класом тиристора, тобто $U_{зв.дон} = U_{кл}$. Якщо у довіднику не має тиристора необхідного класу, то можна використати послідовне з'єднання вентилів нижчого класу. Тоді допустима величина напруги $U_{кл}$ визначається за виразом:

$$n_{посл.} = \frac{U_{зв.дон}}{U_{зв.донH}} + \Delta n \quad (3.20)$$

де $n_{посл.}$ – число послідовно з'єднаних вентилів;

$U_{зв.донH}$ – максимальна зворотна напруга вибраного з каталогу вентиля.

Після вибору кількості послідовно підключених керованих вентилів слід перевірити умову:

$$U_{кл} \geq \frac{U_{зв.дон}}{K_{сн.и} \cdot n_{посл.}}, В \quad (3.21)$$

де $K_{сн.и} = 0,8 + \frac{0,2}{n_{нар}}$ - коефіцієнт зниження допустимої напруги.

Якщо умова (3.21) для вибраного тиристора не виконуються, треба вибрати потужніший тиристор, або збільшити їх кількість на один.

За виконання всіх наведених вище умов із довідника вибирається тип тиристора і записуються усі його параметри.

3.2 Перевірка вибраних тиристорів. Перевірку тиристорів за допустимою температурою нагріву здійснюємо залежно від втрат у тиристорі при нормальному робочому режимі перетворювача і, за необхідності, при технологічних і динамічних перевантаженнях.

Для робочого режиму втрати у вентилі визначаються за формулою:

$$\Delta P_a = U_o I_a + K_{\phi c}^2 R_g I_a^2, \text{ Вт} \quad (3.22)$$

де U_o – порогова напруга;

R_g – динамічний опір тиристора;

$K_{\phi c}$ – коефіцієнт форми струму, рівний відношенню діючого і середнього значень струму через вентиль.

Для прямокутної форми струму ($X_d \rightarrow \infty$):

$$K_{\phi c} = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda}}, \quad (3.23)$$

де λ – кут провідності вентиля в радіанах, який залежить від схеми перетворювача (таблиця 3.1).

Якщо величини U_o , R_g в довіднику не наведені, то вони визначаються за наближеними формулами:

$$U_o \approx (1,35 \div 1,45) \Delta U_{ан}, \text{ В} \quad (3.24)$$

$$R_g \approx \frac{(0,2 \div 0,3) \Delta U_{ан}}{I_{ан}}, \text{ Ом} \quad (3.25)$$

де $\Delta U_{ан}$ – класифікаційне падіння напруги на відкритому вентилі, (приймається з довідника).

$I_{ан}$ – номінальний граничний струм тиристора в класифікаційній схемі, (приймається з довідника).

Температура нагріву кристалу вентиля при тривалому режимі роботи визначається за виразом:

$$Q_n = \Delta P_a R_T + Q_c, \text{ } ^\circ\text{С} \quad (3.26)$$

де R_T – загальний тепловий опір вентиля з охолоджувачем для заданих умов охолодження, $^\circ\text{С} / \text{Вт}$, (приймається з довідника);

Q_c – температура робочого середовища вентиля, для розрахунків можна прийняти $+25^\circ\text{C}$.

Підставляючи в (6.27) різні значення R_T , що відповідають природному і штучному (примусовому) охолодженню, отримуємо різні температури нагріву вентиля.

Після порівняння варіантів обирається той, для якого виконується умова:

$$Q_n \leq Q_{don}, \quad (Q_{don Ge} = 75^\circ\text{C}, Q_{don Si} = 140^\circ\text{C}) \quad (3.27)$$

Якщо температура середовища близька до стандартної ($+25^\circ\text{C}$) то для перевірки теплового режиму достатньо порівняти між собою дійсні втрати у вентилях з його номінальними втратами для різних умов охолодження. Останні визначаються за (6.23), якщо прийняти: $I_a = I_{an}$, $K_{\phi c} = 1,57$ (відповідає синусоїдній формі струму в класифікаційній схемі).

Коли робочий струм вентиля при тривалому режимі відповідає його гранично допустимому значенню, то технологічні перевантаження недопустимі і необхідно збільшити інтенсивність його охолодження, або взяти потужніший тиристор.

3.4. Побудова регульовальної характеристики. Регульовальна характеристика, що являє собою залежність середнього значення випрямленої ерс $U_{d\alpha}$ (для випрямляча) або середнього значення проти-е.р.с. $U_{d\beta}$ (для інвертора) від кута керування α (β).

При зміні кута α від 0° до 90° отримуємо характеристику для випрямленого режиму, а при зміні кута α від 90° до 180° - для інверторного режиму. В останньому випадку е.р.с. змінює знак і стає проти-е.р.с. інвертора (відкладається з протилежним знаком щодо $U_{d\alpha}$).

Регульовальна характеристика може бути побудована за рівнянням:

- для однофазних тасхем ($\alpha_{zp} = 180^\circ$):

$$U_{d\alpha} = K_u \cdot U_2 \cdot \cos \alpha = U_{do} \cdot \cos \alpha \quad (3.28)$$

- для трифазної нульової схеми маємо два режими роботи:

- режим неперервних струмів, коли $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ (кут регулювання α у трифазних випрямлячах прийнято відраховувати від точки дійсного відкривання вентиля);

- режим перервних струмів $\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$.

Середнє значення випрямленої напруги для цих двох режимів визначаються

виразами:

$$U_{da} = \frac{3E_{2m}}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha, \text{ при } (0 \leq \alpha \leq \pi/6),$$

$$U_{da} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right], \text{ при } \left(\frac{\pi}{6} < \alpha < \frac{5\pi}{6} \right).$$

За $\alpha_{zp} = 5\pi/6$ ($\alpha_{zp} = 150^\circ$) випрямлена напруга рівна 0.

- для трифазної мостової схеми маємо два режими роботи:

- режим неперервних струмів, коли $0 \leq \alpha \leq \pi/3$ (кут регулювання α у трифазних випрямлячах прийнято відраховувати від точки дійсного відкривання вентиля);

- режим перервних струмів $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$.

Середнє значення випрямленої напруги для цих двох режимів визначаються виразами:

$$U_{da} = \frac{3E_{2m}}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha, \text{ при } (0 \leq \alpha \leq \pi/6),$$

$$U_{da} = U_{d0} \left[1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right], \text{ при } \left(\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{2\pi}{3} \right).$$

За $\alpha_{zp} = 2\pi/3$ ($\alpha_{zp} = 120^\circ$) випрямлена напруга рівна 0.

Для зручності обчислень розрахункові дані заносяться до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Дані для побудови регульовальної характеристики

α , град.	0	15	30	45	60	α_{zp}
U_{da} , В									

За отриманими даними у таблиці 3.4 будується регульовальна характеристика випрямляча $U_{da} = f(\alpha)$.

За отриманою регульовальною характеристикою визначаємо значення кута керування α_d при відомому значенні напруги U_d .

Завдання 4

Розрахунок і вибір елементів схеми тиристорного регулятора змінної напруги

Мета розрахунку: набуття навиків розрахунку тиристорних регуляторів змінної напруги.

Теоретичні пояснення

Регулятори (переривачі) 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:

- електронний ключ типу контактора;
- керований електронний ключ;
- 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.

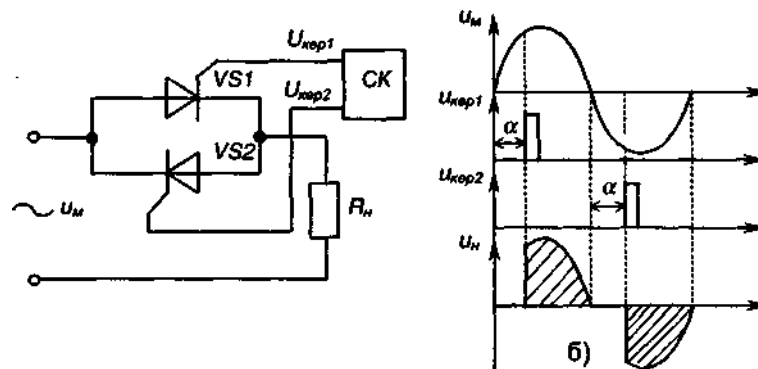
Регульований ключ являє собою електронний тиристорний ключ, у якого може здійснюватися регулювання за необхідним законом кута керування, а, значить, і потужності, що віддається у навантаження. При цьому форма кривої напруги на навантаженні відрізняється від форми кривої мережі живлення, за рахунок чого 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 нулеві: 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, тиристори, симистори 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 рисунку 4.1. Навантаження тут підімкнене до мережі з напругою U_M за допомогою ключа, що є двома увімкненими зутрічно-паралельно тиристорами: VS1 та VS2.



Рисунку 4.1 - Однофазний регулятор: а) електрична схема; б) часові діаграми роботи.

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 рисунку 4.1 (б) видно, що, змінюючи кут керування тиристорів α від 0° до 180° , можна змінювати (регулювати) напругу на навантаженні від U_M до 0.

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

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\pi \sqrt{2} U_M}{R_H} \sin J dJ = \frac{\sqrt{2} U_M}{2\pi R_H} (1 + \cos \alpha); \quad (4.1)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_M}{R_H} \right)^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 J dJ} = \frac{U_M}{R_H} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)}, \quad (4.2)$$

де $J = \omega t = 2\pi f_M t$.

Діюче значення струму навантаження становить:

$$I_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_m}{R_n} \right)^2 \int_0^\pi \sin^2 JdJ} = \frac{U_m}{R_n} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = \sqrt{2}I_T. \quad (4.3)$$

При виборі вентилів регулятора (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 значень струму та напруги навантаження у режимі, що встановився.

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

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

Практичне завдання

Виконайте розрахунок однофазного тиристорного регулятора змінної напруги, схема якого наведена на рисунку 4.1, а.

Вихідними даними для розрахунку є: U_m, B – діюче значення напруги мережі живлення; $f_m = 50 \text{ Гц}$ – частота мережі живлення; $R_n, Ом$ – опір навантаження; α – кут керування тиристорів; $U_{жс}, B$ – напруга джерела живлення системи керування тиристорами.

Необхідно визначити:

- параметри тиристора і виконати його вибір;
- режими роботи силової схеми регулятора (струм, напругу, коефіцієнт форми струму навантаження);
- залежності діючої напруги на навантаженні, середнього струму тиристора та коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування (представити у вигляді графіків);
- втрати потужності в тиристорах та ступінь їх перегріву.

Температура оточуючого середовища 25°C . Рекомендується застосувати тиристори типу Т 10.

Варіанти вихідних даних наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку регулятора напруги

Цифри за списком		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	U_m, B	127	220	380	660	127	220	380	660	220	380
	$R_n, Ом$	6,3	10	18	30	3,1	5,1	9,1	15	4,7	8,2
	$\alpha, ел. град$	10	20	35	40	50	65	70	80	95	100
$U_{жс}, B$		9	12	15	17	9	10	12	17	9	12

Порядок розрахунку

Амплітуда зворотної напруги на тиристорі:

$$U_{зв.м} = \sqrt{2} U_m K_3,$$

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, враховуючи, що максимальне значення струму, на яке повинен бути розрахований тиристор I_{a0} , відповідає куту керування $\alpha = 0$. Тоді:

$$I_{a0} = \frac{\sqrt{2}U_m}{\pi R_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5 \cdot \pi} = 22,75 \text{ A.}$$

Амплітудне значення:

$$I_{ам} = \frac{\sqrt{2}U_m}{R_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5} = 71,44 \text{ A.}$$

Вибираємо тиристор, що відповідає вимогам:

$$\begin{aligned} U_{зв.д} &> U_{зв.м}; \\ I_{с0} &> I_{a0}, \end{aligned}$$

де $U_{зв.д}$ – допустима зворотна напруга на тиристорі, (амплітудне значення);

$I_{с0}$ – середнє значення допустимого граничного струму тиристора з типовим охолоджувачем в умовах природного повітряного охолодження.

З таблиці Д12, у якій наведено параметри тиристорів типу Т10, вибираємо тиристор Т10-80, і описуємо всі його параметри.

Середнє значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування з формули (4.1):

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

Користуючись формулою (4.1), можна побудувати залежність середнього струму тиристора від кута керування. Результати розрахунків подані в таблиці 4.2, а графік залежності – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 – 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							

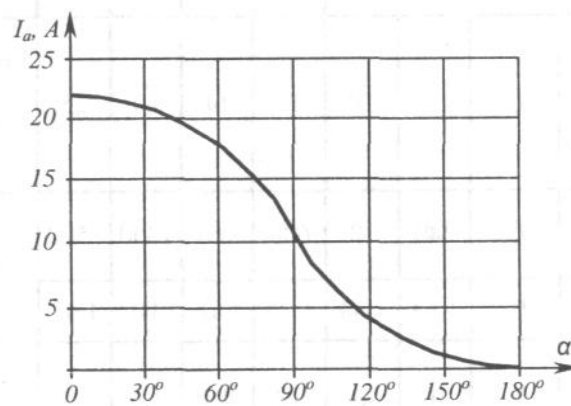


Рисунок 4.2 – Залежність середнього струму тиристора від величини кута керування

Знайдемо значення діючого струму тиристора для $\alpha = 45^\circ$ за формулою (4.2):

$$I_T = \frac{380}{7,5} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin 45^\circ}{2\pi} \right)} = 34,15 \text{ А.}$$

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

Знайдемо вираз для розрахунку значень діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування. Використовуючи формулу (4.2), маємо:

$$U_H(\alpha) = I_H \cdot R_H = U_H \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}}. \quad (4.4)$$

Для заданого $\alpha = 45^\circ$:

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

За формулою (4.4) знайдемо залежність діючої напруги на навантаженні регулятора від кута регулювання, для чого заповнимо таблицю 4.3 та побудуємо графік – рисунок 4.3.

Таблиця 4.3 – Діючі значення напруги на навантаженні за різних кутів керування

Кут керування, ел. град	α	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
Діюче значення напруги на на-нні, В	$U_H, \text{В}$											

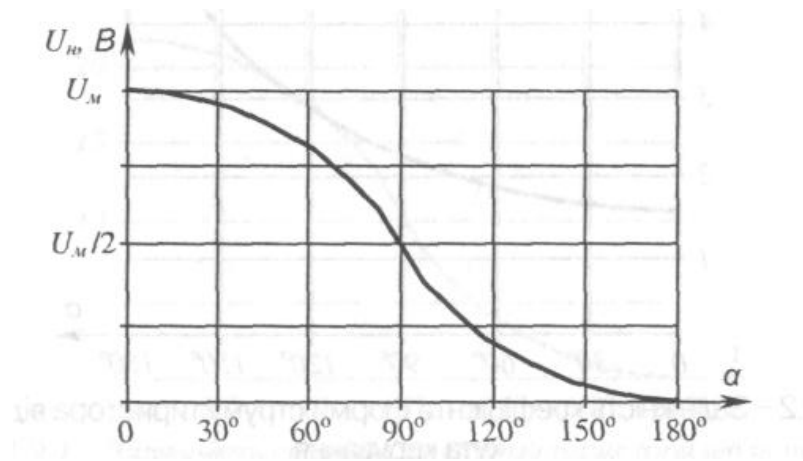


Рисунок 4.3 – Залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування α .

Аналізуючи графік з рисунка 4.3, 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 α° :

$$P_H = I_H U_H.$$

Знаходимо втрати потужності на тиристорі при заданому куті керування, втратами потужності в колах керування нехтуємо:

$$\Delta P = U_o I_a + R_\delta I_m^2.$$

Знаходимо нагрів тиристора для заданого кута керування α :

$$\Delta T = R_T \Delta P.$$

Найбільша температура напівпровідникової структури тиристора складе:

$$T_{max} = T_c + \Delta T < T_{max\ доп} = 140^\circ C,$$

де T_c – температура оточуючого середовища;

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

Знаходимо величину опору додаткового резистора у колі керування тиристора:

$$R_{доб} = \frac{U_{жс} - U_{к}}{I_{к}}.$$

За таблицею Д1 вибираємо найближче стандартне значення з додатку Д1. Потужність, що розсіюється в цьому резисторі:

$$P_{доб} = R_{доб} I_{к}^2.$$

З таблицею Д3 вибираємо тип резистора .

Електричну принципову схему розрахованого регулятора наведено на рисунку 4.4.

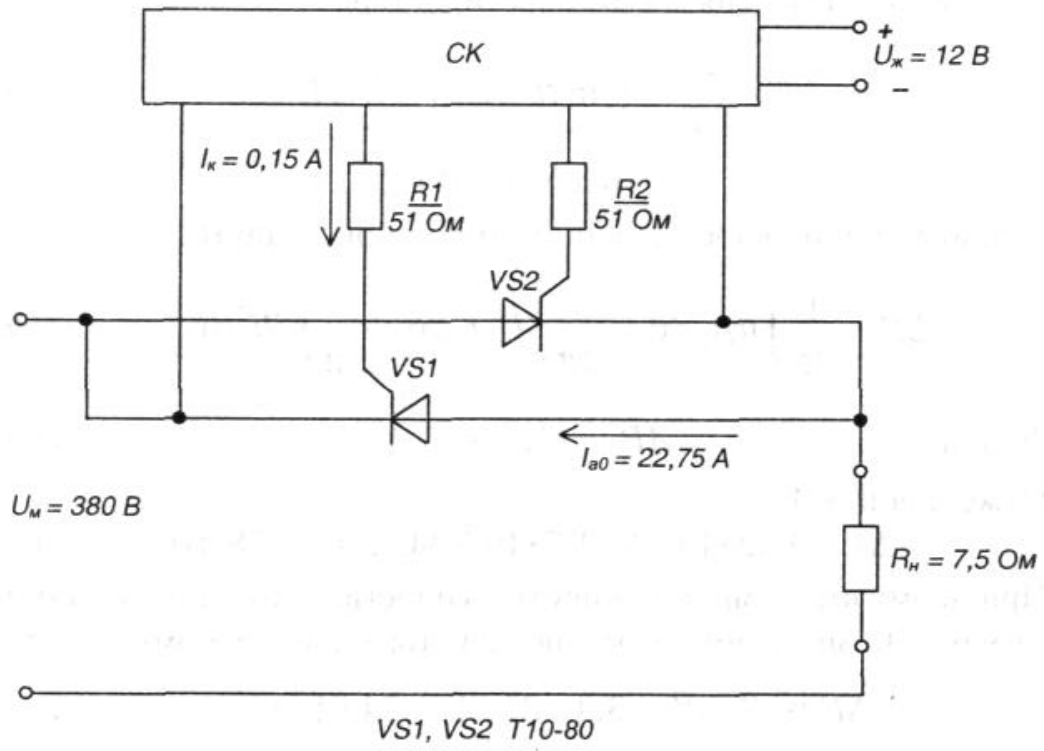


Рисунок 4.4 – Однофазний регулятор змінної напруги на тиристорах

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трубіцин К. В., Победаш К. К. Промислова електроніка. Навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Електронне мережне навчальне видання, 2022. 228 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48007/1/PE_KL.pdf (дата звернення 20.05.2024р).
2. Андрушак Г. О., Козярьський І. П., Майструк Е. В.. Промислова електроніка: навч. посібник Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с. URL: https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/140/Andrushchak_GO_Pro_m_electr_P1.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення 25.05.2024р).
3. Новацький, А. О. Електроніка та мікропроцесорна техніка. Ч. 2. Мікропроцесорні системи. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: Вид-во «Політехніка», 2023. 489 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55622> (дата звернення 27.05.2024р).
4. Гришук Ю. С. Мікроконтролери: архітектура, програмування та застосування в електромеханіці : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 384 с. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/42222/1/Book_2019_Mikrokontrolery.pdf (дата звернення 30.05.2024р).

ДОДАТКИ

Таблиця Д1 – Ряди номінальних значень

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
E48	1,0; 1,05; 1,1; 1,15; 1,21; 1,27; 1,33; 1,4; 1,47; 1,54; 1,62; 1,69; 1,78; 1,87; 1,96; 2,05; 2,15; 2,26; 2,37; 2,49; 2,61; 2,74; 2,87; 3,01; 3,16; 3,32; 3,48; 3,65; 3,83; 4,02; 4,22; 4,42; 4,64; 4,87; 5,11; 5,36; 5,62; 5,9; 6,19; 6,49; 6,81; 7,15; 7,5; 7,87; 8,25; 8,66; 9,09; 9,53	± 2

Числу в індексі знаменника ряду відповідає кількість позицій ряду: так, ряд E24 має 24 номінальних значення у проміжку від 1 до 10 (більша кількість при допустимому відхиленні ± 5 % не потрібна).

Будь-яке номінальне значення ряду може бути помножене на множник 10^n . Множники та їх позначення наведені в таблиця Д2 (може бути, наприклад: 6,8Ом; 680Ом; 6,8кОм; 68кОм; 6,8мкФ; 0,68нФ; 6800пФ та ін.).

Таблиця Д2 – Множники для утворення десяткових часткових та кратних одиниць

Множник 10^n	Приставка	Параметр елемента			
		Опір (R)		Ємність (C)	
		назва	позначення	назва	позначення
10^9	гіга	гігаом	ГОм	фарада	Ф
10^6	мега	мегаом	МОм		
10^3	кіло	кілоом	КОм		
1	-	-	Ом		
10^{-3}	мілі	міліом	МОм	мікрофарада	мкФ
10^{-6}	мікро				
10^{-9}	нано				
10^{-12}	піко				

Таблиця Д3 – Постійні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1 Ом ÷ 3,01 МОм 1 Ом ÷ 5,1 МОм 1 Ом ÷ 10 МОм	0,025; 0,05; 0,125 0,25; 0,5 1; 2
С2-33	1 Ом ÷ 3 МОм 1 Ом ÷ 5,1 МОм 0,1 Ом ÷ 5,1 МОм 1 Ом ÷ 10 МОм 1 Ом ÷ 22 МОм	0,125 0,25 0,5 1 2
ПЕВ-2, ПЕВ-5 ПЕВ-8 ПЕВ-10, ПЕВ-16, ПЕВ-25, ПЕВ-50, ПЕВ-75, ПЕВ-100	45 Ом ÷ 430 кОм 5 Ом ÷ 33 кОм 5 Ом ÷ 10 кОм 5 Ом ÷ 10 кОм	2; 5 8 10; 16; 25 50; 75; 100

Таблиця Д4 – Змінні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
СП 2	20 Ом ÷ 20 кОм	2
СП 3-12	27 Ом ÷ 27 кОм	3

Таблиця Д5 – Фоторезистори

Тип	Робоча напруга, В	Темновий опір, МОм	Питома чутливість, мА/(лмВ)	Інтегральна чутливість, мк/(лм)	Потужність, мВт	Світловий струм, мА
СФ2-1	15	15	10	400	10	1
ФСД	20	20	40	2,8	50	2
СФ2-9	25	3,3	75	2,4	125	0,9
ФСА-6	30	0,3	0,5	0,7	10	0,75
ФСА-Г1	40	1	0,5	0,7	10	0,35
ФСК-1	50	3,3	7	2,8	125	2
СФ2-8	100	100	1,5	1,0	125	1

Таблиця Д6 – Варистори (нелінійні резистори).

Тип резистора	Номін. напруга, В	Номін. струм, мА	Номін. потужність, Вт	Коефіцієнт нелінійності
СН 1-1-1	560 ÷ 1500	10	1	3,5 ÷ 4,5
СН 1-6	33	20	2,5	4,0
СН 1-2-1	56 ÷ 270	8	1	3,6
СН 1-10	15 ÷ 47	10	3	3,2

Таблиця Д7 – Терморезистори

Назва	Тип резистора	Номін. опір, кОм	Температурний к-нт опору, %, °С	Номін. потужність, мВт
Термістор	СТ 1-17	0,3 ÷ 22	4 ÷ 7	500
	КМТ-1	22 ÷ 1000	4,2 ÷ 8,4	8
Позистор	СТ 6-1А	0,04 ÷ 0,4	10	1100
	СТ 6-3Б	1 ÷ 10	15	200

Таблиця Д8 – Основні параметри деяких випрямних діодів.

Тип діоду	Граничні електричні параметри за температури оточуючого середовища 25 ± 5 °С			
	Допустима зворотна напруга $U_{зв. д}$, В	Середнє значення випрямленого струму $I_{ан}$, А	Макс. значення струму вентиля $I_{ант}$, А	Пряме падіння напруги $U_{пр}$ (при $I_{ан}$), В
КД205Д	100	0,5	10	1,0
КД202Б	50	1,0	20	1,0
1N4001	50	1,0	50	1,5
1N5400	50	1,5	70	1,4
КД202А	50	3,5	150	1,0
КД202А	50	5,0	100	1,0
КД205Д	100	0,5	10	1,0
КД205К	100	0,7	14	1,0
КД208	100	1,0	20	1,0
1N4002	100	1,0	50	1,5
1N5401	100	3,0	100	1,4
КД202В	100	3,5	150	1,0
Д242А	100	10,0	200	1,2
Д112-16	100	16	300	1,35
КД212В	200	1,0	20	1,0
КД202Д	200	5	100	1,0
Д243	200	10,0	200	1,0
КД202Ж	300	5,0	150	1,0
Д245	300	10,0	200	1,0
Д246Б	400	5,0	100,	1,5
Д112-10	100, 200,.....,1400	10	200	1,35
Д112-16	100, 200,.....,1400	16	200	1,35
Д112-25	100, 200,.....,1400	25	250	1,35
Д122-32	100, 200,.....,1400	32	320	0,85
Д122-40	100, 200,.....,1400	40	400	0,85
Д132-50	100, 200,.....,1400	50	500	0,9
Д132-63	100, 200,.....,1400	63	630	0,85
Д132-80	100, 200,.....,1400	80	800	0,85

Таблиця Д9 – Основні параметри деяких стабілітронів.

Тип стабілітрона	Напруга стабілізації <i>U_{ст.}</i> , В	ТКН, град ⁻¹	Диф. опір <i>R_{д.}</i> , Ом	Максимальний струм <i>I_{ст. max.}</i> , мА
КС133А	3,0 ÷ 3,6	0,11	65	81
КС139А	3,7 ÷ 4,2	0,1	60	70
КС147А	4,2 ÷ 5,2	0,1	56	58
КС156А	5,0 ÷ 6,4	0,05	46	55
КС168А	6,12 ÷ 7,5	0,06	28	45
Д814А	8	0,07	6	40
Д814Б	9	0,08	10	36
Д814В	10	0,09	12	32
Д814Г	11	0,095	15	29
Д814Д	13	0,095	18	24
Д815Д	12	0,095	10	300
КС515Г	15	0,005	25	31
КС520В	20	0,001	210	22
КС524Г	24	0,005	40	19
КС531	31	0,005	350	15
КС547В	47	0,001	490	10
КС568	68	0,001	700	10
КС596	96	0,001	980	7

Примітка. Мінімальний струм для всіх стабілітронів становить $I_{ст. min} = 3\text{ мА}$.

Таблиця Д10 – Конденсатори постійної ємності

Номинальна напруга, В	К50-7	К 50-35	К 50-18
6,3		20; 30; 50; 100; 200; 500	220000
10		10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000	100000
16		5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 300; 1000; 2000; 5000	22000; 68000 100000
25		2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 000; 2000; 5000	15000; 33000 100000
50		2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000	4700; 10000; 15000
100		0,5; 1; 2,5; 10; 20; 30; 50	2200; 4700;
160	2; 50; 100; 200; 500	1,2; 5; 10; 20	
250	10; 20; 50; 100 200		1000; 4700
300	5; 10; 20; 50; 100; 200		
450	10; 20; 50; 100		

Таблиця Д11 – Основні параметри деяких транзисторів

Тип транзистора	Структура	P_{Kmax} мВт	h_{21E} (β)	f_{h21E} МГц	Граничний режим		Клас за потужністю
					U_{Kmax} В	I_{Kmax} мА	
КТ 103	<i>p-n-p</i>	150	20-80	1	15	50	Малої потужності
КТ 104	<i>n-p-n</i>	150	20-80	1	15	50	
ГТ 122	<i>n-p-n</i>	150	15-45	1	35	20	
ГТ 123	<i>p-n-p</i>	150	15-45	1	35	20	
ГТ 124	<i>n-p-n</i>	150	28-56	1	30	100	
ГТ 125	<i>p-n-p</i>	150	28-56	1	30	100	
КТ 316Г	<i>p-n-p</i>	150	50-350	1	35	50	
КТ 315Г	<i>n-p-n</i>	150	50-350	1	35	50	
КТ 502А	<i>p-n-p</i>	500	30-90	1	40	300	Середньої потужності
КТ 503А	<i>n-p-n</i>	500	30-90	1	40	300	
КТ 502В	<i>p-n-p</i>	500	40-120	1	60	300	
КТ 503В	<i>n-p-n</i>	500	40-120	1	60	300	
ГТ 402А	<i>p-n-p</i>	600	20-40	1	25	500	
ГТ 403А	<i>n-p-n</i>	600	20-40	1	25	500	
ГТ 402В	<i>p-n-p</i>	600	30-60	1	40	500	
ГТ 403В	<i>n-p-n</i>	600	30-60	1	40	500	
КТ 814А	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	25	1500	Великої потужності
КТ 814Б	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	40	1500	
КТ 814В	<i>p-n-p</i>	10000	40	3	60	1500	
КТ 814Г	<i>p-n-p</i>	10000	30	3	80	1500	
КТ 815А	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	25	1500	
КТ 815Б	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	40	1500	
КТ 815В	<i>n-p-n</i>	10000	40	3	60	1500	
КТ 815Г	<i>n-p-n</i>	10000	30	3	80	1500	
КТ 816А	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	25	3000	
КТ 816Б	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	45	3000	
КТ 816В	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	60	3000	
КТ 816Г	<i>p-n-p</i>	25000	25	3	80	3000	
КТ 817А	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	25	3000	
КТ 817Б	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	45	3000	
КТ 817В	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	60	3000	
КТ 817Г	<i>n-p-n</i>	25000	25	3	80	3000	

Таблиця Д12 – Основні параметри тиристорів типу Т10

Параметр	Позначення	Тиристор						Умови режиму
		T10-10	T10-16	T10-25	T10-40	T10-63	T10-80	
Зворотна напруга, В (для всіх тиристорів)	$U_{зв.д}$	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						-
Граничний струм (середнє значення), А	I_z	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження температура корпусу 85°C
Граничний струм з типовим охолоджувачем (середнє значення), А	I_{z0}	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 струму 10 мс
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	За прямої напруги на тиристорі
Відмикаюча напруга керування, не більше, В	U_k	3	3	3	4	4	4	-
Загальний встановлений тепловий опір °С/Вт, мОм	R_T	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем за природного повітряного охолодження

Е50 **Електроніка та перетворювальна техніка:** методичні вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / уклад. М. М. Євсюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 49 с.

Комп'ютерний набір М. М. Євсюк, Т.П. Цизь

Редактор М. М. Євсюк

Підп. до друку «___» _____ 2025 р.

Формат 60x84/16.

Папір офс. Гарн. Таймс.

Ум. друк. арк.3,0. Обл. – вид. арк. 2,2.

Тираж ___ прим. Зам. _____.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – кафедра ЕіТК ЛНТУ