

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»  
Завідувачка кафедри  
\_\_\_\_\_ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ  
\_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня «магістр»**

за спеціальності 171 «Електроніка» освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **ТИРИСТОРНІ СХЕМИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ  
ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ СТРУМІВ І  
НАПРУГ**

Здобувача групи ЕП.м-32 Федоренка Івана Володимировича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Іван ФЕДОРЕНКО

Керівник: доцент кафедри електроніки,  
загальної та прикладної фізики,  
к.ф.-м.н., доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 «Електроніка», освітньо-професійна програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувачка кафедри  
Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ  
«04» листопада 2024 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**Федоренка Івана Володимировича**

1. Тема роботи «Тиристорні схеми в системах електроенергетики для безконтактного вимірювання високих струмів і напруг»

затверджена наказом по університету від «01» листопада 2024 р., № 1130-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета):

На території України відбуваються активні воєнні дії і забезпечення цілісності енергосистеми є дуже важливим завданням. Безконтактний контроль параметрів електричних мереж є пріоритетом на сьогоднішній день. Такий моніторинг може бути забезпечений з допомогою використання тиристорних схем в системах електроенергетики для безконтактного вимірювання високих струмів і напруг. Також ще одною перевагою використання тиристорних схем є високий рівень точності вимірювань з мінімальним втручанням в електричну систему. Розроблений стенд для безконтактного вимірювання може бути використаний для експериментальних досліджень в галузі автоматизації та моніторингу енергосистем.

Метою роботи є розробка та дослідження тиристорних схем для безконтактного вимірювання струмів та напруг з високою точністю та аналіз доцільності їх застосування в сучасних енергосистемах.

4. Зміст текстової частини роботи (перелік питань, які необхідно розробити):

1. Розділ 1. Сучасні методи вимірювання великих струмів і напруг в енергетиці. Літературний огляд

2. Розділ 2. Тиристори як елементи вимірювальних систем.
3. Розділ 3. Безконтактний вимірювач струму та напруги.
4. Висновки.
5. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайди № 1, 2 – Вступ. Мета та актуальність.

Слайди № 3-7 – Сучасні методи вимірювання великих струмів і напруг в енергетиці. Літературний огляд

Слайди № 8-9 – Тиристори як елементи вимірювальних систем.

Слайди № 10-11 – Безконтактний вимірювач струму та напруги. Таблиці та залежності параметрів

Слайд № 12 – Висновки

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан виконання роботи
1	Аналіз літературних даних	до 04.11.2024 р.	Вик.
2	Освоєння методики проведення розрахунків і моделювання.	до 25.11.2024 р.	Вик.
3	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 01.12.2024 р.	Вик.
4	Попередній захист роботи.	12.12.2024 р., 10 <sup>05</sup> (онлайн)	Вик.
5	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2024 р. 11 <sup>40</sup>	Вик.

Здобувач \_\_\_\_\_

Іван ФЕДОРЕНКО

Керівник \_\_\_\_\_

Юрій ШАБЕЛЬНИК

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 34 сторінках, зокрема, містить 11 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 20 найменувань.

Тема магістерської роботи має велике значення в контексті сучасного розвитку енергосистем. Вимірювання високих струмів та напруг в електроенергетичних системах є одним з найважливіших завдань для забезпечення надійної роботи електричної мережі, захисту обладнання та мінімізації аварійних ситуацій. Традиційні методи вимірювання часто передбачають безпосередній контакт з елементами електромережі, що не тільки підвищує ризик для технічного персоналу, але й може мати негативний вплив на саме вимірювальне обладнання через високі напруги та струми.

Використання тиристорних схем для безконтактних вимірювань усуває ці недоліки і забезпечує високий рівень точності вимірювань з мінімальним втручанням в електричну систему. Тиристири - це напівпровідникові пристрої, які можуть керувати перемиканням, що робить їх ідеальними для використання в електричних вимірювальних системах, де важливо уникати фізичного контакту з високовольтними компонентами.

Метою роботи є розробка та дослідження тиристорних схем для безконтактного вимірювання струмів та напруг з високою точністю та аналіз доцільності їх застосування в сучасних енергосистемах.

Використано методи теоретичного аналізу для дослідження фізичних процесів, що лежать в основі роботи тиристорної схеми, математичного моделювання для оцінки технічних характеристик схеми та імітаційного моделювання для перевірки працездатності розробленої системи. Експериментальні дані були отримані з наукових джерел для перевірки результатів моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена тиристорна схема може бути використана для безконтактного вимірювання великих струмів та напруг в реальній енергосистемі. Це дозволяє здійснювати безпечний моніторинг стану електромережі та підвищує надійність її роботи. Рекомендації щодо впровадження розробленої схеми можуть бути використані для модернізації існуючих вимірювальних систем в промисловості та енергетиці.

Отримані результати та сам пристрій можна використати при розробці лабораторних та розрахункових робіт з дисципліни «Інтегральна і функціональна мікроелектроніка»

**Ключові слова:** ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН, ЕЛЕКТРОННА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, НАПРУГА, ТИРИСТОР, СТРУМ.

## ЗМІСТ

<b>РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИКИХ СТРУМІВ І НАПРУГ В ЕНЕРГЕТИЦІ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....</b>	<b>6</b>
1.1 Контактні методи вимірювання .....	6
1.2 Безконтактні методи вимірювання .....	10
1.2.1 Методи на основі Холлівського ефекту .....	14
1.2.2 Електростатичні та електромагнітні методи .....	16
<b>РОЗДІЛ 2 ТИРИСТОРИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ...</b>	<b>17</b>
2.1 Загальні відомості про тиристори .....	17
2.1.1 Визначення та класифікація тиристорів .....	17
2.1.2 Принцип роботи тиристорів .....	20
2.1.3 Основні електричні параметри тиристорів .....	20
2.2 Особливості використання тиристорів у вимірювальних схемах .....	23
<b>РОЗДІЛ 3 КОНТАКНИЙ ВИМІРЮВАЧ СТРУМУ ТА НАПРУГИ НА ОСНОВІ ТИРИСТОРІВ .....</b>	<b>25</b>
3.1 Вимірювання струму .....	25
3.2 Вимірювання напруги .....	26
3.3 Конструктивні особливості .....	28
3.4 Застосування в електроенергетиці .....	29
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>32</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>33</b>

# РОЗДІЛ 1

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИКИХ СТРУМІВ І НАПРУГ В ЕНЕРГЕТИЦІ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Контактні методи вимірювання

В енергетиці контактні методи широко використовуються для вимірювання високих струмів і напруг, які вимагають фізичного підключення до елементів системи, що знаходяться під напругою. Найпоширенішими контактними методами є шунтові вимірювання та вимірювання за допомогою трансформаторів струму.

Вимірювання опору шунта є одним з найпоширеніших методів визначення струму в електричному ланцюзі і базується на використанні спеціальних резисторів (шунтів), які вставляються в електричний ланцюг і створюють пропорційне падіння напруги. Це падіння напруги може бути використане для визначення струму через шунт за допомогою закону Ома:

$$I = \frac{U}{R},$$

де  $I$  – струм,

$U$  – напруга на шунті,

$R$  – його опір.

Зазвичай шунти виготовляються з таких матеріалів, як марганець або константан, які мають низький температурний коефіцієнт опору і чий опір залишається постійним при нагріванні. Шунт може бути інтегрований в конструкцію вимірювального приладу або використовуватися як незалежний компонент в схемі. Зазвичай вони підключаються до низькочастотних ланцюгів постійного або змінного струму.

Основою вимірювання шунтування є шунтовий резистор, який підбирається таким чином, щоб падіння напруги було невеликим навіть при великих струмах. Це падіння напруги, хоча і невелике, може бути точно виміряне за допомогою

відповідного обладнання, такого як мікровольтметр або спеціальний підсилювач. Отже, точність визначення струму залежить не тільки від самого шунта, але й від точності вимірювального обладнання.

Шунти (рис. 1.1) доступні в різних конструкціях і розмірах залежно від необхідного діапазону струму, умов експлуатації та вимог до точності. У промисловому застосуванні шунти використовуються для струмів від декількох ампер до декількох тисяч ампер [1].

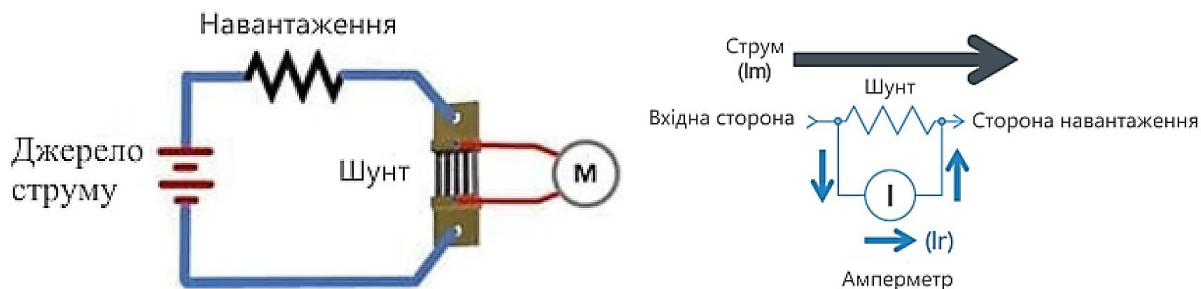


Рисунок 1.1 – Схема застосування шунта. Адаптовано із роботи [1]

Переваги та недоліки даного методу вимірювання зазначені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки шунтових вимірювань [2]

Переваги	Недоліки
Прецизійні резистори в шунтах забезпечують високу точність вимірювань, особливо для постійного струму.	Нагрівання при великих струмах спричиняє зміну опору шунта, що знижує точність вимірювань.
Шунти легко інтегруються у вимірювальні системи без складної електроніки, що знижує витрати.	Великий струм через шунт спричиняє значне тепловиділення, що змінює характеристики елемента.
Шунти підходять для вимірювання як у низьковольтних, так і високовольтних колах.	Потреба прямого підключення до електричного кола може бути небезпечною.

	Пил, вологість і зовнішні умови можуть впливати на роботу шунта, особливо в промислових умовах.
--	---

Шунтові вимірювання широко застосовуються в промисловості, енергетиці та електротранспорті. У системах енергомоніторингу шунти забезпечують точний контроль споживання струму на кожному етапі розподілу енергії, що важливо для оптимізації енергетичних процесів і зниження витрат. На промислових підприємствах шунтові методи використовуються для моніторингу стану обладнання, запобігання перевантажень і контролю режимів роботи електродвигунів та іншого споживчого обладнання.

Шунтові вимірювання є важливим і надійним методом вимірювання великих струмів у різних умовах. Незважаючи на деякі недоліки, пов'язані з температурним впливом і необхідністю безпосереднього контакту, він забезпечує високу точність і стабільність результатів. Хоча цей метод широко використовується в енергосистемах, новіші безконтактні методи, такі як тиристорні схеми, можуть бути більш ефективними і пропонують додаткові переваги з точки зору електричної ізоляції та захисту навколишнього середовища [2].

Трансформатори струму (ТС) (рис. 1.2) є одним з основних інструментів, що використовуються для вимірювання великих струмів в енергосистемах. Вони знижують значення високих струмів до безпечного рівня і забезпечують точне вимірювання струму без прямого контакту з високовольтними лініями. Трансформатори струму працюють за принципом електромагнітної індукції: струм в первинній обмотці трансформатора струму створює магнітне поле, яке індукує струм у вторинній обмотці. В результаті спадаючий струм у вторинній обмотці пропорційний струму в первинній обмотці, і його значення можна виміряти за допомогою звичайних вимірювальних приладів.

Переваги та недоліки даного методу вимірювання наведені у таблиці 1.2.



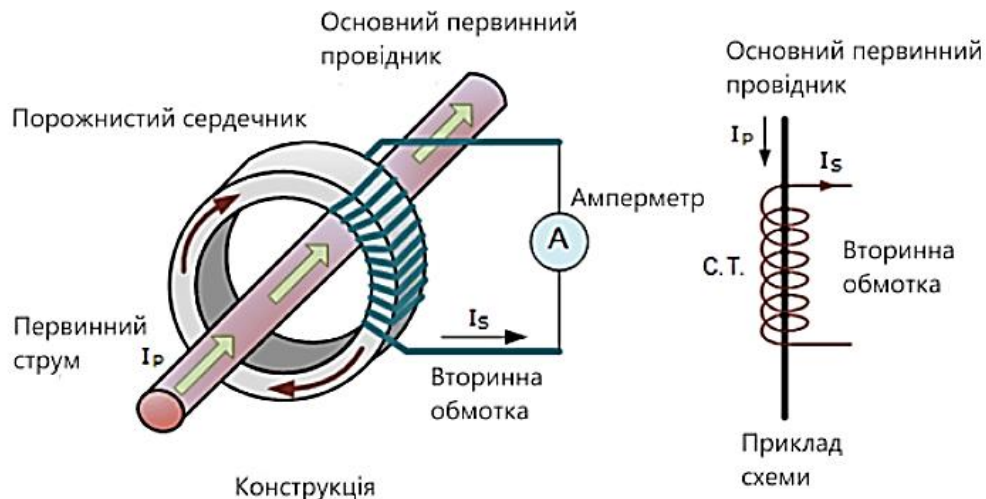


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд трансформатора струму. Адаптовано із роботи [3]

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки трансформаторів струму [2]

Переваги	Недоліки
Дозволяє вимірювати значні струми без ризику пошкодження вимірювального обладнання.	Зниження точності вимірювань при відхиленні від оптимальної частоти (50 або 60 Гц).
Забезпечує електричну ізоляцію між високовольтною частиною системи та вимірювальною апаратурою.	Зміни навантаження або різкі коливання струму можуть впливати на точність вимірювань.
Легко інтегруються у вже існуючі енергетичні мережі та використовуються для контролю обладнання.	Ефект залишкового магнетизму може впливати на точність при малих струмах.
Забезпечують стабільність і точність для довготривалого моніторингу струмів.	Потребують значних розмірів і ваги для високовольтних застосувань, що ускладнює встановлення.

Таким чином, трансформатори струму є важливим і поширеним компонентом вимірювальних систем енергосистем, але вони мають певні обмеження, які необхідно враховувати при виборі методу вимірювання; розуміння переваг і недоліків ТС може допомогти вам прийняти обґрунтоване рішення про їх використання. Їх також можна порівняти з іншими методами, такими як безконтактні технології, які можуть забезпечити альтернативні рішення для вимірювання великих струмів в сучасних енергосистемах [2].

## 1.2 Безконтактні методи вимірювання

Безконтактні методи вимірювання струмів і напруг в енергосистемах дозволяють уникнути прямого контакту з високовольтними елементами і забезпечують додаткову безпеку та ізоляцію. Розглянемо основні види безконтактних методів, їхні принципи роботи, переваги та недоліки.

Оптичні методи вимірювання струмів і напруг використовують явища, що виникають при взаємодії світла з електричними та магнітними полями. Оскільки фізичний контакт з об'єктом вимірювання відсутній, ці методи забезпечують високий рівень електричної ізоляції, що важливо для високовольтних енергосистем. Найпоширенішими оптичними методами є ефекти Фарадея та Поккельса.

Ефект Фарадея – це обертання площини поляризації світла, що проходить через середовище під впливом магнітного поля. З моменту відкриття Майклом Фарадеєм у 1845 році це явище є одним з найважливіших безконтактних методів вимірювання сили струму. Коли струм протікає через провідник, навколо нього створюється магнітне поле, яке взаємодіє зі світлом у певному середовищі, наприклад, у спеціальному кристалі або склі, змінюючи напрямок поляризації світлових хвиль (рис. 1.3). Ступінь повороту поляризації пропорційний силі струму, що протікає через провідник.

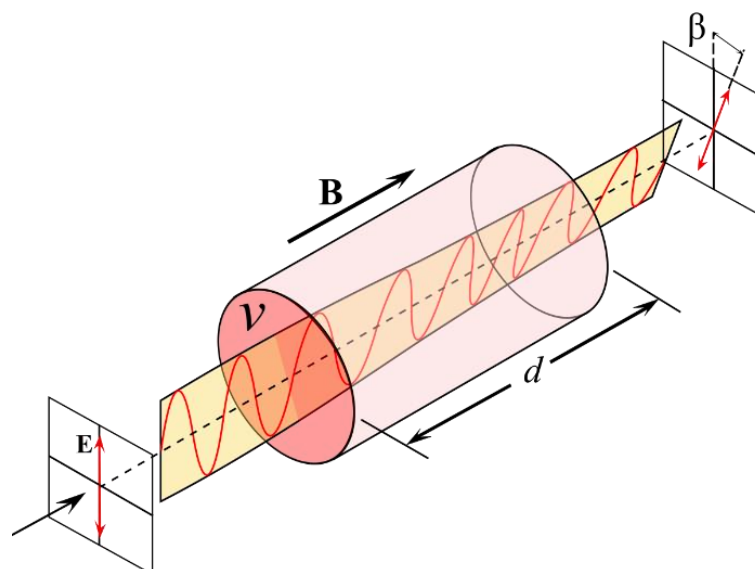


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення обертання площини поляризації в магнітному полі. Адаптовано із роботи [4]

Цей метод використовується в оптичних трансформаторах струму і особливо корисний для вимірювання великих струмів змінного і постійного струму, наприклад, в лініях електропередач. Зміну поляризації світла можна легко відстежувати за допомогою спеціальних датчиків, що надає методу високий ступінь точності та стабільності [4].

В таблиці 1.3 наведено переваги та недоліки використання ефекту Фарадея для вимірювання струмів і напруг.

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки ефекту Фарадея [5]

Переваги	Недоліки
Висока точність вимірювань завдяки здатності фіксувати невеликі зміни поляризації.	Складність налаштування оптичних систем.
Відсутність електричного контакту, що мінімізує ризик електричних впливів і підвищує безпеку вимірювального обладнання.	Висока вартість обладнання та компоненти, такі як поляризатори та сенсори.

Широкий діапазон застосування, зокрема для високовольтних ліній передачі.	
---	--

Ефект Поккельса – це вимірювання напруги, засноване на зміні показника заломлення світла в матеріалі під впливом електричного поля. Це явище відбувається в деяких кристалах (наприклад, ніобат літію, борат барію), в яких швидкість світла, що проходить через кристал, змінюється під впливом електричного поля. Таким чином, електричне поле, створене напругою, змінює напрямок поляризації світлової хвилі (рис. 1.4). Це дає можливість перетворити рівень напруги в зміну оптичних властивостей матеріалу, які потім можна виміряти.

Цей метод використовується для вимірювання високих напруг без підключення до струмоведучих компонентів. Спеціальні оптичні датчики можуть відстежувати зміни показника заломлення та поляризації світла і таким чином вимірювати рівень напруги з високою точністю [6].

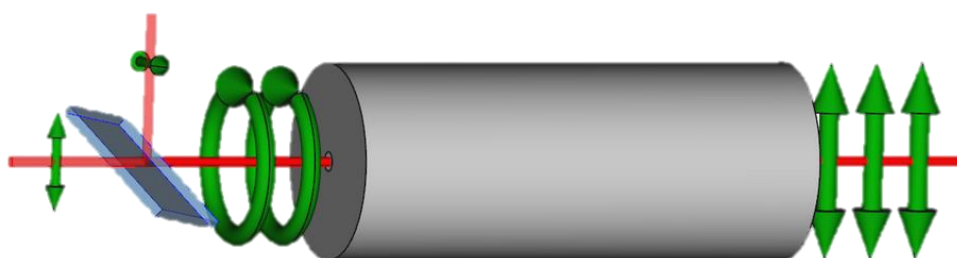


Рисунок 1.4 – Схема осередку Поккельса, що модулює поляризацію світла.

Адаптовано із роботи [6]

В таблиці 1.4 наведено переваги та недоліки використання ефекту Поккельса для вимірювання струмів і напруг.

Оптичні методи вимірювання мають кілька важливих переваг. По-перше, вони забезпечують високоточні та стабільні вимірювання, що має вирішальне

значення в енергосистемах, де чутливість до змін струму та напруги є надзвичайно важливою. Оскільки оптичні методи вимірювання не контактують безпосередньо з провідниками, вони електрично ізольовані, надійно захищаючи вимірювальне обладнання та зменшуючи ризик коротких замикань і несправностей. Ці методи також ідеально підходять для вимірювань на високовольтних лініях електропередач і в промислових енергосистемах, де традиційні методи вимірювання стають все менш ефективними.

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки ефекту Поккельса [7]

Переваги	Недоліки
Висока стабільність і точність вимірювань завдяки відсутності втрат у контактах.	Висока вартість матеріалів та оптичного обладнання.
Повна електрична ізоляція, що підвищує надійність і безпеку при вимірюванні високих напруг.	Складність калібрування та налаштування систем для вимірювання напруги.
Відсутність впливу електричних завад на лініях передачі, оскільки вимірювання відбувається без прямого контакту з проводами.	Чутливість до змін температури, що може вимагати додаткових заходів для підтримки стабільності.

Однак оптичні методи мають і недоліки. Потреба в спеціалізованому оптичному обладнанні та складних установках значно збільшує вартість вимірювальної системи. Крім того, такі компоненти, як поляризатори і спеціальні кристали, є дорогими, що обмежує їх використання у великих кількостях. Температурні коливання і вібрації впливають на точність вимірювання, тому оптична система повинна бути захищена і стабілізована [7].

Незважаючи на ці обмеження, оптичні методи вимірювання залишаються одним з найбільш перспективних напрямків безконтактного вимірювання

електричних параметрів в сучасній енергетиці. Вони високоточні, безпечні і можуть використовуватися в установках з високими струмами і напругами, що є великою перевагою для складних енергосистем.

### 1.2.1 Методи на основі Холлівського ефекту

Вимірювальні методи, засновані на ефекті Холла, є важливим інструментом для безконтактного вимірювання струмів і напруг в енергосистемах. Ефект Холла виникає, коли струмопровідний провідник або напівпровідник піддається впливу магнітного поля. У результаті в матеріалі генерується перпендикулярна напруга (напруга Холла), яка пропорційна силі струму, що протікає через провідник, а також напруженості та напрямку магнітного поля (рис. 1.5).

Коли струм протікає через провідник, створюється електричне поле. Коли до цього провідника прикладається магнітне поле, вектор напруги Холла з'являється перпендикулярно як до струму, так і до магнітного поля. Це дозволяє вимірювати струм без прямого контакту з електричною системою. Вимірювання здійснюється за допомогою датчика з декількома електродами для визначення потенціалу Холла [8].

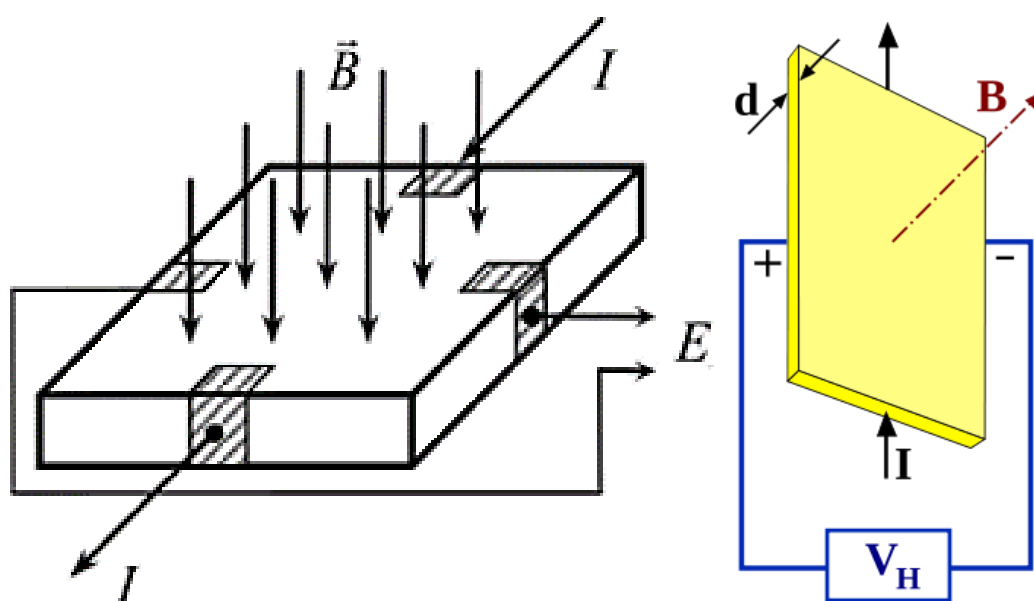


Рисунок 1.5 – Ефект Холла. Адаптовано із роботи [9]

В таблиці 1.5 наведено переваги та недоліки використання методів на ефекті Холла для вимірювання струмів і напруг.

Таблиця 1.5 – Переваги та недоліки методів на ефекті Холла [9-10]

Переваги	Недоліки
Метод дозволяє проводити вимірювання без прямого контакту з провідниками, що є критично важливим у випадках, коли працюють високі напруги або струми.	Умови роботи при високих напругах можуть вплинути на точність вимірювань.
Сенсори можуть використовуватися для вимірювання змінних струмів, що робить їх універсальними для застосування в різних енергетичних системах.	Вимірювання можуть бути спотворені впливом зовнішніх полів, що створює потребу в додатковому екрануванні або захисті системи для збереження точності вимірювань.
Методи, засновані на ефекті Холла, дозволяють вимірювати як невеликі, так і великі струми, що робить їх корисними для різних застосувань у енергетиці.	Властивості матеріалів, з яких виготовлені сенсори на основі ефекту Холла, можуть змінюватися з температурою. Це може призводити до зміни чутливості сенсора і потребує регулярного калібрування.
Висока ступінь ізоляції дозволяє використовувати ці методи в чутливих електронних системах, що потребують захисту від впливу зовнішніх електричних полів.	Виготовлення сенсорів, що використовують ефект Холла, може бути дорожчим у порівнянні з традиційними методами вимірювання, що також слід враховувати при їх виборі.

## 1.2.2 Електростатичні та електромагнітні методи

Електростатичні та електромагнітні методи вимірювання ґрунтуються на спостереженні за змінами електричних і магнітних полів, які виникають під впливом великих струмів і високих напруг. Ці методи дозволяють проводити безконтактні вимірювання, оскільки струм або напруга, що проходять через провідник, створюють навколо нього відповідне електричне поле, зміни якого можна зафіксувати за допомогою спеціальних датчиків.

Електростатичні методи вимірювання засновані на явищі створення електричного поля навколо провідника під високою напругою. Електростатичні датчики використовують здатність електричного поля індукувати потенціал у датчику, який знаходиться близько до провідника, але не торкається його. Величина індукованого потенціалу пропорційна напрузі провідника, тому його значення в електричній системі можна розрахувати.

Електромагнітні методи вимірювання засновані на тому, що при проходженні змінного струму через провідник навколо нього створюється змінне магнітне поле. Це магнітне поле можна виявити за допомогою спеціальних електромагнітних датчиків, таких як котушки індуктивності та трансформатори струму. Ці датчики виявляють зміни магнітного потоку, які пропорційні струму, і таким чином дозволяють проводити безконтактні вимірювання.

Обидва методи забезпечують надійну ізоляцію і дозволяють вимірювати високі струми і напруги без фізичного контакту з провідниками, що підвищує безпеку і простоту використання в енергосистемах.



## РОЗДІЛ 2

### ТИРИСТОРИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

#### 2.1 Загальні відомості про тиристори

##### 2.1.1 Визначення та класифікація тиристорів

Тиристори – це клас напівпровідникових приладів, призначених для комутації та керування високими струмами та напругами. Їх робота заснована на здатності переходити з високоомного стану в низькоомний за допомогою зовнішнього сигналу. Тиристори широко використовуються в різних галузях промисловості, включаючи енергетику, електротехніку, електроприводи і системи автоматичного управління, оскільки вони можуть працювати на високих рівнях потужності і забезпечують надійну комутацію струму.

Тиристори складаються з чотирьох шарів напівпровідникового матеріалу з чергуванням шарів  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ , що утворюють три  $p$ - $n$  переходи (рис. 2.1). Таке розташування призводить до високого опору у вимкненому стані і низького опору у увімкненому стані. Важливою особливістю тиристорів є те, що вони можуть залишатися увімкненими навіть при відсутності керуючого сигналу, що робить їх надзвичайно корисними для застосування в системах керування потужністю [11].

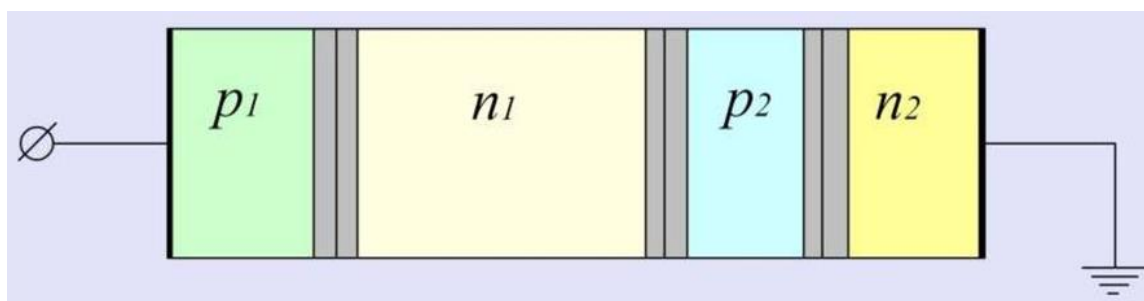


Рисунок 2.1 – Структура класичного тиристора. Із роботи [11]

Тиристри класифікуються за кількома критеріями, включаючи тип керування, напрямок струму, здатність вимикатися за допомогою керуючого сигналу та застосування. Основні типи тиристорів

1. Звичайний тиристор (SCR – Silicon Controlled Rectifier - кремнієвий керований випрямляч): Найпоширеніший тип тиристора, призначений для керування великими струмами в колах постійного і змінного струму. SCR залишається увімкненим до тих пір, поки струм не впаде нижче певного порогу (струм утримання). Вони широко використовуються в стабілізаторах напруги, випрямлячах, інверторах і системах керування двигунами [12].

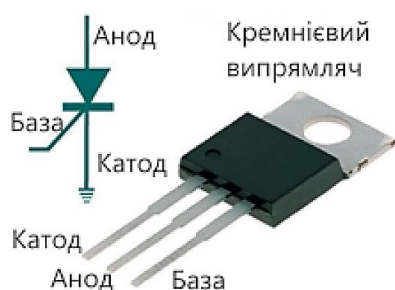


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд тиристора

2. Симістор (TRIAC – Triode for AC): Симістри призначені для комутації змінного струму і можуть працювати в обох напрямках. На відміну від звичайних тиристорів, симістри можуть пропускати струм у двох напрямках, що робить їх придатними для використання в обладнанні зі змінною напругою, наприклад, в системах керування освітленням, обігрівачах і кондиціонерах. Основна перевага симісторів полягає в тому, що вони можуть керувати змінним струмом в обох напівперіодах, що робить можливим регулювання потужності з мінімальними втратами енергії [13].

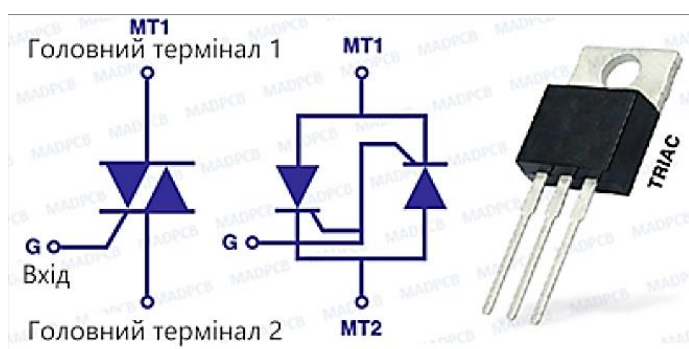


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд симістора та схема включення

3. GTO (тиристор з вимиканням затвора): Тиристри GTO забезпечують можливість відключення струму за допомогою керуючого сигналу. Це дозволяє більш точно контролювати перемикання і зменшити теплові втрати. Завдяки цій особливості GTO використовуються в системах швидкого імпульсного керування, таких як високочастотні перетворювачі, системи керування двигунами та інвертори великої потужності. Завдяки високій швидкості перемикання, GTO також ефективні в умовах швидкої зміни струму та напруги [14].

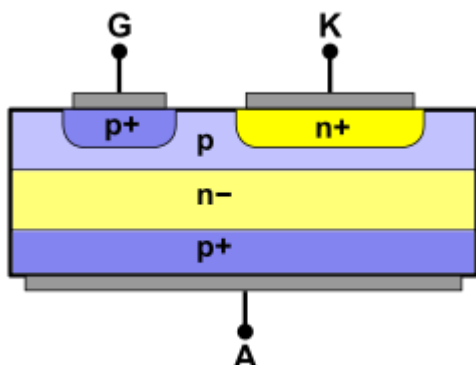


Рисунок 2.4 – Схема тиристора з вимиканням затвора

4. IGCT (Інтегрований тиристор з комутацією затвора): Цей тиристор є вдосконаленою формою тиристора GTO з інтегрованою системою відключення з низькими втратами і високою частотою перемикання. IGCT пропонує підвищену надійність і ефективність при високих струмах і напругах, що робить його ідеальним для використання в потужних перетворювачах, електроприводах і електромережах змінного струму. Вони особливо корисні в додатках, що вимагають стабільного перемикання при високих номінальних напругах і струмах, зберігаючи при цьому стабільність і точність [15].



Рисунок 2.5 – Інтегрований тиристор з комутацією затвора

Тиристри, що активуються світлом: Ці тиристри активуються оптичними імпульсами замість електричних сигналів. Вони використовуються в тих випадках, коли керуючі сигнали повинні бути відокремлені від основного ланцюга або коли необхідно запобігти виникненню електричних перешкод. Ці

тиристри використовуються у високовольтних лініях електропередач і в особливих умовах, де не можна використовувати звичайне електричне керування.

Тиристри з магнітним керуванням: Ці пристрої приводяться в дію магнітними полями і забезпечують безконтактне керування тиристорами. Тиристри використовуються в певних промислових системах, де потрібна електромагнітна ізоляція або де існують сильні електричні поля, які можуть впливати на електричні сигнали керування.

Тиристри мають унікальні характеристики, які роблять їх корисними в різних системах і застосуваннях. У вимірювальних системах особливо цінними є тиристри, які можуть працювати з високими напругами і струмами, зберігаючи стабільні параметри в умовах частих перемикань, що є важливим для безконтактних вимірювань [16].

### **2.1.2 Принцип роботи тиристорів**

Тиристри працюють завдяки поєднанню чотирьох шарів напівпровідникового матеріалу з переходами  $p-n-p-n$ , що чергуються. У вимкненому стані тиристри мають високий опір і перешкоджають проходженню струму. Щоб увімкнути пристрій, на керуючий електрод необхідно подати імпульс, який інжектує носії заряду в провідну область і викликає провідність.

Після активації тиристри залишаються увімкненими доти, доки струм не впаде до критичного значення (так званій струм утримання), навіть після зняття керуючого сигналу. Ця особливість робить тиристри особливо корисними для керування великими струмами в силових і вимірювальних системах, де необхідно точно контролювати параметри струму і напруги [17].

### **2.1.3 Основні електричні параметри тиристорів**

Тиристри використовуються у вимірювальних системах, які точно вимірюють високі струми і напруги, тому важливо враховувати ключові

електричні параметри, які впливають на продуктивність і надійність. Ці параметри включають в себе витримувану напругу, струм утримання, час увімкнення/вимкнення, температурну чутливість і розсіювану потужність. Розглянемо докладніше кожен з них [18].

Напруга пробою є одним з основних параметрів тиристорів і визначає їх здатність витримувати постійну напругу у вимкненому стані без переходу в несправний стан. Ця величина відображає максимальну напругу, яку тиристор може витримати між анодом і катодом без пошкодження і переходу в провідний стан. Для вимірювальних систем, що працюють при високих напругах, цей параметр є важливим показником надійності. Адже при перевищенні пробивної напруги відбудеться зворотний пробій, що призведе до виходу обладнання з ладу.

У вимірювальних системах, особливо тих, що працюють при високих пікових навантаженнях, важливо вибрати тиристор з високою пробивною напругою, щоб забезпечити стабільну роботу при виникненні пікових напруг. Це запобігає небажаним перериванням і підтримує точність вимірювання в разі аномальних коливань напруги.

Струм утримання – це мінімальне значення струму, при якому тиристор залишається відкритим після подачі керуючого імпульсу. Цей параметр особливо важливий у вимірювальних колах, що працюють при малих струмах, оскільки тиристор автоматично вимикається, коли струм падає нижче струму утримання.

Важливо вибрати тиристор з відповідним рівнем струму утримання для вимірювальної системи. Якщо струм недостатній, тиристор може випадково вимкнутися і перервати вимірювання. Це особливо актуально для систем, що працюють при коливаннях або пульсуючих струмах, де необхідно забезпечити стабільність вимірювань і захиститися від помилкових спрацьовувань.

Час увімкнення і вимкнення є індикаторами продуктивності тиристора і визначає, як швидко струм може перемикатися між провідним і переривчастим станами. У вимірювальних системах, особливо тих, що працюють з високочастотними сигналами, ці параметри дуже важливі, оскільки вони визначають, чи може тиристор правильно реагувати на швидкі зміни сигналу.

Наприклад, в ланцюгах, які вимірюють високочастотні коливання, повільний час вмикання і вимикання спотворює результати і знижує точність вимірювання. З іншого боку, занадто короткий час перемикавання може викликати високочастотні електромагнітні перешкоди. Тому вибір тиристорів з оптимальним часом увімкнення і вимкнення для даної вимірювальної системи забезпечить необхідну точність і стабільність вимірювань. [8]

Електричні параметри тиристорів залежать від температури навколишнього середовища. З підвищенням температури пробивна напруга зменшується, а струм утримання збільшується, що впливає на надійність і стабільність роботи тиристора у вимірювальній системі. Крім того, тиристиори більш схильні до теплової деградації, особливо при роботі на великих струмах, де виділяється багато тепла.

Оскільки коливання температури можуть мати значний вплив на точність вимірювання, цей параметр необхідно враховувати у вимірювальних системах, що працюють в умовах мінливого навколишнього середовища. Для компенсації температурної залежності можуть використовуватися тиристиори зі спеціальними схемами захисту або додаткові охолоджувальні елементи, що підвищує надійність вимірювальної системи в умовах температурних коливань.

Розсіювана потужність – ще один важливий параметр тиристорів, особливо при роботі пристрою на великих струмах. Коли тиристор працює в провідному стані, відбуваються теплові втрати, які впливають на стабільність і точність вимірювання. Ці втрати обумовлені внутрішнім опором тиристора і залежать від струму, що протікає через тиристор.

Важливо, щоб вимірювальна система контролювала втрати потужності в тиристорі. При високих температурах електричні параметри можуть змінюватися і призводити до помилок вимірювання. Крім того, високі втрати потужності можуть вимагати додаткових систем охолодження для зниження температури, що збільшує складність і вартість всієї системи. Тому вибір тиристора з мінімальною розсіюваною потужністю може підвищити точність і надійність лічильника [19].

## 2.2 Особливості використання тиристорів у вимірювальних схемах

Тиристири можна використовувати у вимірювальних системах для точного і швидкого вимірювання високих струмів і напруг, оскільки вони витримують високі навантаження і працюють в умовах сильних електричних коливань. У сучасних енергосистемах тиристири можна використовувати для безконтактного вимірювання. Це особливо важливо для забезпечення електробезпеки та зменшення впливу вимірювального пристрою на елементи системи.

Тиристири є важливим елементом вимірювальних систем завдяки своїм унікальним характеристикам, які гарантують високу ефективність і точність вимірювань. По-перше, їхня велика комутаційна ємність дозволяє їм швидко реагувати на зміни електричних параметрів, таких як струм і напруга. Ця особливість має вирішальне значення для вимірювання високошвидкісних перехідних процесів, оскільки тиристири можуть миттєво виявляти зміни електричних параметрів і забезпечувати високу точність вимірювання навіть при наявності раптових стрибків напруги.

По-друге, тиристири призначені для роботи при високих електричних навантаженнях, що робить їх ідеальними для вимірювання високих струмів і напруг. Завдяки такій стійкості до екстремальних умов тиристири працюють без необхідності прямого контакту з електричними параметрами, знижуючи ризик ураження електричним струмом і пошкодження обладнання. Це забезпечує точність вимірювань навіть у високонавантажених системах, що є важливим фактором в сучасних енергетичних системах [20].

Крім того, тиристири характеризуються високою надійністю і довговічністю. Завдяки тривалому терміну служби і високій стійкості до температурних і механічних навантажень вони можуть використовуватися в широкому діапазоні умов експлуатації. Це означає зниження ризику виходу з ладу вимірювальної системи, що дуже важливо в енергетиці, де відмова може мати серйозні наслідки. Завдяки своїй стійкості тиристири також можуть працювати в суворих умовах, де інші компоненти можуть бути пошкоджені.

Нарешті, однією з найважливіших переваг тиристорів є можливість безконтактного вимірювання. Завдяки індуктивним і ємнісним методам тиристири можна вимірювати дистанційно, уникаючи зносу контактів і знижуючи ризик ураження електричним струмом для технічного персоналу. Це підвищує рівень електробезпеки і значно спрощує управління енергосистемою, оскільки стан обладнання можна контролювати без прямого втручання. Таким чином, тиристири є високоефективним компонентом системи обліку завдяки своїм властивостям, які гарантують точні, безпечні та надійні вимірювання навіть у складних електричних умовах [20].



## РОЗДІЛ 3

### БЕЗКОНТАКНИЙ ВИМІРЮВАЧ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

#### 3.1 Вимірювання струму

Принцип роботи безконтактного вимірювача струму та напруги на основі тиристорів ґрунтується на явищах магнітних і електричних полів, які природно виникають у провідниках при протіканні електричного струму або при наявності напруги. Ці поля взаємодіють із чутливими елементами пристрою, а тиристори забезпечують обробку сигналів, стабілізацію та комутацію для отримання точних вимірювань.

Для безконтактного вимірювання струму використовується принцип взаємодії струму в провіднику з навколишнім магнітним полем. Це магнітне поле, створюване провідником, є пропорційним силі струму, що протікає, і служить основою для визначення електричних параметрів. Існують два основні підходи для реалізації цього принципу: використання ефекту Холла та трансформаторів струму.

В основі методу, що використовує ефект Холла, лежить здатність магнітного поля впливати на спеціальний сенсор (сенсор Холла). Коли струм проходить через провідник, магнітне поле, яке утворюється навколо нього, викликає виникнення Холлівської напруги в сенсорі. Ця напруга є пропорційною величині магнітного поля, а отже, і струму в провіднику. Формула, що описує цей ефект, має вигляд:

$$U_H = k \cdot B \cdot I,$$

де  $U_H$  – Холлівська напруга,

$k$  – чутливість сенсора,

$B$  – магнітна індукція,

$I$  – струм у провіднику.

У цій системі тиристиори виконують кілька ключових функцій: вони стабілізують вихідний сигнал сенсора, пригнічують сторонні завади та спрямовують сигнал до обчислювального модуля для подальшої обробки.

Другий підхід передбачає використання трансформаторів струму. Тут магнітне поле, створюване струмом у первинному провіднику, індукуює вторинний струм у котушці трансформатора. Величина цього вторинного струму пропорційна основному струму в провіднику, що вимірюється. Взаємозв'язок між первинним і вторинним струмом виражається формулою:

$$I_2 = \frac{I_1}{N},$$

де  $I_2$  – вторинний струм,

$I_1$  – первинний струм,

$N$  – коефіцієнт трансформації.

Тиристиори в цій схемі використовуються як керовані ключі, які забезпечують стабільну роботу пристрою навіть за умов змінного навантаження. Вони дозволяють швидко перемикатися між режимами роботи, забезпечуючи безперебійне вимірювання та захист системи від перевантажень.

Безконтактне вимірювання струму на основі магнітного поля забезпечує високу точність і безпеку роботи. Використання тиристорів додає системі стабільності, гнучкості та надійності, що є особливо важливим у складних промислових умовах.

### **3.2 Вимірювання напруги**

Вимірювання напруги в безконтактних пристроях здійснюється за допомогою високочутливих датчиків, таких як ємнісні сенсори або індуктивні датчики. Обидва методи дозволяють отримувати інформацію про напругу без

фізичного контакту з провідником, що забезпечує безпечність і надійність вимірювань.

У разі використання ємнісних сенсорів вимірювання базується на зміні ємності між провідником, на якому присутня напруга, та сенсором. Електричне поле, що створюється напругою, впливає на ємність. Ця ємність залежить від параметрів середовища, площі сенсора, а також відстані між сенсором і провідником. Формула ємності виглядає так:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}$$

де  $C$  – ємність (Фаради),

$\varepsilon_0$  – електрична стала ( $8.854 \times 10^{-12}$  Ф/м),

$\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища,

$A$  – площа пластин сенсора,

$d$  – відстань між сенсором і провідником.

У такій системі тиристри виконують важливу роль. По-перше, вони захищають чутливу схему сенсора від перенапруги, яка може виникнути через раптові стрибки в електричній мережі. По-друге, тиристри забезпечують стабілізацію отриманого сигналу, що дозволяє пристрою обробляти дані більш точно. Це важливо для уникнення спотворень, викликаних коливаннями напруги або електромагнітними завадами.

Інший підхід до вимірювання напруги – використання індуктивних сенсорів. Вони працюють на основі зміни магнітної індукції, яка виникає в результаті взаємодії електричного поля з індуктивними елементами. Напруга у провіднику може спричинити зміну струму, що індуктує електрорушійну силу (ЕРС) у сенсорі. Формула, що описує індуктивну ЕРС, має вигляд:

$$\varepsilon = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

де  $\mathcal{E}$  – індуктивна ЕРС,

$L$  – індуктивність,

$\frac{dI}{dt}$  – швидкість зміни струму.

Індуктивні сенсори також генерують слабкі сигнали, які потребують обробки. Тиристори використовуються для підсилення цих сигналів, щоб зробити їх придатними для аналізу. Крім того, вони виконують функцію захисту схеми від електромагнітних завад, які можуть впливати на точність вимірювань.

Незалежно від використаного типу сенсора, тиристори є ключовими компонентами, які забезпечують надійність роботи пристрою, захист і стабільність отриманих сигналів. Вони дозволяють безконтактним вимірювачам досягати високої точності навіть в умовах значних перешкод і коливань напруги.

### 3.3 Конструктивні особливості

Основним елементом такого вимірювача є датчики струму і напруги, які дозволяють зчитувати параметри без фізичного контакту. Наприклад, датчик струму на основі ефекту Холла широко використовується в пристроях LEM HXS 100-NP, які забезпечують вимірювання змінного та постійного струму до 100 А з точністю 1%. Аналогічно, ємнісні датчики для вимірювання напруги, такі як Althen CSM 050, здатні зчитувати напругу до 500 В з точністю  $\pm 0.5\%$ .

Отримані сигнали з датчиків надходять до тиристорних ключів, які виконують функції комутації. Тиристори, наприклад BT152-800R (з максимальним струмом 20 А і напругою до 800 В), забезпечують стабільну роботу навіть у системах з високим рівнем перешкод. Вони витримують швидкі зміни напруги і забезпечують надійність системи.

Сигнали з тиристорів обробляються за допомогою мікроконтролерів або аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП). У популярних промислових рішеннях застосовуються мікроконтролери, такі як STM32F103 від STMicroelectronics, які дозволяють виконувати складні обчислення в реальному

часі. Наприклад, ці контролери здатні аналізувати сигнали з роздільною здатністю до 12 біт і частотою дискретизації 1 МГц, що дозволяє точно визначати параметри мережі, включаючи пульсації і гармоніки.

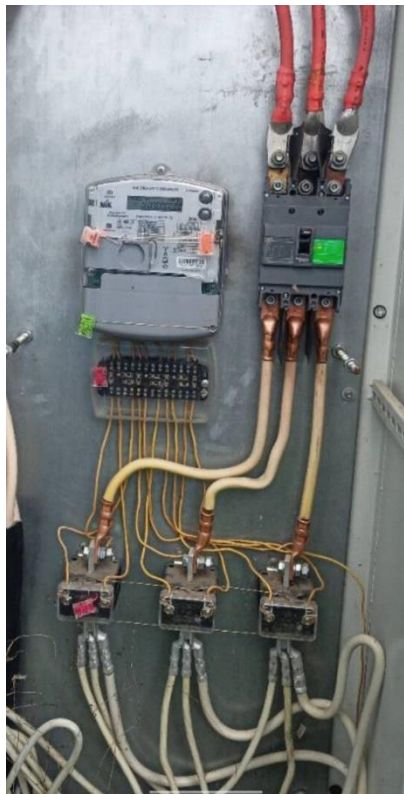


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд стенду

Живлення пристрою може бути як автономним, так і мережевим. У портативних моделях часто використовують літій-іонні акумулятори, наприклад, 18650, які забезпечують тривалий час роботи (до 10 годин) при споживанні пристроєм струму близько 300 мА. Для стаціонарних систем, таких як аналізатори мережі, наприклад, Fluke 438-II, застосовується живлення від стандартної електромережі 220 В.

### 3.4 Застосування в електроенергетиці

Тиристри знайшли широке застосування в області енергетики завдяки своїм високим комунікаційним характеристикам, надійності і здатності працювати при сильному струмі і високій напрузі. Універсальність дозволяє використовувати ці

компоненти в різних аспектах енергосистеми, забезпечуючи як операційну ефективність, так і стабільність мережі.

Одним з важливих застосувань тиристорів є системи компенсації реактивної потужності, зокрема пристрої типу СТАКОМ. У таких системах тиристири відіграють важливу роль у регулюванні рівня напруги в мережі та забезпеченні стабільності джерела живлення. Вони допомагають усунути реактивні навантаження, які можуть негативно вплинути на якість електроенергії, а також допомагають знизити втрати в мережі.

Ще одна важлива область – регулювання напруги на трансформаторних підстанціях. Оскільки тиристири використовуються для точного регулювання напруги, вони можуть підтримувати оптимальні рівні навіть у складних умовах навантаження. Завдяки високій продуктивності ці пристрої здатні справлятися з різкими змінами в мережі і незамінні для сучасних високовольтних систем.

У перетворювачах енергії тиристири забезпечують ефективну роботу випрямлячів і інверторів, що використовуються для передачі енергії в промислових мережах і поновлюваних джерелах енергії, таких як сонячні батареї і вітряні електростанції. Вони полегшують перетворення змінного струму в постійний струм і навпаки, що важливо для підключення різних частин енергосистеми.

Ще одна важлива функція тиристора – захист мережі від короткого замикання. Можливість швидкого відключення струму в аварійній ситуації знижує ризик пошкодження обладнання і підвищує безпеку системи. Дуже важливо так швидко реагувати на великих промислових або енергетичних об'єктах, де затримки можуть мати серйозні наслідки.

Тиристири також активно використовуються в системах управління електроприводом. Він може ефективно контролювати швидкість обертання електродвигуна, що використовується як в промислових, так і в побутових приладах. Це може забезпечити високу енергоефективність і плавне регулювання.

В таблиці 3.1 наведено порівняльну таблицю з перевагами та недоліками використання тиристорів в електроенергетиці.

Таблиця 3.1 – Переваги та недоліки використання тиристорів в електроенергетиці

Критерій	Переваги	Недоліки
Надійність	Стійкість до високих струмів і напруг, що зменшує ризик виходу з ладу	Висока залежність від якості охолодження
Швидкодія	Швидке перемикання дозволяє ефективно реагувати на зміни в системі	Не підходять для роботи з дуже високими частотами через повільність у порівнянні з транзисторами
Енерго-ефективність	Низькі втрати при комутації в порівнянні з механічними перемикачами	Втрати на перемикання вищі, ніж у сучасних транзисторів
Стійкість до перенапруг	Можуть працювати у складних умовах мережі з високими стрибками напруги	Необхідність додаткового захисту від надмірних імпульсів
Вартість	Відносно низька ціна компонентів у порівнянні з іншими напівпровідниковими пристроями	Обмеження по масштабуванню на дуже великі потужності
Довговічність	Тривалий термін служби завдяки відсутності механічного зносу	Потребують періодичного обслуговування систем охолодження
Інтеграція	Легко інтегруються у традиційні та цифрові системи керування	Вимагають складної схеми керування для плавного регулювання

Тиристори в електроенергетиці є ключовими компонентами завдяки своїй надійності, здатності працювати у високовольтних мережах та енергоефективності. Проте їхнє використання вимагає ретельного підходу до охолодження, захисту і управління, що слід враховувати при виборі технологій для конкретних завдань.

## ВИСНОВКИ

1. Показано, що тиристорні схеми забезпечують безконтактне вимірювання струмів і напруг з високою точністю. Це досягається завдяки використанню їхніх напівпровідникових властивостей, які дозволяють ефективно працювати в умовах високих струмів і напруг без фізичного контакту з провідниками.

2. Одержано нові дані про ефективність застосування тиристорів у безконтактних вимірювальних системах. Експериментальні дослідження підтвердили їхню здатність працювати стабільно навіть у високовольтних мережах, що робить їх перспективними для використання в сучасних енергосистемах.

3. Установлено, що тиристори забезпечують підвищену безпеку під час вимірювань. Відсутність прямого контакту з високовольтними елементами усуває ризики для персоналу та вимірювального обладнання, що особливо важливо в умовах промислових і енергетичних систем.

4. Розроблено стенд для контактного вимірювання струму та напруги, який дозволяє вимірювати струм в діапазоні 5-10 А та напругу до 220 В. Його тестування показало переваги порівняно з традиційними методами, особливо щодо стабільності та точності вимірювань.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shunt Resistors <Current Sence Shunt Resistors> [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rohm.com/electronics-basics/resistors/shunt-resistors> (Дата доступу: 20.10.2024 р.).
2. Лющенко В. І., Туяхов А. І., Саф'янц С. М. Вимірювання в енергетиці : навчальний посібник Донецьк : ДНТУ, 2007. 304 с. URL: [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/775891/mod\\_resource/content/2/metrologia.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/775891/mod_resource/content/2/metrologia.pdf).
3. ElectronicsTutorials. The Current Transformer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html> (Дата доступу: 22.10.2024 р.).
4. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки : курс лекцій : [навчальний посібник] / [Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готра та ін. ; за заг. ред. заслуженого діяча науки і техніки України, доктора хімічних наук, проф. Д. М. Фреїка]. – Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с.
5. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч. 3. Провідники та магнетики. – 372 с.
6. Li Yu, Sun Muhan, Miao Ting, Chen Jianping / Towards High-Performance Pockels Effect-Based Modulators: Review and Projections // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 15, No 7. – ID 865.
7. Черногор Л. Ф. Нелінійна радіофізика : підручник. – 3-тє вид., доп. і перероб. / Л. Ф. Черногор. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – 204 с.
8. Hall Effect [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/Hall.html> (Дата доступу: 01.11.2024 р.).
9. The Hall Effect and Its Applications / С. L. Chien, С. R. Westgate // Springer New York, NY. – 2013. – 550 p.
10. M. Crescentini, S. F. Syeda, G. P. Gibiino, Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – Vol. 22, No 11. – ID 10137.

11. What is a thyristor and how does it work? – TechTarget [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/thyristor> (Дата доступу: 20.10.2024 р.).
12. X. Song, P. Cairolì, Y. Du, A. Antoniazzi, A Review of Thyristor Based DC Solid-State Circuit Breakers // IEEE Open Journal of Power Electronics. – 2021. – Vol. 2. – ID 659.
13. The Silicon-Controlled Rectifier (SCR) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-7/silicon-controlled-rectifier-scr> (Дата доступу: 03.11.2024 р.).
14. G. Uslu-Ozkucuk, TRIAC Based Isolated AC Load Drive Equivalent Circuit Design of Solid-State Relay // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. – 2023. – Vol. 26. – Pp. 183–189.
15. What is GTO? Types, Construction, Working and Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.electricaltechnology.org/2021/08/gto.html> (Дата доступу: 03.11.2024 р.).
16. Integrated gate-commutated thyristors (IGCT) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct> (Дата доступу: 03.11.2024 р.).
17. Пристрої перетворювальної техніки : конспект лекцій / укладач А. І. Новгородцев. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 124 с.
18. Ji Shu, Junpeng Ma, Shunliang Wang, Yuqing Dong, Tianqi Liu, Zhiyuan He, A New Active Thyristor-Based DCCB With Reliable Opening Process // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, No. 4. – Pp. 3617–3621.
19. Nilsson, S.L. et al. (2020). Application Examples of the Thyristor Controlled Series Capacitor. In: Andersen, B., Nilsson, S. (eds) Flexible AC Transmission Systems . CIGRE Green Books. Springer, Cham.
20. Основи електротехніки та електроніки: Джерела вторинного електроживлення [Електронний ресурс] : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. В.П. Грудська, О.М. Скринник – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 120 с.