

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання контрольної роботи

з дисципліни

***«МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»***

Харків – 2024

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 16 лютого 2024 р., протокол № 6.

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітніх програм «Електричний транспорт» і «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології» та 273 «Залізничний транспорт» освітньої програми «Електровози та електропоїзди» денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. В. П. Нерубацький,
асп. Д. А. Гордієнко

Рецензент

доц. Н. П. Карпенко

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Розроблення системи керування перетворювачів та залежних інверторів	8
2 Розроблення системи керування перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком	15
3 Розроблення системи керування автономних інверторів струму	18
4 Розроблення системи керування автономних інверторів напруги	22
5 Розроблення системи керування регуляторів-стабілізаторів	24
Список літератури	29
Додаток А Вихідні дані до виконання контрольної роботи	32

ВСТУП

Під системою керування (СК) перетворювального пристрою в широкому значенні розуміють сукупність функціональних вузлів та елементів, що забезпечують:

- керування ключовими елементами силової частини перетворювача, які здійснюють процес перетворення електроенергії;

- регулювання вихідних параметрів перетворювача;

- вмикання, вимикання перетворювача та розподілення електроенергії між окремими споживачами;

- керування захисними пристроями перетворювача та його компонентів;

- видавання інформації про роботу перетворювача під час використання його в автоматизованій системі електроживлення.

До основної частини СК відносяться функціональні вузли та елементи, які забезпечують керування нелінійними елементами (наприклад, тиристорами), що безпосередньо виконують функції перетворення та регулювання параметрів електричної енергії.

У тиристорних перетворювачах основна функція СК полягає у формуванні за певною програмою керуючих імпульсів на керуючих електродах тиристорів схеми. Вимоги до параметрів керуючих імпульсів визначаються типом тиристора, схемою, в якій використовується тиристор, і режимом його роботи. Для надійного вмикання тиристора необхідно забезпечити такі значення струму керування і напруги на керуючому електроді, які відповідають області гарантованого вмикання тиристора з урахуванням максимально допустимих значень струму, напруги та пікової потужності, що виділяється на керуючому електроді.

Залежно від схеми, в якій використовуються тиристори, керуючі імпульси можуть мати різну форму і тривалість. Найпоширеніша форма

керуючих імпульсів – прямокутна. Мінімальна тривалість керуючих імпульсів визначається часом, необхідним для наростання струму в анодному колі до значення струму вмикання тиристора, який зазвичай у 2...3 рази перевищує струм вимкнення. Це час при активному опорі комутуємого тиристором кола майже збігається з часом вмикання тиристора, тобто знаходиться в діапазоні від одиниць до кількох десятків мікросекунд. Наявність індуктивності в анодному колі може істотно збільшити мінімально необхідну тривалість керуючого імпульсу порівняно з часом вмикання тиристора.

Для забезпечення нормальної роботи тиристорів у ряді схем потрібні широкі керуючі імпульси, тривалість яких зазвичай визначається частотою перемикавання тиристорів і особливостями роботи схеми. Наприклад, у трифазному мостовому керованому випрямлячі при роботі в режимі з переривчастим струмом навантаження або при запуску випрямляча необхідно, щоб керуючі імпульси були присутні одночасно на двох тиристорах: одному з анодної групи, а іншому з катодної. Це зумовлено необхідністю утворення кола протікання струму навантаження I_d при вмиканні чергової пари тиристорів, які знаходяться у вимкненому стані через зниження струму I_d до нуля. Одночасна присутність керуючих імпульсів на відповідній парі тиристорів анодної та катодної групи може бути забезпечена, якщо тривалість імпульсів буде більшою, ніж $t = T/6$, де T – період змінної напруги на вході випрямляча.

У цьому випадку завдання може бути вирішене й іншим шляхом. Наприклад, поданням на кожен тиристор здвоєних вузьких керуючих імпульсів, перший з яких відповідає черговому вмиканню тиристора згідно з порядком комутації тиристорів у схемі, а інший – повторному (у момент вмикання чергового тиристора протилежної групи). Однак у багатьох схемах формування широких імпульсів виявляється простіше, ніж ряду вузьких, особливо якщо моменти їх формування мають залежати від режиму

роботи перетворювача. Основним недоліком керування широкими імпульсами є збільшення обсягу та маси імпульсних трансформаторів в СК, а також втрат у тиристорі.

Суттєвим параметром керуючих імпульсів є також крутість переднього фронту імпульсу, яка впливає на час вмикання тиристора і допустиму швидкість наростання прямого струму. Для кращого використання тиристорів тривалість переднього фронту керуючого імпульсу має бути близько однієї мікросекунди. Крутість переднього фронту керуючого імпульсу є важливим параметром і для імпульсів керування транзисторами, що використовуються в схемах перетворювачів як ключові елементи.

При керуванні тиристорами на інтервалі, коли відсутні керуючі імпульси, бажано на керуючі електроди тиристорів подавати невелике негативне зміщення. Замикаюча напруга дає змогу підвищити стійкість тиристорів до помилкових керуючих імпульсів.

У цей час СК тиристорних перетворювачів виконуються на основі напівпровідникових та магнітних елементів. З останніх переважно використовуються імпульсні трансформатори, що застосовуються для розв'язки кіл СК та силової частини перетворювача. З розвитком мікроелектроніки широке застосування в СК знаходять різні типи гібридних і напівпровідникових інтегральних схем.

Конструктивно СК виконується зазвичай як висувні субблоки, що складаються з друкованих плат. Зазвичай кожна друкована плата є функціонально визначеним вузлом СК. З'єднання між платами, субблоками та силовою частиною здійснюються через роз'єми.

Велику увагу при розробці СК приділяють питанням надійності, оскільки кількість елементів СК значно перевищує кількість елементів силової частини. Тому надійність перетворювача переважно визначається надійністю його СК. Особливі вимоги до вузлів СК пред'являють за

завадостійкістю, оскільки вони зазвичай працюють в безпосередній близькості з силовими колами схеми.

У цих методичних вказівках розглядаються деякі спрощені структури СК різних видів перетворювальних пристроїв: випрямлячів, перетворювачів частоти, автономних інверторів тощо. Загальним для усіх розглянутих структурних схем є блок живлення, позначений на рисунках БЖ, без вказівки зв'язків з іншими функціональними вузлами СК.

Метою виконання контрольної роботи здобувачами вищої освіти з дисципліни «Мікропроцесорні пристрої в системах електричної тяги» є розроблення та дослідження системи керування перетворювального пристрою. Найменування перетворювального пристрою, систему керування якого необхідно розробити, кожен здобувач вищої освіти отримує індивідуально у викладача. Здобувачам вищої освіти пропонується самостійно обрати структуру системи керування перетворювального пристрою, а також необхідні для її реалізації електричні принципові схеми функціональних вузлів, користуючись рекомендованою літературою і враховуючи вихідні дані, наведені у таблиці А.1 додатку А.

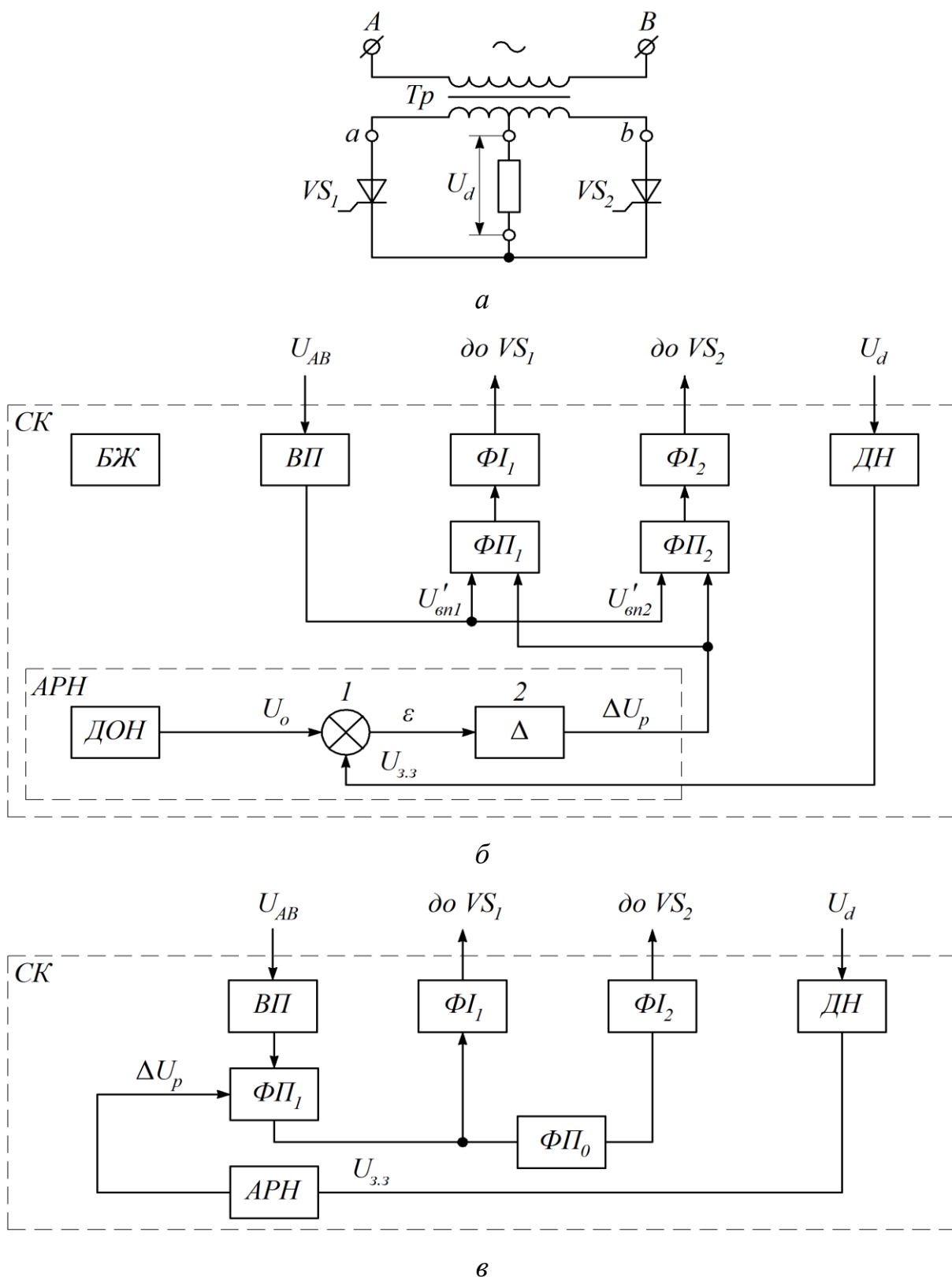
Контрольна робота має складатися з таких складових частин: титульний аркуш; зміст; вступ; опис роботи електричної принципової схеми перетворювального пристрою; огляд структурної схеми системи керування перетворювального пристрою; розрахунок функціональних вузлів (окремим підпунктом виконується розрахунок кожного з функціональних вузлів, що входять до складу структурної схеми системи керування перетворювального пристрою); імітаційне моделювання електричної принципової схеми перетворювального пристрою з розробленою системою керування; висновки до контрольної роботи; список використаних джерел; креслення (формат А3) електричної принципової схеми перетворювального пристрою з розробленою системою керування, оформлене як додаток до контрольної роботи.

1 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ЗАЛЕЖНИХ ІНВЕРТОРІВ

У найзагальнішому вигляді структури СК випрямлячів, залежних інверторів та інших видів тиристорних перетворювачів можна поділити на дві групи: багатоканальні та одноканальні. У багатоканальних структурах СК регулювання фази керуючих імпульсів (тобто кута керування) здійснюється в кожному каналі керування. Число таких каналів зазвичай дорівнює числу тиристорів схеми або числу її фаз. В одноканальних структурах СК регулювання фази керуючих імпульсів здійснюється в одному загальному для всіх фаз каналі з подальшим розподілом імпульсів за тиристорами схеми. Подібну класифікацію СК доцільно проводити для багатофазних перетворювачів, що містять велику кількість тиристорів. У той самий час основний принцип цієї класифікації справедливий і для однофазних схем.

Найбільш поширеною структурою СК випрямлячів є багатоканальна. Приклад СК з такою структурою для тиристорного випрямляча, виконаного за однофазною схемою з середньою точкою (рисунок 1.1, *a*), наведено на рисунку 1.1 *б*. Принцип роботи цієї СК засновано на формуванні керуючих імпульсів, що слідує синхронно з мережевою напругою U_{AB} і зрушених щодо цієї напруги по фазі на кут α . У випрямлячах з регулюванням за вихідною напругою кут α забезпечується таким, щоб середнє значення випрямленої напруги U_d мало відрізнялося від заданого при різних збуреннях, наприклад, коливаннях мережевої напруги U_{AB} .

Прив'язка імпульсів до мережевої напруги здійснюється вхідним пристроєм ВП. Функції ВП в цій СК може виконувати трансформатор із середньою точкою, вторинні напівобмотки якого створюють дві синусоїдальні напруги, зрушені між собою на кут π . Напруги з кожної вторинної напівобмотки ВП надходять на фазозсувні пристрої ФП₁ і ФП₂.



а – силова схема; б – багатоканальна структурна схема СК;

в – одноканальна структурна схема СК

Рисунок 1.1 – Система керування однофазного випрямляча

Найбільш просто фазозсувні пристрої в цьому випадку реалізуються на принципі вертикально-фазового керування. Зокрема, схеми можуть бути виконані так, щоб забезпечити формування імпульсів в моменти рівності напруг, що надходять від ВП та рівних U'_{en1} і U'_{en2} з напругою ΔU_p , що надходить на ФП₁ і ФП₂ від автоматичного регулятора напруги АРН.

Типову структурну схему автоматичного регулятора напруги наведено на рисунку 1.1, б. Вона складається з джерела опорної (еталонної) напруги ДОН, суматора 1 і підсилювача 2, що містить у собі у загальному випадку різні ланки динамічної корекції системи автоматичного регулювання. У прикладі, що розглядається, остання виконана на принципі використання зворотного зв'язку. Напряга кола зворотного зв'язку $U_{3.3}$ від датчика напруги ДН надходить на суматор 1, на вхід якого подається також опорна напряга U_o . Різниця цих напруг ε (один з сигналів надходить на суматор зі зворотним знаком) подається на вхід підсилювача 2. Вихідний сигнал підсилювача надходить на входи ФП₁ і ФП₂ та далі на формувачі керуючих імпульсів ФІ₁ і ФІ₂. ΔU_p визначає моменти формування керуючих імпульсів тиристорів, тобто кут керування α .

Чим більший кут α , тим менше середнє значення вихідної напруги випрямляча. Ця залежність дає змогу регулювати вихідну напругу, зокрема здійснювати її стабілізацію на заданому рівні при різних збурюючих впливах. Наприклад, якщо в результаті зростання вхідної напруги почне збільшуватися вихідна напруга випрямляча, посиленій сигнал неузгодження ε буде змінювати кут α так, щоб відновити вихідну напругу на заданому рівні. В результаті сигнал буде прагнути до нуля, а вихідна напруга до значення, заданого опорною напругою та коефіцієнтом передання датчика вихідної напруги ДН.

Відповідно до принципу дії системи регулювання, що розглядається, встановлене значення напруги U_d має відрізнитися від заданого, щоб забезпечити необхідний рівень сигналу ε для певного значення кута α .

Значення ε буде тим менше, чим вище коефіцієнт посилення кола регулятора, що зв'язує значення ε і α (який залежить в цьому випадку переважно від коефіцієнта посилення підсилювача 2). Тому в режимі, що встановився, нове значення вихідної напруги буде дещо відрізнятись від заданого. Але ця відмінність при великих значеннях коефіцієнта посилення замала.

Оскільки компенсація збурюючих впливів у системах подібного типу відбувається не повністю, а з деяким відхиленням регульованого параметра від заданого значення (званим в теорії автоматичного регулювання статизмом), вони відносяться до статичних систем автоматичного регулювання. Статизм може бути зменшений за рахунок збільшення коефіцієнта посилення кола регулювання. Але це може спричинити нестійкість процесу регулювання, наприклад автоколювання. З метою підвищення стійкості системи регулювання до неї вводять спеціальні корегувальні ланки, які покращують динамічні характеристики системи.

Для пояснення принципу впливу одноканальних структур СК на рисунку 1.1, в наведено інший варіант СК. Тут є фазозсувний пристрій ФП₀, що забезпечує фіксований зсув за фазою на кут π сигналу, що надходить на формувач імпульсів ФІ₂. Регулювання кута керування відбувається лише за допомогою впливу сигналу від АРН на ФП₁, тобто керуючі імпульси синхронізуються за частотою та фазою щодо однієї напівхвилі мережевої напруги. Для однофазних перетворювачів одноканальні структури ускладнюють СК і тому зазвичай не використовуються. Водночас для багатофазних перетворювачів застосування одноканальних СК у деяких випадках може бути вигідним.

Приклад багатоканальної структури СК для трифазного керованого випрямляча (рисунок 1.2, а) наведено на рисунку 1.2, б. Вона містить шість каналів керування тиристорами.

Кожен канал має фазозсувний пристрій ФП і формувач імпульсів ФІ. Синхронізація імпульсів з мережевою напругою здійснюється вхідним пристроєм ВП, який одночасно проводить розподіл синхронізуючих напруг каналами. Функції ВП, зокрема може виконувати трансформатор, що має шість вихідних обмоток, які утворюють шестифазну систему напруг, зрушених на кут $\pi/3$. На входи ФП надходять як синхронізуючі напруги від ВП, так і напруга ΔU_p від АРН, що забезпечує регулювання кута керування α . За принципом дії структура, що розглядається, аналогічна структурі, зображеній на рисунку 1.1, б. Для забезпечення пуску і стійкої роботи випрямляча в режимах з переривчастими струмами слід формувати широкі керуючі імпульси (більше, ніж $\pi/3$) або подавати вузькі, але здвоєні. З цією метою запроваджуються додаткові зв'язки між каналами керування.

Недоліком багатоканальної структури є складність забезпечення симетрії керуючих імпульсів за каналами. Для цієї мети зазвичай передбачають підрегулювання фазових зрушень імпульсів при налагодженні СК в процесі виробництва та за необхідності в умовах експлуатації. Асиметрія в кутах керування фазами призводить до появи низькочастотних пульсацій у випрямленій напрузі, які можуть негативно позначатися на роботі споживача.

Структура СК, зображена на рисунку 1.2, в, практично не має цього недоліку, оскільки є по суті одноканальною. Вона складається із задаючого генератора ЗГ, напруга якого синхронізована з напругою мережі живлення, перерахунково-розподільного пристрою ПРП і формувачів імпульсів Φ_1 та Φ_2 . Частота ЗГ у 6 разів вище частоти мережі живлення; ПРП здійснює перерахунок частоти вихідних імпульсів ЗГ на два та розподіл їх по Φ_1 та Φ_2 , один з яких формує імпульси, що надходять одночасно на тиристори анодної групи випрямляча, а інший – на тиристори катодної групи.

Синхронізація роботи ЗГ з мережею і стабілізація випрямленої напруги здійснюються зворотним зв'язком СК. Для цього вихідна напруга

випрямляча через датчик напруги ДН надходить на АРН. Сигнал ΔU_p із виходу АРН надходить на ЗГ. Характер зворотного зв'язку вибирається таким, щоб зі збільшенням напруги ΔU_p частота ЗГ збільшувалася. При цьому збільшується кут керування α , що призводить до зниження випрямленої напруги. Цей процес буде продовжуватися практично до повного усунення розбалансу напруг $U_{3,3}$ і U_o (рисунок 1.1, б), коли їх різниця ε стане рівною нулю.

Система автоматичного регулювання подібного типу є астатичною, тобто при збуреннях, що діють на випрямляч, наприклад при коливаннях мережевої напруги, вихідна напруга залишатиметься практично незмінною. Астатичний характер системи регулювання, однак, у цій структурі обмежує швидкодію СК при різких змінах збурюючих факторів. Слід зазначити, що використання цієї структури СК у залежних інверторах пов'язане з низкою труднощів, що призводять до значного її ускладнення.

Перевагами даного варіанта структури СК є простота, надійність, висока точність стабілізації вихідної напруги в статичних режимах, високий ступінь симетрії у слідуванні керуючих імпульсів.

У розглянутих варіантах структур СК випрямлячів як регульований параметр вказувалося середнє значення випрямленої напруги U_d . При використанні таких СК в залежних інверторах як регульований параметр зазвичай вибирається струм (середнє значення на стороні постійного струму або наявне на стороні змінного струму інвертора). У цьому випадку датчик напруги замінюється датчиком струму.

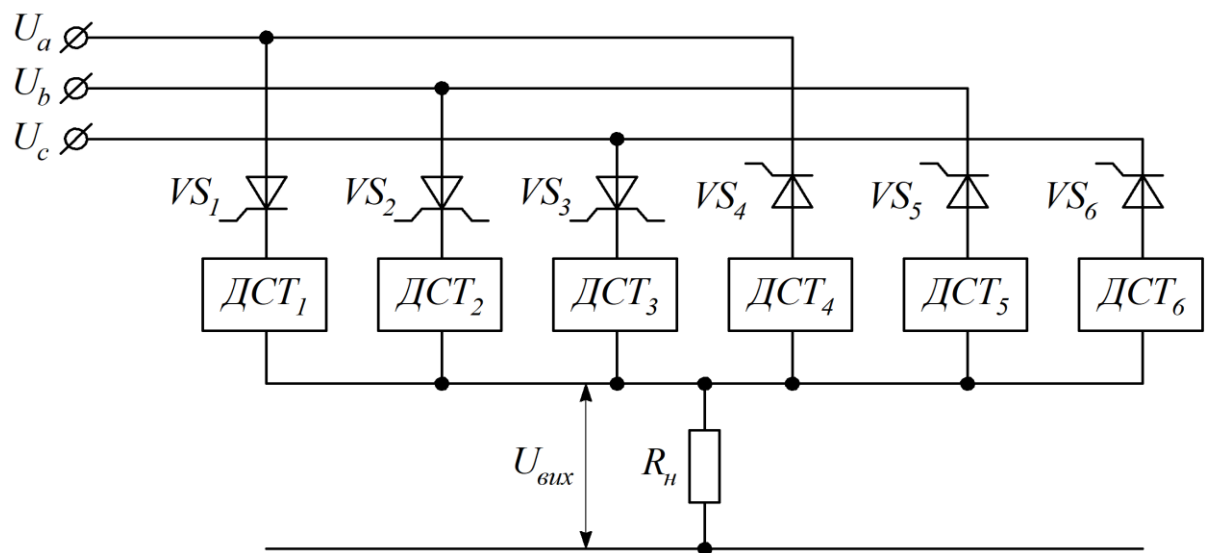
У режимі стабілізації за струмом можуть також працювати і керовані випрямлячі, наприклад при використанні їх як зарядних пристроїв акумуляторних батарей. Тоді також необхідно замінити датчик напруги датчиком струму, сигнал якого пропорційний середньому значенню випрямленого струму I_d .

2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

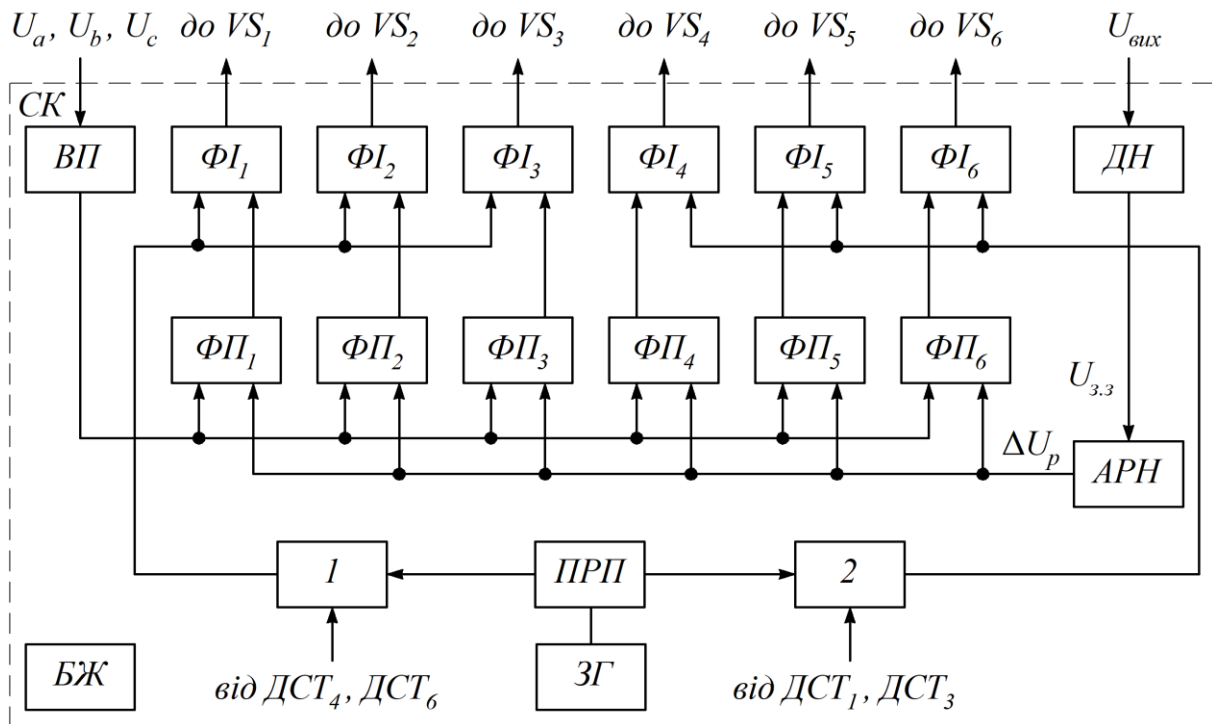
Структурні схеми СК перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком також розрізняються за способом фазового керування тиристорами на багатоканальні та одноканальні, а за принципом регулювання вихідних параметрів – на статичні та астатичні. Найбільшого поширення нині набули багатоканальні структури зі статичною системою автоматичного регулювання.

Порівняно зі структурними схемами СК випрямлячів та залежних інверторів структури СК перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком є значно складнішими. Це пояснюється тим, що у загальному випадку СК в перетворювачах частоти мають реалізувати більший обсяг логічних операцій. Зокрема, керування тиристорними групами має здійснюватися з урахуванням режиму рекуперації реактивної енергії навантаження в мережу (інверторного режиму), виключення зрівняльних струмів між тиристорними групами, модуляції вихідної напруги за певними законами тощо. Тому, враховуючи складність реальних СК перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком, розглянемо як приклад найпростіший варіант структури СК трифазно-однофазного перетворювача, що працює тільки на активне навантаження (рисунок 2.1, *а*) і без модуляції вихідної напруги за законами, що покращують його гармонічний склад.

Кожна з тиристорних груп перетворювача, що розглядається, являє собою трифазний керований випрямляч, виконаний за схемою з середньою точкою. Тому структура СК цього перетворювача (рисунок 2.1, *б*) багато в чому подібна до структур СК випрямлячів. На тиристори надходять керуючі імпульси, синхронізовані з мережею за допомогою вхідного пристрою ВП, вихідні напруги якого розподілені за каналами керування тиристорів відповідно з фазою мережевої напруги, що надходить на тиристор.



a



б

a – силова схема; *б* – структурна схема СК

Рисунок 2.1 – Система керування перетворювачем частоти з безпосереднім зв'язком

Відповідно до принципу дії перетворювача одна напівхвиля вихідної напруги формується тиристорами анодної групи, а інша – тиристорами

катодної групи. Така програма роботи тиристорів забезпечується послідовним блокуванням керуючих імпульсів кожної групи.

Для цього в структуру СК (рисунок 2.1, б) введені вузли блокування (заборони на формування) імпульсів: вузол 1 блокування імпульсів тиристорів катодної групи і вузол 2 блокування імпульсів тиристорів анодної групи.

Сигнали заборони на виходах цих вузлів формуються при надходженні відповідних сигналів від перерахунково-розподільного пристрою ПРП і датчиків стану тиристорів ДСТ (що дає інформацію – ввімкнений або вимкнений тиристор). Наприклад, якщо на вході вузла 1 присутні заборонні сигнали від ПРП та ДСТ анодної групи, то на його виході з'являється сигнал заборони формування керуючих імпульсів тиристорів катодної групи. У структурі, що розглядається, ПРП здійснює розподіл частоти ЗГ на два та розподіл сигналів ЗГ за вузлами блокування. Частота вихідних сигналів ЗГ відповідає частоті вихідної напруги перетворювача.

Одночасна провідність струму тиристорами анодної та катодної груп виключається наявністю ДСТ, сигнали яких забороняють формування керуючих імпульсів тиристорів відповідної групи, поки всі тиристори протилежної групи не вимкнуться.

Вихідна напруга перетворювача регулюється автоматичним регулятором напруги АРН за рахунок подачі сигналу ΔU_p на фазозсувні пристрої ФП всіх каналів, що забезпечує необхідне значення кута керування α при їх внутрішньогруповій комутації.

Частота вихідної напруги може регулюватися, якщо використовувати ЗГ із регульованою частотою.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ СТРУМУ

Серед різних схем інверторів струму найбільшого поширення набула схема паралельного інвертора струму з компенсуючим пристроєм. Система керування такого інвертора зазвичай має забезпечувати стабілізацію частоти і значення вихідної напруги. За принципом синхронізації керуючих імпульсів інвертори струму поділяються на дві групи:

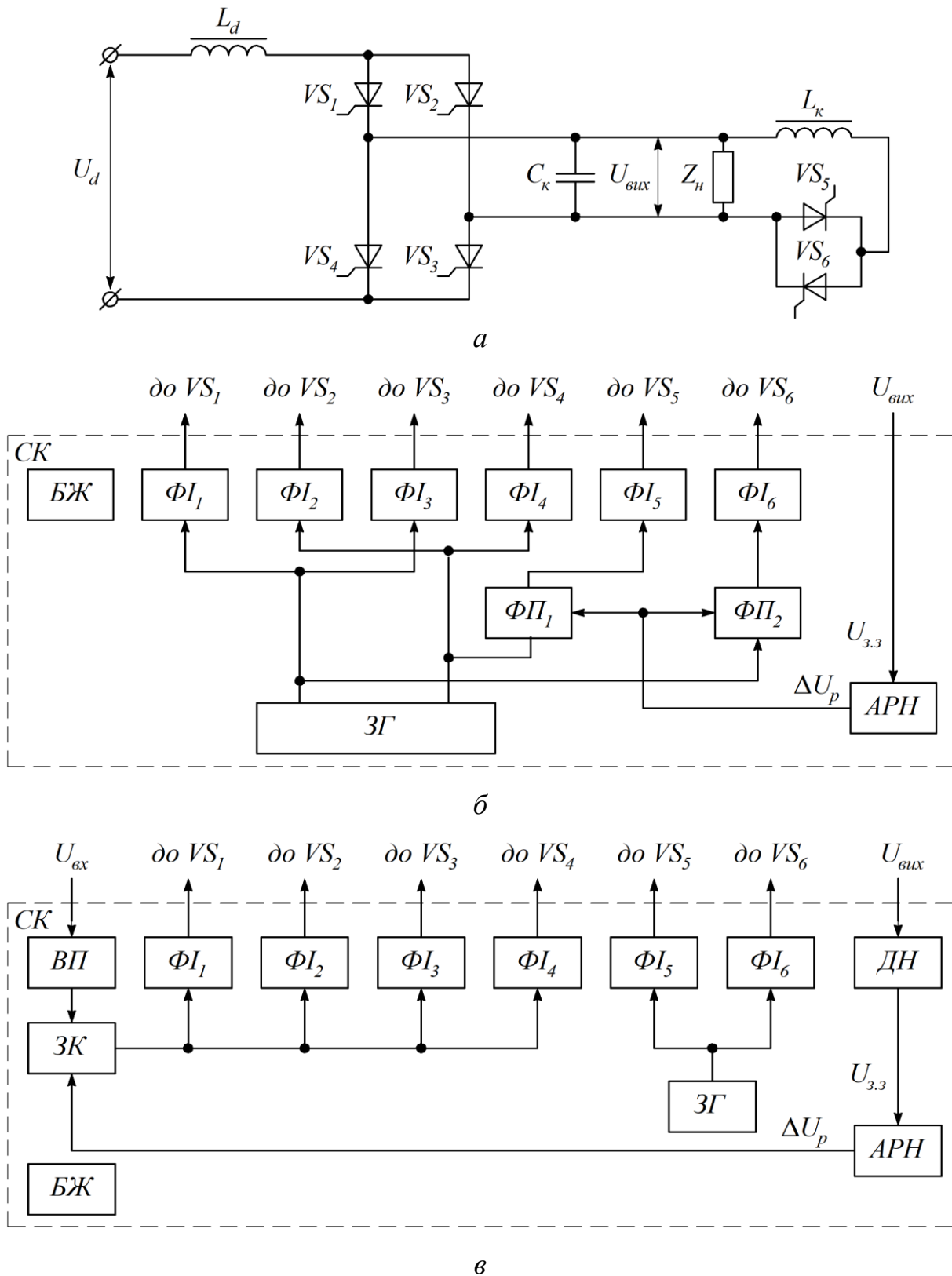
– інвертори з незалежним збудженням, керуючі імпульси в яких синхронізуються від задаючого генератора;

– інвертори з залежним збудженням, керуючі імпульси в яких синхронізуються від вихідної напруги самого інвертора.

При використанні як регулюючий орган компенсуючого пристрою виділяють третю групу – інвертори струму з комбінованим збудженням. В інверторах цієї групи керуючі імпульси однієї ланки (власне інвертора або компенсатора) синхронізуються від задаючого генератора, а іншої – від вихідної напруги. Зазвичай в інверторах струму з комбінованим збудженням імпульси інвертора синхронізуються від вихідної напруги (так само, як і при залежному збудженні), а керуючі імпульси компенсатора – від задаючого генератора.

Регулювання вихідних параметрів в інверторах струму з компенсаторами може також виконуватися різними способами: впливом на фазу керуючих імпульсів інвертора і впливом на фазу керуючих імпульсів компенсатора. Як приклади розглянемо дві типові структури СК однофазного паралельного інвертора струму (рисунок 3.1, *a*).

На рисунку 3.1, *б* представлено структуру СК інвертора з незалежним збудженням. Керуючі імпульси надходять на тиристори інвертора VS_1 – VS_4 від формувачів імпульсів ΦI_1 – ΦI_4 . Частота проходження цих імпульсів задається ЗГ.



a – силова схема; *б* – структурна схема СК з незалежним збудженням;

в – структурна схема СК з комбінованим збудженням

Рисунок 3.1 – Система керування однофазного інвертора струму

Якби компенсатор у схемі був відсутній, то у встановленому режимі роботи фаза вихідної напруги інвертора була б пов'язана з фазою слідування імпульсів кутом β , який залежить тільки від параметрів навантаження Z_n і ємності конденсатора C_k . Для того щоб змінювати кут β з метою регулювання вихідної напруги інвертора $U_{вих}$, необхідно впливати на провідність компенсатора, тобто на фазу керуючих імпульсів тиристорів VS_5 та VS_6 . Регулювання цієї фази (кута керування компенсатором α) здійснюється за допомогою фазозсувних пристроїв ФП₁ та ФП₂. На їх входи надходять сигнали від ЗГ та АРН. Сигнали ЗГ забезпечують синхронність керуючих імпульсів інвертора та компенсатора, а сигнал з виходу АРН визначає фазовий зсув між цими імпульсами, тобто кут α . За принципом регулювання СК, що розглядається, є статичною. Відхилення вихідної напруги від заданого рівня викликає таку зміну кута α , що відбувається процес зменшення цього відхилення до малих значень, які визначаються коефіцієнтом посилення системи регулювання. Частота вихідної напруги за такої структури СК залежить тільки від частоти ЗГ.

У прикладі, що розглядається, як задаючий генератор використовується двотактний генератор з вихідною змінною напругою прямокутної форми. Для формування керуючих імпульсів інвертора використовуються як позитивний, так і негативний імпульси ЗГ.

Структуру СК для інвертора струму з комбінованим збудженням представлено на рисунку 3.1, в. Формування керуючих імпульсів тиристорів інвертора VS_1 – VS_4 відбувається синхронно з вихідною напругою за допомогою задатчика кутів ЗК, який забезпечує незмінність фазового зсуву між вихідною напругою і послідовністю керуючих імпульсів інвертора. При такому способі формування керуючих імпульсів кут випередження β не залежить від параметрів навантаження, тобто інвертор працює в режимі залежного збудження або самозбудження. У цьому режимі зміна навантаження в інверторі без компенсатора викликає зміну частоти вихідної

напруги: при скиданні навантаження частота зменшується, а при накиданні збільшується. Наявність у силовій схемі компенсатора (рисунок 3.1, а) дає змогу стабілізувати частоту вихідної напруги, якщо на тиристори VS_5 і VS_6 подавати керуючі імпульси, що сформовані від ЗГ і не залежать від режиму роботи інвертора.

При такому способі керування зміна частоти вихідної напруги призводить до зміни кута керування компенсатора α . Характер цієї зміни такий, що частота вихідної напруги буде відновлюватися до повного збігу з частотою ЗГ. Подібна система автоматичного регулювання частоти є астатичною. Для стабілізації вихідної напруги (від змін вхідної напруги) СК введено канал регулювання, що складається з датчика напруги ДН і автоматичного регулятора напруги АРН. Цей канал є негативним зворотним зв'язком між вхідною і вихідною напругою інвертора. Він забезпечує збільшення кута β при зниженні вхідної напруги і зменшення при її зростанні, тобто стабілізує вихідну напругу на заданому рівні.

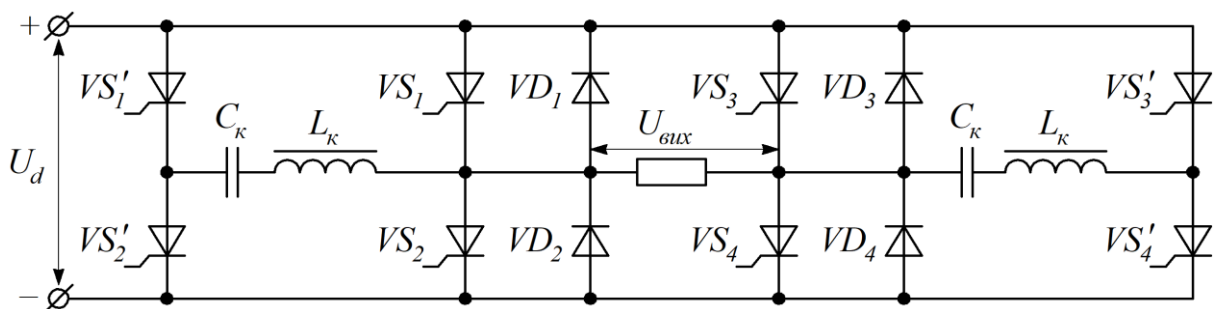
Розглянута структура СК забезпечує значно вищу якість вихідних параметрів як в статичних, так і в динамічних режимах роботи, ніж СК, структуру якої зображено на рисунку 3.1, б.

Структури СК резонансних інверторів багато в чому подібні до структур СК інверторів струму. Слід зазначити, що у деяких схемах резонансних інверторів стабілізація вихідної напруги здійснюється зміною частоти інвертування. Зокрема, такий принцип регулювання використовується в резонансних інверторах, що виконують функції проміжної ланки в комбінованих перетворювачах постійного струму. З цієї метою в СК резонансного інвертора вводиться ЗГ зі змінною частотою, яка регулюється сигналом кола зворотного зв'язку за вихідною напругою.

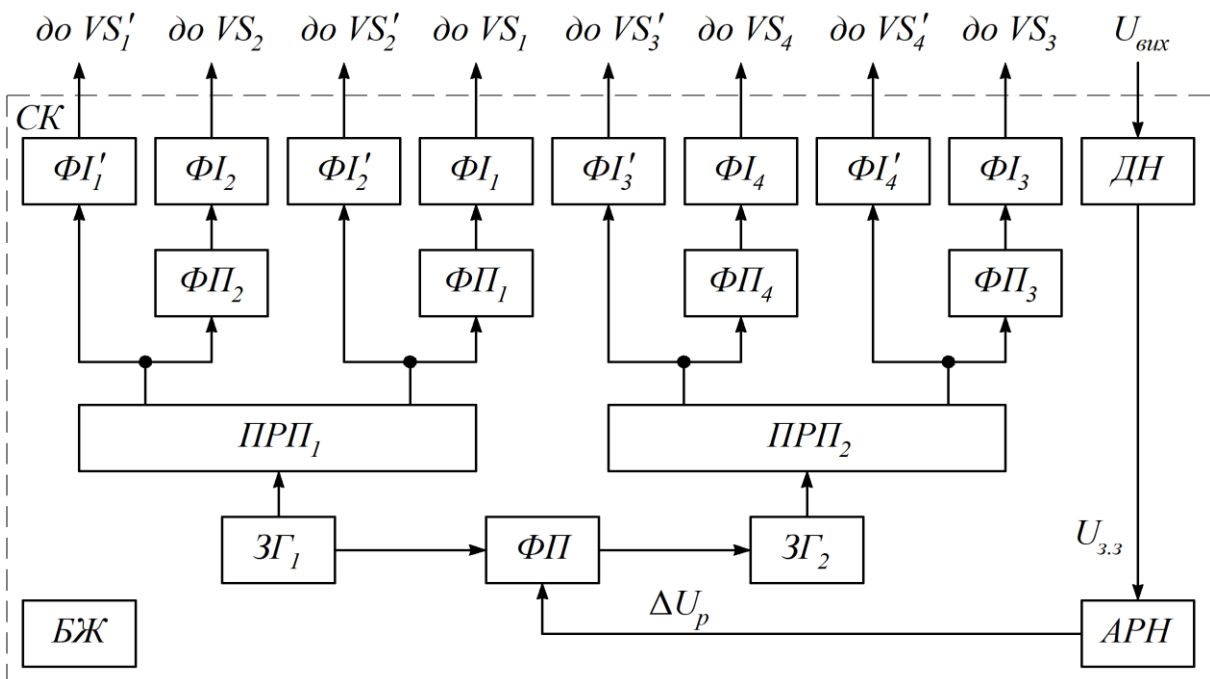
Системи керування трифазних інверторів струму за принципом дії подібні до розглянутих і відрізняються зазвичай числом каналів керування і наявністю деяких додаткових функціональних ланок.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ

Розглянемо СК тиристорного інвертора напруги (рисунок 4.1). У силовій схемі (рисунок 4.1, а) можна виділити два ідентичні плечі з $L_{\kappa}C_{\kappa}$ -комутуючими контурами, кожне з яких складається з основних тиристорів VS_1, VS_2 або VS_3, VS_4 і допоміжних (комутуючих) тиристорів VS'_1, VS'_2 або VS'_3, VS'_4 .



а



б

а – силова схема; б – структурна схема СК

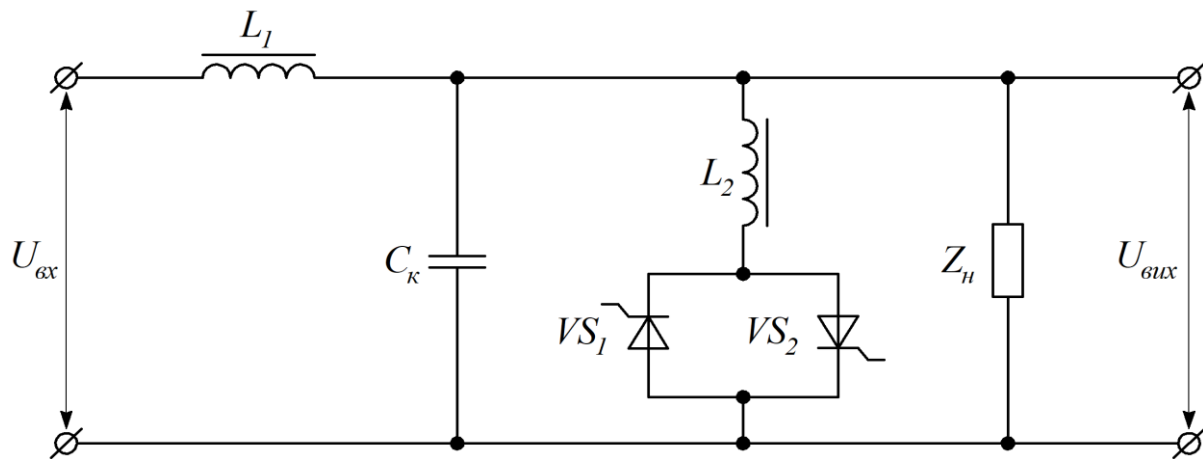
Рисунок 4.1 – Система керування однофазного інвертора напруги

Допоміжні тиристори керуються короткими імпульсами, тривалість яких можна порівняти з тривалістю інтервалу комутації тиристорів у такій схемі (50...100 мкс). Керуючі імпульси основних тиристорів мають бути широкими, оскільки при індуктивному характері навантаження момент проходження струму зворотних діодів через нуль змінюватиметься при регулюванні вихідної напруги або зміні навантаження. Тому, щоб черговий силовий тиристор увімкнувся, потрібна присутність на ньому керуючого імпульсу. Імпульси від задаючого генератора $Z\Gamma_1$ першого плеча інвертора надходять на перерахунково-розподільний пристрій ПРП₁, що здійснює розподіл частоти $Z\Gamma_1$ на два. З виходу ПРП₁ імпульс одночасно надходить на входи ΦI_1 та $\Phi П_2$. Формувач імпульсів ΦI_1 формує короткий керуючий імпульс допоміжного тиристора VS'_1 . Фазозсувний пристрій $\Phi П_2$ здійснює фіксовану затримку початку формування керуючого імпульсу основного тиристора VS_2 , що надходить на нього з виходу ΦI_2 . Надходження наступного імпульсу від $Z\Gamma_1$ призводить до формування керуючих імпульсів для тиристорів VS_2 і VS_1 , що слідує в такому ж порядку. Друге плече інвертора керується аналогічно. Для забезпечення нормальної роботи інвертора потрібна синхронізація $Z\Gamma_1$ та $Z\Gamma_2$. У наведеній структурній схемі синхронізація здійснюється через регульований фазозсувний пристрій ФП, що дає змогу проводити регулювання вихідної напруги за принципом широтно-імпульсної модуляції, для чого сигнал $U_{3,3}$ кола зворотного зв'язку за вихідною напругою подається на ФП. Значення сигналу ΔU_p визначає кут фазового зсуву $\Delta\theta'$ між керуючими імпульсами тиристорів VS'_1 і VS'_4 (або VS'_2 і VS'_3), а отже, і тривалість паузи між позитивними та негативними значеннями вихідної напруги.

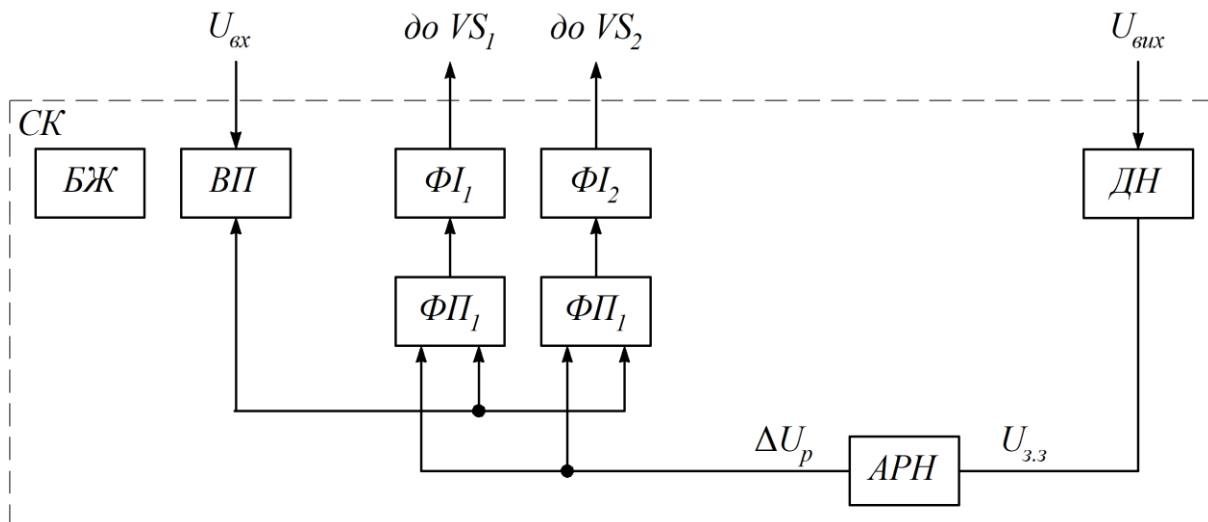
Система керування трифазного інвертора такого типу має подібну структуру. Основна відмінність полягає у використанні перерахунково-розподільного пристрою, що здійснює зсув за фазою керуючих імпульсів основних тиристорів кожного плеча відносно один одного на кут, рівний α .

5 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ-СТАБІЛІЗАТОРІВ

Для регулювання напруги кола змінного струму може бути застосовано компенсатор реактивної потужності, який використовується для регулювання вихідної напруги інвертора струму (рисунк 5.1, а).



а



б

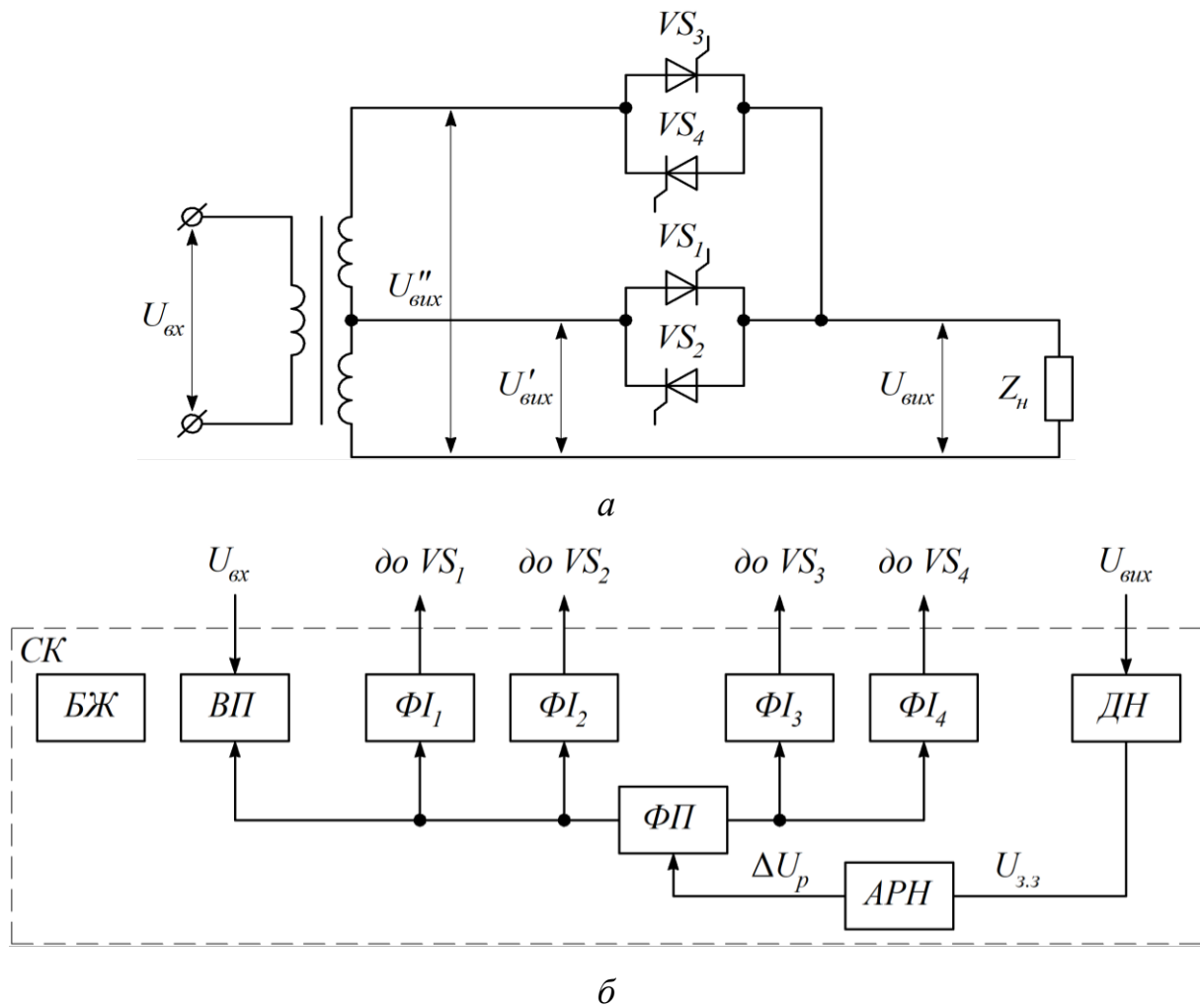
а – силова схема; б – структурна схема СК

Рисунок 5.1 – Система керування регулятора-стабілізатора напруги
з компенсатором реактивної потужності

Принцип регулювання напруги в такому регуляторі-стабілізаторі ґрунтується на зміні його еквівалентної індуктивності. Для цього необхідно регулювати кут керування α . Варіант структурної схеми такого регулятора-стабілізатора наведено на рисунку 5.1, б. Керуючі імпульси тиристорів VS_1 та VS_2 формуються формувачами імпульсів Φ_{I_1} та Φ_{I_2} . Синхронізація цих імпульсів з вихідною напругою $U_{вих}$ здійснюється вхідним пристроєм ВП, сигнали з якого надходять на фазозсувні пристрої $\Phi П_1$ і $\Phi П_2$. Одночасно на ці пристрої поступає сигнал ΔU_p від автоматичного регулятора напруги АРН. Напряга визначає фазу формування керуючих імпульсів щодо вхідної напруги, тобто кут керування α . Вихідна напруга контролюється датчиком ДН, сигнал з якого за колом зворотного зв'язку надходить на АРН.

Варіант структурної схеми СК регулятора-стабілізатора, виконаного на принципі комутації тиристорами відводів від обмотки трансформатора (рисунок 5.2, а), наведено на рисунку 5.2, б. Регулювання напруги у схемі здійснюється за рахунок зміни кута α , що визначає момент перемикавання навантаження з відводу, що відповідає напрузі $U'_{вих}$, на відвод з більш високою напругою $U''_{вих}$. Керуючі імпульси на тиристори VS_1 – VS_4 надходять з виходів формувачів імпульсів Φ_{I_1} – Φ_{I_4} . Синхронізація керуючих імпульсів здійснюється вхідним пристроєм ВП. При цьому моменти формування керуючих імпульсів тиристорів VS_1 і VS_2 жорстко пов'язані з напругою $U_{вх}$ і відповідають проходженню її через нульові значення ($0, \pi, 2\pi \dots$). Водночас керуючі імпульси тиристорів VS_3 і VS_4 зсуваються фазозсувним пристроєм ФП на кут α щодо цих моментів. Зміна кута α проводиться автоматично сигналом ΔU_p , що надходить від АРН.

Регулятори-стабілізатори малої потужності переважно виконуються на транзисторах, що працюють у режимі безперервно регульованого опору. Структурну схему СК у загальному випадку можна представити у вигляді, наведеному на рисунку 5.3.



a – силова схема; *б* – структурна схема СК

Рисунок 5.2 – Система керування регулятора-стабілізатора напруги з тиристорним перемиканням відпайок

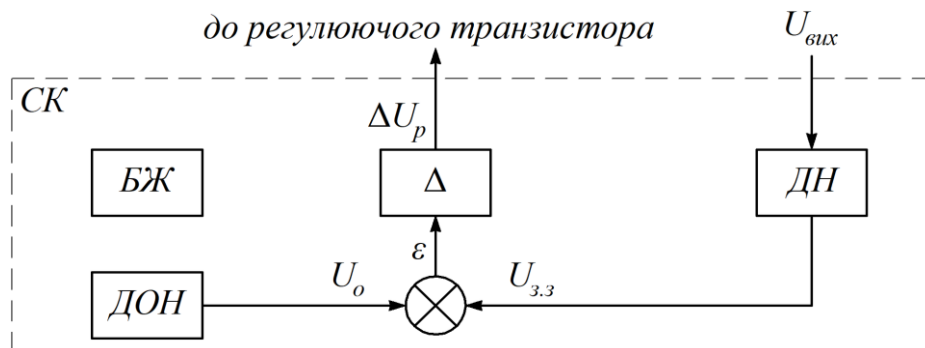


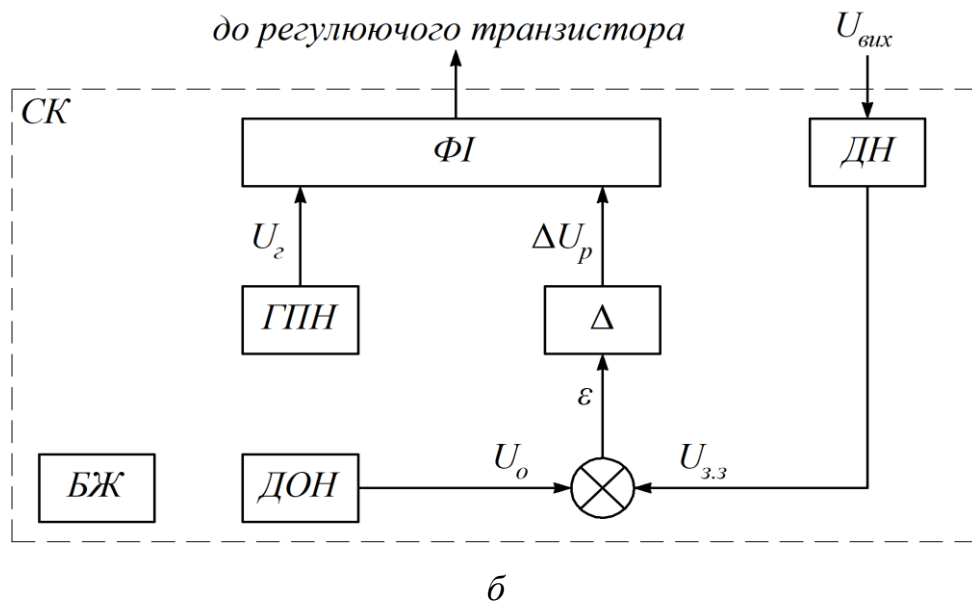
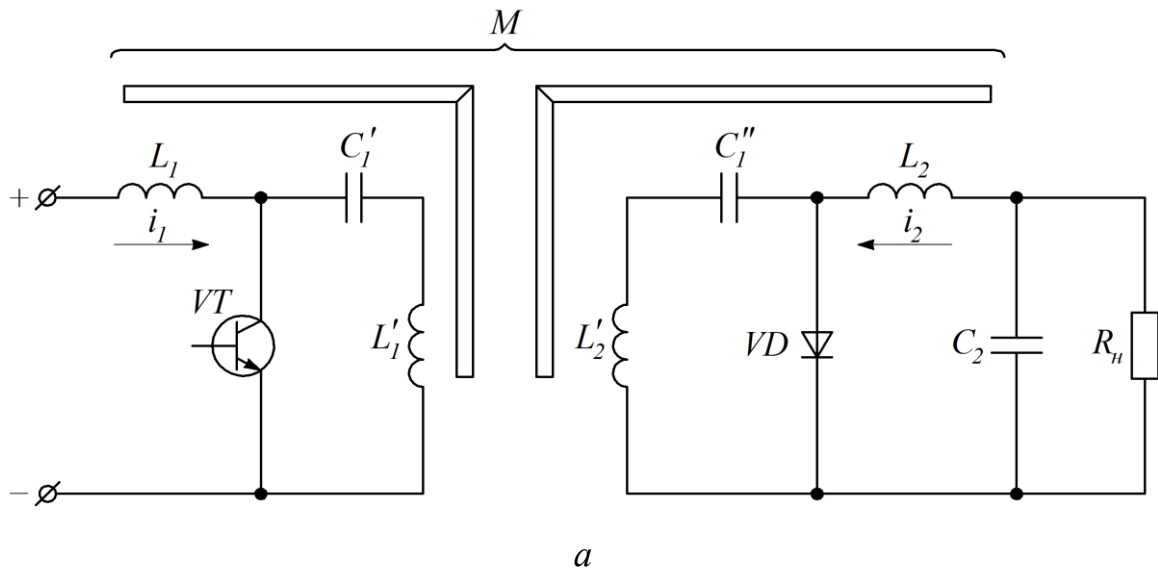
Рисунок 5.3 – Система керування регулятора-стабілізатора постійного струму безперервної дії

Процес регулювання протікає у такий спосіб. Сигнал $U_{3.3}$ у колі зворотного зв'язку, що надходить з датчика вихідної напруги ДН, подається на суматор I . На інший його вхід надходить опорна напруга U_o від джерела опорної напруги ДОН. Різниця цих напруг ε подається на вхід підсилювача, що містить необхідні корегуючі ланки для надання стійкості процесу регулювання. Сигнал ΔU_p з виходу підсилювача подається на транзистор (або сукупність послідовно-паралельно з'єднаних транзисторів), що виконує функції виконавчого органу системи регулювання. За принципом регулювання ця система є статичною системою з негативним зворотним зв'язком, що відпрацьовує до мінімуму при різних збуреннях різницю напруг ε , що залежить від коефіцієнта посилення кола регулювання. Останній переважно визначається коефіцієнтом посилення підсилювача СК.

При підвищенні потужності регулятора-стабілізатора більш раціональним є спосіб імпульсного керування виконавчим органом схеми.

Структурну схему СК для імпульсного керування, наприклад, транзистором VT (рисунок 5.4, а) (або сукупність транзисторів) представлено на рисунку 5.4, б.

Вмикання транзистора здійснюється подачею на нього керуючого імпульсу від ФІ. Момент формування переднього фронту керуючого імпульсу збігається з моментом рівності сигналу U_e , що надходить від генератора пилкоподібної напруги ГПН, і напруги ΔU_p . Тривалість керуючого імпульсу відповідає інтервалу часу, коли напруга перевищує сигнал ΔU_p . Подібна структура СК дає змогу реалізувати регулювання вихідної напруги за способом широтно-імпульсної модуляції. Частота перемикавання транзистора VT у цьому випадку постійна і визначається частотою ГПН. Регулювання вихідної напруги відбувається за рахунок зміни шпаруватості керуючих імпульсів, яка визначається сигналом ΔU_p підсилювача.



а – силова схема; б – структурна схема СК

Рисунок 5.4 – Система керування регулятора постійного струму

Якщо як виконавчий орган регулятора використовуються тиристори, то структурна схема СК, що відповідає регулюванню за способом широтно-імпульсної модуляції, подібна до наведеної на рисунку 5.4, б. Основна відмінність її полягає в додаткових каналах формування керуючих імпульсів допоміжних (комутуючих) тиристорів. Це пов'язано з необхідністю примусового виключення основних тиристорів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Щербак Я. В., Нерубацький В. П., Івакіна К. Я. Мікросхемотехніка електромеханотронних систем: підручник / за заг. ред. Я. В. Щербака. Харків: Видавець Мачулін Л. І., 2024. 260 с.

2 Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph. Kharkiv: Publisher Machulin L., 2023. 220 p.

3 Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги: монографія. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 248 с.

4 Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: монографія / І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. Харків: НТУ «ХП», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.

5 Загальна електротехніка і основи електроніки: навч. посіб. / В. М. Співак, А. М. Гуржий, А. Т. Нельга, О. С. Ітякін. Київ: КП, 2020. 266 с.

6 Квітка С. О. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 223 с.

7 Sharif A. Harsh environment electronics: interconnect materials and performance assessment. E-Book. 2019. 400 p. DOI: 10.1002/9783527813964.

8 Войцицький А. П., Войцицький М. А. Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. Херсон: Олді-плюс, 2018. 300 с.

9 Комп'ютерна схемотехніка: підручник / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Я. М. Клятченко, В. П. Тарасенко. Вінниця: ВНТУ, 2018. 230 с.

10 Масалітіна Є. В., Кільчівський О. О. Операційне числення. Київ: НТУУ «КП імені Ігоря Сікорського», 2018. 90 с.

11 Матвієнко М. П. Комп'ютерна схемотехніка: навч. посіб. Київ: Ліра, 2017. 190 с.

12 Scherz P., Monk S. Practical electronics for inventors. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 1072 p.

13 Електроніка та мікросхемотехніка: підручник / О. М. Воробйова, І. П. Панфілов, М. П. Савицька, Ю. В. Флейта. Одеса: ОНАЗ імені О. С. Попова, 2015. 298 с.

14 Макаренко В. В., Співак В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 314 с.

15 Основи схемотехніки. Аналогова та інтегральна схемотехніка: навч. посіб. / В. М. Кичак, В. Д. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова. Вінниця: ВНТУ, 2013. 267 с.

16 Щерба А. А., Побєдаш К. К., Святненко В. А. Електроніка та мікросхемотехніка: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 360 с.

17 Щербак Я. В., Панченко В. В., Нерубацький В. П. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Мікросхемотехніка та МПЦ пристрої». Харків: УкрДАЗТ, 2013. 14 с.

18 Елементи теорії комплексної змінної. Інтегральні перетворення Фур'є і Лапласа: збірник задач і вправ / П. П. Костробій, Д. В. Уханська, Т. М. Сало, О. М. Уханська, Б. М. Маркович. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 200 с.

19 Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.

20 Дудикевич В. Б., Кеньо Г. В., Петрович І. В. Електроніка та мікросхемотехніка. Ч. II. Аналогова схемотехніка. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 224 с.

21 Електроніка та мікросхемотехніка: навч. посіб. / за ред. В. Ф. Яковлева. Київ: Аграрна освіта, 2010. 329 с.

22 Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д. Цифрова схемотехніка: навч. посіб. Львів: Новий світ-2000, 2009. 736 с.

23 Електроніка і мікросхемотехніка: у 4-х т. Т. 3. Цифрові пристрої: підручник / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько, В. В. Ясінський; за ред. В. І. Сенька. Київ: Каравела, 2008. 400 с.

24 Мікропроцесорна техніка / Ю. І. Якименко, Т. О. Терещенко, Є. І. Сокол, В. Я. Жуйков, Ю. С. Петергеря. Київ: Політехніка, Кондор, 2008. 594 с.

25 Дмитрів В. Т., Шиманський В. М. Електроніка і мікросхемотехніка: навч. посіб. Львів: Афіша, 2006. 175 с.

26 Гуржій А. М., Самсонов В. В., Поваротнюк Н. І. Імпульсна та цифрова техніка: підручник. Харків: Компанія «Сміт», 2005. 424 с.

27 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. Вид. 2-ге, доп. і перероб. Київ: Вища школа, 2004. 366 с.

28 Електроніка і мікросхемотехніка: підручник. Т. 2. Аналогові та імпульсні пристрої / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько; за ред. В. І. Сенька. Харків: Фоліо, 2002. 510 с.

29 Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power electronics: converters, applications, and design. 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc, 2002. 832 p.

30 Перетворювальна техніка: підручник / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьоний, В. Г. Мороз, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко; за ред. В. С. Руденка. Харків: Фоліо, 2000. 357 с.

31 Licari J. J., Enlow L. R. Hybrid microcircuit technology handbook: materials, processes, design, testing and production. Second edition. Noyes Publications, 1998. 579 p.

ДОДАТОК А

Вихідні дані до виконання контрольної роботи

Таблиця А.1 – Вихідні дані до виконання контрольної роботи

№ з/п	Напруга джерела живлення $U_{жс}, В$	Опорна напруга $U_{он}, В$	Задаюча напруга $U_з, В$	Частота модуляції $f, Гц$
1	±15	5	0...5	100
2	±15	6	0...6	150
3	±15	7	0...7	200
4	±15	8	0...8	250
5	±15	9	0...9	300
6	±15	10	0...10	350
7	±15	5	0...5	200
8	±15	6	0...6	250
9	±15	7	0...7	300
10	±15	8	0...8	350
11	±15	9	0...9	100
12	±15	10	0...10	150
13	±15	5	0...5	300
14	±15	6	0...6	350
15	±15	7	0...7	100
16	±15	8	0...8	150
17	±15	9	0...9	200
18	±15	10	0...10	250
19	±15	5	0...5	150
20	±15	6	0...6	200
21	±15	7	0...7	250

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання контрольної роботи

з дисципліни
*«МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»*

Відповідальний за випуск Нерубацький В. П.

Підписано до друку 24.04.2024 р.
Умовн. друк. арк. 2,0. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного
транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.