

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНСПЕКТ лекцій з дисципліни  
Аналогово-цифрові керуючі пристрої  
для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство”  
усіх форм навчання  
Частина 1

2020

КОНСПЕКТ лекцій з дисципліни “ Аналогово-цифрові керуючі пристрої ” для студентів спеціальності 132 “Матеріалознавство” усіх форм навчання/ Укл.: М.Л.Антонов, Є.В.Васильєва - Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2020-84с.

Укладачі: М.Л.Антонов, доцент,  
канд. техн. наук;  
Є.В.Васильєва, старший  
викладач

Рецензенти: А.Є.Казурова, доцент,  
канд. техн. наук

Відповідальний  
за випуск: Є.В.Васильєва, старший  
викладач

Затверджено  
на засіданні кафедри “ЕПА ”  
Протокол № 9  
від “ 24 ” лютого 2020.

Рекомендовано до  
видання НМК ЕТФ  
Протокол № 7  
від “ 5 ” березня 2020.

**ЗМІСТ**

1 Загальні поняття дисципліни.....	4
2 Вимірювальні пристрої електричних параметрів.....	19
3 Вимірювальні пристрої неелектричних параметрів .....	34
4 Тиристорні перетворювачі напруги.....	46
5 Імпульсні перетворювачі напруги.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	81

**Частина 2**

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ДІСЦИПЛІНИ

## 1.1 Предмет та задача

Предметом вивчення в дисципліні «Елементи автоматизованого електропривода» є елементна база, що забезпечує автоматизацію і реалізує необхідні властивості систем електропривода.

Задачею дисципліні «Елементи автоматизованого електропривода» є набуття знань щодо вибору та застосування як окремих елементів, так і систем електропривода в цілому; отримання навичок у роботі з елементами систем керування та силовими перетворювальними пристроями.

## 1.2 Основні поняття та визначення

Автоматизований електропривід (АЕП) - електромеханічна система, яка складається з електродвигуна, перетворювального, передавального та керуючого пристроїв, призначених для приведення в рух органів робочого механізму та керування цим рухом.

Елемент автоматизованого електропривода – це пристрій, що входить до складу автоматизованої системи керування як конструктивна або технічна одиниця, що виконує певну функцію керування і має відносно прості властивості між його вхідними й вихідними величинами.

## 1.3 Класифікація елементів керуючих пристроїв

За енергетичними ознаками розрізняють дві групи елементів АЕП:

а) силові елементи – забезпечують перетворення та підведення основного потоку енергії до кінцевого об'єкта керування – робочого органу (енергетична частина АЕП);

До силових елементів систем АЕП належать керовані перетворювачі, двигуни, механічні перетворювальні елементи.

Основними силовими елементами таких систем є двигун, що виконує електромеханічне перетворення енергії, та керований перетворювач.

За функціональними ознаками перетворювачів вирізняють:

- перетворювач напруги (джерело напруги);
- перетворювач струму (джерело струму);
- перетворювач частоти.

Залежно від способу перетворення енергії керовані перетворювачі поділяються на:

- електромеханічні (генератори постійного і змінного струму);
- електромагнітні (магнітні підсилювачі, індуктивно–ємнісні джерела струму);
- електричні (напівпровідникові перетворювачі).

б) керуючі елементи - виробляють, перетворюють та підводять сигнали, за допомогою яких реалізується керування енергетичним потоком (інформаційна частина ЕП).

Керуючі елементи, порівняно із силовими, більш швидко розвиваються та характеризуються більшою різноманітністю.

Залежно від місця в структурі АЕП, керуючі елементи можна розділити на:

- елементи, що формують сигнали задання технологічної програми роботи АЕП;
- регулятори, що виконують функцію перетворення сигналів, необхідних для регулювання відповідної координати електропривода;
- датчики, що перетворюють контрольовану координату електропривода на електричний сигнал, та використовуються як сигнал зворотного зв'язку;
- узгоджувальні елементи, що узгоджують вихідні та вхідні координати керуючих елементів за технологічними характеристиками, видами струму, типом та рівнем сигналу.

#### **1.4 Силові елементи систем керування**

Однією з основних складових силового каналу АЕП є електродвигуни.

Для створення керуючої дії на електродвигуни використовуються електротехнічні перетворювачі, які призначені для

перетворення струму, напруги, частоти та зміни показників якості електричної енергії.

Залежно від призначення електропривода, силові перетворювачі поділяють на регульовані й нерегульовані.

Регульовані перетворювачі використовують, насамперед, у керованих за швидкістю й положенням електроприводах та у замкнених системах керування.

Регульовані перетворювачі напруги поділяють на:

- перетворювачі змінної напруги на регульовану постійну – керовані випрямлячі (AC/DC);
- перетворювачі постійної напруги на змінну – інвертори (DC/AC);
- перетворювачі постійної напруги на регульовану постійну – перетворювачі постійної напруги (DC/DC);
- перетворювачі змінної напруги на регульовану змінну – перетворювачі змінної напруги (AC/AC).

Нерегульовані перетворювачі використовують переважно для узгодження параметрів мережі живлення й споживачів. Прикладами таких перетворювачів є некерований випрямляч, нерегульований перетворювач частоти.

За принципом побудови перетворювачі поділяють на статичні, які не мають рухомих вузлів, і електромашинні, основним компонентом яких є електричні машини постійного або змінного струму.

## 1.5 Керуючі елементи систем керування

Для одержання інформації про хід виробничого процесу застосовують датчики – елементи автоматики, що перетворюють різні фізичні величини (відстань, температуру, тиск, потужність, швидкість, рівень, вологість і т. д.) на сигнал, який обробляється у системі керування АЕП. Датчики безпосередньо взаємодіють із досліджуванним об'єктом і є джерелом інформації для системи керування.

В основному датчики на виході мають електричні уніфіковані сигнали: релейні, безперервні струмові (0..20 мА, 4..20 мА) та безперервні за напругою постійного струму (0..0,125 В, 0..2,5 В, 0..5

B, 0..10 B, -0,125.. 0,125 B, -2,5..2,5 B, -5..5 B, - 10..10 B).  
Перераховані електричні сигнали визначені стандартами.

Датчики оцінюють за точністю, лінійністю й роздільною здатністю, частотною характеристикою, характеристикою шуму, вхідним та вихідним імпедансом (повним опором). На виходах датчиків можуть бути отримані амплітудні, діючі або середні значення вимірюваних величин.

Залежно від фізичної величини, що контролюється, датчики можна поділити на наступні класи:

### 1. Датчики електромагнітних змінних.

Датчики струму й напруги. У системах автоматичного керування електроприводом сигнали, пропорційні струму, отримуються за допомогою шунтів, трансформаторів струму. Вихідні сигнали датчиків використовуються також для вимірювання ЕРС, потужності, потоку. Основними завданнями при створенні датчиків струму й напруги є забезпечення гальванічної розв'язки силових кіл і кіл керування, забезпечення високої швидкодії й точності.

Як датчики струму та напруги широко використовують перетворювачі, основані на ефекті Холла. Даний тип датчиків забезпечує гальванічну розв'язку між вхідними та вимірювальними колами при нарузі до кількох кіловольт.

Датчики магнітного потоку та індукції. Для контролю зазначених параметрів застосовують датчики Холла. Перевагами цих датчиків є: можливість вимірювань постійних і змінних магнітних полів, малі розміри перетворювачів. Недоліком є відносно велика залежність постійної Холла й, отже, ЕРС від температури.

### 2. Датчики механічних величин.

Датчики параметрів руху. Ці датчики призначені для одержання інформації про лінійні й кутові переміщення, швидкість і прискорення, сили і моменти.

Основними вимогами до датчиків переміщень є: висока точність вимірювання (або контролю) переміщень, швидкодія, надійність, завадостійкість, припустимі нелінійні спотворення.

За фізичним принципом дії чутливого елемента всі існуючі датчики руху можна розділити на:

- фотоелектричні (оптоелектронні), що використовують ефект зміни освітленості;
- електростатичні
- ємнісні (основані на ефекті зміни ємності) та п'єзоелектричні (основані на ефекті виникнення електричного заряду на поверхні деяких матеріалів у момент деформації);
- електромагнітні (використовують ефект зміни індуктивності чи взаємодуктивності);
- електроакустичні (основані, наприклад, на ефекті зміни енергії поверхневої акустичної хвилі);
- реостатні (використовують ефект лінійної зміни опору);
- лазерні.

Високі вимоги до промислових систем АЕП призвели до того, що в якісних системах в основному використовують фотоелектричні й електромагнітні датчики переміщення й швидкості з цифровою обробкою сигналів.

Фотоелектричні датчики мають найбільшу точність порівняно з іншими типами датчиків, найвищу роздільну здатність, вирізняються високою чутливістю й швидкодією, простотою й надійністю конструкції, малими розмірами й масою, відсутністю механічного зв'язку з контрольованим об'єктом, малою інерційністю, можливістю дистанційного вимірювання й контролю. До недоліків фотоелектричних датчиків варто віднести чутливість до сторонніх джерел випромінювання.

Тахогенератори постійного й змінного струмів застосовують у регульованих електроприводах середньої й великої потужності за невисокої точності регулювання швидкості. Вони мають низький рівень полюсних пульсацій, високу лінійність і стабільність характеристик.

Датчики зусилля.

У цих датчиках застосовують магнітострикційні й п'єзоелектричні перетворювачі.

Робота магнітострикційного датчика основана на магнітопружному ефекті (якщо на намагнічене феромагнітне тіло діє зовнішня механічна сила, то тіло деформується, домени змінюють

свою орієнтацію, а індукція в матеріалі змінюється, таким чином, виникає магнітострикційна складова деформації, що накладається на суто механічну деформацію).

Для магнітострикційних датчиків зусилля характерні: малий вплив на вимірювану величину, висока стійкість і надійність, лінійність, значна чутливість до температури та паразитних магнітних полів, обмеженість смуги пропускання. Точність таких датчиків складає декілька відсотків верхньої межі вимірювань.

Робота п'єзоелектричних перетворювачів основана на явищі п'єзоелектрики, яке полягає у виникненні або зміні електричної поляризації, що проявляється в деяких анізотропних діелектриках, коли вони деформуються під дією напрямленої сили.

#### Датчики деформацій.

Як такі датчики застосовують тензорезисторні перетворювачі (металеві, дровові, напівпровідникові та ін.). Тензорезисторний перетворювач є провідником, що змінює свій опір при деформації (розтягу або стиску). Деформації кристалічної решітки призводять до зміни питомого опору провідника, відповідно до зміни повного опору. Тензорезисторні датчики кріпляться до об'єкта, і вони деформуються разом з ним. При цьому із-за малих розмірів датчики забезпечують досить точні вимірювання деформацій.

#### Акселерометри.

Пристрої, що призначені для вимірювань прискорення, широко застосовуються в промисловості при оцінюванні чутливості виробів до ударів та вібрацій. Для побудови даних пристроїв використовують п'єзоелектричні датчики. Вихідна змінна напруга таких датчиків, що генерується під впливом вібраційного прискорення, зазвичай має досить малу амплітуду, через це, для збільшення вихідного сигналу, з'єднують декілька п'єзокристалів.

### 3. Датчики технологічних змінних.

#### Датчики температури.

Для задач вимірювань температури використовуються термомари, терморезистори, напівпровідникові датчики та пірометри. Вибір

того чи іншого типу датчика визначається діапазоном зміни вимірюваної температури та його умовами експлуатації.

Як датчики температури широко використовуються термопари, оскільки вони мають широкий робочий діапазон температур і високу надійність. При вимірюванні температури за допомогою термопар послідовно з вимірювальним спаєм вмикаються компенсаційні спаї, що дозволяють отримати струм певного напрямку та максимальну ЕРС вимірювального спаю. Залежно від робочого діапазону температур та середовища, у якому розміщено датчик, використовують різні пари матеріалів.

Покращені, порівняно з термопарами, характеристики мають термометри опору – пристрої, що використовують ефект зміни електричного опору провідника при зміні температури. У промисловості часто використовують платинові термометри, що мають високу точність, механічну та електричну стабільність.

Термістори – другий тип термометрів опору – отримують шляхом спікання сумішей металічних сплавів, при цьому утворюється кераміка з великим від'ємним температурним коефіцієнтом. Температурний діапазон метало-плівкових опорів порівняно з термісторами більший, однак термістори мають приблизно в 10 разів більшу чутливість. Для використання таких датчиків необхідно перетворювати вимірювані опори на зміну напруги та, по можливості, лінеаризувати залежність вихідної напруги від температури.

У тих випадках, коли можливість є тільки візуального спостереження досліджуваного процесу, для вимірювань температури використовують оптичні пірометри. Діапазон вимірюваних температур, у даному випадку, обмежується діапазоном спектральної чутливості використовуваного датчика.

Датчики тиску й витратоміри. Для вимірювань тиску та витрат рідини чи газу широко використовуються потенціометричні датчики, однак їм властиві висока чутливість до ударів та вібрацій, а також значні похибки обумовлені механічною конструкцією, що призводять до нелінійності характеристик.

Позбавитися недоліків потенціометричних датчиків дозволяють безконтактні тензометри. На відміну від інших

безконтактних пристроїв, напівпровідникові тензометри розміщують безпосередньо на діафрагмі, яка реагує на тиск. Такий підхід дозволяє позбавитися механічних з'єднувальних деталей. Вихідний сигнал таких датчиків дуже низький, через це після нього зазвичай встановлюється підсилювач, а низька чутливість робить їх зручними для вимірювань високих тисків.

Датчики рівня. Для вимірювань рівня рідини та його зміни широко застосовуються поплавкові датчики, диференціальні датчики тиску, ультразвукові й радіоактивні.

Поплавкові датчики вирізняються простотою конструкції та різноманітністю методів перетворення зміни вимірюваного рівня. Однак при вимірюванні рівня в'язких рідин вони мають похибки.

У тому разі, коли відома густина рідини, висоту стовпа рідини можна виміряти за допомогою диференціального датчика тиску (дифманометр), який при цьому повинен фіксувати різницю гідростатичного тиску між рівнем поверхні та площиною дна. За принципом дії дифманометри поділяють на поплавкові, кільцеві, мембранні.

Ультразвукові датчики можуть входити до складу локаційних установок, що зручні для вимірювань рівня рідини у високих цистернах, а також у складі приладів, що вимірюють дискретні значення рівнів

Рівень важких сумішей, таких як цемент та паперова маса, краще за все вимірювати за допомогою радіоактивних датчиків, розміщених аналогічно ультразвуковим пристроям дискретного вимірювання рівня.

До датчиків технологічних змінних належать також датчики товщини смугового матеріалу (металу, паперу, пластику), вологості матеріалу, маси та інших змінних.

## 1.6 Гальванічна розв'язка

Гальванічна розв'язка кіл є радикальним рішенням більшості проблем, пов'язаних з перешкодозахищеністю, і її застосування фактично стало стандартом у системах промислової автоматизації та системах АЕП.

Суть гальванічної розв'язки полягає в усуненні фізичних електричних з'єднань між силовими, вимірювальними, керуючими каналами, а також каналами живлення (виключення можливості передачі кондуктивної перешкоди).

Передача сигналів при цьому може здійснюватися через ізоляційний бар'єр у вигляді світла або магнітного поля. Гальванічно роздільне живлення може бути забезпечене за допомогою трансформаторів або за допомогою автономних джерел живлення.

Кондуктивної перешкоди - перешкода, яка передається із сусідніх електричних кіл шляхом перенесення електричного струму за загальним для обох кіл провідником, в основному через загальні ділянки кіл заземлення або живлення.

Джерела кондуктивних перешкод: генератори, кола з великим струмом, цифрова частина аналоговоцифрової схеми, реле, DC/DC та AC/DC перетворювачі, крокові двигуни з імпульсним живленням, системи із ШІМ-керуванням, а також перешкоди з мережі живлення, що протікають по загальній ділянці заземлення, і перешкоди із частотою перетворення джерела безперебійного живлення.

Причиною появи кондуктивних перешкод у системах промислової автоматизації є неправильно виконане заземлення.

Використання гальванічної ізоляції дозволяє розв'язати наступні проблеми:

- виключається поява паразитних струмів по землі, що зрівнює потенціали, і тим самим знижує індуктивні наведення, викликані цими струмами;

- практично до нуля зменшується напруга синфазної перешкоди на вході диференціального приймача аналогового сигналу;

- здійснюється захист від пробую вхідних та вихідних кіл модулів введення і виведення.

Найбільш розповсюджені наступні принципи гальванічної розв'язки: трансформаторна та оптоелектронна.

Трансформаторна гальванічна розв'язка (рис. 1.1) сигнального кола належить до індивідуального способу захисту, і може бути як однофазною, так і диференціальною.

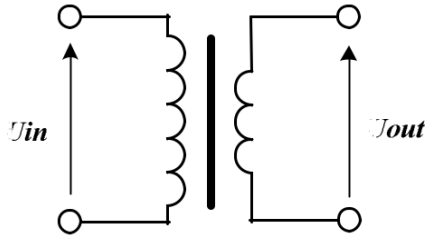


Рисунок 1.1 – Трансформаторна гальванічна розв'язка

При застосуванні трансформаторної гальванічної розв'язки необхідно враховувати наступні її недоліки:

- наявність прохідної ємності між обмотками, що не забезпечує повну незалежність кіл, за високої частоти сигналу;
- несучий сигнал може створювати перешкоди, що впливають на вихідний сигнал розв'язки.

Оптоелектронна гальванічна розв'язка забезпечує якісний захист сигнального кола. На практиці використовується для розв'язки цифрових або аналогових кіл.

Принцип роботи оптоелектронної гальванічної розв'язки (оптрона) проілюстрований на рис. 1.2. Світлодіод випромінює світло, яке сприймається фототранзистором. Таким чином, здійснюється гальванічна розв'язка кіл, зв'язаних зі світлодіодом, з одного боку, і з фототранзистором, з другого.

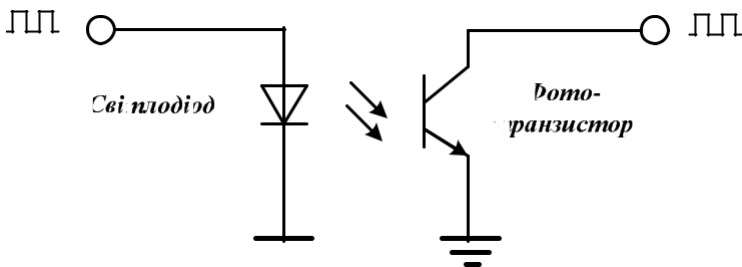


Рисунок 1.2 – Оптоелектронна гальванічна розв'язка

До переваг оптоелектронних пристроїв можна віднести:

- можливість передавати сигнали на високій частоті (до десятків МГц);
- малі габаритні розміри.

Залежно від типу сигналу, який передається, та вимог до схеми, можна вибрати або трансформаторну, або оптичну гальванорозв'язку.

## 1.7 Заземлення

Заземлення – один з основних шляхів зменшення шумів і наведень у системах АЕП.

Заземлення – це з'єднання з ґрунтом Землі, або з'єднання з деяким «загальним проводом» електричної системи, відносно якого вимірюють електричний потенціал. Аналогом землі може бути "плаваюча" земля – не з'єднана з ґрунтом Землі система провідників, відносно якої відраховується потенціал в електричній підсистемі.

Проектування систем з коректним заземленням має дві основні мети:

- мінімізувати напругу шумів, що виникають при проходженні струмів від двох або більше схем через загальний провід;
- виключення утворення контурів заземлення, чутливих до магнітних полів і різниць потенціалів землі. Разом з тим, неправильно виконане заземлення може стати основною причиною появи шумів та перешкод.

Захисне заземлення – це електричне з'єднання провідних частин обладнання з ґрунтом Землі через заземлювальні пристрої з метою захисту персоналу від ураження електричним струмом. Захисне заземлення слугує виключно для захисту людей від ураження електричним струмом.

Загальним проводом (провідником) називають провідник у системі, відносно якого відраховуються потенціали. Зазвичай він є загальним для джерела живлення і підключених до нього електронних пристроїв.

Сигнальне заземлення – це з'єднання із землею загального проводу кіл передачі сигналу. Сигнальну землю поділяють на цифрову землю та аналогову. Сигнальну аналогову землю іноді

поділяють на землю аналогових входів і землю аналогових виходів. Сигнальна земля слугує для спрощення електричної схеми і здешевлення пристроїв і систем промислової автоматизації. При використанні сигнальної землі як спільного провідника для різних кіл з'являється можливість застосування одного загального джерела живлення для всього електричного кола, замість кількох «плаваючих» джерел живлення.

Силова земля - загальний провід у системі, з'єднаний із захисною землею, по якому тече великий струм (великий, порівняно зі струмом передачі сигналу).

В основі такого поділу земель лежить різний рівень чутливості до перешкод аналогових і цифрових кіл, а також сигнальних і потужних (силових) кіл і, як правило, наявність гальванічної розв'язки між зазначеними землями в системах автоматизованого електропривода.

Техніка заземлення сильно різниться для гальванічно зв'язаних і гальванічно розв'язаних кіл. Більшість існуючих методів заземлення стосується гальванічно зв'язаних кіл. Прикладом гальванічно зв'язаного кола є з'єднання джерела і приймача стандартного сигналу.

## **1.8 Екранування сигнальних проводів**

Методи екранування сигнальних проводів вибирають залежно від шляхів проходження перешкоди. Оскільки довжина сигнальних кабелів може складати десятки і сотні метрів, то вони повинні бути захищені від змінного магнітного поля (застосуванням звитих пар) та електростатичних зарядів, ємнісних та індуктивних наведень (екрануванням).

Якщо частота перешкоди не перевищує 1 МГц, то кабель необхідно заземлювати з одного боку. Не можна з'єднувати електростатичний екран із «землею» джерела і приймача одночасно (рис. 1.3), оскільки при цьому через екран тече струм, зумовлений нерівністю потенціалів цих «земель», та може досягати кількох ампер, а різниця потенціалів «земель» може сягати кількох вольт. Струм, що тече по екрану, є джерелом індуктивних наведень на сусідніх проводах і проводах, що знаходяться всередині екрана. Наведення на дроти всередині екрана може мати значну величину.

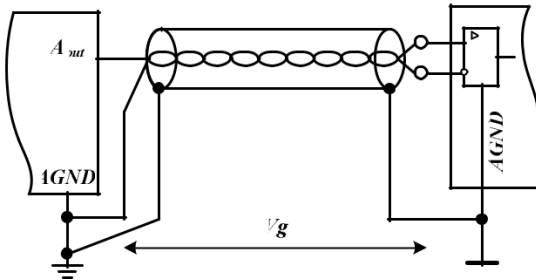


Рисунок 1.3 – Приклад неправильного заземлення екрану

Тому екран потрібно заземляти тільки з одного боку, причому з боку джерела сигналу. У загальному випадку при передачі широкосмугового сигналу від віддаленого джерела з високим опором рекомендується використовувати популярну схему гібридного заземлення (рис. 1.4). У даній схемі ємність  $C_{hf}$  дозволяє послабити високочастотну складову перешкоди. Таким чином, низькочастотний струм, що створює індуктивне наведення, залишається малим, а високо-частотні наведення заземлюються через ємність.

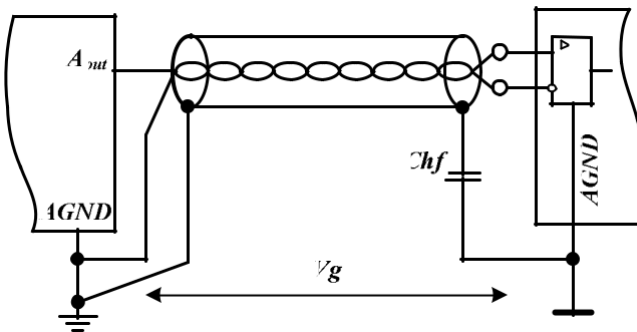


Рисунок 1.4 – Приклад правильного заземлення екрану при передачі сигналу від віддаленого джерела з високим опором

Якщо джерело сигналу не заземлене (наприклад, термопара), то заземлювати екран можна з будь-якого боку, тому що в даному разі не створюється замкнутий контур для струму перешкоди.

На частотах понад 1 МГц збільшується індуктивний опір екрана, і струми ємнісних наведень створюють на ньому велике падіння напруги, що може передаватися на внутрішні жили через

ємність між обплетенням і жилами. Крім того, при довжині кабелю, що дорівнює довжині хвилі перешкоди, зростає опір обплетення, що різко підвищує напругу перешкоди на ній. Тому на високих частотах обплетення кабелю треба заземлювати не тільки з обох боків, але і в декількох точках між ними (рис. 1.5). Ці точки вибирають на відстані  $1/10$  довжини хвилі перешкоди одна від одної. При цьому по обплетенню кабелю буде протікати частина струму, що передає перешкоду до центральної жили через взаємну індуктивність. Вибір кількості точок заземлення кабелю залежить від різниці напруги перешкоди на кінцях екрана, частоти перешкоди, вимог до захисту від ударів блискавки або від величини струмів, що протікають через екран у разі його заземлення.

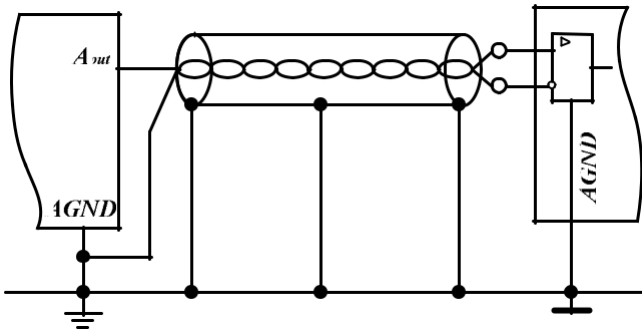


Рисунок 1.5 – Заземлення екрана довгого кабелю на високих частотах

Для якісного екранування в широкому спектрі частот використовують подвійний екран (рис. 1.6). Внутрішній екран заземлюють з одного боку – з боку джерела сигналу, щоб виключити проходження ємнісних перешкод, а зовнішній екран зменшує високочастотні наведення. У всіх випадках екран повинен бути ізольований, щоб запобігти його випадковому контакту з металевими предметами і землею.

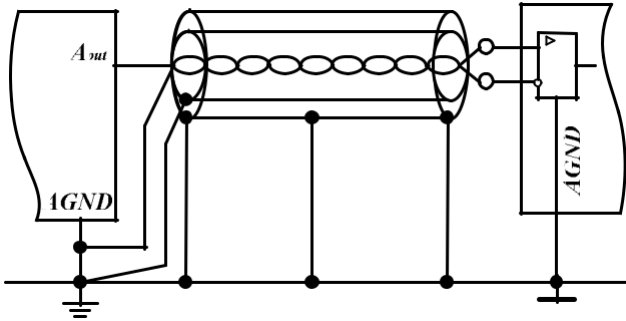


Рисунок 1.6 – Подвійне екранування довгого кабелю

У системі автоматизованого електропривода кількість окремих екранів має дорівнювати кількості вимірюваних сигналів. Кожен сигнал повинен мати свій власний екран, не з'єднаний з іншими пристроями, крім як в об'єднаній точці загальних висновків джерел. Якщо в схемі наявні кілька сигнальних земель, то кожен екран повинен бути підключений до опорного потенціалу свого джерела (рис. 1.7).

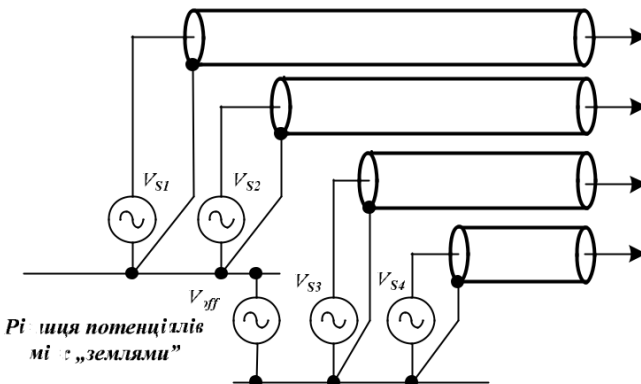


Рисунок 1.7 – Екранування сигнальних проводів з різними сигнальними землями

Оскільки навіть при коректному заземленні, але довгому кабелі перешкода все одно проходить через екран, то для передачі сигналу

на велику відстань або при підвищених вимогах до точності вимірювань потрібно передавати сигнал у цифровій формі або через оптичний кабель.

## 2 ВІМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1 Перетворення аналогових сигналів на дискретні

Для передавання вихідних сигналів тахогенераторів на великій відстані без спотворення інформації доцільно використовувати дискретні сигнали, що можуть бути отримані з аналогових за допомогою спеціалізованих мікросхем – перетворювачів напруга-частота (ПНЧ), які дозволяють перетворювати рівень вхідної напруги на частоту вихідних імпульсів.

Як перетворювач напруга-частота може бути використана мікросхема КР1108ПП1, функціональна схема якої зображена на рис. 2.1.

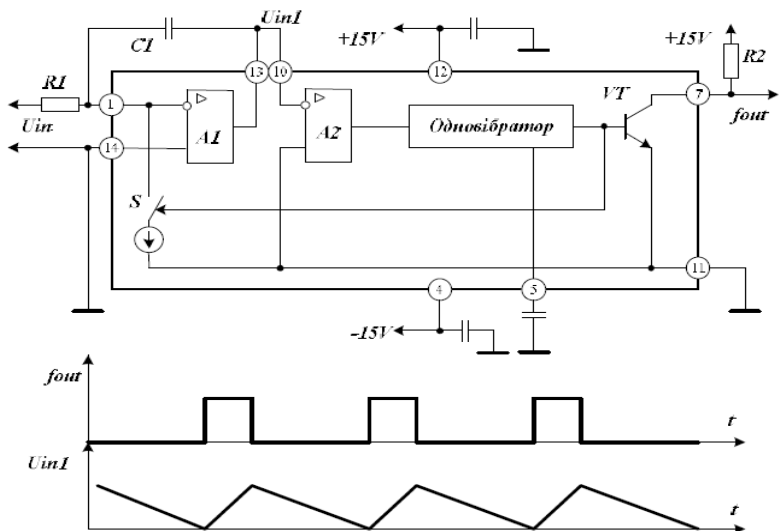


Рисунок 2.1 – Типова схема ввімкнення і діаграми сигналів ПНЧ КР1108ПП1

ПНЧ включає в себе підсилювач  $A_1$ , компаратор  $A_{21}$ , одновібратор, джерело стабільного струму  $I_0$ , аналоговий ключ  $s$  і вихідний транзистор  $VT$ . Для побудови ПНЧ мікросхему слід доповнити двома конденсаторами  $C_1, C_2$  та двома резисторами  $R_1, R_2$ . Елементи  $R_1, C_1, A_1$  утворюють інтегратор. Конденсатор  $C_2$  задає тривалість імпульсу одновібратора ( $t = kC_2$ , де  $k$  визначається характеристиками мікросхеми).

За допомогою розглянутого ПНЧ можна перетворювати від'ємний сигнал напруги, але для цього потрібно змінити підключення вхідного сигналу, тобто пряме перетворення біполярних сигналів у мікросхемі не передбачено.

Перетворювачі напруга-частота (ПНЧ) є найбільш простим засобом перетворення сигналів для багатоканальних систем уведення аналогової інформації в пристрої збору даних, що забезпечує високу перешкодозахищеність і простоту гальванічної розв'язки через оптопару.

## 2.2 Імпульсні датчики

Дискретні (імпульсні) датчики використовуються в електроприводі в основному при регулюванні положення й швидкості у випадках, коли вимоги до точності регулювання не можуть бути задоволені аналоговими датчиками.

Прикладом імпульсних датчиків можуть слугувати оптичні датчики, принцип дії яких ґрунтується на перериванні або віддзеркаленні інфрачервоного (ІЧ) променя оптично непрозорим об'єктом, що знаходиться в полі зору датчика. Усі ці прилади поділяються за принципом дії на три групи: датчики бар'єрного типу (на переривання променя), датчики відбивного типу та ІЧ енкодери. Залежно від конструкції та принципу дії, датчики положення мають різний діапазон спрацьовування, різну точність і розраховані на виявлення об'єктів з різних матеріалів.

Датчики на відбиття призначені для визначення положення і вимірювання швидкості обертання об'єкта. Вони інтегрують в одному корпусі ІЧ випромінювач і ІЧ фотоприймач, які закріплені в корпусі під певним кутом. Кут перетину оптичних полів випромінювача і приймача становить робочу зону датчика. Якщо до

неї потрапляє об'єкт, то на фототранзистор надходить відображений сигнал, що призводить до збільшення вихідного струму. Як правило, такі датчики мають малу робочу відстань спрацювання.

Щілинні ІЧ оптичні датчики мають відведені на певній відстані один від одного ІЧ випромінювач і ІЧ приймач, оптичні осі яких напрямлені одна на одну. Відстань між випромінювачем і приймачем (щілина в корпусі датчика) і становить робочу зону датчика. У звичайному робочому режимі випромінювач світить на фотоприймач, який підтримує на виході високий струм. При появі непрозорого об'єкта в робочій зоні датчика промінь переривається і струм на фотоприймачі спадає.

Щілинні датчики дозволяють вимірювати швидкість обертання диска на валу. Поверхня такого диска складається з  $N$  рівних секторів, кожний з яких має характерну оцінку (отвір, щілина, зуб). Як зразок можна використовувати будь-яке обертове тіло з періодичною структурою: шестірню, вісь із виїмками, колесо з лопатками тощо. Оптичний датчик, розміщений напроти диска, виявляє проходження відміток і видає імпульсний сигнал із частотою, яка пропорційна швидкості обертання, і з амплітудою, що не залежить від цієї швидкості. Діапазон вимірювань залежить від числа  $n$  стрибкоподібних змін властивостей обертового тіла, наприклад, від числа зубів колеса  $N$ .

Мінімальна вимірювана швидкість щілинних датчиків тим менша, чим більше  $N$ . Типові діапазони вимірювання становлять від 50 до 500 об/хв для колеса із 60 зубами й від 500 до 100 об/хв для колеса з 15 зубами.

Прикладом щілинного датчика може бути оптичний датчик ВРІ-3С2-17 (рис. 2.2–2.3).

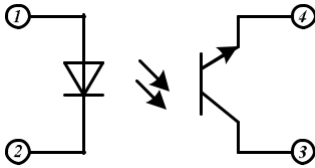


Рисунок 2.2 – Структурна схема датчика ВРІ-3С2-17

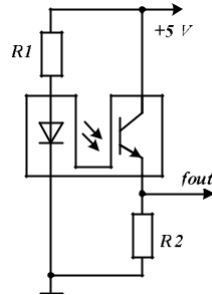


Рисунок 2.3 – Принципова схема підключення датчика

Вихідний сигнал щілинного датчика швидкості зображено на рис. 2.4.

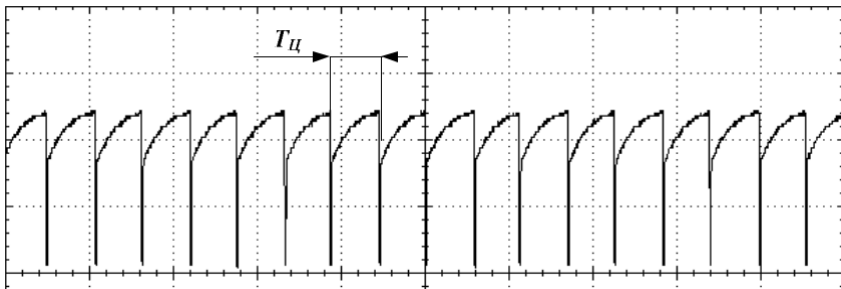


Рисунок 2.4 – Цифровий сигнал фотоелектричного датчика швидкості

## 2.3 Енкодери

Відмінність енкодерних датчиків від оптичних і щілинних датчиків полягає в кількості вбудованих у корпус пар випромінювач-приймач. Наявність двох випромінювачів і приймачів дозволяє не тільки визначати переміщення, кут повороту і швидкість, але і напрямок обертання.

Швидкість обертання вала двигуна, виміряну за допомогою оптичного датчика, можна розрахувати за формулою:

$$n = \frac{60}{T_{\text{ц}} \cdot N} = \frac{60 \cdot f_{\text{ц}}}{N}, \quad (2.1)$$

де  $N$  – кількість зубців диска,  $T_{\text{ц}}$  – період вихідних імпульсів,  $f_{\text{ц}}$  – частота вихідних імпульсів.

Оскільки вихід оптичних датчиків являє собою частотний сигнал, то для їхнього перетворення на аналогові сигнали може бути використана мікросхема ПНЧ у режимі інтегруючого ЦАП, вихідна напруга якого пропорційна середнім значенням частоти вхідного сигналу.

Коефіцієнт передачі вихідного аналогового сигналу фотоелектричного датчика швидкості розраховується за допомогою формули:

$$K_{\text{ПЕР}} = \frac{n}{U_A}, \quad (2.2)$$

де  $U_A$  – вхідна напруга ПНЧ

Енкодер (перетворювач кутових переміщень) – пристрій, призначений для перетворення кута повороту обертового об'єкта (вала) на електричні сигнали, що дозволяє визначити кут його повороту.

Енкодери поділяються на:

- інкрементальні (відносні) – видають за один оберт певну кількість імпульсів;
- абсолютні однообертові – дозволяють у будь-який момент часу визначити поточний кут повороту осі, у тому числі й після зникнення та відновлення живлення;
- багатообертові абсолютні енкодери, крім того, також підраховують і запам'ятовують кількість повних обертів.

Енкодери за принципом дії можуть бути як оптичні, так і магнітні й працювати через шинні інтерфейси або промислову мережу. Перетворювачі «кут повороту–цифровий код» практично повністю виключили застосування сельсинів у промисловості.

Інкрементальні енкодери призначені для визначення кута повороту обертових об'єктів. Вони генерують послідовний імпульсний цифровий код, що містить інформацію щодо кута повороту об'єкта. Якщо вал зупиняється, то зупиняється й передача імпульсів. Основним робочим параметром датчика є кількість імпульсів за один оберт. Миттєву величину кута повороту об'єкта визначають за допомогою підрахунку імпульсів відносно старту.

Диск інкрементального енкодера розділений на точно позиціоновані позначки. Кількість позначок визначає кількість імпульсів за один оберт. Наприклад, якщо диск розділений на 1000 позначок, тоді за 250 імпульсів вал повинен повернутися на 90 градусів. Для обчислення кутової швидкості об'єкта процесор у тахометрі виконує диференціювання кількості імпульсів у часі у такий спосіб, що показує відразу швидкість, тобто число обертів за хвилину. Вихідний сигнал має два канали, у яких ідентичні послідовності імпульсів зміщені на  $90^\circ$  один відносно одного, що дозволяє визначати напрямок обертання. Є також цифровий вихід нульової позначки, що дозволяє завжди розрахувати абсолютне положення вала.

Абсолютні енкодери, як оптичні, так і магнітні, мають за свою основу робочу характеристику число кроків, тобто унікальних кодів на оберт і кількість таких обертів, при цьому не потрібно виконувати первинну установку та ініціалізацію датчика. Тому абсолютні енкодери не втрачають свою позицію при зникненні напруги.

Абсолютний енкодер створює унікальний код для кожної позиції вала. На відміну від інкрементного енкодера, лічильник імпульсів не потрібний, оскільки кут повороту завжди відомий. Абсолютний енкодер формує сигнал як під час обертання, так й у режимі спокою. Диск абсолютного енкодера відрізняється від диска покровоного енкодера, тому що має кілька концентричних доріжок. Кожною доріжкою формується унікальний двійковий код для конкретної позиції вала.

Для абсолютного енкодера не потрібна точна установка вала. Крім того, якщо кодований сигнал не може бути прочитаний

енкодером, наприклад, при обертанні вала занадто швидко, правильний кут обертання буде зареєстрований, коли швидкість обертання зменшиться. Абсолютний енкадер стійкий до вібрацій.

Абсолютні енкадери розділяються на одно та багатообертові.

Однообертові датчики видають абсолютні значення в межах одного оберту, тобто в радіусі  $360^\circ$ . Після одного оберту код є повністю пройденим і розпочинається з його початкового значення. Даний тип датчиків слугує переважно для вимірювань кута повороту.

Багатообертові датчики дозволяють проводити вимірювання лінійних переміщень. Такі датчики, окрім вимірювань кута повороту в межах одного оберту, підраховують кількість обертів за допомогою додатково вбудованого передавального механізму, тобто свого роду редуктора з декількома кодовими оптичними дисками.

## 2.4 Резистивні датчики

Резистивні датчики – недорогі, лінійні й точні. Однак їм властиві втрати, внесені в коло виміру, відсутність гальванічної розв'язки, обмеження смуги пропускання частот, зумовлене паразитною індуктивністю більшості потужних резисторів, а також саморозігрів і термо-ЕРС при великих струмах, що знижують точність вимірювання. Низькоіндуктивні вимірювальні резистори істотно дорожчі, але можуть бути використані для вимірювання струмів у діапазоні частот до декількох мегагерц.

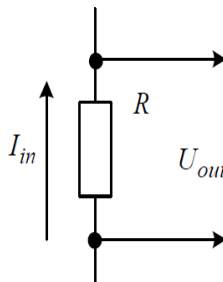


Рисунок 2.5 – Схема підключення шунта при вимірюванні струму

Вимірювання сигналів струму за допомогою резистивних датчиків ґрунтується на встановленні шунта в коло вимірювань (рис. 2.5). Шунт є низькоомним опором і найпростішим вимірювальним перетворювачем струму на напругу. Шунт характеризується номінальним значенням вихідного струму  $I_{in}$  та номінальним значенням вихідної напруги  $U_{out}$ . Їхнє відношення визначає номінальний опір шунта:

$$R = U_{out} / I_{in} \quad (2.3)$$

Шунти застосовуються здебільшого у колах постійного струму та при вимірюваннях низькочастотних сигналів. При вимірюванні змінних струмів як шунт може використовуватися конденсатор, якщо навантаження має ємнісний характер, або індуктивність за індуктивного характеру навантаження.

Вимірювання сигналів напруги за допомогою резистивних датчиків базується на використанні подільників напруги (рис. 2.6). Подільники напруги призначені для отримання певного співвідношення між вхідною напругою  $U_{in}$  та вихідною  $U_{out}$  і використовуються на постійному і змінному струмах.

Вони виконуються на параметричних елементах: резисторах, конденсаторах, індуктивностях.

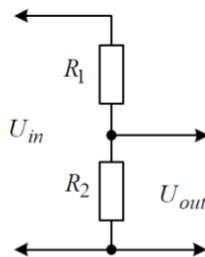


Рисунок 2.6 – Схема резистивного подільника напруги

Рівняння перетворення чи коефіцієнт перетворення резистивного подільника напруги на постійному струмі має вигляд:

$$K_R = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + (R_1/R_2)}, \quad (2.4)$$

На змінному струмі коефіцієнт перетворення в загальному випадку є комплексною величиною та визначається за рівнянням:

$$K_R = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}} = \frac{1}{1 + (Z_1/Z_2)}, \quad (2.5)$$

Конденсаторні подільники напруги застосовуються на змінному струмі у засобах вимірювання, які мають ємнісний характер вхідного опору. Подільник побудований на двох конденсаторах з ємностями  $C_1$  і  $C_2$ , так само представлені опори ізоляції  $R_1$  і  $R_2$  конденсаторів, вплив яких проявляється на нижніх частотах.

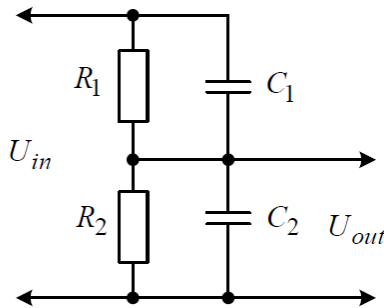


Рисунок 2.7 – Схема конденсаторного подільника напруги  
Комплексний коефіцієнт перетворення подільника:

$$K_c = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}} = \frac{1}{1+(Z_1/Z_2)} = \frac{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1}\right)}{C_1 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1}\right) + C_2 \left(1 + \frac{1}{j\omega C_2 R_2}\right)} \quad (2.6)$$

У загальному випадку коефіцієнт перетворення змінюється зі зміною частоти. Але якщо частота досить висока, то коефіцієнт перетворення не залежить від частоти і визначається як для подільника з ідеальними конденсаторами:

$$K_{\alpha} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (2.7)$$

У випадку роботи конденсаторних подільників у широкому діапазоні частот конденсатори шунтують опором, щоб виконувалася умова  $R_1 / R_2 = C_1 / C_2$ , тоді коефіцієнт перетворення не буде залежати від частоти.

Індуктивні подільники напруги. Особливістю таких подільників напруги є те, що їх вхідні й вихідні кола індуктивно пов'язані між собою. За принципом роботи індуктивні подільники аналогічні вимірювальним трансформаторам, але вирізняються деякими конструктивними особливостями й можуть виконуватись за трансформаторною або автотрансформаторною схемами.

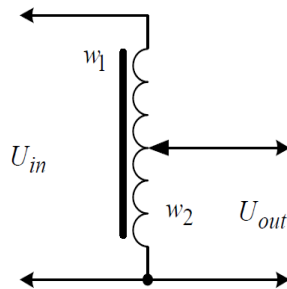


Рисунок 2.8 - Схема індуктивного подільника напруги

Коефіцієнт перетворення індуктивного подільника напруги визначається за формулою:

$$K_L = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (2.8)$$

де  $w_1, w_2$  – загальна кількість витків на ділянці, від якої змінюється вихідна напруга.

Індуктивні подільники напруги мають низку переваг над резистивними та конденсаторними подільниками, а саме: широкий частотний діапазон (20 Гц..200 кГц); можливість отримання коефіцієнта ділення у широких межах ( $0,9..10^{-7}$ ); висока точність та стабільність коефіцієнта ділення, незначна залежність коефіцієнта від навантаження.

У загальному випадку коефіцієнт передачі резистивних датчиків струму і напруги може бути визначений за формулою:

$$K_{ПЕР} = \frac{U_{out}}{U_{in}}. \quad (2.9)$$

Резистивні датчики струму широко використовуються при побудові систем захисту силових перетворювачів постійної та змінної напруги.

Якщо необхідно забезпечити гальванічну розв'язку елементів вимірювального ланцюга, то використовують трансформаторну схему, але її точність нижча.

Для посилення або обробки сигналів напруги з виходів резистивних датчиків струму та напруги необхідні диференціальний підсилювач або операційний підсилювач з достатнім коефіцієнтом підсилення. Для захисту системи вимірювання резистивні датчики потребують використання гальванічної розв'язки, тобто передачі сигналу без електричного контакту. Найбільш сучасними є системи з використанням мікросхем оптичної гальванічної розв'язки.

## 2.5 Датчики, основані на ефекті Холла

Ефект Холла полягає в появі напруги на кінцях смужки провідника або напівпровідника, поміщеного перпендикулярно силовим лініям магнітного поля (рис. 2.9). Для міді напруга Холла становить  $\pm 24$  мкВ/Тл, для напівпровідника – понад  $\pm 110$  мВ/Тл (з урахуванням напрямків магнітного поля й струму), що цілком достатньо для побудови промислових датчиків струму та напруги, головними перевагами яких є відсутність внесених втрат і «природна» гальванічна розв'язка.

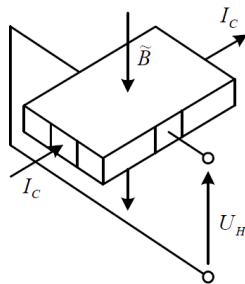


Рисунок 2.9 – Виникнення ЕРС Холла

У датчиках, основаних на ефекті Холла, покращена перешкодозахищеність, оскільки відхідний сигнал – струм – пропорційний прикладеному магнітному полю, а не напрузі. Порівняно з резистивними датчиками, прилади на основі ефекту Холла мають більш вузький частотний діапазон, паразитну напругу зсуву (у деяких конструкціях), високу вартість і для роботи потребують наявності зовнішнього джерела живлення.

Датчики струму та напруги, основані на ефекті Холла, використовуються в частотно-керованих електроприводах змінного струму; перетворювачах для приводів постійного струму; системах керування роботою акумуляторних батарей; програмованих джерелах живлення; джерелах безперебійного живлення; джерелах живлення для зварювальних автоматів.

Існує два різновиди датчиків на ефекті Холла:

- прямого підсилення;
- компенсаційного типу.

У датчиках прямого підсилення магнітний потік та напруга Холла створюються вимірюваним первинним струмом ( $I_p$ ), який необхідно перетворити на вихідний сигнал датчика. Вимірюваний сигнал підсилюється та з виходу датчика, залежно від конструкції, отримують сигнал у вигляді сигналу напруги або струму. Датчики даного типу дозволяють вимірювати постійний, змінний струм та струми інших форм. При цьому вихідні сигнали гальванічно ізольовані від джерела вимірюваного струму.

Датчики компенсаційного типу (з компенсаційною обмоткою) забезпечують високу точність, у кілька разів більш широку смугу пропускання та, як правило, не мають вихідного зсуву при нульовому струмі. Їх чутливість прямо пропорційна числу витків компенсаційної обмотки.

Первинний струм  $I_p$ , протікаючи через датчик, створює первинний магнітний потік. Фіксуючий елемент, розташований у повітряному зазорі магнітного контуру, забезпечує напругу, пропорційну цьому потоку. В електронному контурі відбувається підсилення напруги та її перетворення на вторинний струм  $I_s$ .

Таким чином, у будь-який момент часу вихідний струм прямо пропорційний первинному струмові. Вторинний струм може протікати через вимірювальний резистор  $R$ . Отже, напруга  $U_{OUT}$  на клеммах вимірювального резистора також прямо пропорційно первинному струму.

Принцип дії датчика напруги на ефекті Холла компенсаційного типу подібний до принципу дії аналогічного датчика струму. До первинного кола даного датчика включається струмообмежуючий опір. Струм, що тече через вхідний опір, трансформується у вторинний струм, що пропорційний первинній напрузі.

## 2.6 Загальна характеристика датчиків струму та напруги

Розглянуті типи датчиків струму та напруги мають свої недоліки та переваги, що визначають сферу їх використання. Так, резистивні датчики використовуються при побудові систем захисту силових перетворювачів постійної та змінної напруги, датчики на

основі ефекту Холла набули широкого застосування в частотно-керуваних електроприводах і системах моніторингу, а трансформаторні датчики використовуються в системах релейного захисту та системах контролю енергоспоживання. Наведемо загальні характеристики розглянутих датчиків.

Резистивні датчики:

- переваги: низька вартість, висока лінійність й точність.
- недоліки: наявні втрати, що вносяться в коло виміру, відсутність гальванічної розв'язки, саморозігрів і термо-ЕРС при великих струмах.

Датчики, основані на ефекті Холла:

- переваги: висока перешкодозахищеність за рахунок струмового виходу, гальванічна розв'язка, можливість вимірювань постійних, змінних та імпульсних сигналів струму та напруги, широкий частотний діапазон, висока точність.
- недоліки: паразитна напруга зсуву (у датчиках розімкненого типу), висока вартість, потребують наявності зовнішнього джерела живлення, необхідність підключення перед датчиком напруги струмообмежувального резистора значної потужності, від точності та температурних параметрів якого залежить загальна точність вимірювань.

Трансформаторні датчики:

- переваги: відсутність внесених втрат і напруги зсуву при нульовому струмі, гальванічна розв'язка з високою пробивною напругою; не потрібне зовнішнє джерело живлення;
- недоліки: фазові спотворення, низька смуга пропускання, насичення осердя за наявності в первинному струмі постійної складової, використовуються лише для вимірювання змінних сигналів струму та напруги.

## **3 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТОЇ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

### **3.1 Загальна характеристика датчиків неелектричних величин**

У системах автоматизованого електропривода вимірювання неелектричних величин здійснюється завдяки перетворенню їх на електричний сигнал з використанням різних фізичних явищ (п'єзоэффект, ефект Холла, виникнення термо-ЕРС та ін.).

До датчиків неелектричних параметрів системи автоматизованого електропривода можна віднести: датчики температури, що використовуються для побудови систем теплового захисту; датчики вібрацій, що використовуються в системах діагностики електромеханічного обладнання; датчики сили, датчики ваги, датчики переміщення, датчик крутного моменту, які знайшли широке розповсюдження в промислових системах автоматки.

Залежно від того явища, яке використовується для перетворення неелектричної величини на електричну, датчики можна розділити на три групи:

- електромеханічні (контактні, реостатні, тензометричні, електростатичні, електромагнітні);
- теплові та електрохімічні (термоелектричні, термоопору, електрохімічні);
- електронні та іонізаційні (електронні, іонні, іонізаційні).

Залежно від виду вихідної величини всі типи датчиків можна розділити на дві групи: параметричні (резистивні, індуктивні та взаємодуктивні, магнітопружні, ємнісні, електролітичні, фотоелектричні перетворювачі й терморезистори) і генераторні (індукційні, п'єзоелектричні, термоелектричні та деякі різновиди електрохімічних перетворювачів).

До датчиків неелектричних величин висувають ряд вимог: сталість у часі функції перетворення (зазвичай лінійної); висока чутливість; малі похибки; високі динамічні властивості (можливість вимірювання перехідних процесів).

Ефективність застосування датчиків неелектричних величин у системах автоматизованого електропривода визначається цілим рядом вимог до датчиків температури:

- низька інерційність;
- висока точність та лінійність;
- перешкодозахищеність;
- невеликі габаритні розміри та вартість;
- до датчиків вібрації:
- висока чутливість;
- лінійність та точність вихідної характеристики;
- достатній діапазон вимірювань;
- достатня полоса пропускання;
- низькі малогабаритні показники;
- кількість просторових координат вимірювань вібропараметрів;
- можливість одночасного вимірювання як віброприскорення, так і віброшвидкості;
- перешкодозахищеність.
- до датчиків сили, ваги й крутильного моменту на основі тензометричного чутливого елемента:
- мала інерційність,
- точність вихідної характеристики;
- висока лінійність характеристики;
- висока чутливість вимірюваного елемента.

Значним недоліком тензометричних датчиків є низька чутливість, що вимагає значного підсилення вихідного сигналу, та висока вартість.

### 3.2 Датчики температури

Робота електродвигунів вимагає їх надійного захисту від перегріву обмоток, що дозволяє підвищити як безпеку експлуатації, так надійність і термін служби електроприводів. З урахуванням усіх чинників, які призводять до нагрівання електродвигуна, найбільш надійним захистом є температурний захист.

Широкого розповсюдження в промислових системах температурного захисту електроприводів набули терморезистори. Вони належать до параметричних датчиків температури, оскільки їх

активний опір залежить від температури, та застосовуються для вимірювання температури в широкому діапазоні від  $-270$  до  $1600$  °С.

Розрізняють металеві й напівпровідникові терморезистори. Металеві терморезистори виготовляють із чистих металів: міді, платини, нікелю, заліза, рідше з молібдену й вольфраму.

Опір металевого провідника залежить від температури:

$$R = Ce^{\alpha T} \quad (3.1)$$

де  $C$  – постійний коефіцієнт, що залежить від матеріалу та конструктивних особливостей провідника,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору.

Мідні терморезистори випускаються серійно і позначаються ТРМ (терморезистори мідні) з відповідним градуванням. Вони виконуються з дроту діаметром не менше  $0,1$  мм та покритою емаллю для ізоляції.

Для платинових терморезисторів, які застосовуються в більш широкому діапазоні температур, ніж мідні, варто враховувати залежність температурного коефіцієнта опору від температури.

Платинові терморезистори випускаються серійно і позначаються ТРП (терморезистори платинові) з відповідним градуванням. Платина застосовується у вигляді неізольованого дроту діаметром  $0,05$ – $0,07$  мм.

Широке застосування в автоматиці одержали напівпровідникові терморезистори, які називають термісторами. Матеріалом для їх виготовлення є суміші оксидів марганцю, нікелю й кобальту; германію і кремнію з різними домішками.

Порівняно з металевими терморезисторами, напівпровідникові мають менші розміри та більші значення номінальних опорів. Термістори мають на порядок більший температурний коефіцієнт опору. Але цей коефіцієнт – від'ємний, тобто при збільшенні температури опір термістора зменшується. Істотний недолік напівпровідникових терморезисторів порівняно з металевими – нелінійність температурного коефіцієнта опору. З підвищенням температури він сильно падає, тобто термістор має нелінійну характеристику.

Основною характеристикою терморезистора є залежність його опору від абсолютної температури  $T$ :

$$RT = Ae^{B/T} \quad (3.2)$$

де  $A$  – постійний коефіцієнт, що залежить від матеріалу й конструктивних розмірів термістора;  $B$  – постійний коефіцієнт, що залежить від фізичних властивостей напівпровідника.

Серійно випускаються мідно-марганцеві (ММТ) і кобальт-марганцеві (КМТ) термістори. На рис 4.1 зображено залежності опору від температури для термісторів цих типів і для порівняння – для мідного терморезистора. Електричний опір термістора при навколишній температурі  $+20^{\circ}\text{C}$  називають номінальним або холодним опором.

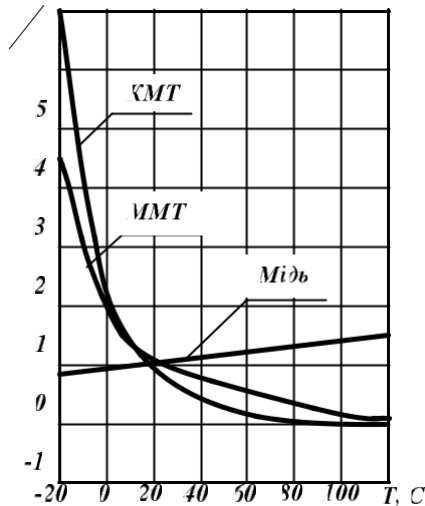


Рисунок 3.1 – Залежність опору термісторів та мідного терморезистора від температури

Термістори застосовують у схемах автоматики, які можна розділити на дві групи. До першої групи входять схеми з термісторами, опір яких визначається тільки температурою навколишнього середовища. Струм, що проходить при цьому через термістор, настільки малий, що не викликає додаткового розігріву термістора. До другої групи входять схеми з термісторами, опір яких змінюється за рахунок власного нагрівання (струм, що проходить

через термістор, розігріває його). Оскільки при підвищенні температури опір зменшується, струм збільшується, що призводить до ще більшого виділення теплоти.

Питання сигналізації або відключення двигуна, при використанні термісторів, повинне бути забезпечене схемою керування захистом, у яку терморезистор вмикається як вимірювальний елемент.

Завдяки високій чутливості та малій похибці вимірювання терморезистори застосовуються для вимірювання температур у діапазоні від 170 до 570 °К. Для монтажу в електродвигуні доцільно застосовувати бусинкові та дискові терморезистори.

Бусинковий терморезистор має постійну часу нагріву на відкритому повітрі близько 0,3 с, а зістарений термістор дозволяє вимірювати температуру з похибкою близько 0,2 С. Термістори встановлюються в одній точці обмотки і сигналізують про температуру в точці установки.

Як датчики температури широкого розповсюдження набули напівпровідникові терморезистори з позитивним коефіцієнтом залежності опору від температури – позистори. Вони встановлюються в одній точці обмотки і спрацьовують при досягненні заданої температури спрацьовування. Для визначення середньої температури за опором необхідно використовувати або аналогову, або цифрову модель, яка дозволить за температурою в точці установки позистора визначити середню або максимальну температуру обмотки.

Позистори не можуть бути ввімкнені безпосередньо в коло котушки контактора живлення, а вимагають проміжного пристрою, у якому позистори виконують роль елемента задання, а контактор – виконавчого елемента.

Пристрої керування можуть бути виконані на різноманітній елементній базі, у тому числі й на напівпровідниковій та релейній.

До переваг використання позисторів у системах теплового захисту можна віднести:

- малі габарити датчика і, у зв'язку з цим, зручність його вмонтування. Сучасні позистори дозволяють створити температурний захист з високою точністю температурного налаштування;

- можливість створення захисту не тільки для повільно наростаючого теплового перевантаження, але й швидко

наростаючого, при швидкостях зростання температури до 30 – 50 °C/с;

- висока вібростійкість захисту;
- малі габарити дозволяють убудувати датчики і для захисту підшипникових вузлів електродвигунів;
- низька вартість напівпровідникових датчиків.

Недоліки при використанні позисторів:

- більш складні схеми теплового захисту внаслідок наявності проміжних елементів схеми (пристроїв керування), тому що позистори не можуть бути ввімкнені безпосередньо в коло котушки контактора живлення;
- залежність систем захисту від зовнішніх електромагнітних перешкод;
- висока вартість пристроїв керування.

Для задач вимірювання температури у вузлах електромеханічних систем широкого розповсюдження набули термоелектричні датчики, які належать до датчиків генераторного типу. Їх робота основана на термоелектричному явищі – появі термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС). Сутність цього явища полягає в наступному: якщо скласти електричне коло із двох різнорідних металевих провідників (або напівпровідників), з одного кінця провідники спаяти (рис. 4.3, а), а місце з'єднання (спай) нагріти, то в такому колі виникає ЕРС. Ця ЕРС буде пропорційна температурі місця спаю (різниці температур місця спаю й вільних, неспаяних кінців). Коефіцієнт пропорційності залежить від матеріалу провідників та у певному інтервалі температури залишається постійним. Коло, складене із двох різнорідних матеріалів, називається термопарою; провідники, що становлять термопару, називають термоелектродами; місця з'єднання термоелектродів – спаями.

До матеріалів для термоелектродів термопар, крім вимоги отримання великого значення термо-ЕРС, висувають й інші вимоги. Найбільш важливим з них є забезпечення взаємозамінності. Це означає, що термопари одного і того ж типу повинні мати при однакових температурах одну і ту ж термо-ЕРС. У цьому випадку заміна термопари не повинна призвести до переналаштування або переградування вимірювальних приладів.

Найбільшого поширення набули термопари типу ТХА (хромель-алюмель) і типу ТХК (хромель-копель). Залежність термо-ЕРС цих термопар від температури зображена на рис. 3.2. Вони здатні працювати в окислювальному середовищі, оскільки при нагріванні створюється тонка захисна плівка, яка перешкоджає проникненню кисню всередину металу.

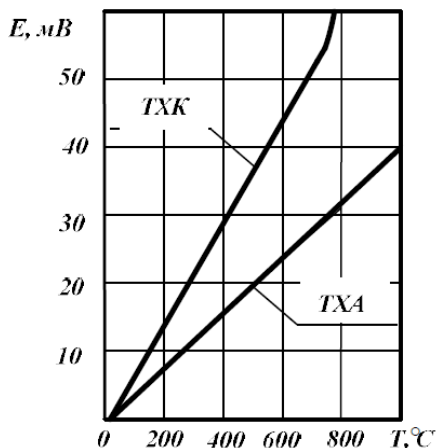


Рисунок 3.2 – Залежності термо-ЕРС від температури

Окрім перерахованих матеріалів, для термопар використовуються й інші, менш поширені, але такі, що мають свої переваги. Для вимірювання високих температур застосовують термопару з тугоплавких металів – вольфраму та молібдену.

### 3.3 Датчики вібрацій

Для визначення режимів вібрації різних машин і механізмів у даний час використовують п'єзоелектричні акселерометри, що забезпечують високу точність вимірювань. Чутливий елемент датчика сприймає вібрацію корпусу й формує електричний сигнал, пропорційний величині віброприскорення.

Робота п'єзоелектричних датчиків основана на фізичному явищі, що називається п'єзоелектричним ефектом. Цей ефект виявляється в деяких кристалах у вигляді появи на їхніх гранях

електричних зарядів різних знаків при стисканні (розтягуванні) кристала в певному напрямку. Залежно від значення сили стискання (або розтягання), змінюється кількість зарядів, а отже, і різниця потенціалів між гранями. П'єзоелектричні датчики належать до датчиків генераторного типу.

Розглянемо появу зарядів на гранях кристала кварцу, у якого п'єзоелектричний ефект досить сильно виражений. На рис. 3.3 зображений кристал кварцу, що має вигляд шестигранної призми.

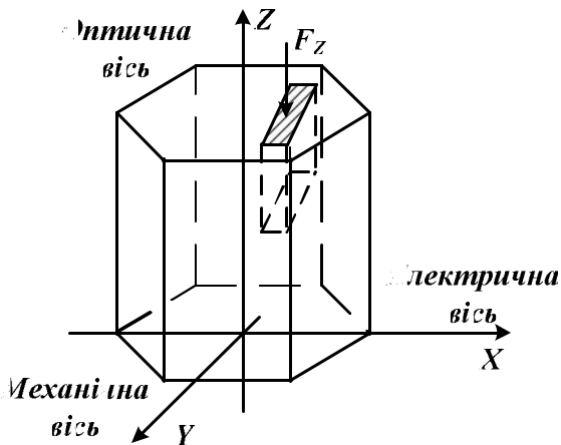


Рисунок 3.3 – Прояв п'єзоелектричного ефекту на прикладі кристала кварцу

У кристалі можна виділити три осі симетрії:  $Z$  – поздовжня вісь, що називається оптичною віссю;  $X$  – поперечна вісь, що проходить через ребра призми перпендикулярно поздовжній осі;  $Y$  – поперечна вісь, що проходить через грані призми перпендикулярно їм та осям  $Z$ ,  $X$ . Вісь  $X$  називається електричною віссю, вісь  $Y$  – механічною або нейтральною. Під дією сили  $F_x$  уздовж електричної осі  $X$  на кожній із граней кристала з'являються електричні заряди. Величина зарядів не залежить від геометричних розмірів кристала, а визначається лише прикладеною до нього силою.

Поява зарядів на гранях, залежно від стискання, називається прямим п'єзоелементом, що використовують в автоматичі для

вимірювань тисків, вібрацій, прискорень, інших параметрів швидкоплинних процесів.

Зворотний п'єзоэффект пов'язаний зі зміною розмірів кристала (стискання або розтягнення) при подачі на його грані напруги. Зворотний п'єзоэффект знайшов застосування в ультразвукових генераторах.

При вимірюванні вібрації за допомогою датчиків на основі п'єзоэффекту можна виміряти лише проекцію вектора віброприскорення на вісь датчика. Ця проекція не дозволяє визначити ні величину, ні напрям вектора віброприскорення. Для розв'язання цієї проблеми потрібно не однокомпонентний, а трикомпонентний датчик (рис. 3.4). І тоді за трьома проекціями вектора а можна отримати його величину і напрям у заданій системі координат.

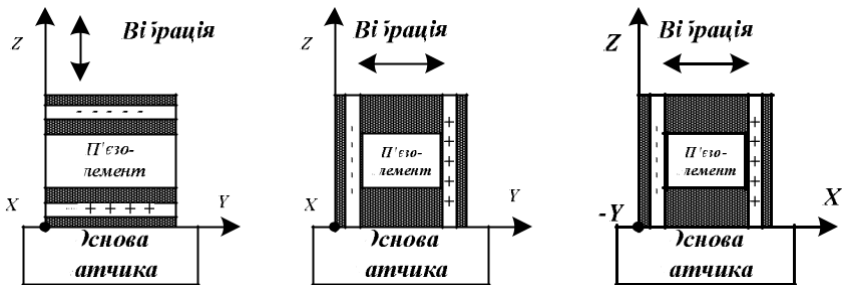


Рисунок 3.4 – Принцип дії трикомпонентних датчиків вібрації

Трикомпонентні акселерометри є поєднанням трьох однокомпонентних датчиків в одному корпусі, при цьому чутливі елементи датчиків розташовуються в трьох різних точках простору.

Широкого розповсюдження для задач вимірювання вібрацій набули датчики, у яких використовується лише один чутливий елемент (тобто є лише одна вимірювальна точка) у вигляді прямокутного паралелепіпеда, виготовленого з п'єзокристала певної симетрії та орієнтації.

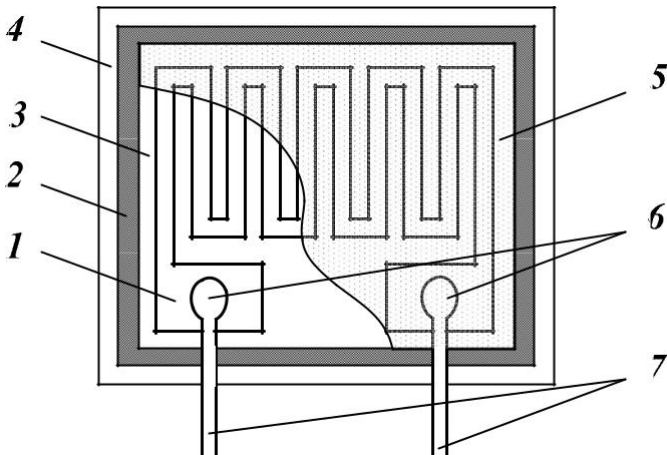
Найпоширенішим типом акселерометрів є акселерометри із убудованим підсилювачем заряду, живлення на які надходить від аналізатора даних по тому ж проводу, що й вимірюваний сигнал. Прикладом таких датчиків можуть слугувати датчики вібрації

Wilcoxon 784 А. Особливість цих датчиків полягає в тому, що вбудована в них електроніка формує так звану струмову петлю – сигнал, пропорційний віброприскоренню досліджуваного процесу. При цьому для роботи датчика не потрібно додаткового джерела живлення, крім живлення для струмової петлі.

### 3.4 Тензометричні датчики

Тензометричні датчики використовуються для вимірювання деформацій у деталях машин і механізмів. Вони можуть також використовуватися для вимірювання інших механічних величин (тиску, вібрації, прискорення та ін.), які попередньо перетворюються на деформацію.

Тензометричний вимірювальний перетворювач конструктивно являє собою тензорезистор, чутливий елемент якого виконаний з тензочутливого матеріалу (дроту, фольги тощо), закріплений за допомогою сполучного матеріалу (клею, цементу) на досліджуваній деталі (рис. 3.5). Для приєднання чутливого елемента до електричного кола в тензорезисторі є вивідні провідники.



1 – чутливий елемент, 2 – сполучний матеріал, 3 – підкладка,  
4 – досліджувана деталь, 5 – захисний елемент, 6 – вузол пайки  
(зварювання), 7 – вивідні провідники

Рисунок 3.5 – Схема тензоперетворювача

Принцип роботи дротового тензодатчика оснований на зміні активного опору дроту при його деформації. Зміна активного опору дроту відбувається з двох причин: по-перше, змінюються геометричні розміри дроту (довжина, поперечний переріз), по-друге, при деформації змінюється питомий опір матеріалу дроту. Після калібрування за зміною опору тензорезистора можна обчислити ступінь деформації, яка буде пропорційна силі, що прикладається до конструкції.

Існуючі типи датчиків, дія яких основана на використанні тензочутливого елемента, можна поділити на такі:

1. Датчики сили використовують у різних вимірювальних задачах: від простого вимірювання сили при випробуваннях до вимірювання ваги (маси) резервуарів, бункерів, транспортних засобів та іншого обладнання. Датчик сили може бути використаний як самостійно, так і в поєднанні із системами під час динамічних випробувань різних конструкцій і машинного обладнання. У таблиці 4.9 наведено паспортні характеристики датчиків сили.

2. Датчики тиску поділяються на: датчики абсолютного тиску, датчики надлишкового тиску, перетворювач тиску, датчики різниці та датчики перепаду тиску.

Датчики абсолютного і надлишкового тиску призначені для визначення величини абсолютного та надлишкового тиску газоподібних і рідких середовищ і перетворення тиску на уніфікований сигнал постійного струму.

Датчики диференціального тиску використовуються для роботи в системах контролю, керування та регулювання технологічних процесів шляхом безперервного перетворення різниці тиску середовища на уніфікований сигнал постійного струму. У таблиці 4.10 наведено паспортні характеристики датчиків тиску.

3. Акселерометр (датчик прискорення) – прилад, що вимірює проекцію прискорення. Акселерометр може застосовуватися як для вимірювання проекцій абсолютного лінійного прискорення, так і для непрямих вимірювань проекції. Акселерометри розрізняють: залежно від виду руху – лінійний і кутовий акселерометр; за принципом дії – механічний та електромеханічний акселерометр.

4. Датчики переміщення використовують для вимірювання переміщень (у тому числі відносних та абсолютних переміщень) від нульової точки. При цьому переміщення перетворюється на електричний сигнал. Існують датчики лінійних переміщень і датчики кутових переміщень. Лінійний датчик переміщення використовує принцип магнітострикції, тобто здатний безконтактно контролювати положення магніту, що переміщається вздовж датчика. Оскільки відсутні проблемні електромеханічні рухомі контакти, ця особливість виключає проблему зносу датчика і гарантує тривалий термін служби. Кутовий датчик переміщення слугує для вимірювання наступних параметрів роботи електроприводів: швидкість, положення вала, вимірювання кутових переміщень.

5. Датчики моменту широко використовуються не тільки для експериментальних досліджень, а й для вимірювання в промислових умовах. Маючи в основі тензометричний принцип, датчики моменту перетворюють обертання вала, що відповідає крутному моменту, на електричний сигнал і передають електричний сигнал через контактне кільце і щітку, або обертовий трансформатор і оптичний пристрій. Вони гарантують точне і просте вимірювання моменту, переданого від об'єкта з високими частотами обертання.

Широке поширення тензодатчиків пояснюється цілим рядом їх переваг:

- малі габарити і вага;
- мала інерційність, що дозволяє застосовувати тензодатчики як при статичних, так і при динамічних вимірюваннях;
- висока лінійність характеристики;
- дозволяють дистанційно і в багатьох точках проводити вимірювання;
- спосіб установлення їх на досліджувану деталь не потребує складних пристосувань і не спотворює поле деформацій досліджуваної деталі.

Загальним недоліком усіх тензодатчиків є температурна чутливість, однак у більшості випадків, її можна компенсувати.

## **4 ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ**

Тиристорні перетворювачі напруги призначені для перетворення змінного струму й напруги одного рівня на змінний чи постійний струм і напругу іншого рівня без зміни частоти. Вони набули широкого розповсюдження для живлення як активного, активно-індуктивного, так і активно-індуктивного навантаження з проти-ЕРС. Регулювання напруги в таких системах відбувається за рахунок зміни кута відкриття силових ключів.

Широке використання тиристорних перетворювачів напруги пояснюється їх високими енергетичними та експлуатаційними показниками: незначні втрати енергії; високий коефіцієнт підсилення за струмом та потужністю; низька інерційність; малі габарити та вага; висока надійність.

До недоліків тиристорних перетворювачів напруги належать: пульсації вихідної напруги; низький коефіцієнт потужності при глибокому регулюванні напруги; викривлення в мережах живлення.

Тиристорні перетворювачі постійного струму знайшли широке застосування для керування технологічними механізмами у машинобудівній, металургійній промисловості в транспорті (електровози, тепловози, трамваї, тролейбуси). Такі перетворювачі виконуються для нереверсивних та реверсивних електроприводів і використовуються при керуванні колами збудження, якірними колами електроприводів з великим діапазоном регулювання швидкості.

У керованих тиристорних випрямлячах потік енергії може бути спрямований із мережі змінного струму в коло постійного струму (режим випрямлення), так і в зворотному напрямку (режим інвертування).

Основні переваги керованих випрямлячів: високі коефіцієнт підсилення та ККД, мала потужність керування та висока швидкодія. Недоліки керованих випрямлячів: пульсації вихідної напруги, низький коефіцієнт потужності при глибокому регулюванні напруги, висока чутливість до перенапруги, викривлення в мережах живлення, підвищений рівень випромінювання радіоперешкод.

Керовані випрямлячі класифікують:

- за вихідною потужністю: малопотужні – (до 10 кВт); середньої потужності (десятки–сотні кіловат), потужні (понад 1000 кВт);
- за кількістю фаз напруги живлення: однофазні й трифазні;
- залежно від схем вмикання вентилів та підключення навантаження: нульові й мостові, симетричні й несиметричні;
- за можливістю зміни полярності вихідної напруги: реверсивні та неререверсивні.

Тиристорні перетворювачі змінного струму знайшли широке розповсюдження в системах плавного пуску асинхронних чи синхронних електродвигунів, що є складовою частиною електроприводів таких агрегатів, як компресор, вентилятор (димосос), насос та ін. Їх використання дозволяє здійснювати необмежену кількість плавних пусків ненавантажених або навантажених двигунів з обмеженням пускового струму від одного до трьох значень номінального струму, залежно від параметрів навантаження, з подальшим їх перемиканням на живлення від промислової мережі.

#### **4.1 Напівпровідникові ключі та методи керування ними**

Тиристор є керованим напівпровідниковим діодом, якому властиві два стійкі стани: відкритий, коли прями́й опір тиристора дуже малий і струм у його колі залежить від напруги джерела живлення й опору навантаження, і закритий, коли його прями́й опір великий і струм складає одиниці міліампер. При зворотних напругах тиристор поводитьися як звичайний діод.

Якщо при нульовому струмі керуючого електрода збільшувати значення прямої напруги на закритому ключі, то тиристор відкриється при досягненні напруги рівній напрузі ввімкнення, таке перемикання називається перемиканням за анодом. Наявність керуючого електрода дозволяє відкривати тиристор при значенні анодної напруги, яка менша за напругу ввімкнення. Для цього на керуючий електрод необхідно подати струм керування  $I_k$ . Мінімальний струм керування, необхідний для відкриття тиристора, називається струмом випрямлення. Середнє значення напруги на

навантаженні можна регулювати за допомогою зміни моменту подачі імпульсу на керуючий електрод.

Тиристри є найбільш потужними напівпровідниковими ключами, здатними комутувати кола з напругою до 5 кВ і струмами до 5 кА при частоті не більше 1 кГц. На даний час розроблено велику кількість різновидів тиристорів, що вирізняються швидкістю, методами керування, напрямком струмів у провідному стані. Серед них слід зазначити такі типи:

- тиристор-діод, який еквівалентний тиристорі із зустрічно-паралельно ввімкненим діодом (рис. 4.1, б);

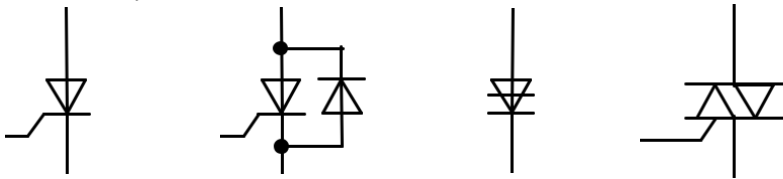
- діодний тиристор (диністор), що переходить у провідний стан при перевищенні певного рівня напруги, прикладеної між анодом та катодом (рис. 4.1, в);

- симетричний тиристор або симістор, який еквівалентний двом зустрічно-паралельно ввімкненим тиристорам (рис. 4.1, г);

- швидкодіючий інверторний тиристор (час вимкнення 5–50 мкс);

- тиристор з польовим керуванням за допомогою керуючого електрода, наприклад, на основі комбінації МОП-транзистора з тиристором;

- оптотиристор, керування яким відбувається за допомогою світлового потоку.



а)

б)

в)

г)

а) тиристор; б) тиристор-діод; в) діодний тиристор (диністор); г) симістор

Рисунок 4.1 – Умовно-графічне позначення тиристорів:

Як силові елементи керування широкого розповсюдження також набули симістори (рис. 4.1, г). Симістор – напівпровідниковий елемент, призначений для комутації навантаження в мережі змінного струму. Він являє собою двонапрявлений тиристор і має три електроди: один керуючий і два основні для пропускання робочого струму. Особливістю симістора є здатність проводити струм як від анода до катода, так і в зворотному напрямку.

На відміну від тиристорів, симістор може керуватися як позитивним, так і негативним струмом між затвором та катодом. Ця властивість дозволяє симістору працювати в усіх чотирьох квадрантах. Для керування режимом роботи симістора використовується низьковольтний сигнал, що подається на керуючий електрод симістора. При подачі напруги на керуючий електрод симістор переходить із закритого стану у відкрите і пропускає через себе струм.

У стандартних колах керування фазою змінного струму, таких як регулятори яскравості та регулятори швидкості обертання, керування проводиться завжди в квадрантах 1+ та 3, у яких комутувальні параметри симістора однакові.

Розрахунок та вибір напівпровідникових ключів, що використовуються в перетворювальних приладах, проводиться на основі необхідних експлуатаційних характеристик та при ідеалізації силових ключів, у яких час увімкнення, час вимкнення та падіння напруги дорівнює нулю.

Розрахунок та вибір силових напівпровідникових ключів відбувається за наступними вихідними даними:

- максимально допустима амплітуда імпульсної робочої напруги чи постійної робочої напруги, що прикладається до одного напівпровідникового ключа чи декількох ключів, з'єднаних у групу;
- максимально допустимий струм вихідного кола ключа, що включає в себе середні, імпульсні та ударні струмові параметри ключа, а також струми витоку в закритому стані;
- максимально допустимі швидкості зміни струму і напруги, відповідно у відкритому та закритому станах ключа, а також паразитні ємності й індуктивності;
- частота імпульсів струму еквівалентного вентиля;
- кут відпирання, кут провідності та форма струму ключа;
- необхідна тривалість імпульсів керування;

- часові параметри ввімкнення та вимкнення, які характеризують тривалість перехідних процесів та їх складові етапи;

- спосіб охолодження ключа (природне чи штучне охолодження) та вид охолоджувального середовища (повітряне чи водне середовище);

- максимальна та мінімальна температура середовища охолодження;

- число температурних циклів роботи силового ключа. Також вибір напівпровідникових ключів необхідно проводити таким чином, щоб за всіх можливих умов його роботи значення будь-якого впливу на ключ не перевищувало допустимі значення відповідних параметрів. За кожним параметром між його допустимим значенням та значенням фактичного впливу на ключ за даним параметром необхідно мати певний запас при всіх можливих експлуатаційних умовах роботи. Запас за кожним із параметрів вибирається з умови отримання необхідних техніко-економічних показників перетворювального приладу, при цьому вибраний напівпровідниковий ключ буде мати параметри, за яких забезпечуються прийнятні значення потужності втрат та достатня його перевантажувальна здатність за основними впливами. У загальному випадку можна виділити наступні техніко-економічні показники:

- мінімальна потужність втрат при експлуатації;

- економія енергії;

- висока надійність;

- погоджений оптимум за затратами та надійністю.

Рекомендовані коефіцієнти запасу за головними параметрами напівпровідникових ключів, залежно від техніко-економічних показників, представлено в таблиці.

Для керування роботою тиристорів та симісторів використовуються різні схеми, що забезпечують відкривання силових ключів у визначений момент часу.

Після відкривання тиристора коло керування не впливає на його стан, тому керування тиристором може здійснюватися імпульсами невеликої тривалості (сотні мікросекунд), що дозволяє спростити схеми керування й знизити потужність на керуючому електроді.

Існує кілька методів керування тиристорами: амплітудний, фазовий, фазово-імпульсний тощо.

Амплітудний метод керування полягає у тому, що на керуючий електрод тиристора надходить змінна за величиною напруга (рис. 4.2). Тиристор відкривається в той момент, коли ця напруга є достатньою для протікання через керуючий перехід струму випрямлення. Змінюючи напругу на керуючому електроді, можна змінювати момент відключення тиристора.

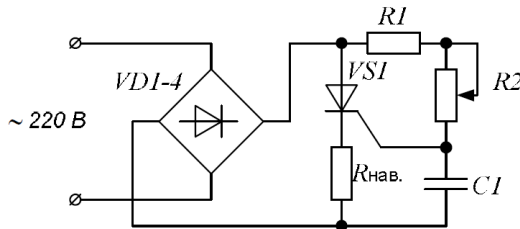


Рисунок 4.2 – Схема регулятора напруги

Дана схема дозволяє забезпечити діапазон регулювання до  $180^\circ$  і регулювати напругу на навантаженні протягом обох півперіодів напруги мережі живлення.

Фазово-імпульсний метод керування тиристорами полягає у тому, що на керуючий електрод подається імпульс напруги із крутим фронтом. Залежно від принципу зміни фази керуючого імпульсу, системи керування поділяються на горизонтальні та вертикальні.

Горизонтальний метод керування. При даному методі керування формування керуючого імпульсу здійснюється в момент переходу синусоїдальної напруги через нуль (рис. 4.3), а зміна його фази забезпечується зміною фази синусоїдальної напруги, тобто зміщенням його по горизонталі.

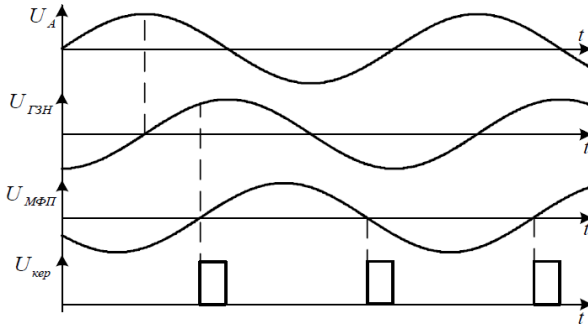


Рисунок 4.3 – Формування імпульсів керування при горизонтальному методі керування

Структурна схема системи горизонтального керування зображена на рис. 4.4. Вона включає в себе генератор змінної напруги (ГЗН), що генерує синусоїдальну напругу, яка знаходиться в певному фазному співвідношенні з анодною напругою тиристора, зазвичай як змінну напругу використовують напругу відповідної фази мережі. З виходу мостового фазообертового пристрою (МФП) зрушена за фазою напруга надходить на формувач імпульсів (ФІ), де в момент переходу синусоїди через нуль формується керуючий імпульс, який підсилюється в блоці вихідного підсилювача (БВП). Кут зсуву фаз регулюється зміною напруги керування.

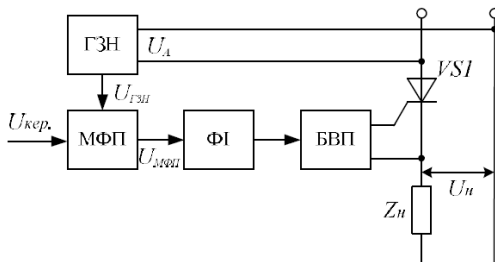


Рисунок 4.4 – Структурна схема системи горизонтального керування

Горизонтальний метод керування не знайшов широкого розповсюдження, оскільки мостові фазообертачі чутливі до зміни форми і частоти поданої на них напруги.

Вертикальний метод керування. Він полягає в тому, що на вході генератора імпульсів здійснюється порівняння постійної напруги (1) і пилкоподібної напруги (2), період якої дорівнює півперіоду мережі живлення (рис. 4.5). У момент рівності цих напруг генерується імпульс (3) керування тиристором. Змінна за величиною напруга може мати синусоїдальну, трикутну чи пилкоподібну форму.

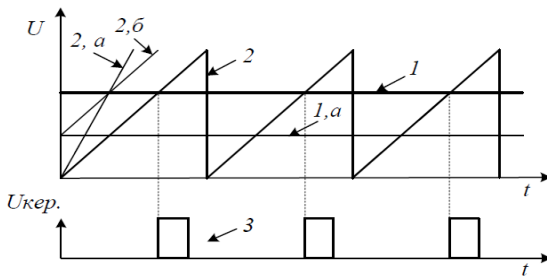


Рисунок 4.5 – Формування імпульсів керування при вертикальному методі керування

Зміна моменту виникнення керуючого імпульсу, тобто зрушення його фази, може здійснюватися трьома різними способами (рис. 4.5):

- зміною швидкості наростання змінної напруги (2, а);
- зміною початкового рівня змінної напруги (2, б);
- зміною величини постійної напруги (1, а).

Структурна схема системи вертикального керування наведена на рис. 4.6. Вона включає блок синхронізації (БС), який керує генератором пилкоподібної напруги (ГПН) і запускає його в момент появи на тиристорі прямої напруги, системою порівняння (СП), який порівнює величину напруги керування  $U_{кер}$  та пилкоподібної напруги з виходу ГПН. У момент рівності цих напруг формувач імпульсів (ФІ) генерує імпульс напруги керування, який підсилюється в блоці вихідного підсилювача (БВП) і через гальванічний розв'язок надходить на керуючий електрод тиристора. Таким чином, при

вертикальному способі керування роль фазообертового пристрою виконують генератор пилкоподібної напруги та система порівняння.

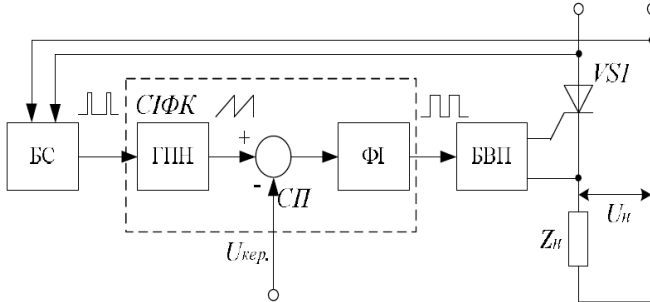


Рисунок 4.6 - Структурна схема системи вертикального керування

Вертикальний метод керування набув найбільш широкого розповсюдження при побудові систем керування силою вими тиристорами в автоматизованих системах електропривода.

У сучасних системах автоматизованого електропривода системи імпульсно-фазного керування виконуються програмно, на базі мікроконтролерів чи цифрових сигнальних процесорів.

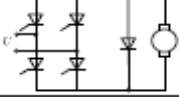
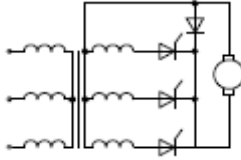
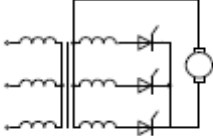
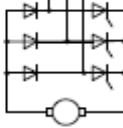
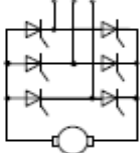
## 4.2 Силова частина тиристорних перетворювачів

Для розв'язання задачі перетворення змінної напруги на постійну, що є актуальною в електроприводах постійного струму, широко використовуються керовані випрямлячі. У таблиці 4.1 наведено схеми неререверсивних керованих випрямлячів та вирази для визначення напруги на навантаженні.

Таблиця 4.1 - Тиристорні перетворювачі постійного струму

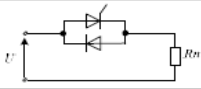
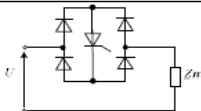
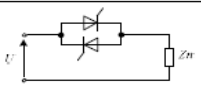
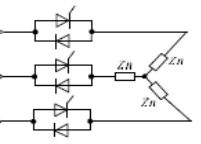
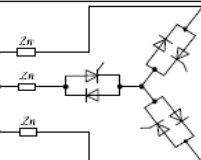
Схема	Закон зміни напруги	Глибина регулювання
1. Однофазна однопівперіодна із шунтувальним діодом		
	$U_{сеп} = \frac{U_d}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$	180°
2. Двопівперіодна нульова із шунтувальним діодом		
	$U_{сеп} = \frac{U_d}{\pi} (1 + \cos \alpha)$	180°
3. Двопівперіодна нульова без шунтувального діода		
	$U_{сеп} = \frac{2U_d}{\pi} \cos \alpha$	180°
4. Однофазна мостова із двома тиристорами		
	$U_{сеп} = \frac{U_d}{\pi} (1 + \cos \alpha)$	180°

Продовження таблиці 4.1

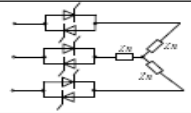
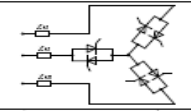
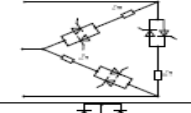
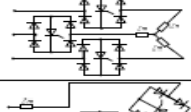
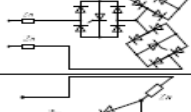
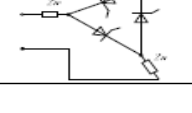
<b>5. Однофазна мостова із чотирма тиристорами</b>		
	$U_{сер} = \frac{2U_d}{\pi} \cos \alpha$	$180^\circ$
<b>6. Трифазна нульова із шунтувальним діодом</b>		
	$U_{сер} = \frac{3\sqrt{3}U_d}{2\pi} \cos \alpha,$ $(5^\circ < \alpha < 30^\circ)$ $U_{сер} = \frac{3U_d}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]$ $(30^\circ < \alpha < 150^\circ)$	$150^\circ$
<b>7. Трифазна нульова без шунтувального діода</b>		
	$U_{сер} = \frac{2U_d}{\pi} \cos \alpha$	$150^\circ$
<b>8. Трифазна мостова із трьома тиристорами</b>		
	$U_{сер} = \frac{3\sqrt{3}U_d}{\pi} (1 + \cos \alpha)$	$150^\circ$
<b>9. Трифазна мостова із шістьома тиристорами</b>		
	$U_{сер} = \frac{3\sqrt{3}U_d}{\pi} \cos \alpha$	$120^\circ$

Тиристорні перетворювачі напруги знайшли широке розповсюдження в системах перетворення змінного струму й напруги одного рівня на змінний струм і напругу іншого рівня без зміни частоти. У таблиці 4.2 наведено схеми нереверсивних керованих випрямлячів та вирази для визначення напруги на навантаженні.

Таблиця 4.2 - Тиристорні перетворювачі змінного струму  
 Тиристорні перетворювачі змінного струму

№ пор.	Коло	Відносна вихідна потужність	Тип навантаження	Діапазон регулювання, %
1		1	Активне	50..100
2		0,7	Активне чи індуктивне	0..100
3		1	Активне чи індуктивне	0..100
4		1,73	Активне чи індуктивне	0..100
5		1,73	Активне чи індуктивне	0..100

## Продовження таблиці 4.2

№ пор.	Кола	Відносна вихідна потужність	Тип навантаження	Діапазон регулювання, %
6		1,73	Активне чи індуктивне	0..100
7		1,73	Активне чи індуктивне	0..100
8		3	Активне чи індуктивне	0..100
9		1,21	Активне чи індуктивне	0..100
10		1,21	Активне чи індуктивне	0..100
11		1,73	Активне чи індуктивне	0..100

Трансформаторні підсилювачі традиційно використовуються в схемах керування одноопераційними тиристорами. Загальні вимоги, що висуваються до подібних схем, зумовлені внутрішніми особливостями перемикання структури тиристора та параметрами кола керування.

Оптоелектронний блок вихідного підсилювача може бути реалізований за допомогою оптронів діодного чи транзисторного типу. Основною перевагою оптронів перед схемами підсилення трансформаторного типу є можливість передачі безперервних сигналів та перешкодостійкість оптичного каналу.

### 4.3 Захист напівпровідникових ключів

Структура тиристорів та симісторів є критичною до швидкостей зростання прямого струму  $di/dt$  і прямої напруги  $du/dt$ . Під час переходу напівпровідникових ключів із закритого стану в провідний зовнішнім колом може бути викликаний значний струм. У той же час миттєвого спаду напруги на виводах ключів не відбувається. Отже, одночасно будуть присутні напруга і струм, що розвивають миттєву потужність, яка може досягти значних величин. Енергія, розсіяна в малому просторі, викличе різке підвищення температури в структурі тиристорів та симісторів. Якщо критична температура буде перевищена, то відбудеться руйнування ключа, викликане надмірною швидкістю зростання струму  $di/dt$ .

Обмеження також поширюються на зміну напруги двох категорій: на  $du/dt$  відносно закритого ключа та на  $du/dt$  при відкритому ключі (останнє також називається швидкістю перемикання).

Надмірна швидкість зростання напруги, прикладеної між виводами закритого ключа, може викликати його відкриття за відсутності сигналу на керуючому електроді, що пояснюється наявністю внутрішньої ємності. Однак це не є основною причиною несвоєчасного відкриття. Максимальна величина  $du/dt$  при перемиканні ключа, як правило, дуже мала, і занадто швидка зміна напруги на його виводах у момент відключення може відразу ж викликати нове ввімкнення. Таким чином, ключ знову відкривається у той час, як повинен закритися.

Тому для захисту тиристорів зазвичай використовують різні схеми, які в динамічних режимах здійснюють захист від неприпустимих значень  $di/dt$  і  $du/dt$ . Для цієї мети зазвичай використовують RC-кола (снабери) (рис. 4.7, а, б) чи RCD-кола (рис. 4.7, в), що підключаються паралельно тиристорі чи симісторі. Існують різні схемотехнічні модифікації RC-кіл і методики розрахунку їх параметрів для різних умов використання тиристорів та симісторів.

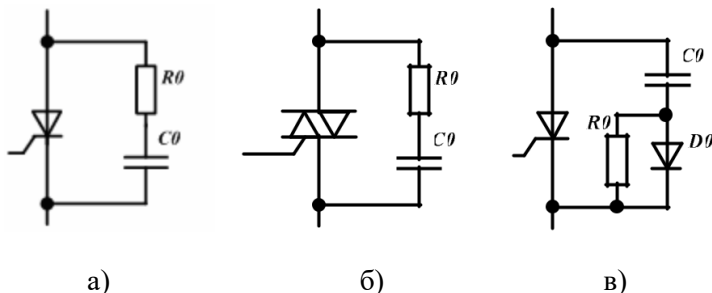


Рисунок 4.7 – Типові схеми захисту тиристорів (а), симісторів (б) на основі RC-кіл та RCD-кіл (в)

Розрахунок параметрів снаберних кіл залежить від декількох параметрів, серед яких – величина струму навантаження, значення індуктивності та номінального опору навантаження, робочої напруги, характеристик тиристора чи симістора. Зазвичай при виборі елементів захисних кіл (демпферних кіл) використовують наступний підхід:

- Захисну ємність  $C_0$  вибирають з умови забезпечення допустимої швидкості зміни анодної напруги:

$$C_0 \geq I_{TM} / \left( \frac{du}{dt} \right)_{KP}, \quad (4.1)$$

де  $I_{TM}$  – максимальний анодний струм перед комутацією;

$\left( \frac{du}{dt} \right)_{KP}$  – критична швидкість зростання анодної напруги.

- Опір  $R_0$  вибирається на напругу, до якої заряджається захисний конденсатор, і на необхідну потужність розсіювання енергії. Величина  $R_0$  обмежена знизу допустимою амплітудою струму ввімкнення ключа, а зверху – швидкістю повного розряду  $C_0$  протягом тривалості відкритого стану ключа  $t_n$ :

$$\frac{U_0}{I_{TO}} < R_0 < \frac{t_n}{3C_0}, \quad (4.2)$$

де  $U_0$  – напруга на захисному конденсаторі перед увімкненням ключа,  $I_{TO}$  – допустимий струм увімкнення ключа.

Значення захисного опору повинне бути набагато меншим (або одного порядку), ніж величина повного навантаження, будучи досить високим для того, щоб обмежити струм розряду конденсатора з метою дотримання максимального значення  $di/dt$  у момент відключення.

Потужність, що розсіюється на резисторі, визначається формулою:

$$P_0 = 0,5C_0U_0f, \quad (4.3)$$

де  $f$  – частота комутації ключа.

– Демпферний діод вибирається за класом напруги, що відповідає силовому ключу та середньому струму на порядок меншому, ніж середній струм ключа. Цей діод повинен бути високочастотним зі швидким відновленням.

Сумарна потужність, що розсіюється на ключі та в демпферному колі, постійна і визначається струмом навантаження та індуктивністю анодного кола. Тому чим більша потужність, що виділяється на  $R_0$ , тим менша потужність втрат у структурі ключа, що покращує умови його вимкнення.

Захист симісторів від перенапруг також може бути забезпечений за допомогою увімкнених паралельно нелінійних елементів, опір яких зменшується при збільшенні напруги. При великій нарузі на ключі вони шунтують його силове коло. Через високу крутизну імпульсів перенапруг вони можуть бути усунені за допомогою металооксидних варисторів.

Додатковий захист, що заслуговує уваги, може бути забезпечений за допомогою варистора, підключеного до виводів індуктивного навантаження. Інший варистор, увімкнений паралельно мережі живлення, затримує перешкоди, що поширюються з мережі живлення.

## 5 ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ

Для живлення споживачів електричної енергії, які потребують регулювання підведеної до них напруги, широкого розповсюдження набули імпульсні перетворювачі напруги. Вони перетворюють сталу за значенням постійну чи змінну напругу на регульовану величину шляхом періодичного підключення навантаження до джерела живлення. При цьому тривалість такого підключення можна змінювати, регулюючи тим самим середнє або діюче значення підведеної до навантаження напруги. При розгляді силового ключа як ідеального при підключенні навантаження до джерела живлення напруга на ньому дорівнює напрузі джерела, а при відключенні – нулю.

Існує два способи імпульсного керування:

- широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) характеризується тим, що середнє значення вихідної напруги змінюється за рахунок співвідношення між часом імпульсу  $t_{\text{імп}}$  і часом паузи між ними  $t_{\text{п}}$  при постійному періоді  $T \text{ const}$ , тобто при постійній частоті комутації ключа  $f_{\text{імп}} 1/T \text{ const}$ ;

- частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ) характеризується тим, що ширина імпульсу (або паузи) залишається постійною, а частота проходження імпульсів є змінною величиною  $f_{\text{імп}} 1/T \text{ var}$ .

Перетворювачі, що дозволяють здійснювати широтно-імпульсне регулювання напруги на навантаженні, називають широтно-імпульсними перетворювачами (ШІП).

Залежно від можливості зміни полярності напруги на навантаженні ШІП поділяються на:

- нереверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою й полярністю, але з різною тривалістю;
- реверсивні, що перетворюють напругу на імпульсну з постійною амплітудою, різною тривалістю й полярністю за один період.

### 5.1 Нереверсивні імпульсні перетворювачі

Вихідна напруга імпульсних перетворювачів постійного струму являє собою послідовність однополярних імпульсів напруги прямокутної форми (рис. 5.1) з тривалістю  $t_{\text{імп}}$  і паузою між ними  $t_0$ .

Сума цих відрізків часу становить період проходження імпульсів вихідної напруги  $T$   $t_{\text{імп}}$   $t_0$ , а співвідношення між ними впливає на значення вихідної напруги. Форма вихідного струму залежить від характеру навантаження.

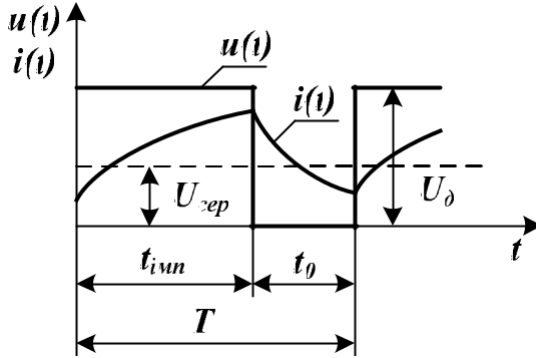


Рисунок 5.1 – Напряга та струм імпульсного перетворювача

Середнє значення напруги на навантаженні при живленні від імпульсного перетворювача із широтно-імпульсною модуляцією може бути розраховане за формулою:

$$U_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_0} U_d dt = U_d \frac{t_0}{T} = U_d \gamma, \quad (5.1)$$

де  $U_d$  – напруга джерела живлення;  $\gamma = \frac{t_0}{T}$  – коефіцієнт заповнення імпульсів;  $t_0$  – час увімкненого стану вентилі;  $T$  – цикл роботи ШПП.

Діюче значення напруги на навантаженні може бути визначено за виразом:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{імп}}} U_d^2 dt} = U_d \sqrt{\frac{t_{\text{імп}}}{T}} = U_d \sqrt{\gamma}. \quad (5.2)$$

Таким чином, змінюючи величину коефіцієнта заповнення імпульсів, на виході широтно-імпульсного перетворювача можна отримати різні значення середньої та діючої напруги на навантаженні, які не залежать від його характеру.

Нереверсивні ШПП можна розділити на дві великі групи: паралельні та послідовні. У послідовних імпульсних перетворювачах робочий транзисторний ключ вмикається послідовно з навантаженням. Характерною особливістю послідовних ШПП є неможливість отримання напруги на їх виході вище за напругу джерела живлення. На рис. 5.2 наведено схему нереверсивного перетворювача постійної напруги з послідовним увімкненням транзистора.

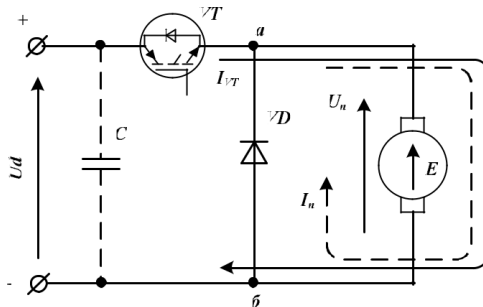


Рисунок 5.2 – Схема нереверсивного послідовного перетворювача

При аналізі широтно-імпульсних перетворювачів зроблено припущення, що транзистори є ідеальними ключами із часом перемикання, значення якого наближається до нуля, внутрішній опір джерела живлення дорівнює нулю.

Для захисту силових елементів від перенапруг, що виникають при розриві кола живлення, на вході широтно-імпульсного перетворювача встановлюється фільтр нижніх частот, який представляється конденсатором  $C$  (рис. 5.2). У схемах, де напруга  $U_d$  створюється входним випрямлячем, ємність  $C$  також зменшує пульсації напруги.

У паралельних ШПП силовий транзисторний ключ включається паралельно навантаженню. Характерною особливістю паралельних перетворювачів є можливість отримання напруги на навантаженні, що

перевищує за величиною напругу джерела живлення. Схема нереверсивного перетворювача з послідовним увімкненням транзистора наведена на рис. 5.3.

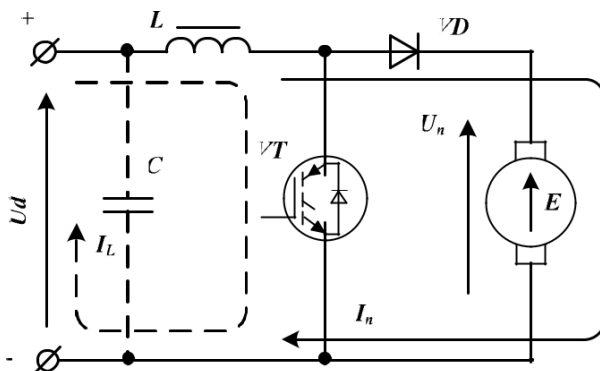


Рисунок 5.3 – Схема нереверсивного паралельного перетворювача

У момент часу, коли транзистор VT замкнений, напруга джерела живлення через діод VD прикладається до навантаження. При переключенні робочого транзистора з певним коефіцієнтом заповнення імпульсів у моменти, коли він відключений, напруга джерела живлення прикладається до дроселя L, і в ньому запасється енергія (напрямок струму дроселя L зображено суцільною лінією).

При замиканні транзистора струм дроселя L, що підтримується ЕРС самоіндукції дроселя, тече через діод та навантаження, віддаючи енергію, яка була запасена в період відключеного стану транзистора.

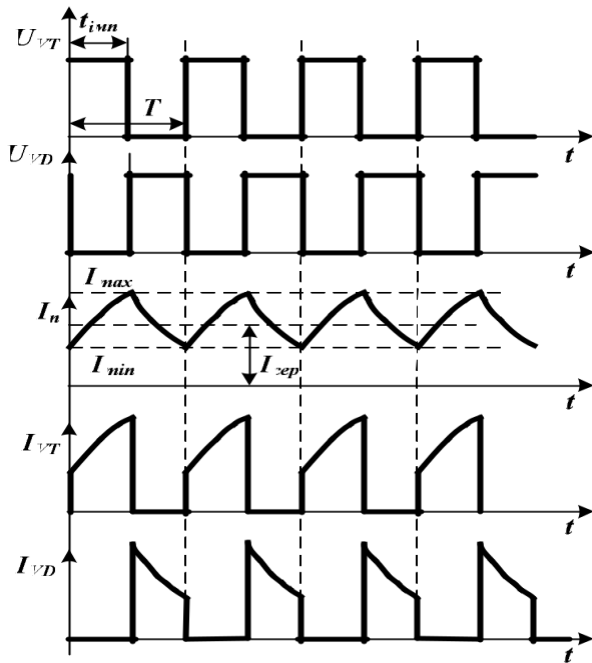


Рисунок 5.4 – Часові діаграми роботи нереверсивного паралельного перетворювача

Нереверсивні широтно-імпульсні перетворювачі з послідовним увімкненням транзисторного ключа набули широкого розповсюдження для живлення якірних кіл двигунів постійного струму, оскільки вони забезпечують їх роботу в двигунному режимі. Об'єднуючи схеми послідовного та паралельного перетворювача, можна отримати нереверсивний електропривод, характеристики якого розташовуються в I та II квадрантах.

Для імпульсних перетворювачів великої потужності, а також для зменшення пульсацій вихідного струму часто використовується багатотактний принцип, коли на паралельну роботу вмикається декілька окремих (однотактних) перетворювачів, які працюють на спільне джерело навантаження від спільного джерела живлення постійного струму. Струм на навантаженні в цьому разі дорівнює сумі струмів усіх каналів і, порівняно з одним каналом, має більшу

частоту, але меншу амплітуду пульсацій. Такі перетворювачі отримали назву багатofазних імпульсних перетворювачів.

Для побудови системи керування нереверсивними широтно-імпульсними перетворювачами постійної напруги необхідно створити джерело ШІМ-сигналів керування.

Для встановлення вихідної частоти внутрішній генератор пилкоподібної напруги вимагає наявності лише двох зовнішніх компонентів – опору  $R_4$  та ємності  $C_1$ . Частота генератора визначається за формулою:

$$f_c = \frac{1,1}{R_4 \cdot C_1} \quad (5.3)$$

Модуляція ширини вихідних імпульсів досягається порівнянням пилкоподібної напруги на конденсаторі  $C_1$  з керуючим сигналом, що подається на неінвертуючий вхід мікросхеми через подільник напруги  $R_1 R_2$ . Значення опорів подільника вибирають таким чином, щоб напруга на вході змінювалася в діапазоні від 0 до 3,3 В.

Незалежні вихідні транзистори мікросхеми забезпечують можливість роботи вихідного каскаду за схемою зі спільним емітером (рис. 5.4) або за схемою емітерного повторювача (рис. 5.5).

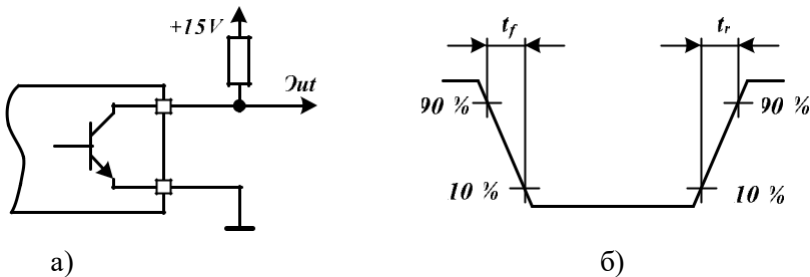


Рисунок 5.5 – Конфігурація виходу за схемою зі спільним емітером а) схема підключення; б) часові діаграми вихідної напруги

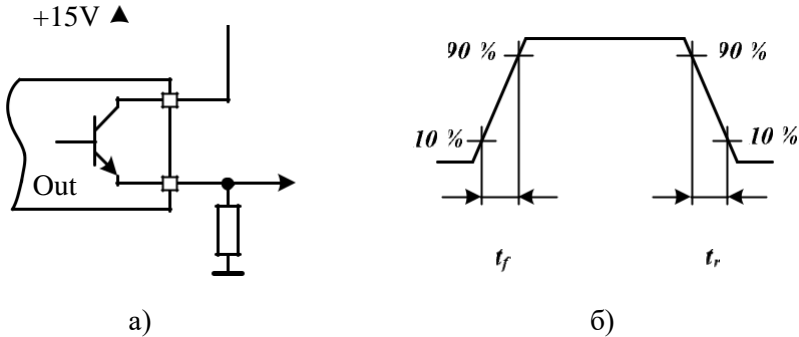


Рисунок 5.6 – Конфігурація виходу за схемою емітерного повторювача: а) схема підключення; б) часові діаграми вихідної напруги.

## 5.2 Реверсивні імпульсні перетворювачі

Реверсивні перетворювачі постійної напруги дають змогу здійснювати безконтактне плавне регулювання та реверсування струму в споживачах постійного струму. Як правило, реверсивні перетворювачі виконуються за мостовою схемою, в одну діагональ якої подається постійна напруга від джерела живлення  $U_d$ , а в іншу – вмикається навантаження. Зустрічно-паралельно транзисторним ключам вмикаються діоди, що забезпечують протікання струму в активно-індуктивному навантаженні при розмиканні ключів.

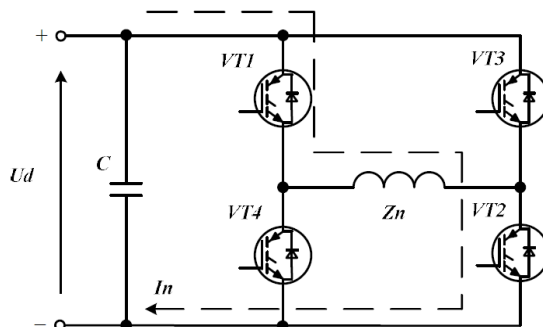


Рисунок 5.7 – Принципова схема транзисторного широтно-імпульсного перетворювача

Для реверсивних (мостових) перетворювачів застосовують три способи керування ключами:

- симетричний;
- несиметричний;
- почерговий.

За симетричного керування почергово відкриваються ключі VT1–VT2, потім VT3–VT4. Коли відкриті VT1–VT2, енергія споживається від мережі й забезпечується вказана полярність напруги на навантаженні. Часові діаграми роботи наведено на рис. 5.8.

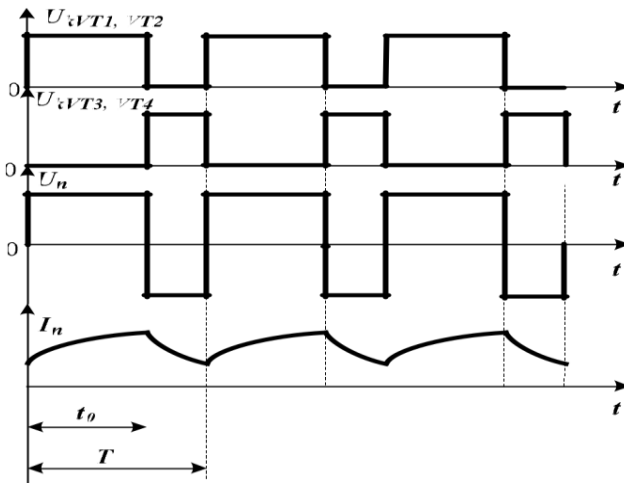


Рисунок 5.8 – Часові діаграми роботи ШПІ при симетричному керуванні

При закритті ключів VT1–VT2 і відкритті VT3–VT4 (момент часу  $t_0$ ) напруга на навантаженні реверсується, а струм навантаження за рахунок ЕРС самоіндукції зберігає свій напрямок і замикається через зворотні діоди транзисторів VT3–VT4 на джерело живлення. Потім у момент часу  $T$  знову відкривається перша пара транзисторів VT1–VT2. Змінюючи інтервали позитивного та негативного імпульсів напруги, можна регулювати значення й полярність напруги на навантаженні.

У ШПІ із симетричним керуванням середня напруга  $U_n$  на виході дорівнює нулю, коли  $=0,5$ .

Недоліком симетричного регулювання є зміна знака миттєвих значень вихідної напруги та істотні пульсації напруги на навантаженні, що потребує досить великої індуктивності згладжувального дроселя. Тому такий спосіб керування застосовується в перетворювачах невеликої потужності.

Пульсації можуть бути зменшеними, якщо на інтервалі  $t_{\text{мп}2}$  створюється нульовий рівень (пауза) вихідної напруги, і тому вона має форму однополярних імпульсів позитивної чи негативної полярності. Таку форму напруги на навантаженні дістають за несиметричного керування. При цьому для створення вихідної регульованої напруги певної полярності ключів в одній колонці моста транзистори відкриваються по чергово в протифазі, а в іншій – один транзистор постійно відкритий, а інший – закритий. Часові діаграми роботи реверсивного перетворювача з несиметричним законом керування наведено на рис. 5.9.

Так, для створення вихідної напруги із зазначеною полярністю постійно відкритим має бути ключ VT2, а закритим – VT3. Керуючим ключем є VT1, який у протифазі працює з ключем VT4. Для активно-індуктивного навантаження при відкритому ключі VT1 (на інтервалі  $0 \leq t \leq t_0$ ) струм споживається від джерела живлення і тече через ключі VT1 та VT2.

Під час закриття VT1 у момент часу  $t_0$  (у цей час отримує відкриваючий імпульс також ключ VT4) струм навантаження, зберігаючи свій напрям, замикається через ключ VT2, спільну мінусову шину та зворотний діод тиристора VT4. Напруга на навантаженні при цьому дорівнює нулю (інтервал  $t_0 \leq t \leq T$ ). Черговий імпульс вихідної напруги створюється за повторного відкриття VT1. Для забезпечення напруги протилежної полярності в протифазі керуються ключі VT2 та VT3, а постійно відкритим є ключ VT4. Тоді керуючим ключем є VT3, а розрядний контур створюється через транзистор VT4, зворотний діод тиристора VT2 та мінусову шину.

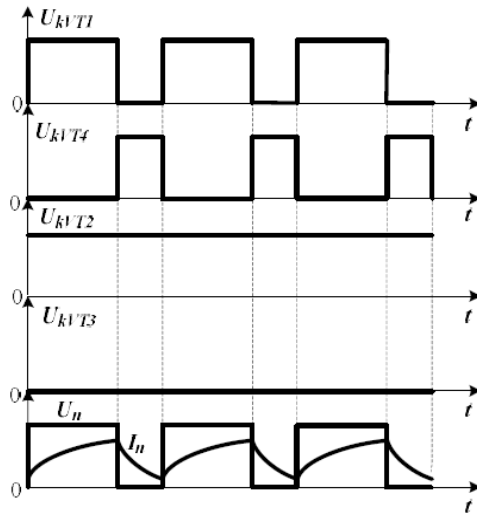


Рисунок 5.9 – Часові діаграми роботи ШП при несиметричному керуванні

За почергового керування відкриваються два ключі, розташовані на протилежних боках моста, тоді як друга пара ключів постійно закрита. Якщо, наприклад, керування здійснюється ключами VT1 і VT2, то ключі VT3 та VT4 закриті. При цьому ключі VT1 і VT2 відкриваються не одночасно, як за симетричного керування, а зі зсувом у часі, що дорівнює періоду вихідних імпульсів напруги перетворювача. Таким самим інтервалом визначається й момент закриття цих ключів. У результаті частота роботи кожного ключа у два рази менша, ніж частота вихідної напруги. Часові діаграми роботи перетворювача з почерговим керуванням наведено на рис. 5.10.

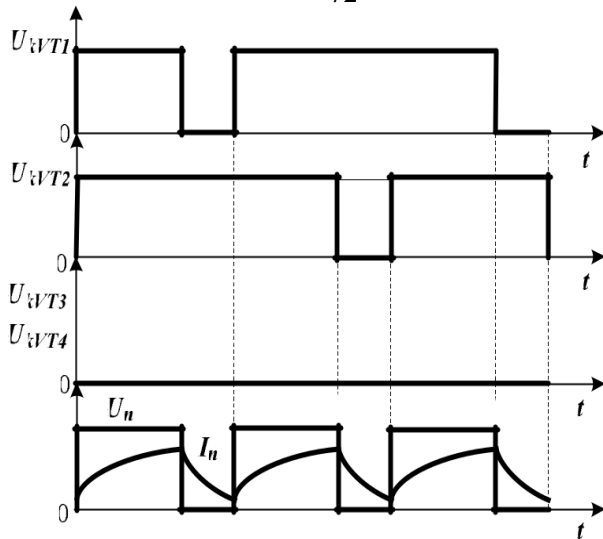


Рисунок 5.10 – Часові діаграми роботи ШПІ при почерговому керуванні

У ті моменти, коли, наприклад, відкриті обидва ключі VT1, VT2, енергія споживається від джерела живлення й забезпечується зазначена полярність на навантаженні. У разі закриття ключа VT1 енергія, накопичена в індуктивності навантаження, розряджається через відкритий ключ VT2, спільну мінусову шину та зворотний діод транзистора VT4. Напряга на навантаженні в цей час дорівнює нулю. Потім у момент T знову відкривається ключ VT1 і навантаження підключається до джерела живлення, але після закриття ключа VT2 розряд енергії проходить контуром VT1 – плюсова шина – зворотний діод транзистора VT3, забезпечуючи нуль напруги на виході. При реверсі вихідної напруги аналогічно працюють ключі VT3–VT4 та зворотні діоди транзисторів VT1–VT2.

Отже, за почергового керування вихідна напруга має вигляд однополярних імпульсів певної полярності, як і за несиметричного керування. В обох випадках зменшуються пульсації вихідної напруги й габарити згладжувальних дроселів у колі навантаження.

Таким чином, за симетричного та несиметричного керування забезпечується двосторонній обмін енергією між джерелом живлення й навантаженням, а за почергового керування лише в одному напрямку – від джерела живлення до навантаження.

Середнє значення вихідної напруги реверсивних перетворювачів постійної напруги визначається за формулою:

$$U_n = U_d(2\gamma - 1), \quad (5.4)$$

або

$$U_n = U_d \frac{t_{имп1} - t_{имп2}}{T}, \quad (5.5)$$

де  $t_{имп1}$ ,  $t_{имп2}$  – тривалість імпульсу позитивної та негативної напруг відповідно.

Під час розробки системи керування напівмостовими та мостовими перетворювачами необхідно, щоб сигнали схеми керування мали захисну паузу (dead time). Це пов'язано з тим, що в момент подачі закриваючого імпульсу транзистор VT1 не встигає одразу закритися, а в цей момент транзистор VT2 відкривається. У результаті через обидва транзистори тече наскрізний струм, який подібний до струму короткого замикання, та моментально виводить із ладу обидва транзистори. У зв'язку з цим схема керування повинна «рознести» моменти комутації силових ключів (рис. 5.11).

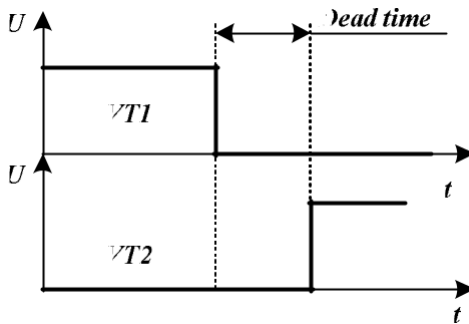


Рисунок 5.11 – Спосіб захисту від наскрізних струмів

У двотактному режимі роботи мікросхема формує захисну паузу у вихідних сигналах керування за рахунок компаратора регулювання мертвого часу, що має зсув 120мВ та обмежує мінімальний «мертвий» час на виході близько 4 % тривалості циклу пилкоподібної напруги. У результаті максимальна тривалість робочого циклу складе 96 % у тому випадку, якщо вивід 13

заземлений, і 48 % – у тому випадку, якщо на вивід 13 подана опорна напруга.

Збільшити тривалість «мертвого» часу на виході генератора можна, подаючи на вхід регулювання мертвого часу (4) постійну напругу в діапазоні 0..3,3 В.

ШІМ–компаратор регулює ширину вихідних імпульсів від максимального значення, визначеного входом регулювання мертвого часу до нуля, коли напруга зворотного зв'язку змінюється від 0,5 до 3,5 В. Значення величини «мертвого» часу може бути розраховано за формулою:

$$D_C = 45 - \left( 80 / \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right). \quad (5.6)$$

На базі мостової схеми імпульсного перетворювача може бути побудований автономний інвертор з формованою сигналом вихідною напругою.

На зображено функціональну схему силового перетворювача керуваного джерела живлення, що забезпечує реалізацію практично довільної форми струму на навантаженні.

Принцип дії даного перетворювача ґрунтується на «струмовому коридорі», за яким струм навантаження коливається навколо заданого сигналу керування. Перемикання силових ключів перетворювача здійснюється за допомогою перемикання компаратора К. У свою чергу, стан сигналу на виході компаратора залежить від знака відхилення реального сигналу струму навантаження від сигналу завдання.

У поданій системі сигнал завдання за допомогою суматора (рис. 5.12) додається до сигналу струму, що тече через навантаження.

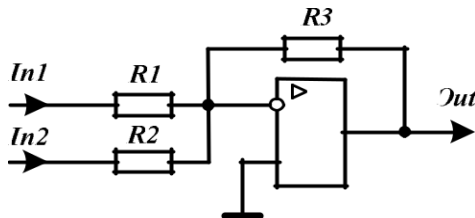


Рисунок 5.12 – Суматор на операційному підсилювачі

Оскільки вихідний сигнал суматора є аналоговим сигналом, то для перетворення його на дискретну форму доцільно застосовувати інтегральні компаратори (рис. 5.13). На один з входів компаратора подається вхідний сигнал, на другий – опорна напруга. Під час перевищення вхідним сигналом опорної напруги відбувається перемикання компаратора. Для збільшення перешкодостійкості схеми до неї вводять позитивний зворотний зв'язок, при цьому у вихідній характеристиці компаратора з'являється гістерезис.

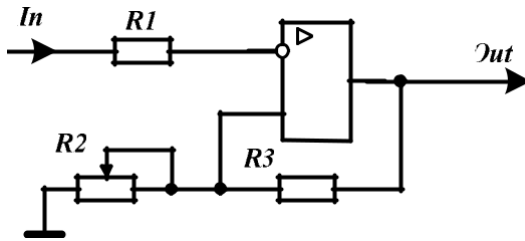


Рисунок 5.13 – Інтегральний компаратор з гістерезисом

Вихідні імпульси з компаратора надходять на вхід розподільвача імпульсів (рис. 5.14), що виконується на базі логічних елементів. Елементи  $VD_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  та  $VD_2$ ,  $R_2$ ,  $C_2$  формують захисну паузу у вихідних сигналах керування транзисторами півмоста.

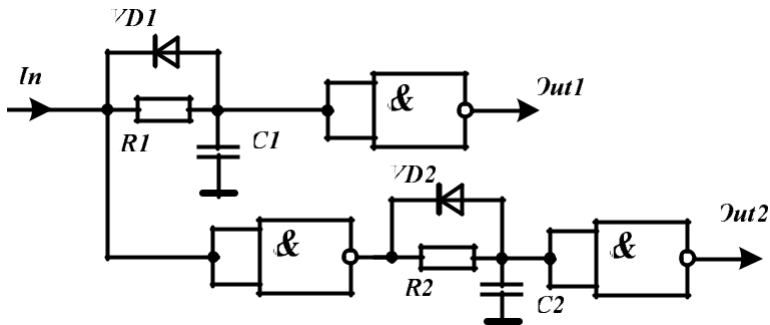


Рисунок 5.14 – Розподільвач імпульсів

### 5.3 Схемотехніка силових елементів імпульсних перетворювачів

Силова частина перетворювача може бути побудована на основі UltraFast IGBT ключа. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – є біполярним р-п-р-транзистором, керованим від порівняно низьковольтного MOSFET-транзистора (MOSFET – польові транзистори з ізольованим затвором) з індукованим каналом (рис. 5.15).

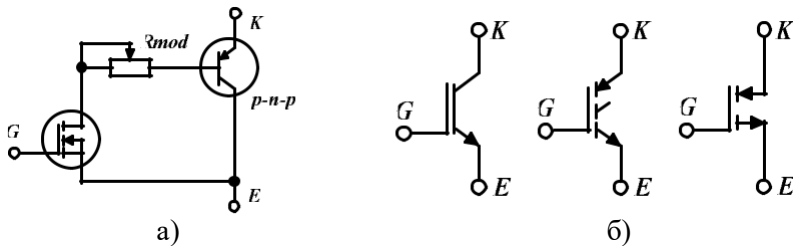


Рисунок 5.15 – Еквівалентна схема IGBT транзистора (а) та його умовно-графічні позначення (б).

IGBT є компромісним технічним рішенням, що дозволило об'єднати позитивні якості як біполярних (малий спад напруги у відкритому стані, високі робочі напруги), так і MOSFET-транзисторів (мала потужність керування, високі швидкості комутації).

У той же час втрати в них зростають пропорційно струму, а не квадрату струму, як у польових транзисторів. Максимальна напруга IGBT обмежена тільки технологічним пробоем, і вже сьогодні випускаються прилади з робочою напругою до 4000 В, при цьому залишкова напруга на транзисторі у ввімкненому стані не перевищує 2..3 В.

На сьогодні відома велика кількість способів керування ключами перетворювальних пристроїв, що вирізняються складністю технічних рішень. Узагалі до схем керування затвором IGBT транзисторів висуваються наступні вимоги:

- напруга затвора при відключенні повинна бути на 15–20 В вища за напругу шини живлення;

- драйвер повинен керуватись логічним сигналом, зв'язаним із сигнальною шиною загального живлення транзистора;
- потужність, що розсіює схема керування, повинна бути малою, порівняно із загальною потужністю розсіювання;
- схема керування повинна забезпечувати достатні струми перезаряду кола затвора, що гарантують високі динамічні характеристики транзистора.

Найбільш широкого розповсюдження із зазначених методів керування IGBT набув метод з використанням драйвера з бутстрепним каскадом живлення.

Особливу увагу слід приділити вибору елементів бутстрепного каскаду, що представляється діодом  $VD_b$  та ємністю  $C_b$ . Заряд, накопичений у бутстрепній ємності, імітує “плаваюче” джерело живлення половини драйвера, що стосується верхнього ключа.

Величина бутстрепної ємності може бути розрахована за виразом:

$$C_b = 15 \times \frac{2 \left[ 2Q_g + \frac{I_{qbs}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{ls}}, \quad (5.7)$$

де  $Q_g$  – величина заряду затвора,  $I_{qbs}$  – споживаний струм вихідного каскаду мікросхеми в статичному режимі,  $f$  – частота імпульсів ШІМ,  $Q_{ls}$  – циклічна зміна заряду драйвера,  $I_{cbs(leak)}$  – струм витoku бутстрепної ємності,  $V_{cc}$  – напруга живлення системи керування,  $V_f$  – спад напруги на бутстрепному діоді,  $V_{ls}$  – спад напруги на транзисторі нижнього рівня в півмостовій схемі.

Установлений бутстрепний діод  $VD_b$  має бути високовольтним, його зворотна напруга визначається напругою живлення силової шини. Окрім того, для нормальної роботи в режимі ШІМ він має бути швидкодіючим, мати малий зворотний струм, також повинен мати гарні характеристики зворотного відновлення.

Підключення драйверів до вхідних кіл силових транзисторів зводиться до вирішення питань конструктивного характеру, для мінімізації паразитних індуктивностей монтажу, а також використання додаткових схемних рішень – для регулювання швидкості перемикання силового ключа.

Регулювання швидкості перемикання транзисторів досягається шляхом увімкнення резистора послідовно між виходом драйвера та входом ключа. Зазвичай значення опору даного резистора наводиться в довідковій літературі фірми-виробника для кожного типу силового ключа.

При використанні IGBT для задач керування двигунами необхідним є роздільне керування швидкістю вмикання та вимикання, за рахунок чого зменшується кидок струму при пуску. У даному разі використовують однонапрямлені додаткові кола чи драйвери з роздільними каналами керуючих сигналів для ввімкнення та вимкнення (рис. 5.16).

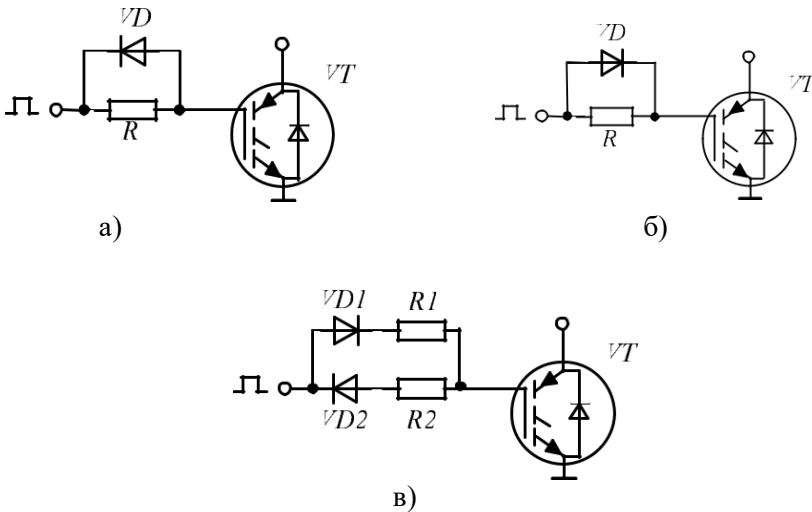


Рисунок 5.16 – Обмеження швидкості перемикання транзисторів: при ввімкненні (а), при вимкненні (б), при роздільній процесів увімкнення і вимкнення (в)

Для захисту IGBT-транзисторів від комутаційних перенапруг у колі колектор–емітер варто застосовувати захисні (снаберні) RC- та RCD-кола (рис. 5.17), установлені безпосередньо на силових вентилях.

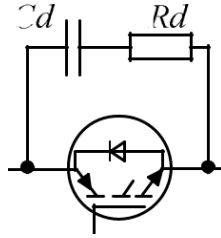


Рисунок 5.17 – Снаберне RC-коло транзистора

Для розрахунку захисних кіл транзисторів задаються приростом напруги  $U_{Cd}$  на ємності за час  $t_{Cn}$ :

$$\Delta U_{Cd} = (0,05 \div 0,15) U_{Kmax}, \quad (5.8)$$

де  $U_{Kmax}$  – максимальна напруга на ключі,  $t_{Cn}$  – час закриття транзистора (час спрацьовування), с.

Вибравши величину струму заряду  $I_{Cd} = (0.1-0.3)I_{Kmax}$ , визначають значення захисної ємності  $C_d$ :

$$C_d = I_{Cd} t_{Cn} / \Delta U_{Cd}, \quad \Phi. \quad (5.9)$$

При виборі типу конденсатора враховується, що максимальна напруга на конденсаторі може досягати значення  $U_{Cdmax} \approx U_{Kmax}$ .

Зважаючи, що конденсатор розряджається через резистор  $R_d$ , максимальне значення струму розряду ємності вибираємо рівним струму заряду  $I_{Cd}$ , у результаті знаходимо опір резистора  $R_d$ :

$$R_d = U_{Kmax} / I_{Cd}, \quad \text{Ом.} \quad (5.10)$$

Перевірка умови здійснення повного розрядження ємності:

$$t_{umin} \geq 3\tau_d \quad \text{чи} \quad R_d \leq \gamma_{min} / 3f_{\Pi} C_d. \quad (5.11)$$

де  $\tau_d = R_d C_d$  – стала часу захисного кола, с;  $\gamma_{min}$  – мінімальна шпаруватість імпульсів;  $f_{\Pi}$  – частота перетворення, Гц.

Потужність резистора захисного кола розраховується за виразом:

$$P_{Rd} = C_d U^2 f_{\Pi} / 2, \text{ Вт. (1.12)}$$

Для зниження пульсацій випрямленої напруги у колі постійного струму доцільно використовувати ємнісний фільтр С . Ємність електролітичного конденсатора С вибирається за умови допустимих пульсацій напруги кола постійного струму на рівні 10..20 % від номінальної напруги цього кола та залежить від навантаження ШПІ.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода : учебник для вузов / В. М. Терехов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
2. Попович М. Г. Електромеханічні системи керування та електроприводи : навч. Посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
3. Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные. ГОСТ 26.011-80 – М.: Издательство стандартов, 1982. 24 С.
4. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
5. Келим Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления : учебное пособие [для студентов учреждений среднего профессионального образования] / Ю. М. Келим. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2002. – 384 с.
6. Копылов И. П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков. – Т. 1. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. Александров Н. Н. Электрические машины и микромашины / Н. Н. Александров. – М. : Колос, 1983. – 384 с.
8. Свириденко П. А. Основы автоматизированного электропривода : учебное пособие / П. А. Свириденко, А. Н. Шмелев. – М. : Высш. школа, 1970. – 392 с.
9. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988 – 385 с.
10. Нефедов А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги : в 12 т. / А. В. Нефедов. – Т. 8 – М. Радио-Софт, 2000. – 265 с.
11. Принцип работы инкрементального энкодера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.megasensor.com/ugolpovorota/glossarij/inkrementalnye\\_ekodery/princip\\_rabotyinkrementalnogo\\_ekodera](http://www.megasensor.com/ugolpovorota/glossarij/inkrementalnye_ekodery/princip_rabotyinkrementalnogo_ekodera).
12. Принцип работы абсолютного энкодера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.radioradar.net/articles/scientific\\_technical/encoder.html](http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/encoder.html)

13. Дорожовець М. М. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем : навч. посібник /М. М. Дорожовець, О. В. Івахів, В. О. Мокрицький. – Львів :Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 304 с.
14. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника /М. Л.Бараночников. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
15. Системы автоматизированного управления электро-приводами : учебное пособие / [Ю. Н. Петренко, Г. И. Гульков, Е. П. Раткевич, О. Л. Симоненкова]. – Мн. : Новое знание, 2004. – 384 с.
16. Данилов А. Современные промышленные датчики тока/ А. Данилов // Современная электроника ([www.soel.ru](http://www.soel.ru)). – 2004.– С. 26-35.
17. Чернобров Н. В. Релейная защита : учебное пособие для техникумов / Н. В. Чернобров. – [Изд. 5-е перераб. и доп.].– М. : Энергия, 1974. – 680 с.
18. Калинов А. П. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий / А. П. Калинов, А. И. Гладырь // Щоквартальний науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Вип. 1. – Кременчук : КДПУ, 2007. – С. 14–19.
19. Электронный ресурс: <http://www.holit.ua/>
20. Электронный ресурс: <http://www.lcard.ru/>
21. Калинов А. П. Измерение токов и напряжений асинхронного двигателя в составе частотно регулируемого электропривода/ А. П. Калинов, О. С. Воробейчик, В. О. Мельников // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Випуск 1 (11). – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. – С. 110–117.
22. Минкин С. Б. Позисторы / С. Б. Минкин, А. Г. Шашков. – М.: Энергия, 1973. – 89 с.
23. Машины электрические вращающиеся. Встроенная температурная защита. Термодетекторы и вспомогательная аппаратура управления, используемые в системах температурной защиты. (МЭК 34–11–2) ГОСТ 27917-88. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 36 с.
24. Пьезоэлектрические однокомпонентные акселерометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.oaopiezo.com/vtk.html> [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.montagelectro.com/izmeren-21.html>.

26. Денисенко В. Заземление в системах промышленной автоматизации. Часть 2. / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – № 3/2006. – С. 76–92.
27. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт – М. : Мир, 1979. – 318 с.
28. Правила устройства электроустановок (ПУЭ).[6-е издание.]. – М. : Энергосервис, 2002. – 608 с.
29. Денисенко В., Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации / В.Денисенко, А. Халявко // Современные технологии автоматизации № 1/2001. – С. 68–75.
30. Барнс Д. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / Д. Барнс. – М. : Мир, 1990. – 239 с.
31. Лукутин Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении : учебное пособие / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 144 с.
32. Белов С. Симисторы (триаки) от Philips Semiconductors /С. Белов // Современная электроника. – № 1, 2006. – С. 14–16.
33. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи:семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. –[Изд. 2-е, перераб. и доп.]. – М. : Издательский дом Додэка–XXI, 2005. – 384 с.
34. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках/ [М. И. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либер и др.]. – М.:Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
35. Комплексные тиристорные электроприводы : Справочник/ [И. Х. Евзеров, А. С. Горобец, Б. И. Мошкович, под ред. В. М.Перельмутера]. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.
36. Руденко В. С. Основы промышленной электроники /В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 400 с.
37. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике / И. М Чиженко. – К.; Техніка, 1978. – 447 с.
38. Голубев М. И. Тиристорные электроприводы / М. И. Голубев. – Издательское отделение «Вища школа», 1976. – 104 с.
39. Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. – [2-е изд., испр. и доп.]. – М. : Издательский дом «Додэка–XXI», 2001. – 608 с.
40. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания.

Схемотехника и расчет : учебное пособие / Е. Н. Гейтенко. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с

41. Калінов А. П. Ідентифікація електромагнітних параметрів асинхронного двигуна при використанні низькочастотного живлення / А. П. Калінов., В. О. Мельников // Технічна електродинаміка.

Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки» – Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2010. – частина 2/2010. – С. 138–143.

42. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями : учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

43. Колпаков А. Характеристики и особенности применения драйверов Mosfet и IGBT/ А. Колпаков // Компоненты и технологии. – № 3. – 2003. – 56-64 С.

44. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – Москва : Техносфера, 2006. – 632 с.

45. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 416 с.

46. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

47. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

48. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 : учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА, 2001. – 320 с.

49. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК /