

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний  
(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати  
(повна назва кафедри )

**Пояснювальна записка**  
до дипломного проекту (роботи)  
бакалавр  
(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему «Тиристорний силовий блок перетворювача 660 В, 2500 А для  
потужного електроприводу постійного струму прокатного стану»

Виконав: студент 4 курсу, групи Е-813сп

спеціальності 141- "Електроенергетика,  
електротехніка, та електромеханіка"  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)  
Електромеханічне обладнання енергоємних  
виробництв

Сергій ОЛЕФІРЕНКО  
(ім'я та прізвище)

Керівник Людмила СКРУПІСЬКА  
(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ  
(ім'я та прізвище)

2026 рік

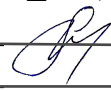
Форма № 25

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
 ( повне найменування вищого навчального закладу )

Факультет Електротехнічний  
 Кафедра Електричні та електронні апарати  
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалавр  
 Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"  
 (код і назва)  
 Освітня програма (спеціалізація) Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв  
 (код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Завідувач кафедри П. Д. Андрієнко

“ 24 ” квітня  2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**  
Олефіренко Сергію Вікторовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Тиристорний силовий блок перетворювача 660 В, 2500 А для потужного електроприводу постійного струму прокатного стану»

керівник проєкту (роботи) Скрупська Людмила Степанівна, ст. викл  
 ( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 17 ” 04 2026 року № 163

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Номінальна напруга мережі 660 В, номінальний струм навантаження 2500 А, частота мережі 50 Гц, режим роботи - тривалий / важкий (прокатний стан), тип перетворювача - тиристорний випрямляч

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Вибір напрямку та обґрунтування проєктування тиристорного перетворювача. 2 Розрахунок та вибір елементів тиристорного силового блоку.

3 Система керування та захисту тиристорного перетворювача. 4 Конструктивне виконання та оптимізація силового блоку.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. НУЗП.656141.046 01СК – Силовий блок - 1 арк. А1; 2. НУЗП.654473.046 Е1 – електрична схема електропроводу КТЕ - 1 арк. А1; 3. НУЗП.656121.046 02СК - Блок, НУЗП.301614.046 - Шпилька та НУЗП.734112.046 – Траверса - 1 арк. А1; 4. НУЗП.746462.046 - Охолоджувач, НУЗП.745316.046 – Шина та

НУЗП.685526.046 .– Шина\_ 1 арк. А1.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

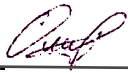
| Розділ    | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|-----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                           | завдання видав                                                                      | прийняв виконане завдання                                                           |
| Технічний | Скрупська Людмила Степанівна,<br>ст. викл | 24.04.26                                                                            | 03.06.26                                                                            |
|           |                                           |  |  |

7. Дата видачі завдання 24.04.2026

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проєкту (роботи)                                              | Строк виконання етапів проєкту ( роботи ) | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------|
| 1     | Техніко-економічне обґрунтування проєкту                                              | 19.05.2026                                |          |
| 2     | Попередній розрахунок головних елементів апарата                                      | 21.05.2026                                |          |
| 3     | Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата             | 25.05.2026                                |          |
| 4     | Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата | 29.05.2026                                |          |
| 5     | Оформлення розрахунково-пояснювальної записки проєкту                                 | 01.06.2026                                |          |
| 6     | Узгодження проєкту з керівником                                                       | 03.06.2026                                |          |
| 7     | Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри                                     | 05.06.2026                                |          |
| 8     | Перевірка керівником пояснювальної записки на антиплагіат                             | 08.06.2026                                |          |
| 9     | РЕЦЕНЗУВАННЯ ПРОЄКТУ                                                                  | 09.06.2026                                |          |
| 10    | ЗАХИСТ ПРОЄКТУ                                                                        | з 15.06.2026                              |          |
| 11    | Здача бакалаврської роботи до репозитарію                                             | 29.06.2026                                |          |
|       |                                                                                       |                                           |          |

Студент

  
( підпис )

Сергій ОЛЕФІРЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

  
( підпис )

Людмила Скрупська

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 76 с; 17 рис; 18 табл.; 14 джерел.

ТИРИСТОР, СИЛОВИЙ БЛОК, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ, ШИННИЙ ПРОВІД, ТЕПЛОВИЙ ОПР, КУТ КЕРУВАННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

*Об'єкт дослідження* - процес проектування та модернізації силового тиристорного блоку, інтегрованого у перетворювальний агрегат із параметрами 660 В та 2500 А.

*Мета роботи* полягає у розрахунку та конструктивному розробленні високоефективного силового блоку для потужних електроприводів постійного струму (зокрема для прокатних станів металургійного виробництва). Основним завданням є оптимізація архітектури перетворювача для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД), зниження сукупної собівартості виробу та мінімізації трудовитрат під час його серійного виготовлення.

*Метод дослідження* - Для визначення ключових параметрів пристрою застосовано аналітичні методи розрахунку електричних, теплових та енергетичних показників із використанням фундаментальних положень силової електроніки.

*Результати та новизна.* У межах проекту запропоновано перехід від базової конфігурації перетворювача серії КТЕ (збудованого на тиристорах Т253-800) до вдосконаленої архітектури на базі потужних силових напівпровідникових приладів (СНП) типу Т173-2000. Дана модернізація дозволила радикально переглянути структуру силового кола.

*Обґрунтування технічних рішень:* Використання тиристорів Т173-2000 з вищим номінальним струмом дозволило відмовитися від складних систем паралельного з'єднання великої кількості приладів низької потужності. Це не тільки спростило систему керування та охолодження, а й підвищило загальну надійність агрегату за рахунок зменшення кількості контактних з'єднань.

Порівняльні показники модернізації наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1 — Порівняльна характеристика базового та проєктованого блоків

| <b>Показник</b>                    | <b>Базовий виріб<br/>(Т253-800)</b> | <b>Проектний виріб<br/>(Т173-2000)</b> | <b>Ефект</b>        |
|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|
| Кількість СНП у блоці, шт          | 48                                  | 12                                     | ↓ у 4 рази          |
| Кількість силових запобіжників, шт | 48                                  | 6                                      | ↓ у 8 разів         |
| Габаритні розміри (Д×Ш×В), мм      | 7320×1000×2990                      | 6520×1000×2990                         | ↓ довжини на 800 мм |

Зменшення лінійних габаритів приводу на 11% забезпечує додаткову економію виробничих площ під час монтажу обладнання на промислових об'єктах.

Розрахунковий приріст ККД зумовлений зниженням втрат потужності на активних опорах шин та запобіжниках.

## ЗМІСТ

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Реферат.....                                                                         | 4  |
| Вступ.....                                                                           | 7  |
| 1 Вибір напрямку та обґрунтування проектування тиристорного перетворювача.....       | 9  |
| 1.1 Аналіз електроприводів постійного струму прокатних станів.....                   | 10 |
| 1.2 Вимоги до силових перетворювачів для потужних електроприводів.....               | 17 |
| 1.3 Обґрунтування вибору схеми тиристорного перетворювача.....                       | 22 |
| 1.4 Аналіз та огляд конструкцій тиристорних силових блоків.....                      | 27 |
| 2 Розрахунок та вибір елементів тиристорного силового блоку.....                     | 34 |
| 2.1 Вибір параметрів живлення, схеми випрямлення та кута керування.....              | 35 |
| 2.2 Розрахунок та вибір силового трансформатора.....                                 | 39 |
| 2.3 Вибір силових тиристорів за струмовими та напруговими параметрами.....           | 41 |
| 2.4 Розрахунок і вибір захисних елементів тиристорів<br>(RC-ланцюги, варистори)..... | 43 |
| 2.5 Вибір силових напівпровідникових приладів за робочою напругою.....               | 47 |
| 2.6 Розрахунок системи охолодження силового блоку.....                               | 49 |
| 2.7 Розрахунок втрат потужності в тиристорах у тривалому<br>режимі роботи.....       | 53 |
| 2.8 Оцінка коефіцієнта корисної дії силового блоку.....                              | 56 |
| 3 Система керування та захисту тиристорного перетворювача.....                       | 59 |
| 3.1 Принцип побудови системи керування тиристорами .....                             | 60 |
| 3.2 Формування імпульсів керування та синхронізація з мережею .....                  | 62 |
| 3.3 Система електричного захисту та діагностики .....                                | 63 |
| 4. Конструктивне виконання та оптимізація силового блоку .....                       | 67 |
| 4.1 Конструкція тиристорного силового блоку .....                                    | 68 |
| 4.2 Заходи щодо підвищення ККД перетворювача .....                                   | 71 |
| Висновки.....                                                                        | 73 |
| Перелік посилань.....                                                                | 75 |

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку металургійної промисловості ефективність функціонування прокатних станів безпосередньо залежить від надійності та енергоефективності головних електроприводів. Потужні електроприводи постійного струму, незважаючи на активне впровадження асинхронних машин, залишаються незамінними у вузлах із жорсткими вимогами до динамічних характеристик та широкого діапазону регулювання швидкості. Ключовим елементом таких систем є тиристорний перетворювач, що забезпечує кероване живлення двигуна.

Проблема більшості існуючих перетворювальних агрегатів (наприклад, серії КТЕ) полягає у високій матеріаломісткості силових блоків через використання великої кількості паралельно з'єднаних напівпровідникових приладів малої одиничної потужності. Це призводить до ускладнення систем захисту, розгалуженості мереж охолодження та зниження загального ККД агрегату. Тому проектування силового блоку з використанням сучасних тиристорів нового покоління (таких як T173-2000) є критично актуальним завданням, спрямованим на оптимізацію масогабаритних показників та підвищення надійності електроприводу.

*Зв'язок роботи з науковими програмами та планами.* Робота спрямована на реалізацію концепції енергозбереження в промисловості шляхом модернізації силової електроніки потужних споживачів.

*Мета і завдання дослідження.* Метою дипломного проєкту є розроблення конструкції та розрахунок параметрів тиристорного силового блоку перетворювача напругою 660 В та струмом 2500 А, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності та зниження виробничих витрат.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Виконати порівняльний аналіз вимог до сучасних перетворювачів для прокатних станів та обґрунтувати вибір силової схеми.

2. Провести розрахунок та вибір силового трансформатора, напівпровідникових приладів та захисних RC-ланцюгів.

3. Розробити ефективну систему примусового охолодження силового блоку.

4. Проектувати мікропроцесорну систему керування та електричного захисту з функціями діагностики стану тиристорів.

5. Виконати конструктивну оптимізацію силового блоку для мінімізації його габаритів та підвищення ККД.

*Об'єкт дослідження* — процеси перетворення електричної енергії та теплообміну в тиристорному силовому блоці потужного електроприводу.

*Предмет дослідження* — схемотехнічні та конструктивні рішення, що визначають енергетичну ефективність та надійність перетворювального агрегату 660 В, 2500 А.

*Методи дослідження.* У роботі використано аналітичні методи розрахунку електричних кіл, методи теплового моделювання напівпровідникових структур та принципи системного проектування пристроїв силових електроніки.

*Наукова та практична значущість результатів.*

- Запропоновано перехід на нову елементну базу (тиристори Т173-2000), що дозволяє зменшити кількість активних компонентів силового кола у 4 рази.

- Розроблена система керування з покращеними характеристиками синхронізації з мережею, що мінімізує вплив вищих гармонік на живильну мережу.

- Практична цінність полягає у зменшенні лінійних габаритів перетворювача на 800 мм, що дозволяє виконувати монтаж у обмеженому просторі існуючих машинних залів без капітальної перебудови фундаментів.

Згідно з поставленими завданнями, робота складається з чотирьох розділів, де послідовно викладено шлях від теоретичного обґрунтування до практичної реалізації та оцінки ефективності модернізованого пристрою.



## 1 Вибір напрямку та обґрунтування проєктування тиристорного перетворювача

Сучасні потужні електроприводи постійного струму широко застосовуються в електромеханічних системах, що працюють у важких режимах експлуатації та потребують високої надійності, стабільності регулювання й значної перевантажувальної здатності. До таких систем, зокрема, належать електроприводи прокатних станів металургійних підприємств, для яких характерні великі пускові струми, часті зміни навантаження та підвищені вимоги до безперервності технологічного процесу.

Ключовим елементом електроприводу постійного струму є силовий перетворювач, який забезпечує перетворення енергії електричної мережі змінного струму в керовану напругу постійного струму з необхідними параметрами. В умовах високих потужностей і струмів одним із найбільш поширених і технічно доцільних рішень залишаються тиристорні перетворювачі, що поєднують відносну простоту конструкції, високу перевантажувальну здатність і надійність при тривалій роботі.

Вибір напрямку проєктування тиристорного перетворювача з номінальними параметрами 660 В і 2500 А зумовлений необхідністю забезпечення енергоефективної та стабільної роботи потужного електроприводу постійного струму. При цьому особлива увага приділяється обґрунтуванню схеми перетворювача, вибору силових напівпровідникових приладів, а також аналізу конструктивних рішень силового блоку з позицій підвищення коефіцієнта корисної дії, зниження собівартості та зменшення трудомісткості виготовлення.

У цьому розділі виконано аналіз умов роботи та вимог до електроприводів прокатних станів, розглянуто основні типи тиристорних перетворювачів, наведено огляд існуючих конструкцій силових блоків та обґрунтовано вибір напрямку подальшого проєктування. Отримані висновки слугують основою для формування проєктно-технічного завдання та подальших розрахунків силового блоку перетворювача.

## 1.1 Аналіз електроприводів постійного струму прокатних станів

Прокатний стан у сучасній металургії є складним енергоємним об'єктом, де процес пластичної деформації металу інтегрований у єдиний автоматизований цикл. Сучасні вимоги до якості прокату та продуктивності агрегатів змушують розглядати електропривод не просто як джерело механічної енергії, а як ключовий інструмент керування геометрією та структурою металу. Ефективність роботи всього комплексу безпосередньо залежить від того, наскільки динамічні характеристики силового перетворювача відповідають технологічній схемі конкретного стану

### **Розширена класифікація та функціональне призначення**

Архітектура електроприводу безпосередньо залежить від сортаменту продукції та кінематичної схеми агрегату. За призначенням прокатні стани систематизують на такі основні групи:

1. **Заготовочні стани:** Виконують первинну обробку сталевих злитків великого перерізу. Сюди відносять блюмінги (для квадратних заготовок) та слябінги (для плоских заготовок).
2. **Сортові та фасонні стани:** Спеціалізуються на виробництві арматури, катанки, балок, швелерів та дроту.
3. **Листопрокатні стани:** Поділяються на стани гарячої та холодної прокатки для випуску листової сталі та рулонної смуги.
4. **Спеціалізовані установки:** Трубопрокатні агрегати та верстати для виготовлення бандажів, коліс та осей.

За специфікою технологічного процесу та режимами роботи головного електроприводу виділяють:

*а) Нереверсивні стани:* характеризуються постійним напрямком обертання валків. Типовим прикладом є дресирувальні стани (рис. 1.1), де прокатка здійснюється в один прохід.

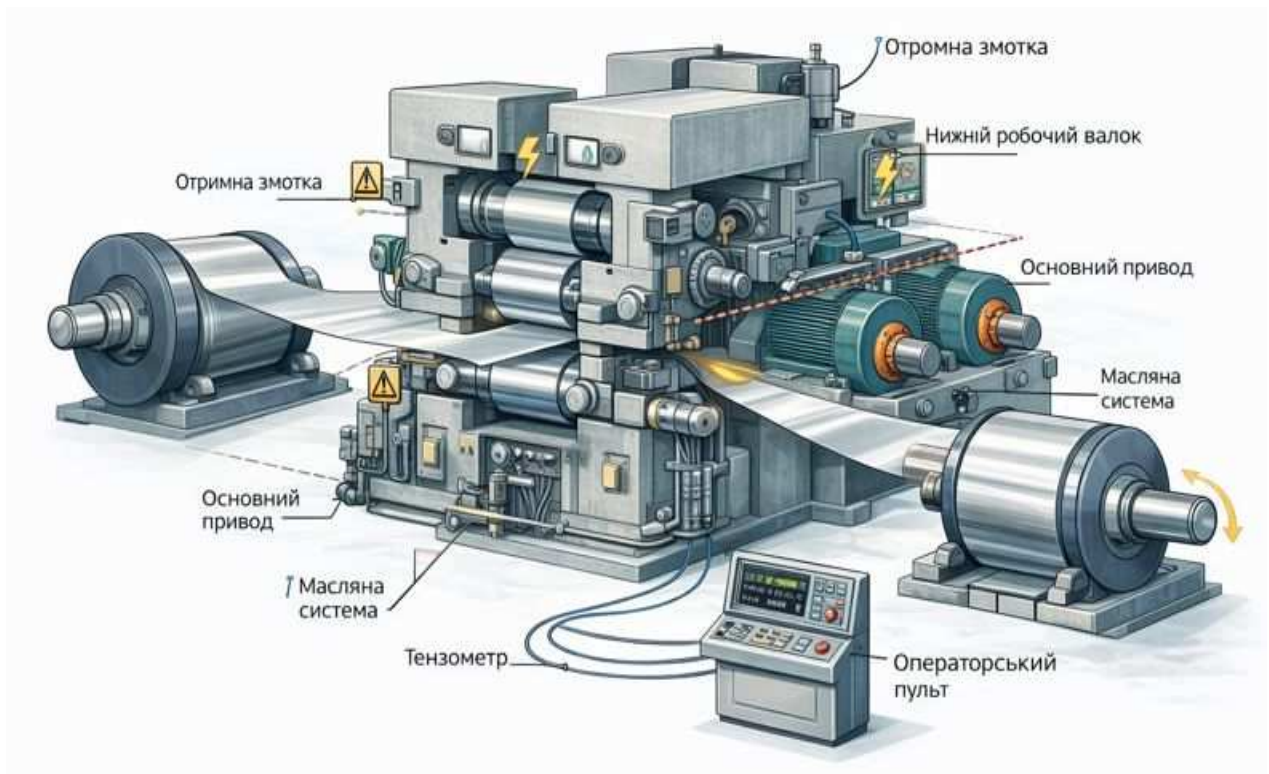


Рисунок 1.1 – Технологічна схема дресувального стану

Нереверсивні стани характеризуються односпрямованим рухом матеріалу. Яскравим прикладом є дресувальні стани, призначені для надання холоднокатаній смузі необхідних механічних властивостей та мікрорельєфу поверхні при малих ступенях обтиснення (0,5–3%). У таких системах електропривод моталок і розмотувачів працює в режимі регулювання натягу, що потребує від силового блоку підтримки стабільного моменту при змінному радіусі рулону.

б) *Реверсивні стани*: передбачають багаторазову деформацію смуги шляхом зміни напрямку обертання головного приводу (реверсу). Це потребує від перетворювача високої динаміки та здатності працювати в режимі рекуперативного гальмування.

У реверсивних станах (Рис. 1.2) основне навантаження припадає на головний привід валків. Процес складається з циклів розгону, прокатки, гальмування та реверсу.

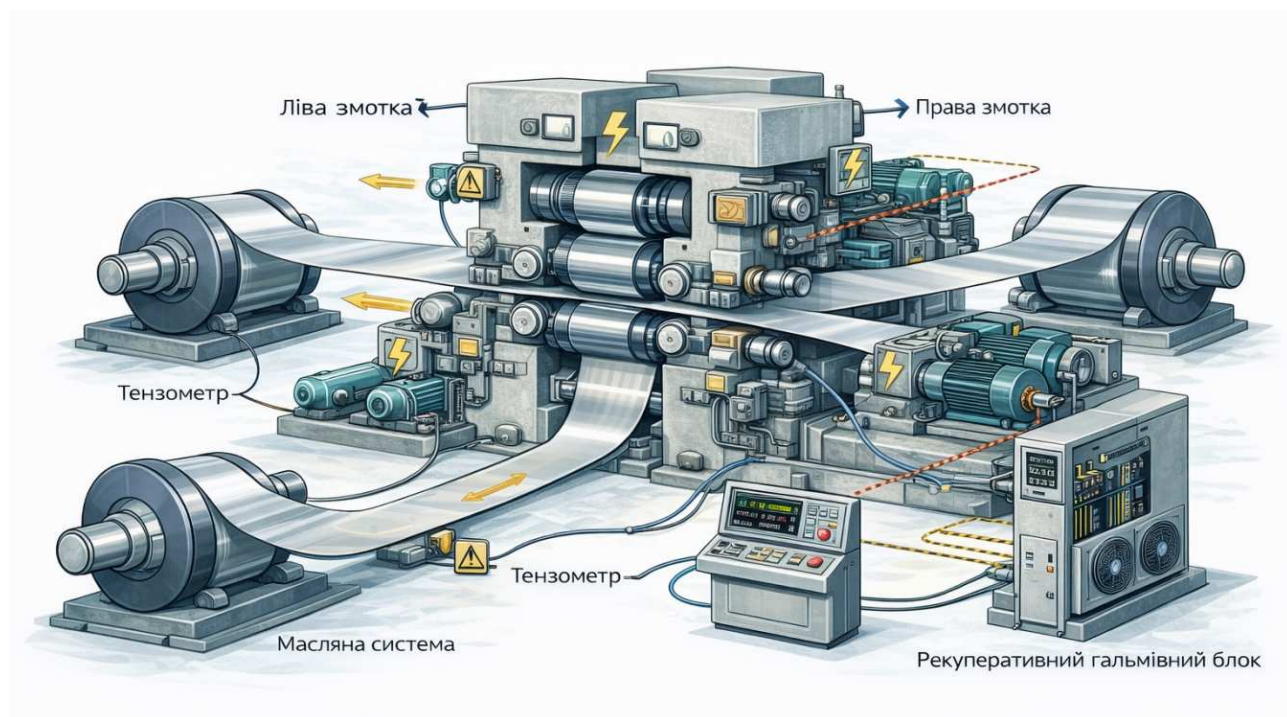


Рисунок 1.2 -реверсивний прокатний стан

Таблиця 1.1 — Режими роботи електроприводу реверсивного стану

| Етап циклу         | Стан електроприводу   | Вимоги до тиристорного блоку                               |
|--------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| Захоплення металу  | Ударне навантаження   | Висока динамічна жорсткість (падіння швидкості $< 1-2\%$ ) |
| Прокатка           | Сталий режим          | Підтримка швидкості з точністю до $0,5\%$                  |
| Вихід металу       | Скидання навантаження | Запобігання "ривку" швидкості (overshoot)                  |
| Гальмування/Реверс | Генераторний режим    | Рекуперація енергії в мережу через реверсивний міст        |

в) *Безперервні стани*: складаються з послідовного ряду клітей, де метал знаходиться одночасно у декількох робочих проміжках (рис. 1.3). Це висуває жорсткі вимоги до синхронізації швидкостей окремих двигунів.

Сучасні тенденції спрямовані на створення агрегатів безперервної прокатки, де рулони зварюються між собою "на льоту".

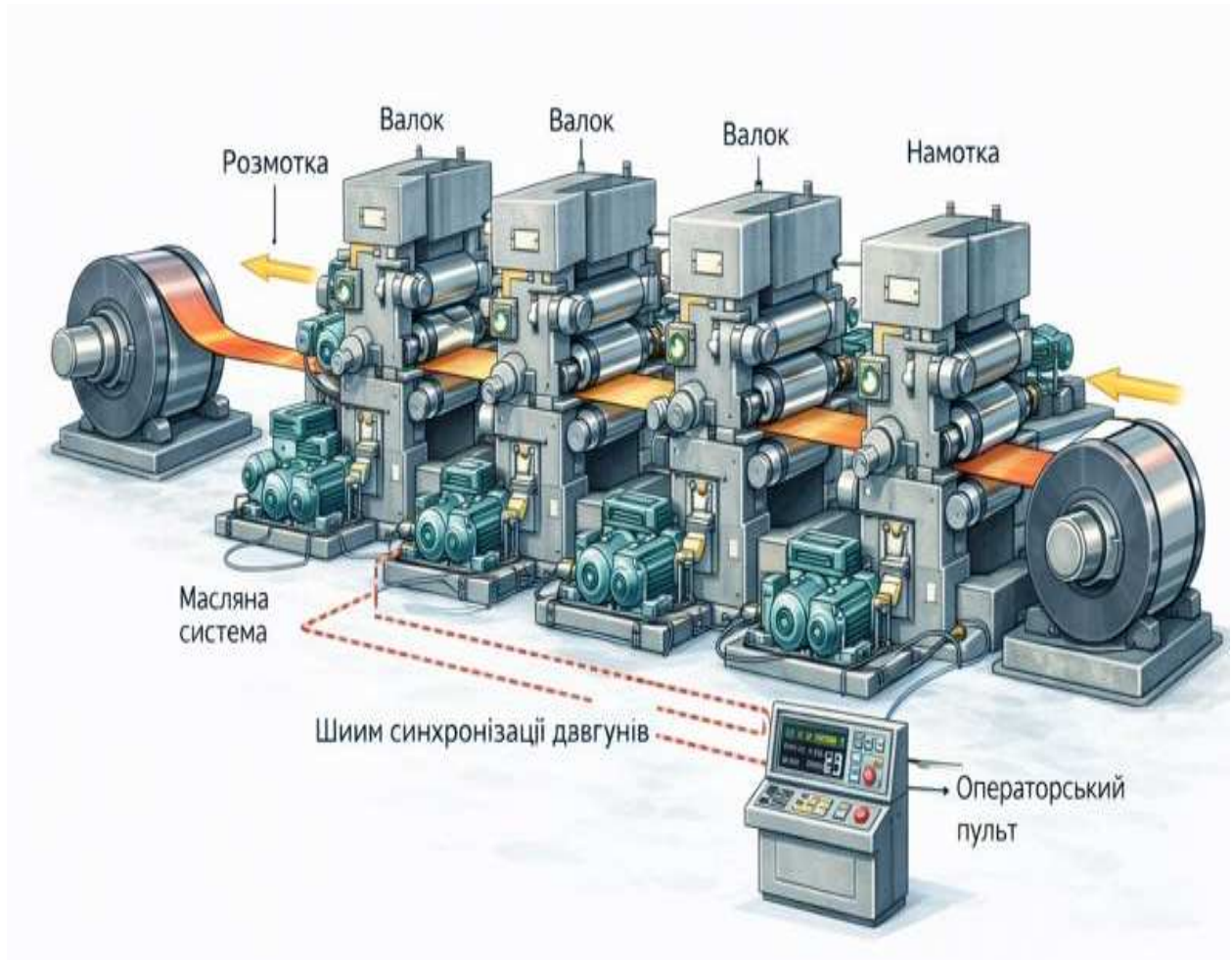


Рисунок 1.3 - безперервний п-клієвий прокатний стан

Для забезпечення роботи такої лінії привід кожної кліти має бути індивідуальним, а силова частина — здатною витримувати тривалі струмові навантаження без перегріву. Застосування петльового накопичувача дозволяє підтримувати швидкість прокатки, поки вхідна частина сповільнюється для зварювання кінців рулонів.

Сьогодні всі холодні стани безперервної прокатки оснащені регуляторної-торами процесу прокатки, що працюють в режимі автоматики і дозволяють вести процес безперервно, без зупинки агрегату. У момент видалення готового рулону на виході і на вході йде заправка наступного рулону (рис. 1.4).





Рисунок 1.4 - схема стану нескінченного прокату

Сучасний прокатний цех являє собою складний комплекс механічного та електричного обладнання. Слід зазначити, що в прокатному цеху містяться найбільша кількість електроприводів.

Правильний вибір типу і потужностей двигунів механізмів прокатних станів забезпечує надійну і економічну роботу електроприводу, отже, і всього цеху. До електроприводу прокатних станів пред'являють високі вимоги, пов'язані з особливостями роботи приводу цих станів. До основних особливостей роботи електроприводу валків прокатних станів відносяться: велика кількість включень (до 1000 включень в годину для реверсивних станів), ударний характер навантаження, що перевищує номінальне навантаження двигунів, а також розгін і гальмування двигуна з металом в валках, забезпечення високої продуктивності прокатних станів.

#### Технологічні вимоги до електроприводів

Електропривод головної лінії прокатного стану є одним із найбільш енергоємних та складних вузлів підприємства. До нього пред'являються наступні специфічні вимоги:

- Висока перевантажувальна здатність: зважаючи на ударний характер навантаження в момент захоплення металу валками, привід повинен витримувати короточасні перевантаження, що перевищують номінальні значення у 2–2,5 рази.

- Інтенсивна динаміка: для реверсивних станів кількість циклів увімкнення може сягати 1000 на годину, що потребує мінімальної інерційності системи «перетворювач-двигун».

- Точність регулювання: забезпечення заданих фізико-механічних властивостей прокату можливе лише за умови підтримки швидкості з похибкою не більше 0,1–0,5%.

#### Вибір системи електроприводу: від Г-Д до тиристорних блоків

До 1980-х років домінувала система "генератор-двигун" (Г-Д), яка мала гарну керованість, але низьку енергоефективність через подвійне перетворення енергії. Впровадження тиристорних перетворювачів (ТП) революціонізувало галузь.

Порівняльні переваги тиристорного силового блоку (на 2500 А) над системою Г-Д:

1. **Енергоефективність:** ККД статичного перетворювача складає 96–98% проти 88–91% у систем Г-Д.
2. **Швидкодія:** Стала часу тиристорного перетворювача становить мілісекунди ( $T_{\text{ТП}} \approx 0.01$  с), що дозволяє миттєво реагувати на зміни навантаження.
3. **Масогабаритні показники:** Тиристорний блок займає в 4–6 разів менше площі та не потребує масивних фундаментів під обертові машини.
4. **Експлуатаційна придатність:** Модульна конструкція дозволяє замінити несправний силовий напівпровідниковий прилад (СПП) протягом 15–20 хвилин.

#### Порівняльна характеристика систем живлення

Історично для потужних приводів використовувалася система «генератор-двигун» (Г-Д). Однак із розвитком силової електроніки пріоритет змістився в бік статичних тиристорних перетворювачів. Порівняльні показники наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз систем Г-Д та тиристорного електроприводу

| Параметр порівняння              | Система Г-Д<br>(електромеханічна) | Тиристорний<br>перетворювач (статичний) |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| Коефіцієнт корисної дії<br>(ККД) | 85 – 90%                          | 95 – 98%                                |
| Швидкодія (стала часу)           | Висока (0,1 – 0,5 с)              | Дуже висока (0,01 – 0,02 с)             |
| Габарити та маса                 | Значні (потребує<br>фундаментів)  | Малі (модульна конструкція)             |
| Обслуговування                   | Регулярне (щітковий<br>апарат)    | Мінімальне<br>(напівпровідники)         |
| Інерційність системи             | Велика (через обертові<br>маси)   | Майже відсутня                          |

Незважаючи на зростання частки асинхронного частотно-регульованого приводу, системи постійного струму займають стабільну нішу (близько 15–20%) у надпотужних агрегатах завдяки простоті реалізації великих моментів на низьких швидкостях.

#### Еволюція систем керування: від Г-Д до тиристорних комплексів

Функціональні потреби сучасних станів (особливо безперервних та реверсивних) практично неможливо задовольнити за допомогою застарілих систем "генератор-двигун". Хоча система Г-Д забезпечувала плавне регулювання, вона мала велику інерційність, що не дозволяло реалізувати складні алгоритми автоматизації.

Перехід до тиристорних перетворювачів (ТП) став логічним кроком для забезпечення описаних вище функцій. Головні переваги ТП у контексті технології:

1. Динамічна перевага: ТП дозволяє реалізувати перехідні процеси, що у 5–10 разів швидші, ніж у електромашинних системах.
2. Гнучкість налаштувань: Сучасні цифрові системи керування на базі



тиристорних блоків дозволяють легко інтегрувати функції захисту від буксування валків та компенсацію пружних деформацій кліті.

3. Надійність: Відсутність рухомих частин у силовому перетворювачі значно знижує витрати на обслуговування, що критично для металургійних циклів з режимом роботи 24/7.

Таким чином, вибір тиристорного перетворювача на струм 2500 А для модернізації електроприводу прокатних станів є технічно обґрунтованим рішенням, яке дозволяє поєднати високу потужність із прецизійною точністю керування, необхідною для виробництва конкурентоспроможного прокату

#### Проблематика модернізації

Більшість діючих прокатних станів оснащені морально застарілими тиристорними агрегатами, де реалізовано багаторазове паралельне з'єднання тиристорів малої потужності. Це знижує надійність системи та збільшує експлуатаційні витрати.

Використання в даному проєкті потужних тиристорів T173-2000 дозволяє оптимізувати показник  $\xi_{tr}$  за рахунок зменшення кількості контактних переходів та спрощення геометрії силових шин, що є ключовим кроком у модернізації застарілих систем.

### 1.2 Вимоги до силових перетворювачів для потужних електроприводів

Проектування силового тиристорного перетворювача для головного приводу прокатного стану вимагає врахування сукупності суворих технічних, експлуатаційних та енергетичних вимог. Оскільки об'єкт дослідження має номінальні параметри 660 В та 2500 А (рис. 1.5), він належить до категорії потужних промислових агрегатів, де будь-яка відмова призводить до значних економічних збитків через простій технологічної лінії.



Рисунок 1.5 – Тиристорний перетворювач 660В, 2500А

### 1.2.1 Електричні вимоги та стійкість до перевантажень

Однією з головних особливостей роботи прокатного стану є різко перемінний характер навантаження. В момент захоплення металу валками (вхід заготовки в кліть) виникає ударний момент, який викликає стрибок струму.

*Вимоги до перевантажувальної здатності:* Силовий блок повинен бути спроектований таким чином, щоб витримувати короточасні перевантаження без порушення теплової стійкості р-п переходів тиристорів. Згідно з технологічними нормами для прокатних станів, перетворювач має забезпечувати:

- Робочий цикл з перевантаженням  $1.5 \cdot I_{\text{ном}}$  протягом 60 секунд.
- Пікове навантаження  $2.25 \cdot I_{\text{ном}}$  (ударний струм) протягом 10 секунд.

Для забезпечення таких режимів при розрахунку випрямленої напруги  $U_d$  необхідно враховувати падіння напруги в трансформаторі та безпосередньо на тиристорах. Розрахункова формула для середнього значення напруги при куті керування  $\alpha$ :

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{tr} - \Delta U_{th}$$

де:

$U_{d0}$  — максимальна середня випрямлена напруга при  $\alpha = 0$ ;

$\Delta U_{tr}$  — падіння напруги в трансформаторі;

$\Delta U_{th}$  — порогове падіння напруги на тиристорі.

### 1.2.2 Вимоги до якості електроенергії та електромагнітної сумісності (ЕМС)

Тиристорні перетворювачі є потужними джерелами вищих гармонік струму та споживачами реактивної потужності. Оскільки ми проєктуємо блок на 2500 А, вплив на живильну мережу 6-10 кВ є критичним.

Вимоги до енергетичних показників:

1. **Коефіцієнт потужності ( $\cos \phi$ ):** При глибокому регулюванні швидкості (великі кути  $\alpha$ ) коефіцієнт потужності суттєво знижується. Перетворювач повинен бути спроектований так, щоб мінімізувати споживання реактивної енергії.

2. **Гармонічний склад:** Струм, що споживається перетворювачем, має несинусоїдальну форму. Для 6-пульсної мостової схеми характерними є гармоніки порядку  $n = 6k \pm 1$  (5-та, 7-ма, 11-та, 13-та тощо). Перетворювач повинен відповідати стандартам ЕМС (ГОСТ 13109-97 або міжнародним стандартам IEEE), що часто вимагає встановлення вхідних фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП).

Таблиця 1.3 — Вимоги до показників якості енергії перетворювача

| Показник                                               | Вимога (норма)                  | Технічне рішення                         |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги ( $K_U$ ) | не більше 5%                    | Застосування вхідних реакторів           |
| Рівень 5-ї гармоніки струму                            | не більше 20-30% від $I_1$      | Вибір схеми випрямлення (6 або 12 пульс) |
| Коефіцієнт зміщення ( $\cos \phi_1$ )                  | $\geq 0.85$ (при $\alpha = 0$ ) | Оптимізація напруги вторинної обмотки    |

### 1.2.3 Вимоги до надійності та системи захисту

Потужні тиристорні блоки працюють у середовищі з високою температурою, пилом та вібраціями.

#### **Критерії надійності:**

- **Селективність захисту:** При виникненні внутрішнього короткого замикання (пробій тиристора), швидкодіючі запобіжники повинні вимкнути лише пошкоджене плече, не викликаючи відключення всього агрегату (якщо передбачено резервування). У нашому проєкті перехід на тиристиори T173-2000 дозволяє зменшити кількість запобіжників, але підвищує вимоги до їхньої швидкодії ( $i^2t$  запобіжника має бути меншим за  $i^2t$  тиристора).
- **Стійкість до швидкості наростання струму ( $di/dt$ ) та напруги ( $du/dt$ ):** Для запобігання самовільному ввімкненню або локальному перегріву структури тиристора, силовий блок повинен містити захисні RC-ланцюги (спадні ланцюги) та варистори для обмеження комутаційних перенапруг.

### 1.2.4 Теплові вимоги та система охолодження

Для тиристора T173-2000 критичною є температура переходу  $T_j$ .

Перевищення порогу у 125-140 °C призводить до втрати керованості та теплового пробою.

Вимоги до охолодження:

1. **Примусове повітряне охолодження:** Швидкість повітряного потоку в зоні радіаторів має бути в межах 6-12 м/с.
2. **Тепловий опір:** Сумарний тепловий опір "перехід-середовище"  $R_{th(j-a)}$  має забезпечувати відведення тепла потужністю  $P_\Delta$ , яка для струму 2500 А може сягати кількох кіловат на один прилад.

$$P_\Delta = \Delta U \cdot I_{av} + R_{dyn} \cdot I_{rms}^2$$

де:

$\Delta U$  — порогова напруга;

$R_{dyn}$  — динамічний опір тиристора у відкритому стані.

*Пояснення до схеми теплових потоків:* Тепло, що генерується в кремнієвій структурі, проходить крізь корпус тиристора, контактну пасту та радіатор. Найменше забруднення або недостатнє зусилля стиснення (для таблеткових тиристорів це близько 20-30 кН) різко збільшує тепловий опір, що робить контроль зусилля стиснення обов'язковою конструктивною вимогою.

#### 1.2.5 Конструктивні та експлуатаційні вимоги

Прокатні стани часто модернізуються в умовах обмеженого простору машинних залів.

1. **Компактність:** Мінімізація габаритів силового блоку за рахунок раціональної компоновки шин та охолоджувачів.
2. **Мінімальна індуктивність ошиновки:** Довгі шини при великих струмах створюють значну паразитарну індуктивність, що призводить до затягування процесів комутації та додаткових втрат. Вимогою є використання максимально коротких та симетричних струмопроводів.
3. **Зручність обслуговування (Ремонтпридатність):** Конструкція повинна забезпечувати вільний доступ до кожного тиристора та запобіжника для їхньої швидкої заміни без демонтажу всього блоку.

#### 1.2.6 Вимоги до системи керування

Сучасний перетворювач на 2500 А не може працювати на аналоговій системі керування.

- **Цифрова реалізація:** Система керування повинна бути побудована на мікропроцесорній базі (DSP або FPGA).
- **Точність фазового керування:** Крок регулювання кута  $\alpha$  має бути не більше 0,1-0,5 електричного градуса для забезпечення плавності моменту двигуна.
- **Діагностика:** Обов'язкова наявність функцій моніторингу температури радіаторів, стану запобіжників та наявності імпульсів керування в кожному каналі.

Отже: Сформульовані вимоги до силового перетворювача 660 В, 2500 А демонструють необхідність комплексного підходу до проєктування. Основний акцент має бути зроблений на поєднанні високої перевантажувальної здатності з ефективним тепловідоведенням та впровадженні прецизійної системи цифрового керування. Виконання цих вимог дозволить створити надійний агрегат, здатний працювати в жорстких умовах металургійного цеху з високими техніко-економічними показниками.

### 1.3 Обґрунтування вибору схеми тиристорного перетворювача

Одним із фундаментальних етапів проєктування силового агрегату є критичний аналіз та вибір топології схеми випрямлення. Для потужних електроприводів постійного струму раціональність обраної схеми визначає не лише масогабаритні показники трансформаторного обладнання, а й енергетичну ефективність системи в цілому.

#### 1.3.1 Поняття пульсності та якості перетворення

Ключовим критерієм оцінки статичного перетворювача є його фазність (пульсність) — показник  $m$ , що визначає кількість пульсацій випрямленої напруги протягом одного періоду живильної мережі. Збільшення значення  $m$  сприяє наближенню форми випрямленої напруги до ідеальної постійної прямої, що математично виражається через відношення діючого значення до середнього.

Згідно з положеннями теорії перетворення, при зростанні пульсності коефіцієнт випрямлення прямує до одиниці. Це означає, що значення ЕРС холостого ходу перетворювача  $E_{d0}$  максимально наближається до амплітудного значення напруги мережі. Порівняємо характеристики для різних систем:

- Для однофазної двонапівперіодної схеми ( $m=2$ ):  $E_{d0} = 0.9 \cdot U_2$ .
- Для трифазної мостової схеми ( $m=6$ ):  $E_{d0} = 2.34 \cdot U_{2\phi}$ .

Де  $U_2$  — діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Очевидно, що схеми з вищою пульсністю дозволяють суттєво знизити встановлену потужність трансформатора при ідентичних вихідних параметрах.

### 1.3.2 Аналіз нульових схем випрямлення

Нульові схеми (схеми із середньою точкою) історично використовувалися в установках з відносно низькими напругами. Основна ідея полягає у підключенні анода (або катода) кожного тиристора до фазних висновків вторинної обмотки, тоді як загальна точка навантаження з'єднується з нульовим виводом трансформатора.

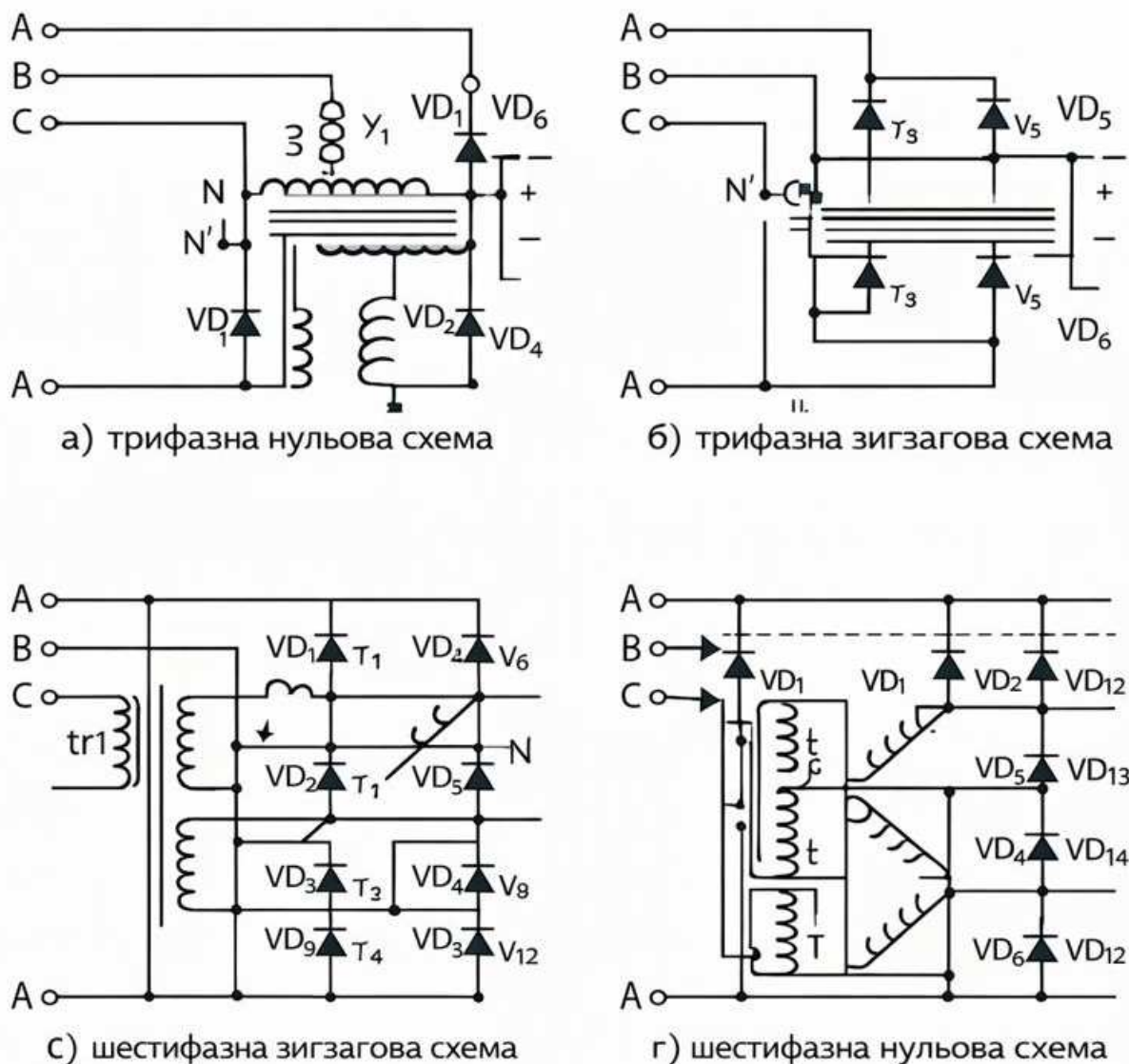


Рисунок 1.6 - Топології нульових перетворювачів: а) трифазна зірка; б) трифазна схема "зигзаг"; в) шестифазна схема "зигзаг"; г) шестифазна зірка.



**Трифазна нульова схема (Рис. 1.6, а).** Це найпростіша топологія, де кожен вентиль проводить струм лише протягом 1/3 періоду. Головним недоліком, що робить її неприйнятною для потужності 2500 А, є виникнення вимушеного підмагнічування магнітопроводу трансформатора постійним струмом. Це призводить до насичення сталі та різкого зростання габаритної потужності трансформатора (типова потужність  $S_{\text{тип}} \approx 1.35 \cdot P_d$ ).

**Шестифазні нульові схеми (Рис. 1.6, в, г).** Для підвищення якості напруги ( $m=6$ ) використовують розщеплення вторинних обмоток. Проте схема "зворотної зірки" (Рис. 1.6, г) страждає від значних індуктивних падінь напруги через потоки вимушеного намагнічування, що змінюються з потроєною частотою мережі. Певною мірою це нівелюється у схемі "зигзаг" (Рис. 1.6, в), але за ціну погіршення використання міді обмоток.

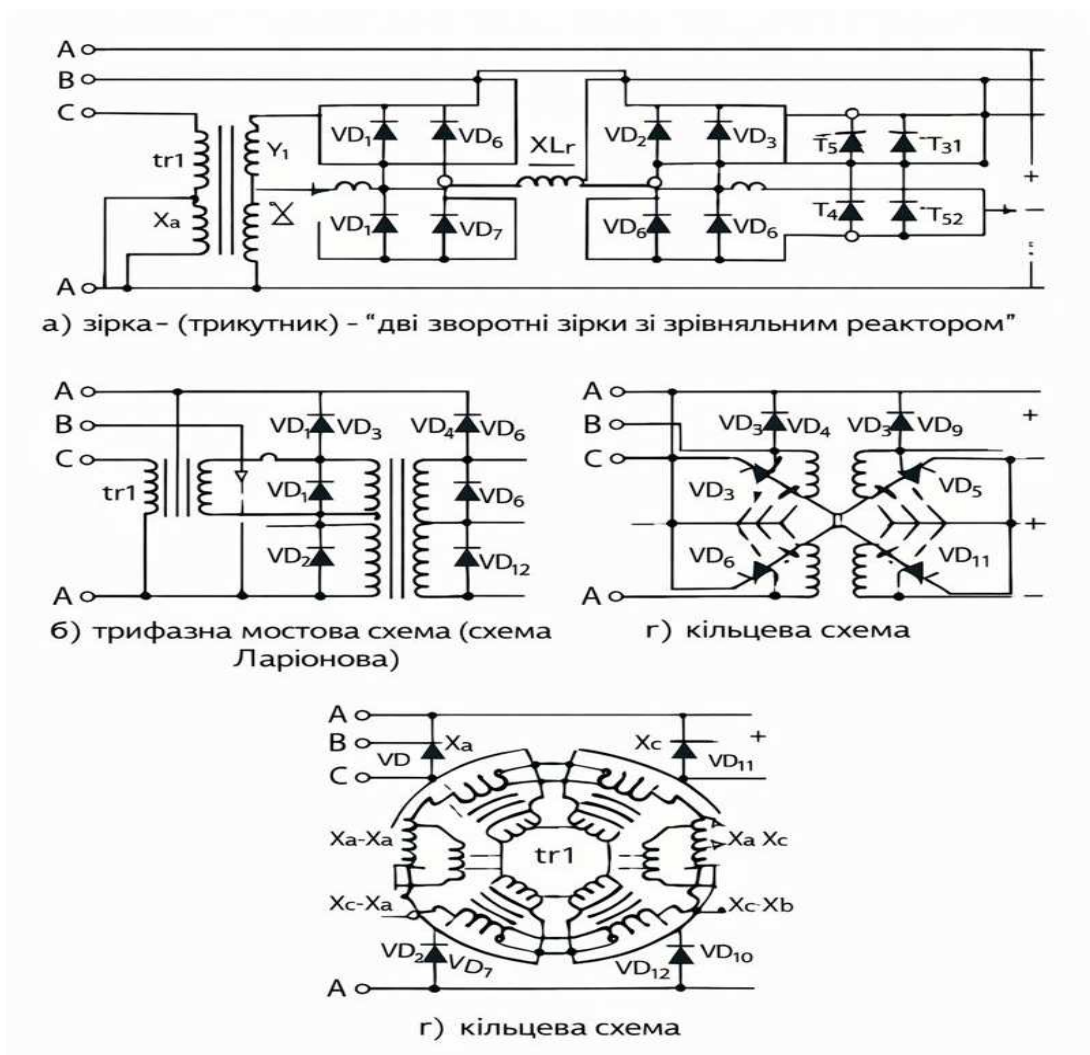


Рисунок 1.7 – Схеми випрямлення середньої та великої потужності:



а) дві зворотні зірки з реактором; б) трифазний міст; в) кільцева схема

**Схема "дві зворотні зірки зі зрівняльним реактором" (Рис. 1.7, а).** Дана архітектура поєднує дві трифазні групи, що працюють паралельно завдяки реактору.

- **Перевага:** Кожен тиристор проводить струм протягом  $1/3$  періоду (а не  $1/6$ , як у звичайній шестифазній схемі), що покращує використання напівпровідників за струмом.
- **Область застосування:** Винятково низьковольтні установки з екстремально великими струмами (електроліз, гальваніка). Для напруги 660 В наявність додаткового громіздкого реактора є технічно недоцільною.

### 1.3.3 Обґрунтування вибору трифазної мостової схеми

Для металургійних електроприводів потужністю понад 1000 кВт стандартом де-факто є трифазна мостова схема (схема Ларіонова, Рис. 1.7, б).

#### **Аналітичні переваги мостової схеми:**

1. **Магнітна врівноваженість:** Струми у фазах трансформатора протікають в обох напрямках протягом періоду, що повністю виключає явище вимушеного підмагнічування.
2. **Мінімальна типова потужність:** Коефіцієнт використання трансформатора є найвищим серед усіх шестипульсних схем ( $S_{\text{тип}} = 1.05 \cdot P_d$ ).
3. **Розподіл напруги:** На відміну від нульових схем, де зворотна напруга на вентилі сягає  $2.09 \cdot U_d$ , у мостовій схемі вона обмежена значенням  $1.045 \cdot U_d$  (при послідовному включенні груп).
4. **Економічність:** Менша кількість обмоток трансформатора порівняно зі складними нульовими схемами.

**Кільцева схема (Рис. 1.7, в)** займає проміжне місце. Вона забезпечує менші втрати на самих тиристорах (оскільки в колі струму одночасно знаходяться два паралельні вентилі), проте потребує трансформатора з двома вторинними

обмотками, що суттєво здорожує конструкцію при великих перерізах шин на 2500 А.

#### 1.3.4 Порівняльний аналіз технічних показників

Для остаточного підтвердження вибору в таблиці 1.4 наведено зведені розрахункові коефіцієнти для основних топологій.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика параметрів схем випрямлення

| Схема випрямлення             | Струм вентиля (середній)<br>$I_{av}/I_d$ | Струм вторинної обмотки<br>$I_2/I_d$ | Макс. зворотна напруга<br>$U_{rev}/U_d$ | Типова потужність трансформатора<br>$S_{тип}/P_d$ |
|-------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Трифазна нульова (m=3)        | 0.333                                    | 0.577                                | 2.09                                    | 1.35                                              |
| Шестифазна нульова (m=6)      | 0.167                                    | 0.408                                | 2.09                                    | 1.55                                              |
| <b>Трифазна мостова (m=6)</b> | <b>0.333</b>                             | <b>0.816</b>                         | <b>1.05</b>                             | <b>1.05</b>                                       |
| Зі зрівняльним реактором      | 0.167                                    | 0.289                                | 2.09                                    | 1.26                                              |

*Примітка:* Значення наведено для ідеалізованого перетворювача без урахування кута комутації.

*Резюме до вибору:* При проєктуванні силового блоку на 2500 А пріоритетом є мінімізація втрат у трансформаторі та габаритів ошиновки. Трифазна мостова схема демонструє найкращий баланс між використанням напівпровідникових приладів та встановленою потужністю магнітного обладнання. З огляду на використання тиристорів T173-2000, мостова схема дозволяє реалізувати повноцінне реверсивне керування двигуном прокатного стану з високим ККД та мінімальними пульсаціями моменту.

Розрахункові значення струмів, напруг і потужності найбільш поширених нульових і мостових схем випрямлення приведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Порівняння характеристик схем випрямлення

| Схема випрямлення                               | $\frac{U_d}{U_{2\phi}}$ | $\frac{I_2}{I_d}$ | $\frac{I_{dH}}{Id}$ | $\frac{U_{обр\ m}}{U_d}$ | $\frac{S_1}{P_d}$ | $\frac{S_2}{P_d}$ | $\frac{S_T}{P_d}$ |
|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Трехфазная нульова                              |                         | 0,577             | 0,33                | 2,1                      | 1,21              | 1,48<br>1,71*     | 1,345<br>1,46*    |
| Шестифазная нульова                             | 1,35                    | 0,167             | 0,167               | 2,1                      | 1,05              | 1,81              | 1,42              |
| Шестифазная нульова по схемі позв'язаний зігзак | 1,35                    | 0,167             | 0,167               | 2,1                      | 1,05              | 1,79              | 1,42              |
| Шестифазная нулева с Рівняльним реактором       | 1,17                    | 0,289             | 0,167               | 2,1                      | 1,05              | 1,48              | 1,26<br>1,335     |
| Трьюхфазная мостова                             | 2,34                    | 0,817             | 0,33                | 1,05                     | 1,05              | 1,05              | 1,05              |
| Кільцева                                        | 2,34                    | 0,577             | 0,157               | 2,1                      | 1,05              | 1,48              | 1,26              |

На підставі проведеного аналізу для подальшої розробки приймається **трифазна мостова схема випрямлення**.

#### 1.4 Аналіз та огляд конструкцій тиристорних силових блоків

Конструктивне виконання силового блоку перетворювача безпосередньо впливає на його надійність, енергоефективність та зручність експлуатації в умовах металургійного виробництва. Основним завданням при проектуванні конструкції є забезпечення оптимального тепловідведення від напівпровідникових структур та

мінімізація індуктивності ошиновки (рис. 1,8).

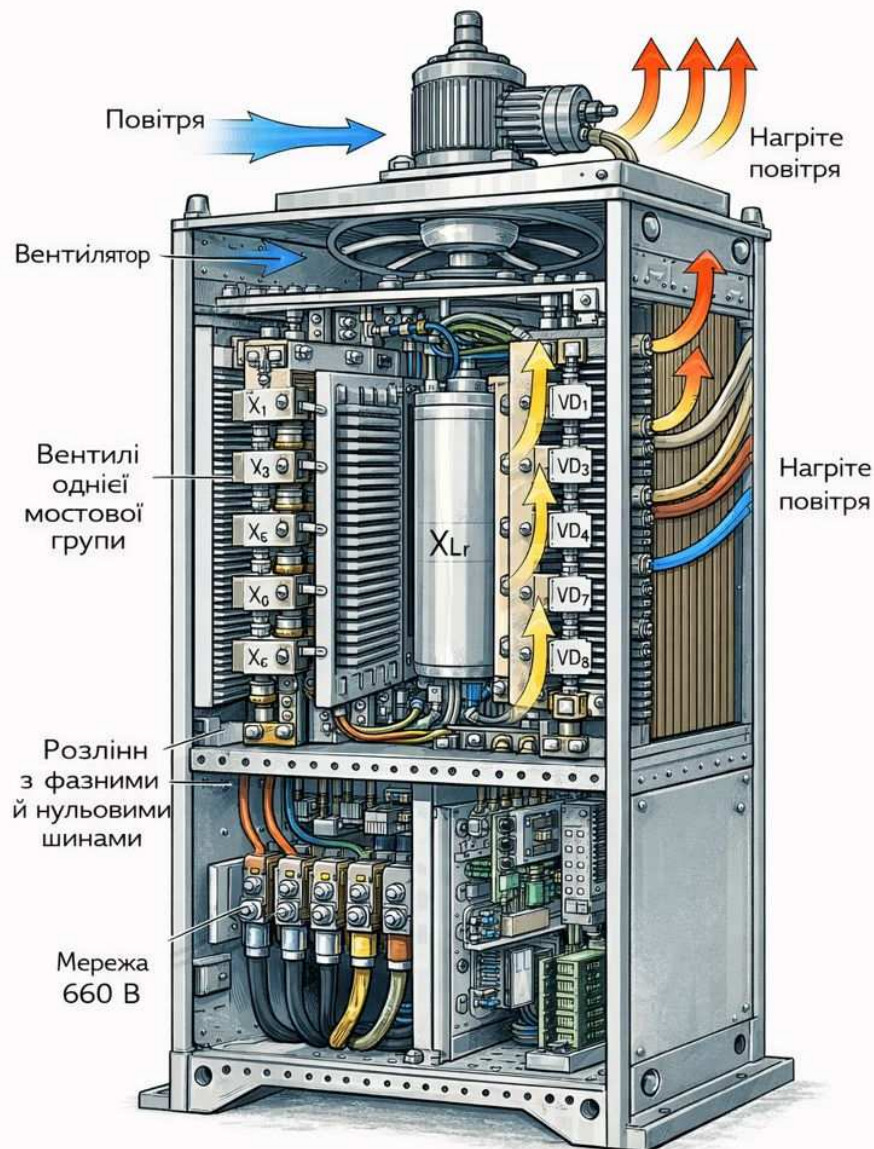


Рисунок 1.8 – Конструкція реверсного випрямляча з інтервальною системою охолодження

#### 1.4.1 Конструктивні особливості блоків на базі таблеткових тиристорів

У потужних перетворювачах для гальванічних та привідних установок часто використовують реверсивні випрямлячі з мостовою топологією або схеми зі зрівняльними реакторами. На рисунку 1.9 представлено архітектуру реверсивного агрегату, де силова частина базується на дванадцяти тиристорах таблеткового (шайбового) типу T978-800, розрахованих на номінальний струм 800 А

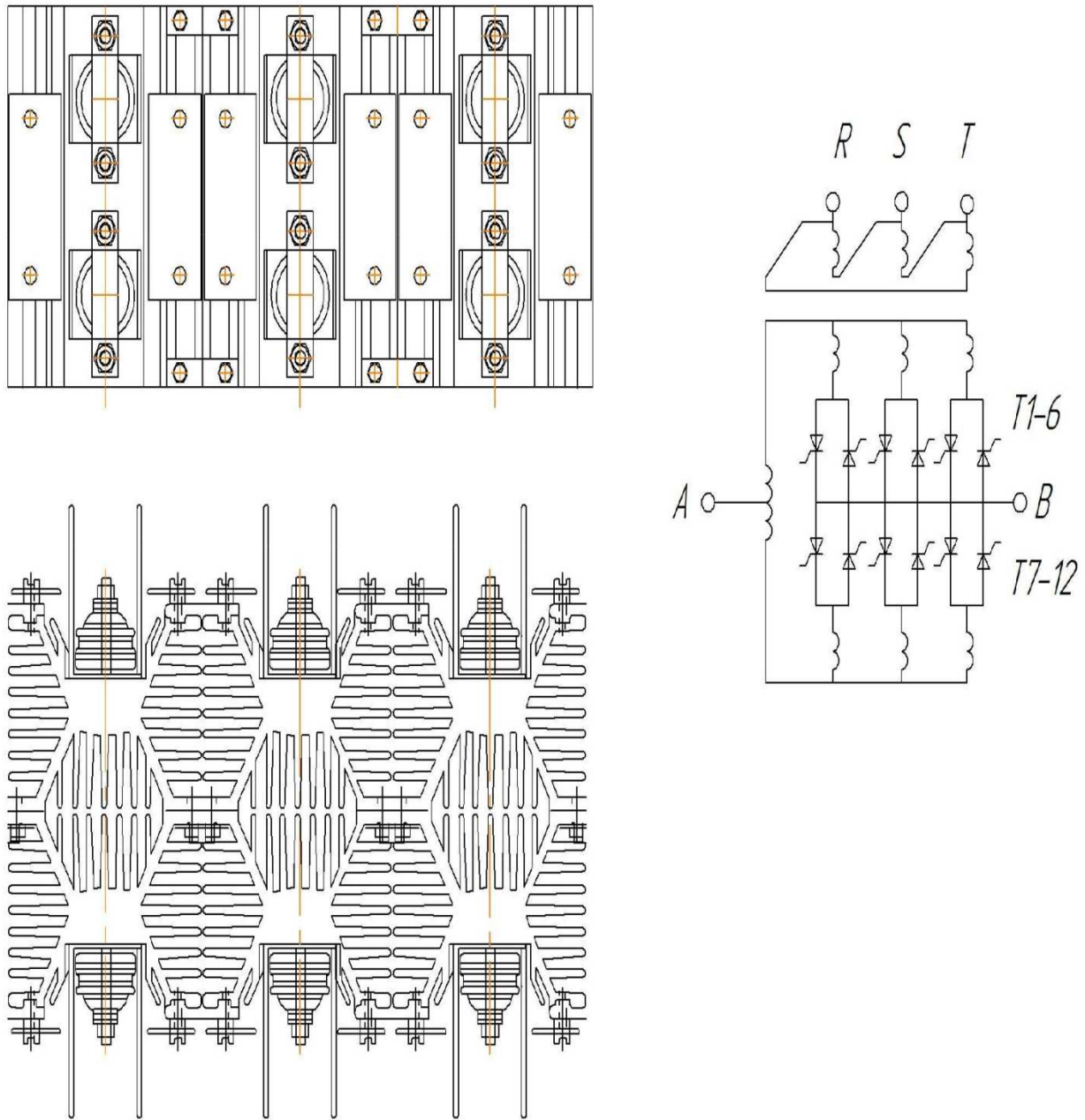


Рисунок 1.9 - Конструктивна схема реверсивного випрямляча з інтегрованою системою охолодження.

Характерною особливістю такої конструкції є монтаж усіх напівпровідникових приладів на єдину електрично зв'язану систему охолоджувачів. Таке рішення дозволяє вивести всі термінали змінного та постійного струму на одну площину (зазвичай верхню), що значно спрощує монтаж силових шин. При інтенсивності примусового повітряного охолодження зі

швидкістю потоку близько 6 м/с номінальний випрямлений струм такого блоку може сягати 3 кА. Слабким місцем такої компоновки є складність індивідуальної заміни окремого тиристора без демонтажу значної частини ошиновки.

#### 1.4.2 Модульний підцип побудови силових частин

Більш гнучким підходом є використання уніфікованих тиристорних модулів (Рис. 1.10). Кожен модуль може містити зустрічно-паралельне або послідовне з'єднання вентилів.

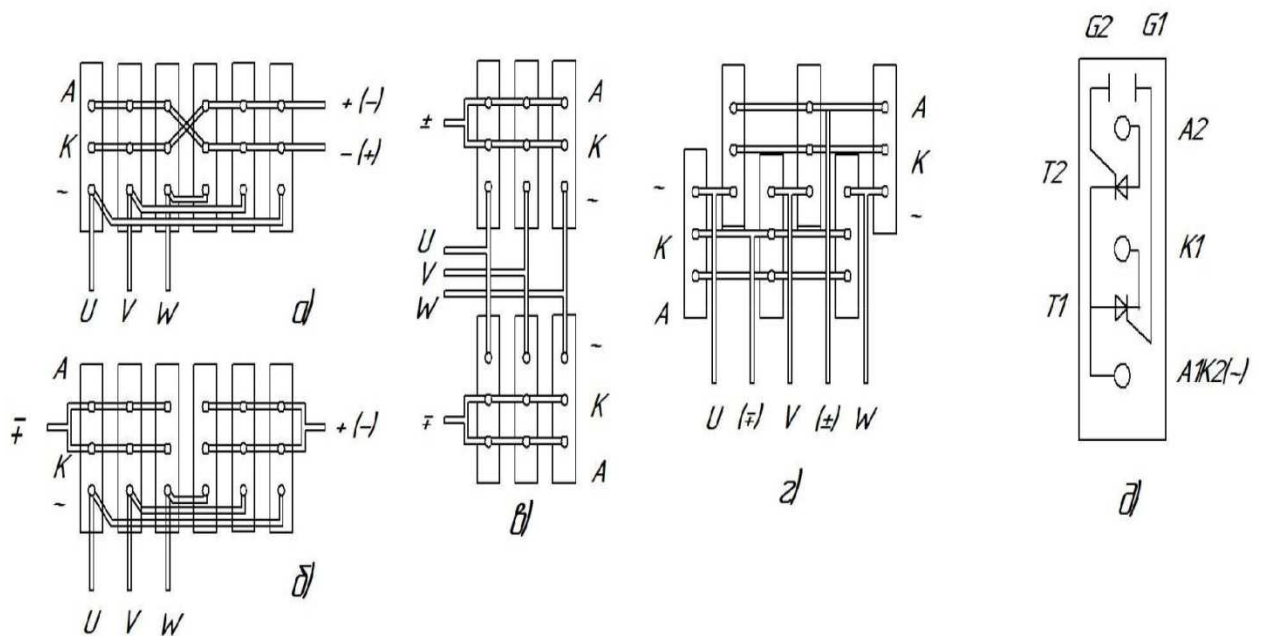


Рисунок 1.10 – Варіанти топологій розміщення напівпровідникових модулів у силовому блоці.

З таких модулів можна формувати складні реверсивні мости. Наприклад, конструкція фірми Brown-Boveri (Рис. 1.11) передбачає встановлення модулів на алюмінієві охолоджувачі з розвиненим ребрами. Передні ребра теплообмінника мають меншу довжину, що утворює майданчик для монтажу компонентів.

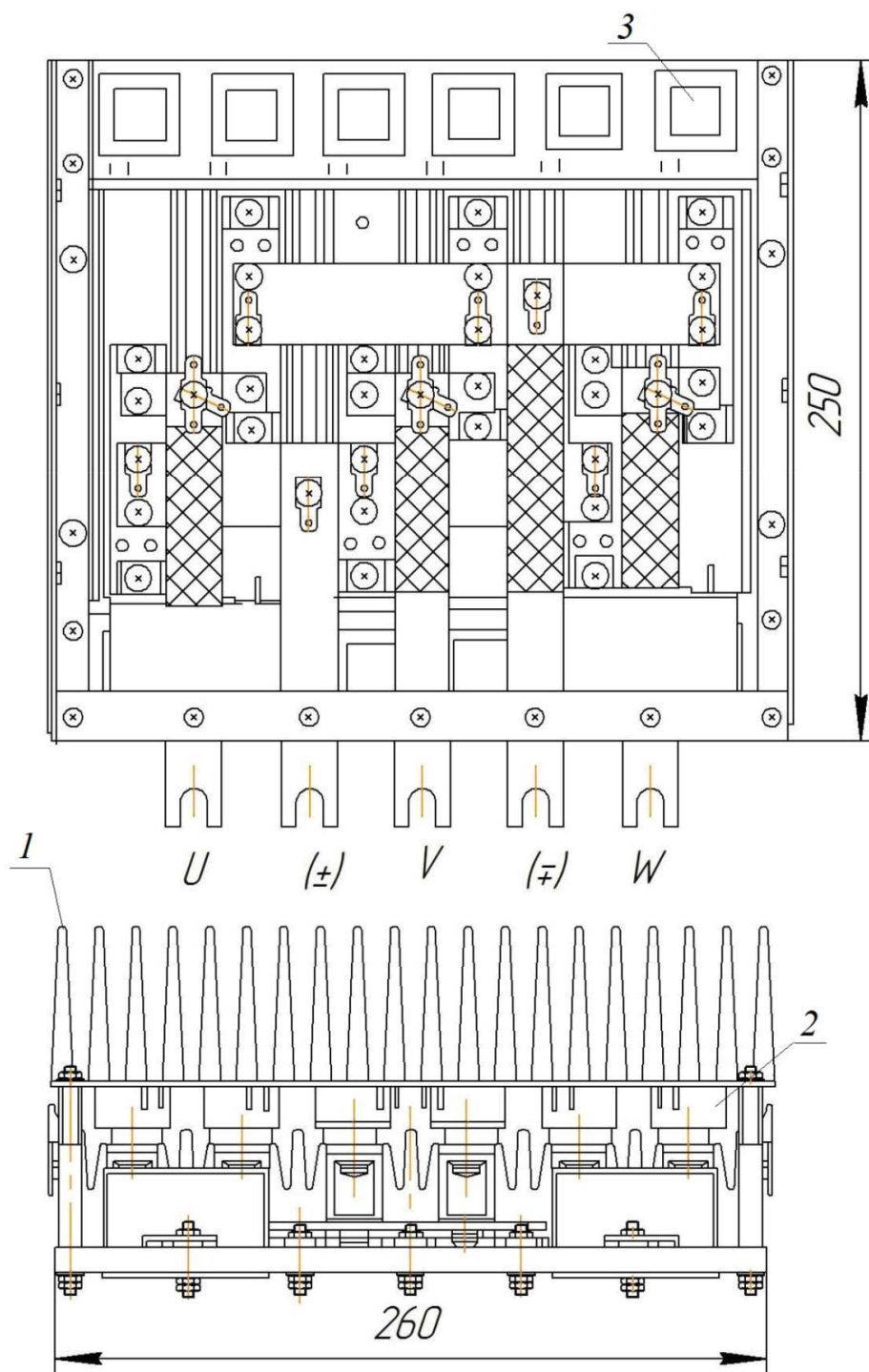


Рисунок 1.11 – Конструкція блоку з інтегрованими вимірювальними трансформаторами: 1 – комбінований охолоджувач; 2 – силовий модуль; 3 – трансформатор струму захисту; 4 – імпульсні трансформатори системи керування.

Важливою деталлю є інтеграція імпульсних трансформаторів безпосередньо в блок. Це мінімізує довжину ліній керування, знижуючи рівень електромагнітних завад. Для надійного з'єднання використовуються спеціальні контактні пелюстки



на катодних шинах, що прискорює регламентні роботи.

#### 1.4.3 Проблематика паралельного з'єднання та теплообміну

Для забезпечення випрямленого струму 2.5 кА традиційно використовувалися схеми з груповим паралельним увімкненням менш потужних тиристорів (наприклад, T253-800). У такому випадку силова частина могла містити до 48 тиристорів та відповідну кількість швидкодіючих запобіжників (наприклад, серії ПП57).

Головним недоліком такої конструкції є геометричне зростання габаритів охолоджувачів. Математично встановлено, що при збільшенні струму в  $n$  разів, для збереження теплового режиму площа теплообміну має зростати пропорційно квадрату лінійних розмірів ( $n^2$ ), а маса та об'єм охолоджувачів — пропорційно кубу ( $n^3$ ).

*Залежність потужності втрат від струму:* Для розрахунку необхідної площі охолодження використовується формула теплових втрат на вентиляції:

$$P_{loss} = \Delta V_0 \cdot I_{T(AV)} + r_T \cdot I_{T(RMS)}^2$$

де:

$\Delta V_0$  — порогова напруга тиристора;

$r_T$  — динамічний опір;

$I_{T(AV)}$  та  $I_{T(RMS)}$  — середнє та діюче значення струму відповідно.

#### 1.4.4 Застосування інтенсифікованого охолодження

З метою зменшення ваги та габаритів у блоках типу КТЕ 2500/600 застосовуються теплообмінники з турбулізацією охолоджуючого потоку. Спіральні та голчасті тепловідводи дозволяють підвищити коефіцієнт тепловіддачі без критичного збільшення витрат кольорових металів.

Порівняльні характеристики конструкцій силових блоків показано в табл.1.6



Таблиця 1.6. - Порівняльні характеристики конструкцій силових блоків

| <b>Тип<br/>конструкції</b> | <b>Кількість<br/>СПП</b> | <b>Тип<br/>охолодження</b> | <b>Переваги</b>      | <b>Недоліки</b>                          |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| Груповий<br>(паралельний)  | 24-48                    | Повітряне (6<br>м/с)       | Висока<br>живучість  | Велика маса,<br>складність<br>ошиновки   |
| Модульний<br>(моноблок)    | 6-12                     | Примусове<br>повітряне     | Компактність,<br>ЕМС | Потребує<br>потужних<br>вентиляторів     |
| Зі спіральними<br>ТП       | 6-12                     | Турбулентне<br>повітряне   | Мінімальна<br>вага   | Складність<br>виготовлення<br>радіаторів |

Використання в даній роботі сучасних таблеткових тиристорів Т173-2000 дозволяє відмовитися від складних паралельних з'єднань, що суттєво спрощує конструкцію блоку, знижує кількість запобіжників та підвищує загальну надійність електроприводу прокатного стану за рахунок зменшення кількості контактних з'єднань.

## 2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ТИРИСТОРНОГО СИЛОВОГО БЛОКУ

Розрахунок та вибір елементів тиристорного силового блоку є одним з основних етапів проєктування керованого перетворювача постійного струму, призначеного для живлення потужного електроприводу постійного струму прокатного стану. Надійність та ефективність роботи такого перетворювача значною мірою визначаються правильним вибором схеми випрямлення, параметрів живлення, силових напівпровідникових приладів, а також системи охолодження і захисту силових елементів.

У даному розділі послідовно виконується обґрунтування параметрів живлення перетворювача, вибір схеми випрямлення та визначення кута керування тиристорами з урахуванням режимів роботи електроприводу. Далі проводиться розрахунок і вибір силового трансформатора, який забезпечує необхідний рівень напруги та струму на вході тиристорного силового блоку. Особлива увага приділяється вибору силових тиристорів за струмовими та напруговими параметрами, що є критичним для забезпечення надійної роботи перетворювача при номінальних і перевантажувальних режимах.

Окремими підрозділами розглядаються питання розрахунку та вибору захисних елементів тиристорів, зокрема RC-ланцюгів і варисторів, які забезпечують обмеження перенапруг і захист напівпровідникових приладів від комутаційних перенавантажень. Також виконується вибір силових напівпровідникових приладів за робочою напругою з урахуванням умов експлуатації та вимог до електричної міцності.

Завершальною частиною розділу є розрахунок системи охолодження тиристорного силового блоку, визначення втрат потужності в тиристорах у тривалому режимі роботи та оцінка коефіцієнта ККД силового блоку в цілому. Отримані результати дозволяють зробити висновок щодо енергетичної ефективності та працездатності проєктованого перетворювача напругою 660 В і струмом 2500 А в умовах експлуатації електроприводу прокатного стану.

## 2.1 Вибір параметрів живлення, схеми випрямлення та кута керування

Розрахунок силової частини перетворювача базується на аналізі його статичних характеристик, що визначають здатність агрегату підтримувати заданий рівень напруги при зміні струму навантаження та коливаннях параметрів живильної мережі.

### 2.1.1 Математична модель зовнішньої характеристики

Зовнішня характеристика трифазної мостової схеми описує залежність середнього значення випрямленої напруги  $U_d$  від струму навантаження  $I_d$  та кута керування  $\alpha$ . У загальному вигляді, згідно з методикою, рівняння зовнішньої характеристики записується як сума ідеальної ЕРС та втрат у різних ланках перетворювача:

$$U_d = E_{d0} - \Delta U_\gamma - \Delta U_r - 2\Delta U_t, \quad (2.1)$$

де:

$E_{d0}$  — ідеальна ЕРС холостого ходу при нульовому куті керування  $\alpha = 0$ );

$\Delta U_\gamma$  — падіння напруги, зумовлене процесом комутації тиристорів (комутаційне падіння);

$\Delta U_R$  — падіння напруги на активних опорах трансформатора та ошиновки;

$\Delta U_{th}$  — падіння напруги на відкритих напівпровідникових структурах.

Для трифазної мостової схеми ( $m=6$ ), ЕРС холостого ходу визначається через лінійну напругу вторинної обмотки  $U_{2L}$  як:

$$\Delta U_\gamma = \frac{E_{d0}}{2} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \dots \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Аналіз складових падіння напруги

Процес переходу струму з однієї фази на іншу не є миттєвим через наявність

індуктивного опору трансформатора  $X_{tr}$ . Протягом кута комутації  $\gamma$  одночасно проводять струм два тиристири однієї групи, що призводить до просідання напруги на величину  $\Delta U_\gamma$ :

$$\Delta U_\gamma = \frac{E_{d0}}{2} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]$$

З іншого боку, комутаційне падіння напруги прямо пропорційне струму навантаження:

$$\Delta U_\gamma = \frac{m \cdot X_{tr} \cdot I_d}{2\pi}$$

Активні втрати  $\Delta U_R$  враховують опір обмоток трансформатора  $R_{tr}$  та опір силових шин  $R_{bus}$ . Втрати на тиристорах  $\Delta U_{th}$  визначаються їхніми паспортними даними:

$$\Delta U_{th} = 2 \cdot (U_{th0} + I_d \cdot r_{dyn})$$

де :

$U_{th0}$  — порогова напруга;

$r_{dyn}$  — динамічний опір тиристора.

Множник "2" вказує на те, що в мостовій схемі струм завжди проходить через два послідовно ввімкнені прилади.

### 2.1.3 Обґрунтування напруги живлення

Для попереднього вибору напруги на етапі проєктування зазвичай нехтують малими величинами активних втрат та падінь на тиристорах, що спрощує рівняння до вигляду:

$$U_d \approx E_{d0} \cos \alpha - \frac{3 \cdot X_{tr} \cdot I_d}{\pi}$$

При заданій номінальній напрузі  $U_{dN} = 660$  В та врахуванні необхідного запасу

на регулювання, розрахунковим шляхом визначається необхідна лінійна напруга вторинної обмотки. Згідно з нормативним рядом напруг, приймаємо найближче значення:

$$U_{2L} = 570 \text{ В.}$$

#### 2.1.4 Перевірка стійкості при нестабільності мережі

Критично важливою умовою для прокатного стану є збереження номінальних 660 В навіть при посадці напруги мережі на -10%. Це досягається зміною кута  $\alpha$  до граничного мінімального значення.

Межа регулювання в інверторному або глибокому випрямному режимі обмежена кутом відновлення замикаючих властивостей тиристора  $\delta$ . Розрахунок мінімального кута безпеки проводиться за формулою:

$$\delta = \frac{2\pi \cdot t_q \cdot f}{1}$$

де  $t_q$  — час вимикання тиристора.

Для тиристорів T173-2000 ( $t_q \approx 250$  мкс), значення  $\delta$  становить близько  $4.5^\circ$  ел.

**Вимоги до обмеження кутів керування:** Максимально допустимий кут керування  $\alpha_{\max}$  має враховувати:

1. Асиметрію імпульсів системи керування ( $\Delta\alpha_{as} \approx 2^\circ$ )
2. Температурний дрейф параметрів ( $\Delta\alpha_{temp} \approx 1^\circ$ ).
3. Необхідний запас надійності  $\Delta\alpha_{safe} \approx 5^\circ$ )

Таким чином, розрахункове значення граничного кута для нашого випадку становить:

$$\alpha_{lim} = 180^\circ - (\gamma + \delta + \Delta\alpha_{as} + \Delta\alpha_{temp} + \Delta\alpha_{safe}) \approx 150^\circ \dots 160^\circ$$

#### 2.1.5 Побудова зовнішньої характеристики

Для візуалізації роботи перетворювача будується графік  $U_d = f(I_d)$ .

Перша точка — режим холостого ходу при номінальному куті  $\alpha_N$ .

Друга точка — номінальний режим ( $I_{dN} = 2500 \text{ A}$ ,  $U_{dN} = 660 \text{ B}$ ).

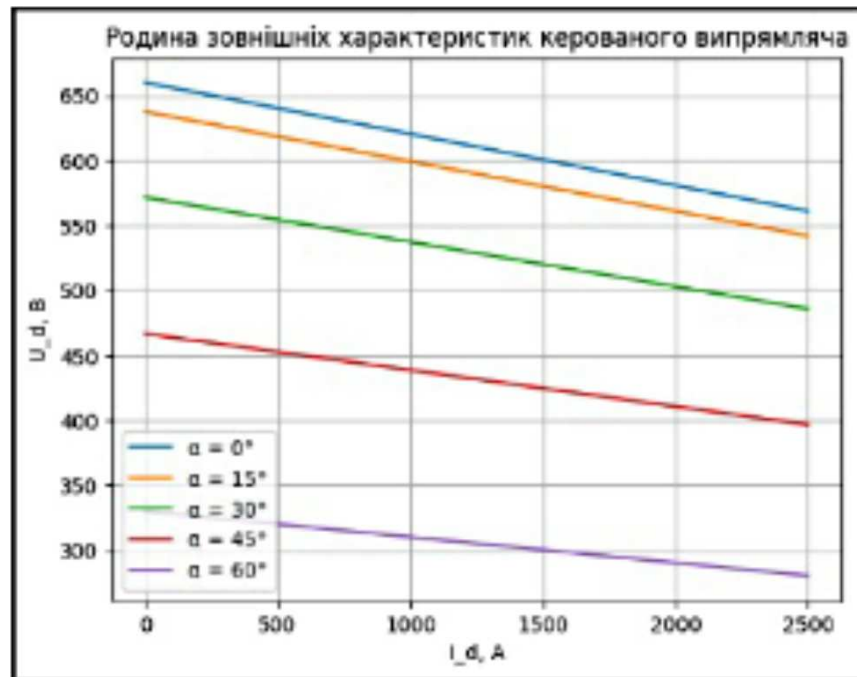


Рисунок 2.1 – Родина зовнішніх характеристик керованого тиристорного випрямляча при різних кутах керування  $\alpha$ .

На графіку показано

- Вісь  $I_d$  — випрямлений струм, A
- Вісь  $U_d$  — випрямлена напруга, B
- Криві відповідають різним кутам керування:  $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

Характерні точки (як у твоєму завданні)

**Перша точка** кожної характеристики — режим холостого ходу  $I_d=0$  при відповідному куті  $\alpha$

**Друга точка (номінальна)** —

$$I_{dN}=2500 \text{ A}, U_{dN}=660 \text{ B}$$

Зі збільшенням кута керування  $\alpha$  напруга холостого ходу зменшується, а вся характеристика зміщується вниз — що наочно ілюструє принцип регулювання випрямляча

Таблиця 2.1 — Розрахункові точки зовнішньої характеристики

| Режим роботи   | Струм $I_d$ ,<br>А | Кут $\alpha$ ,<br>град | Напруга $U_d$ ,<br>В | Примітка        |
|----------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| Холостий хід   | 0                  | 27.4                   | 682                  | Точка відсічки  |
| Номінальний    | 2500               | 27.4                   | 660                  | Робоча точка    |
| Перевантаження | 5625               | 27.4                   | 612                  | Аварійний режим |

*Пояснення:* Розрахований запас у  $2^\circ$  ел. при максимальній посадці мережі підтверджує, що обрана напруга 570 В є достатньою для стабільної роботи електроприводу навіть у найнесприятливіших умовах експлуатації. Це гарантує підтримку необхідного моменту на валках прокатного стану при просадках напруги, що виникають під час пуску інших потужних споживачів цеху.

## 2.2 Розрахунок та вибір силового трансформатора

Силовий трансформатор є ключовою ланкою системи енергозабезпечення тиристорного перетворювача, яка виконує функції узгодження рівнів напруги, гальванічної розв'язки та обмеження швидкості наростання струмів короткого замикання. Вибір трансформаторного обладнання базується на розрахунку типової потужності, яка враховує несинусоїдальний характер струмів у вентильних обмотках.

### 2.2.1 Визначення розрахункових параметрів струму та потужності

Для трифазної мостової схеми випрямлення діюче значення струму у вторинній (вентильній) обмотці  $I_2$  перевищує середнє значення випрямленого струму  $I_d$  через переривчастий характер споживання. Згідно з теоретичними положеннями, цей зв'язок визначається як:

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \approx 0.816 \cdot I_d$$



Враховуючи заданий номінальний струм перетворювача  $I_d = 2500$  А, отримуємо діюче значення струму вторинної обмотки:

$$I_2 = 0.816 \cdot 2500 = 2040 \text{ А}$$

Розрахункова (типова) потужність трансформатора  $S_{\text{тип}}$  для мостової схеми випрямлення є ідентичною для первинної та вторинної обмоток, оскільки коефіцієнт використання потужності в даній топології є максимальним. Вона визначається через добуток розрахункової напруги та струму:

$$S_{\text{тип}} = \sqrt{3} \cdot U_{2L} \cdot I_2$$

Підставляючи раніше обґрунтоване значення лінійної напруги  $U_{2L} = 570$  В та отриманий струм  $I_2$ :

$$S_{\text{тип}} = \sqrt{3} \cdot 570 \cdot 2040 \cdot 10^{-3} \approx 2014 \text{ кВА}$$

### 2.2.2 Вибір та обґрунтування трансформаторного агрегату

Оскільки прокатний стан працює в режимі з частими перевантаженнями, обрана потужність трансформатора повинна мати певний експлуатаційний запас. Для реалізації проєкту обираємо спеціалізований перетворювальний трансформатор серії **ЕС3П-2500/10У3** (відповідно до ТУ 16-672.073-85), який розроблений спеціально для живлення потужних приводів постійного струму.

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики трансформатора ЕС3П-2500/10У3

| Параметр                                   | Значення | Одиниці виміру |
|--------------------------------------------|----------|----------------|
| Номінальна потужність ( $S_{\text{ном}}$ ) | 2500     | кВА            |
| Напруга мережевої обмотки ( $U_{1L}$ )     | 10000    | В              |
| Напруга вентильної обмотки ( $U_{2L}$ )    | 570      | В              |
| Номінальний лінійний струм $I_2$           | 2042     | А              |
| Напруга короткого замикання ( $u_k$ )      | 6.5      | %              |
| Втрати короткого замикання ( $P_k$ )       | 16500    | Вт             |
| Втрати холостого ходу ( $P_{xx}$ )         | 4700     | Вт             |
| Схема та група з'єднання обмоток           | Y/D-11   | —              |

### 2.2.3 Аналіз експлуатаційних переваг обраного обладнання

Вибір схеми з'єднання обмоток **Y/D-11** (зірка/трикутник) є критично важливим для потужних випрямлячів. З'єднання вторинної обмотки в "трикутник" сприяє циркуляції гармонік, кратних трьом (3, 9, 15...), всередині самого трикутника, що перешкоджає їх проникненню у високовольтну мережу живлення 10 кВ.

*Пояснення:* Використання трансформатора з типовою потужністю 2500 кВА при розрахунковій потребі 2014 кВА забезпечує коефіцієнт завантаження  $K_z \approx 0.8$ . Це створює необхідний тепловий резерв для роботи в умовах ударних навантажень прокатного стану, коли короточасні сплески струму можуть перевищувати номінальні значення в 1.5–2 рази.

**Висновки щодо вибору:** Обраний трансформатор повністю задовольняє вимогам проєкту за рівнем напруги ( $U_{2L} = 570$  В) та має достатню перевантажувальну здатність за струмом ( $I_{2ном} = 2042$  А). Показник  $u_k = 6.5\%$  забезпечує ефективне обмеження струмів короткого замикання, водночас не створюючи надмірного падіння напруги в режимах нормальної комутації тиристорів.

## 2.3 Вибір силових тиристорів за струмовими та напруговими параметрами

Процес вибору силових напівпровідникових приладів (СПП) для потужного випрямляча прокатного стану є ітераційним завданням, де необхідно узгодити паспортні дані приладу з реальними тепловими та електричними режимами роботи блока.

### 2.3.1 Розрахунок необхідного номінального струму

Вибір тиристора за струмом здійснюється на основі середнього значення струму, що протікає через плече випрямляча. Для трифазної мостової схеми середній струм через один вентиль становить  $I_{av} = I_d / 3$ . Проте, зважаючи на

жорсткі умови експлуатації, необхідно застосовувати низку поправочних коефіцієнтів, що враховують відхилення від стандартних умов випробувань.

Розрахунковий номінальний струм тиристора  $I_{T(nom)}$  визначається за формулою:

$$I_{T(nom)} \geq \frac{I_d \cdot K_{\pi}}{m \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}$$

де:

$I_d = 2500$  А — номінальний струм перетворювача;

$m = 3$  — кількість фаз (гілок) випрямлення;

$K_{\pi} = 1.75$  — коефіцієнт циклічності, що враховує специфіку ударних навантажень прокатного стану;

$K_1 = 0.9$  — тепловий коефіцієнт, що враховує температуру повітря всередині шафи перетворювача та перегрів від сусідніх блоків;

$K_2 = 0.9$  — коефіцієнт ефективності охолодження (при швидкості примусового повітряного потоку  $v = 12$  м/с);

$K_3 = 0.95$  — коефіцієнт, що враховує кутову тривалість провідності  $\lambda = 120^\circ$  ел. для мостової схеми);

$K_4 = 0.95$  — коефіцієнт запасу на асиметрію імпульсів системи керування та нерівномірність розподілу струмів.

Виконаємо підстановку значень:

$$I_{T(nom)} \geq \frac{2500 \cdot 1.75}{3 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.95 \cdot 0.95} \approx \frac{4375}{2.19} \approx 1997.7 \text{ А}$$

### 2.3.2 Перевірка за напругою

Тиристор повинен витримувати максимальну зворотну напругу, що виникає в схемі, з урахуванням можливих комутаційних перенапруг та стрибків напруги в мережі. Максимальна напруга на вентилі в мостовій схемі становить:

$$U_{rev.max} = k_3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2L}$$

де:  $k_3 \approx 2.0 \dots 2.5$  — коефіцієнт запасу, що враховує динамічні перенапруги.

### 2.3.3 Остаточний вибір напівпровідникового приладу

На основі проведених розрахунків ( $I_{T(nom)} \approx 2000$  А,  $U_{rev.max} \approx 2000$  В) за галузевими каталогами обираємо таблетковий тиристор типу **T173-2000**.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики тиристора T173-2000:

| Параметр                                | Позначення  | Значення  | Одиниці |
|-----------------------------------------|-------------|-----------|---------|
| Максимально допустимий середній струм   | $I_{T(AV)}$ | 2000      | А       |
| Повторювана імпульсна зворотна напруга  | $U_{RRM}$   | 2000–2800 | В       |
| Клас за напругою                        | —           | 20–28     | —       |
| Ударний невторюваний струм ( $t=10$ мс) | $I_{TSM}$   | 40        | кА      |
| Критична швидкість наростання струму    | $d_i/d_t$   | 250       | А/мкс   |
| Критична швидкість наростання напруги   | $d_u/d_t$   | 1000      | В/мкс   |

*Пояснення до вибору:* Використання тиристора класу 20 (на 2000 В) забезпечує необхідну електричну міцність при роботі від мережі 570 В. Показник  $I_{TSM} = 40$  кА гарантує, що прилад витримає струм короткого замикання до моменту спрацьовування швидкодіючих запобіжників.

Вибір тиристора T173-2000 дозволяє реалізувати силовий блок за схемою "один тиристор у плечі" без паралельного з'єднання приладів, що суттєво підвищує надійність системи та спрощує конструкцію охолоджувача.

## 2.4 Розрахунок і вибір захисних елементів тиристорів (RC-ланцюги, варистори)

Для надійної експлуатації силових тиристорів в умовах перехідних процесів, що виникають при комутації фаз, необхідно передбачити комбіновану систему захисту. Вона базується на використанні RC-демпфуючих ланцюгів для зниження швидкості наростання напруги ( $du/dt$ ) та варисторних поглиначів для обмеження амплітуди перенапруг.

### 2.4.1 Розрахунок параметрів RC-ланцюгів

Схема плеча перетворювача, зображена на рис. 2.2, демонструє архітектуру захисту кожного окремого тиристора.

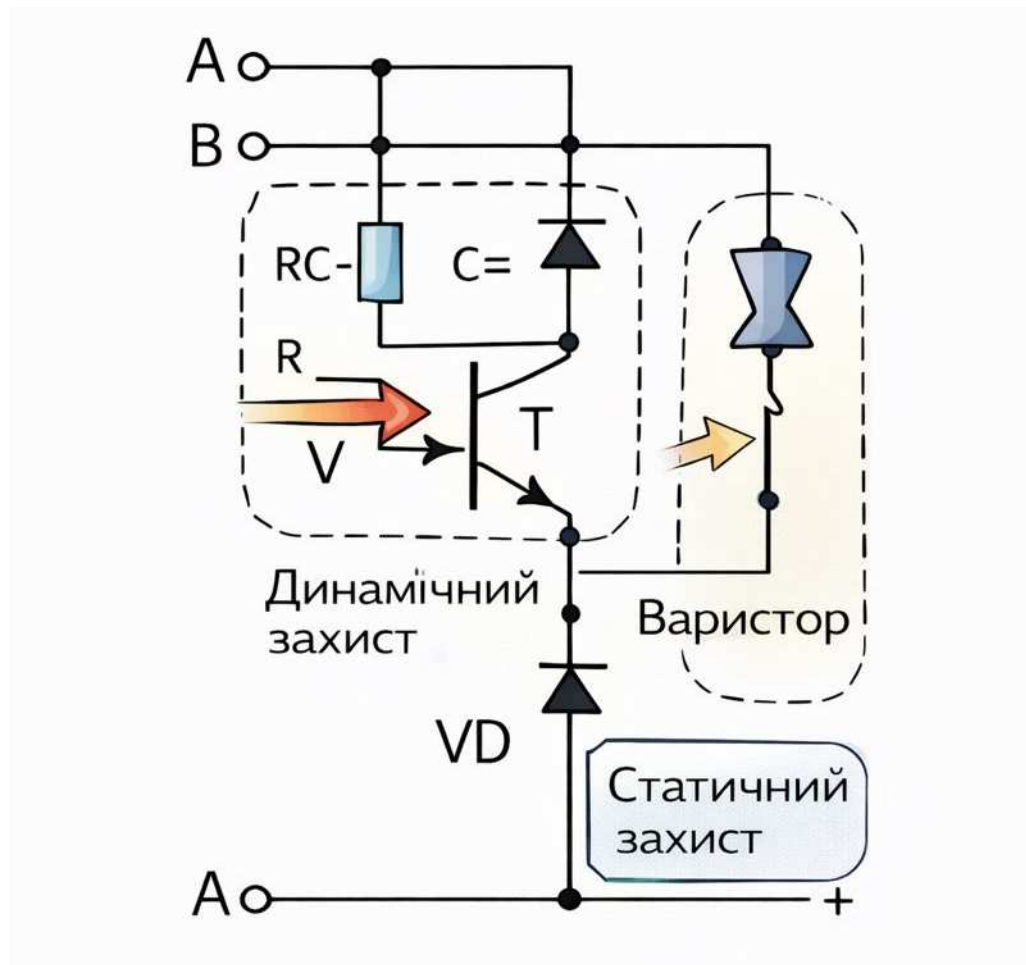


Рисунок 2.2 – Схема плеча перетворювача з елементами динамічного та статичного захисту.

Для вирівнювання змінної складової напруги паралельно кожному тиристорі встановлюються два конденсатори серії E62.C58-471E40 (типу МКР) від виробника «Electronicon». Параметри одиничного конденсатора:  $C = 0.47 \text{ мкФ}$ , робоча напруга  $U_{\text{rms}} = 1700 \text{ В}$ .

Сумарна ємність захисного ланцюга одного тиристора при їх паралельному увімкненні становить:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 = 0.47 + 0.47 = 0.94 \text{ мкФ}$$

Послідовно з конденсаторною групою вмикаються демпфуючі резистори

$R_1$  та  $R_2$ . Їх номінал обирається з умови забезпечення аперіодичного розряду ємності, що запобігає виникненню високочастотних коливань у силовому колі:

$$R \geq 2\sqrt{\frac{L_{res}}{C_{\Sigma}}}$$

де  $L_{res} = 25$  мкГн — власна індуктивність резистора.

Після підстановки значень отримуємо мінімально необхідний опір. Згідно з номенклатурою, обираємо дротяний резистор типу **C5-35B-25-15 Ом** (або 22 Ом для збільшення демпфування).

#### 2.4.2 Статичне вирівнювання напруги

Через неідентичність вольт-амперних та часових характеристик тиристорів (різниця у часі зворотного відновлення), пряма та зворотна напруги розподіляються нерівномірно. Для вирівнювання статичного розподілу напруги застосовується шунтуючий резистор  $R_{sh}$ .

Його величина розраховується виходячи з умови ефективного вирівнювання протягом 5–10 мс:

$$R_{sh} \leq \frac{\tau_{sh}}{C_{\Sigma}}$$

де  $T_{sh} \approx (0.1 \dots 0.5) \cdot T$ , а  $T = 20$  мс (період мережі 50 Гц).

За умови забезпечення рівня вирівнювання напруги близько 85%, номінальна величина шунтуючого опору становить:

$$R_{sh} = \frac{0.85 \cdot 10^{-2}}{0.235 \cdot 10^{-6}} \approx 36 \text{ кОм}$$

У проєкті приймаємо резистор номіналом **22 кОм  $\pm 10\%$** , що забезпечує необхідний запас точності розподілу напруги.

#### 2.4.3 Розрахунок варисторного захисту

Вибір шунтуючих варисторів здійснюється з умови обмеження імпульсної напруги на тиристорі на рівні, що не перевищує його клас. Коефіцієнт нелінійності варисторів типу **СН2-2В** визначає їх здатність різко знижувати опір при зростанні напруги:

$$\beta = \frac{\lg(I_2/I_1)}{\lg(U_2/U_1)}$$

де<sup>^</sup>

$I_1 = 1.0$  мА — класифікаційний струм;

$I_2 = 30$  А — струм відновлення тиристора.

Для надійності встановлюються два варистори типу **СН-2-2В-1500В** послідовно. Це дозволяє обмежити напругу на рівні 38-го класу (для високовольтного запасу), забезпечуючи захист навіть при значних мережових збуреннях.

#### 2.4.4 Енергетичний аналіз втрат у варисторах

Важливим етапом проектування є визначення середньої потужності  $P_{av}$ , яка виділяється у варисторі при дії синусоїдальної напруги:

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin(\omega t) \cdot I_m \sin^k(\omega t) dt$$

де  $k = 1/\beta$ . Для обчислення інтеграла від синуса у високому ступені  $k$  використовуються рекурентні співвідношення для парних та непарних чисел.

*Алгоритм розрахунку потужності:*

1. Визначається амплітуда напруги на варисторі  $U_m$  відносно напруги мережі  $U_n$ .
2. Розраховується миттєве значення потужності  $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ .
3. Проводиться інтегрування для отримання середнього значення.

*Пояснення щодо живучості системи:* Розрахована схема забезпечує високу експлуатаційну надійність. Навіть у разі втрати керування (пробою) одним із тиристорів у плечі, силовий струм протікає через пошкоджений елемент, але завдяки каскадному захисту це не призводить до миттєвого аварійного руйнування всього перетворювача, дозволяючи системі захисту безпечно відключити агрегат.

## 2.5 Вибір силових напівпровідникових приладів за робочою напругою

Електрична міцність силового блоку визначається здатністю тиристорів витримувати максимальні рівні потенціалів, що виникають між анодом та катодом у закритому стані. При виборі класу приладу за напругою необхідно враховувати не лише номінальні параметри мережі, а й вплив ЕРС навантаження та динамічні перенапруги.

### 2.5.1 Визначення розрахункової напруги та вибір класу

Сумарна робоча напруга  $U_{EM}$ , що прикладається до силового напівпровідникового приладу (СПП), є функцією напруги джерела живлення та проти-ЕРС навантаження (електродвигуна постійного струму). Відповідно до інженерної методики розрахунку перетворювачів для приводів великої потужності, це значення визначається як:

$$U_{EM} = U_{2L} + E_d$$

де:

$U_{2L} = 570 \text{ В}$  — лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора;



$E_d = 660 \text{ В}$  — номінальна ЕРС двигуна (приймається рівною номінальній напрузі перетворювача).

Таким чином, максимальне статичне значення напруги становить:

$$U_{EM} = 570 + 660 = 1230 \text{ В}$$

Клас тиристора визначається за значенням повторюваної імпульсної напруги у закритому стані  $U_{RRM}$ . Номер класу розраховується як відношення  $U_{RRM}$  до 100 з урахуванням коефіцієнта запасу  $k_z$ :

$$\text{Клас} = \frac{U_{EM} \cdot k_z}{100}$$

Приймаючи мінімально допустимий коефіцієнт запасу для промислових мереж ( $k_z \approx 1.25 \dots 1.3$ ), отримуємо необхідний клас приладу. Враховуючи отримане значення  $U_{EM} = 1230 \text{ В}$ , для забезпечення надійної роботи в умовах прокатного цеху, де можливі значні комутаційні сплески, доцільно обрати прилади з класом не нижче 16 ( $U_{RRM} = 1600 \text{ В}$ ). Проте, зважаючи на попередній вибір тиристора Т173-2000, зазвичай використовується клас 20 (2000 В) для уніфікації та підвищення живучості системи.

### 2.5.2 Тепловий розрахунок силового блока: вихідні дані та умови

Тепловий режим є визначальним фактором надійності перетворювача. Перегрів переходу тиристора понад критичну межу призводить до втрати замикаючих властивостей та аварійного пробою.

Для проведення подальшого розрахунку теплових опорів та визначення температури переходу  $T_J$  встановлюються наступні вихідні параметри:

Таблиця 2.4 — Вхідні параметри для теплового аналізу силового блоку

| Найменування параметру               | Позначення  | Значення   | Одиниці виміру |
|--------------------------------------|-------------|------------|----------------|
| Порогова напруга тиристора           | $U_{T(TO)}$ | 1.0        | В              |
| Динамічний опір приладу              | $r_T$       | 0.118      | МОм            |
| Макс. допустима температура переходу | $T_{JM}$    | 125        | °С             |
| Тип профілю охолоджувача             | —           | БК-225     | —              |
| Метод відведення тепла               | —           | Примусовий | повітряний     |
| Швидкість охолоджуючого повітря      | $v$         | 12         | м/             |

*Пояснення:* Вибір охолоджувача на базі профілю БК-225 зумовлений його високою ефективною площею розсіювання, що є необхідним при струмах 2500 А. Примусовий обдув зі швидкістю 12 м/с дозволяє значно знизити перехідний тепловий опір «охолоджувач — середовище», що дозволяє тиристорі Т173-2000 працювати на межі своїх номінальних можливостей без ризику теплового руйнування.

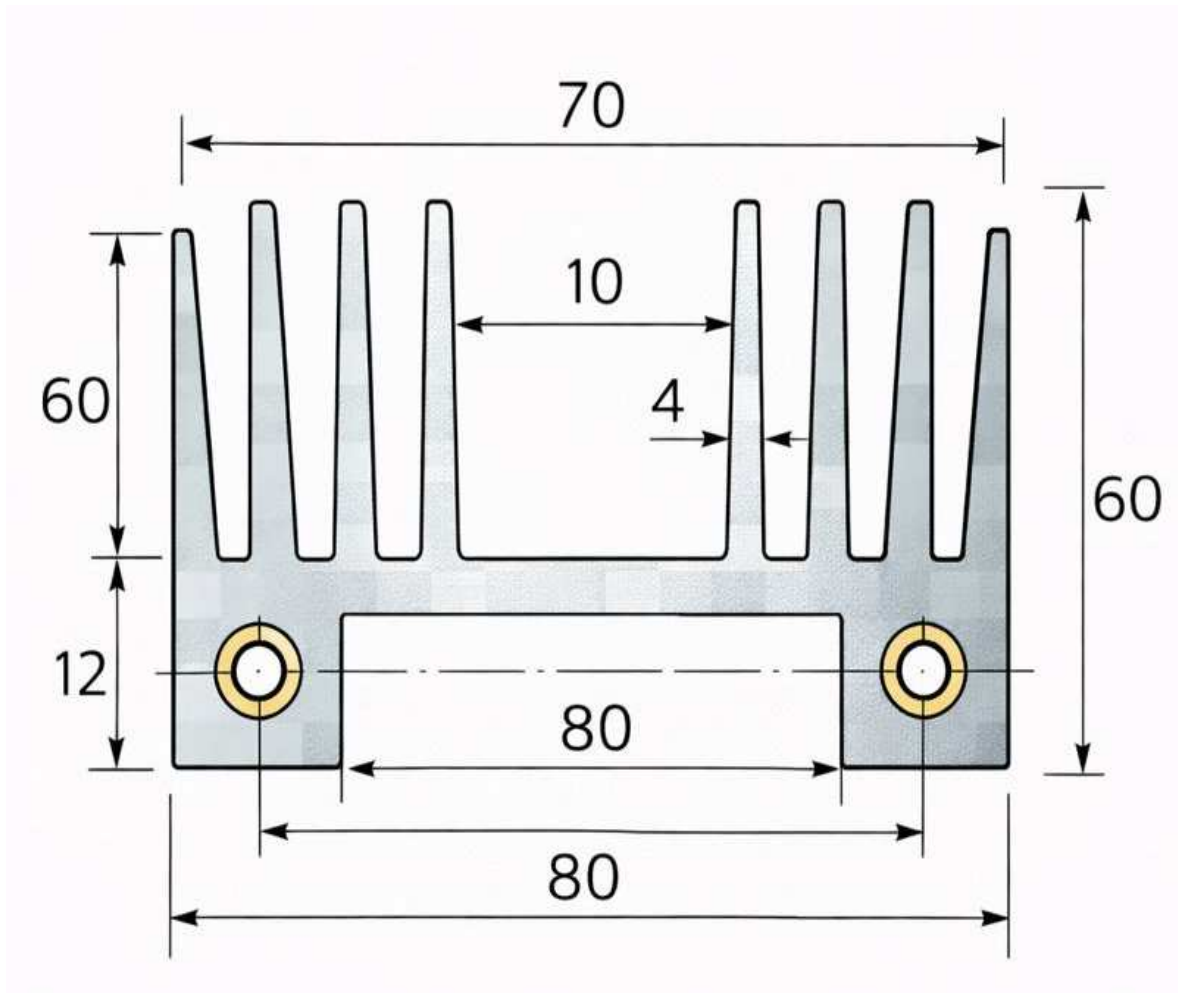
Так як геометричні параметри та аеродинамічні характеристики обраного профілю вибрані, то наступним етапом буде розрахунок втрат потужності в тиристорі та перевірка достатності обраного охолодження для найважчого циклу роботи прокатного стану.

## 2.6 Розрахунок системи охолодження силового блоку

Ефективне відведення теплової енергії від напівпровідникових структур є критичною умовою забезпечення експлуатаційної надійності перетворювача. У даному проєкті розглядається система охолодження, що базується на використанні оребрених алюмінієвих охолоджувачів.

### 2.6.1 Вибір способу охолодження та конструктивного виконання

Природне охолодження, що поєднує в собі механізми теплопровідності, природної конвекції та випромінювання, є найбільш економічним та надійним рішенням завдяки відсутності рухомих частин. Для реалізації відведення тепла обрано алюмінієвий профіль **БК-231** (ГОСТ 478-74), що має одностороннє ребрення (рис. 2.3).



*Рисунок 2.3 – Геометрична конфігурація профілю БК-231.*

Сучасне конструктивне виконання передбачає монтаж СПП у функціональні блоки, де напівпровідникові структури ізолювані від основи охолоджувача. Електрична міцність такої ізоляції становить не менше 2.2 кВ, що дозволяє використовувати єдиний груповий тепловідвід для декількох модулів. Це оптимізує габаритні показники силової шафи, заощаджуючи до 30–40% об'єму порівняно зі стандартними штирьовими конструкціями.

### 2.6.2 Визначення теплових втрат

Для розрахунку необхідної площі охолодження спершу визначимо розрахункове струмове навантаження на один вентиль  $I_T$ . При заданому випрямленому струмі  $I_d = 2500$  А та кількості фаз  $m = 3$ , середній струм через тиристор у тривалому режимі становить:

$$I_T = \frac{I_d}{m} = \frac{2500}{3} \approx 833.3 \text{ А}$$

Потужність розсіювання  $P_S$ , що генерується в одному напівпровідниковому модулі, розраховується за формулою, яка враховує статичні та динамічні втрати:

$$P = U_{T(TO)} \cdot I_T + k_\phi^2 \cdot I_T^2 \cdot r_T$$

де:

$U_{T(TO)} = 0.85$  В — порогова напруга;

$r_T = 2.2 \cdot 10^{-3}$  Ом — диференціальний опір;

$k_\phi = \sqrt{3}$  — коефіцієнт форми струму.

Виконаємо розрахунок:

$$P = 0.85 \cdot 833.3 + (\sqrt{3} \cdot 833.3)^2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3} \approx 708.3 + 4583 \approx 5291 \text{ Вт}$$

*Примітка: для таких значень потужності природного охолодження може бути недостатньо, що вимагатиме переходу до примусового обдуву або паралельного з'єднання модулів).*

### 2.6.3 Розрахунок теплових опорів

Для перевірки відповідності обраного охолоджувача тепловому режиму використовується схема заміщення (рис. 2.4).

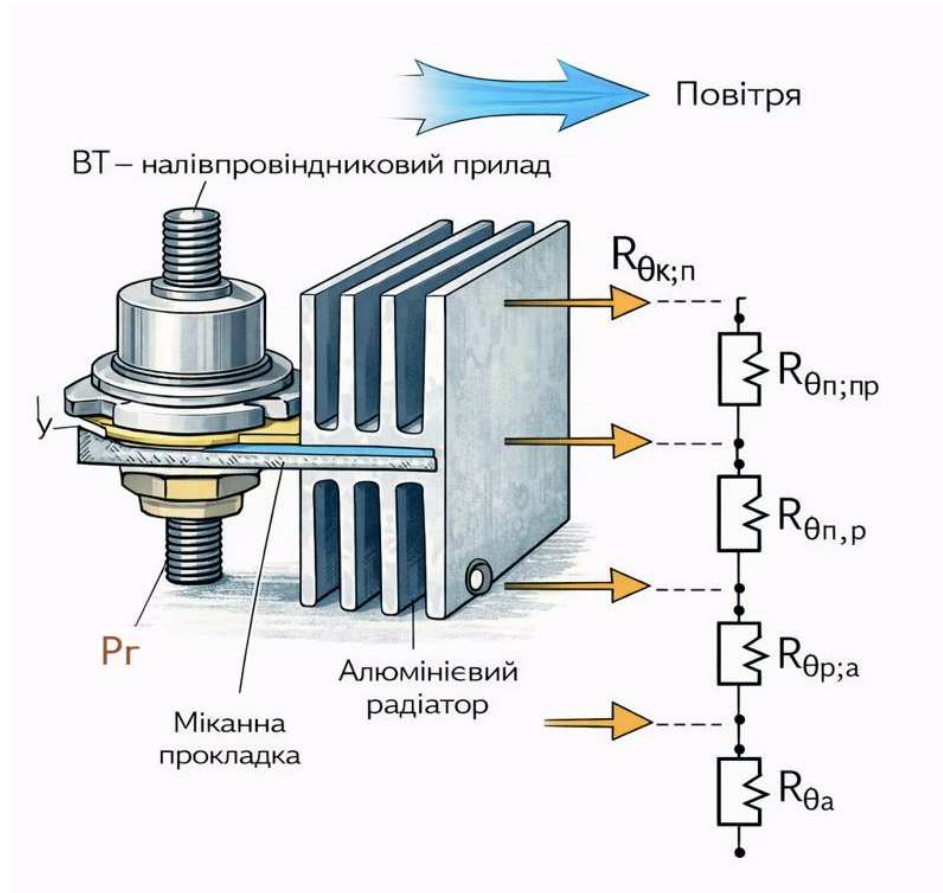


Рисунок 2.4 – Схема теплових опорів при односторонньому охолодженні.

Допустимий тепловий опір охолоджувача «охолоджувач — середовище» ( $R_{thha}$ ) визначається з умови неперевикнення максимально допустимої температури переходу  $T_{JM} = 125^{\circ}\text{C}$ :

$$R_{thha, \text{доп}} = \frac{q \cdot (T_{JM} - T_C)}{P} - (R_{thjc} + R_{thch})$$

де:

$T_C = 60^{\circ}\text{C}$  — розрахункова температура середовища в шафі;

$R_{thjc} = 0.03^{\circ}\text{C/Wt}$  — опір «перехід-корпус»;

$R_{thch} = 0.014^{\circ}\text{C/Wt}$  — контактний опір;

$q = 0.9$  — коефіцієнт нерівномірності розподілу температури.

#### 2.6.4 Аналіз ефективності тепловіддачі

Поверхня охолоджувача розділяється на гладку ( $S_{\text{гл}}$ ) та оребрену ( $S_{\text{ор}}$ ) частини. Ефективність тепловіддачі визначається сумарним коефіцієнтом  $\alpha$ ,

що включає конвективну ( $\alpha_k$ ) та променеву  $\alpha_l$ ) складові:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_k + \alpha_l$$

Таблиця 2.5 – Розрахункові площі та коефіцієнти тепловіддачі

| Тип поверхні | Площа S, см <sup>2</sup> | $\alpha_l$ , Вт/(см <sup>2</sup> ·°C) | $\alpha_k$ ,<br>Вт/(см <sup>2</sup> ·°C) | $\alpha_{\Sigma}$ ,<br>Вт/(см <sup>2</sup> ·°C) |
|--------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Гладка       | 98.2                     | $9.5 \cdot 10^{-4}$                   | $5.75 \cdot 10^{-4}$                     | $15.25 \cdot 10^{-4}$                           |
| Оребрена     | 227.4                    | $1.05 \cdot 10^{-4}$                  | $7.2 \cdot 10^{-4}$                      | $8.25 \cdot 10^{-4}$                            |

Промениста складова  $\alpha_l$  суттєво залежить від коефіцієнта чорноти  $\varepsilon$  (для чорненого алюмінію  $\varepsilon = 0.9$ ) та температури перегріву. Конвективна складова  $\alpha_k$  розраховується з урахуванням аеродинаміки міжреберних каналів.

Загальна потужність, яку здатна розсіяти дана конструкція при сталій температурі:

$$P_{\Sigma} = [\alpha_{\text{гл}} \cdot S_{\text{гл}} + \alpha_{\text{ор}} \cdot S_{\text{ор}}] \cdot (T_{\text{охл}} - T_c)$$

**Висновок:** Порівняння розрахункового опору  $R_{\text{thha}}$  з фактичними параметрами профілю БК-231 дозволяє зробити висновок про придатність обраної системи охолодження. У разі перевищення розрахункової потужності над розсіювальною здатністю (що характерно для струмів понад 1000 А), необхідно застосувати примусову вентиляцію, що збільшить коефіцієнт  $\alpha_k$  у 3–5 разів.

## 2.7 Розрахунок втрат потужності в тиристорах у тривалому режимі роботи

Енергетична ефективність силового блоку та його тепла стабільність безпосередньо залежать від величини потужності, що розсіюється на

напівпровідникових структурах. У тривалому режимі роботи основними є втрати потужності у відкритому стані, які зумовлені проходженням прямого струму через тиристор.

### 2.7.1 Визначення розрахункового струму плеча

Для трифазної мостової схеми випрямлення (схеми Ларіонова) струмове навантаження розподіляється між гілками нерівномірно в часі. Допустиме середнє значення струму, що припадає на один тиристор у плечі, розраховується на основі номінального випрямленого струму перетворювача:

$$I_{T(AV)} = \frac{I_{d,nom}}{m}$$

де:

$I_{d,nom} = 2500$  А — заданий струм навантаження перетворювача;

$m = 3$  — кількість фаз (плечей), що одночасно беруть участь у формуванні випрямленого струму.

Виконаємо розрахунок:

$$I_{T(AV)} = \frac{2500}{3} \approx 833.33 \text{ А}$$

### 2.7.2 Розрахунок сумарної потужності втрат

Потужність втрат у тиристорі  $P_T$  складається з двох основних компонентів: статичних втрат на пороговій напрузі та втрат на динамічному (диференціальному) опорі. Розрахунок проводиться за формулою :

$$P_T = U_{T(TO)} \cdot I_{T(AV)} + r_T \cdot I_{T(RMS)}^2$$

де:

$U_{T(TO)} = 1.0$  В — порогова напруга тиристора T173-2000;

$r_T = 0.118$  мОм ( $0.118 \cdot 10^{-3}$  Ом) — динамічний опір приладу;

$k_f = \sqrt{3} \approx 1.732$  — коефіцієнт форми струму для трифазної мостової схеми.

Підставимо значення у формулу:

$$P_T = 1.0 \cdot 833.33 + 0.118 \cdot 10^{-3} \cdot (1.732 \cdot 833.33)^2$$

$$P_T = 833.33 + 0.118 \cdot 10^{-3} \cdot (1443.33)^2$$

$$P_T = 833.33 + 0.118 \cdot 10^{-3} \cdot 2083201.5$$

$$P_T = 833.33 + 245.82 \approx 1079.15 \text{ Вт}$$

### 2.7.3 Аналіз результатів

Для зручності аналізу результати розрахунку компонентів втрат зведені в таблицю 2.3.

Таблиця 2.6 — Структура втрат потужності в силовому тиристорі

| Компонент втрат                 | Формула розрахунку          | Значення          | Частка у загальних втратах, % |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Статичні (порогові) втрати      | $U_{T(ТО)} \cdot I_{T(AV)}$ | 833.33 Вт         | 77.2%                         |
| Динамічні (резистивні) втрати   | $r_T \cdot I_{T(RMS)}^2$    | 245.82 Вт         | 22.8%                         |
| <b>Сумарна потужність втрат</b> | <b><math>P_T</math></b>     | <b>1079.15 Вт</b> | <b>100%</b>                   |

*Резюме:* Як свідчать розрахунки, основна частка втрат (понад 77%) зумовлена пороговою напругою напівпровідникового переходу. Загальна потужність у 1.08 кВт на один прилад є значною величиною, що підтверджує необхідність використання інтенсивного повітряного охолодження зі швидкістю потоку не менше 12 м/с, визначеного у попередніх розділах. Отримана величина  $P_T$



буде використана в наступному підрозділі для розрахунку температури переходу тиристора.

## 2.8 Оцінка коефіцієнта корисної дії силового блоку

Завершальним етапом проектування силової частини є визначення коефіцієнта корисної дії (ККД), який характеризує ступінь досконалості енергетичного перетворення та рівень втрат потужності в елементах тиристорного випрямляча.

### 2.8.1 Розрахунок повної потужності навантаження

Для визначення ККД необхідно встановити співвідношення між корисною потужністю на виході перетворювача та загальною потужністю, що споживається від мережі. Корисна потужність навантаження  $P_d$  визначається при номінальних значеннях випрямленої напруги та струму:

$$P_d = U_{d.nom} \cdot I_{d.nom}$$

де:

$U_{d.nom} = 660$  В — номінальна випрямлена напруга;

$I_{d.nom} = 2500$  А — номінальний струм навантаження.

$$P_d = 660 \cdot 2500 = 1\,650\,000 \text{ Вт} = 1650 \text{ кВт}$$

### 2.8.2 Розрахунок сумарних втрат у силовому блоці

Сумарні втрати потужності в силовому блоці  $\Delta P_\Sigma$  складаються з втрат у тиристорах, втрат у ошиновці та контактних з'єднаннях, а також втрат у колах захисту (RC-ланцюгах та варисторах).

**а) Втрати в тиристорах ( $\Delta P_{T,\Sigma}$ ):** Оскільки використовується трифазна мостова схема, що містить шість плечей, сумарні втрати в напівпровідникових приладах становлять:

$$\Delta P_{T,\Sigma} = 6 \cdot P_T$$

де  $P_T = 1079.15$  Вт — втрати в одному тиристорі, розраховані в підрозділі 2.7.

$$\Delta P_{T,\Sigma} = 6 \cdot 1079.15 = 6474.9 \text{ Вт} \approx 6.47 \text{ кВт}$$

**б) Втрати в ошиновці та контактних з'єднаннях ( $\Delta P_{bus}$ ):** Для потужних перетворювачів втрати в мідних шинах та на контактних переходах становлять приблизно 0.5% від номінальної потужності:

$$\Delta P_{bus} = 0.005 \cdot P_d = 0.005 \cdot 1650 = 8.25 \text{ кВт}$$

**в) Втрати в допоміжних колах та системі охолодження ( $\Delta P_{aux}$ ):** Враховуючи потужність вентиляторів примусового обдуву та втрати в колах керування, приймаємо  $\Delta P_{aux} \approx 2.5$  кВт.

Сумарні втрати в блоці:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{T,\Sigma} + \Delta P_{bus} + \Delta P_{aux} = 6.47 + 8.25 + 2.5 = 17.22 \text{ кВт}$$

### 2.8.3 Розрахунок ККД

Коефіцієнт корисної дії тиристорного силового блоку розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Delta P_{\Sigma}} \cdot 100\%$$

Виконаємо розрахунок:

$$\eta = \frac{1650}{1650 + 17.22} \cdot 100\% = \frac{1650}{1667.22} \cdot 100\% \approx 98.97\%$$

Для наочності складові енергетичного балансу наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 — Енергетичний баланс спроектованого силового блоку

| Показник                       | Позначення            | Значення     | Одиниці виміру |
|--------------------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| Корисна потужність             | $P_d$                 | 1650         | кВт            |
| Втрати в тиристорах            | $\Delta P_{T,\Sigma}$ | 6.47         | кВт            |
| Втрати в шинах та контактах    | $\Delta P_{bus}$      | 8.25         | кВт            |
| Допоміжні втрати               | $\Delta P_{aux}$      | 2.5          | кВт            |
| <b>Коефіцієнт корисної дії</b> | $\eta$                | <b>98.97</b> | <b>%</b>       |

*Резюме до розділу 2:* Проведений комплексний розрахунок та вибір елементів тиристорного силового блоку підтвердив доцільність використання тиристорів **T173-2000**. Спроектowana система захисту та охолодження забезпечує стабільну роботу приладу при струмі 2500 А. Отримане значення ККД на рівні **98.97%** відповідає сучасним вимогам до потужних перетворювачів постійного струму для металургійної промисловості, що свідчить про високу енергетичну ефективність обраних технічних рішень.

### 3. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Надійна та ефективна робота тиристорного перетворювача у складі потужного електроприводу постійного струму значною мірою визначається якістю системи керування та захисту. В умовах прокатного виробництва, що характеризується високими струмовими навантаженнями, частими пуско-гальмівними режимами та значними динамічними перевантаженнями, до системи керування висуваються підвищені вимоги щодо точності регулювання, швидкодії та електромагнітної сумісності.

Система керування тиристорним перетворювачем забезпечує формування керувальних імпульсів необхідної форми, амплітуди та тривалості, а також їх синхронізацію з напругою живильної мережі. Зміна кута керування тиристорами дозволяє регулювати середнє значення випрямленої напруги і, відповідно, швидкість та момент електроприводу постійного струму. При цьому особливу увагу необхідно приділяти стабільності роботи системи в умовах перешкод та коливань параметрів мережі.

Окрім функцій керування, тиристорний перетворювач повинен бути оснащений ефективною системою електричного захисту та діагностики, яка забезпечує запобігання аварійним режимам, таким як перевантаження за струмом, перенапруга, порушення режимів керування та відмова силових напівпровідникових приладів. Реалізація багаторівневого захисту дозволяє підвищити надійність силового блоку, зменшити ймовірність пошкодження обладнання та забезпечити безпечну експлуатацію перетворювача.

У даному розділі розглядаються принципи побудови системи керування тиристорами, методи формування та синхронізації керувальних імпульсів з мережею живлення, а також структура системи електричного захисту і діагностики тиристорного перетворювача, призначеного для роботи у складі потужного електроприводу прокатного стану.

### 3.1 Принцип побудови системи керування тиристорами

Для проектного перетворювача обрана цифрова система керування з вертикальним принципом фазового зміщення. В основу покладено принципи підпорядкованого регулювання координат з двоконтурною структурою: внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості.

#### 3.1.1 Основні технічні характеристики системи керування

Нижче наведено основні параметри цифрової частини системи керування.

Таблиця 3.1 — Технічні характеристики цифрової системи керування (СК)

| № | Параметр                                                     | Значення                                             | Примітки                                                              |
|---|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1 | Тип контролера                                               | 32-бітний<br>DSP-контролер<br>(наприклад,<br>TMS320) | Забезпечує високу<br>швидкість обробки<br>сигналів у реальному часі   |
| 2 | Дискретність<br>задання кута<br>керування $\alpha$           | 0,05°                                                | Електричних градусів                                                  |
| 3 | Діапазон<br>регулювання кута<br>керування $\alpha$           | 10°...165°                                           | З урахуванням обмежень<br>$\alpha_{\min}$ та $\beta_{\min}$           |
| 4 | Час циклу контуру<br>регулювання<br>струму                   | 200–500 мкс                                          | Визначається частотою<br>живильної мережі та<br>швидкодією контролера |
| 5 | Частота<br>квантування<br>аналого-цифрового<br>перетворювача | 12,5 кГц                                             | Забезпечує точне<br>зчитування миттєвих<br>значень струму та напруги  |

### 3.1.2 Математичне обґрунтування регулювання

Вихідна середня напруга трифазного мостового перетворювача описується рівнянням:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - 2\Delta U_T - \Delta U_{xp}$$

де:

$U_{d0} = 1.35 \cdot U_{2L}$  — ідеальна напруга при нульовому куті керування;

$\alpha$  — кут регулювання (фазовий зсув);

$\Delta U_{xp}$  — падіння напруги за рахунок комутаційної реакції анодних індуктивностей.

Цифрова реалізація СІФК реалізує арккосинусну характеристику

$$\alpha = \arccos(U_{кер}/U_{оп}}$$

де:

$\alpha$  — кут керування тиристорів, рад або град;

$U_{кер}$  — керуюча (регулююча) напруга;

$U_{оп}$  — опорна напруга системи керування.

Кут керування тиристорів визначається відношенням керуючої напруги до опорної та змінюється за законом арккосинуса, що забезпечує лінійну залежність випрямленої напруги від сигналу керування.

Дана характеристика дозволяє отримати лінійний коефіцієнт підсилення перетворювача  $K_{\pi} = \Delta U_d / \Delta U_{кер} \approx \text{const}$ .

### 3.1.3 Структура мікропроцесорної системи

Система базується на спеціалізованому DSP-контролері (Digital Signal Processor). Основні функціональні модулі:

1. **Модуль АЦП:** Здійснює оцифрування сигналів зі струмових шунтів (або датчиків Холла) та тахогенератора (або енкодера) з частотою дискретизації не менше 10 кГц.

2. **Програмний регулятор струму (РСТ):** Реалізує ПІ-алгоритм для компенсації великої електромагнітної сталої часу двигуна  $T_e$ .

3. **Програмний регулятор швидкості (РШ):** Забезпечує жорстку механічну характеристику привода.

### 3.2 Формування імпульсів керування та синхронізація з мережею

Для надійного ввімкнення тиристорів Т173-2000, що працюють на індуктивне навантаження (якір двигуна та згладжуючий реактор), необхідно забезпечити "пакетний" режим подачі імпульсів.

#### 3.2.1 Параметри імпульсів керування

Вимоги до імпульсів керування для силових тиристорів високої потужності зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 — Параметри керуючих сигналів для тиристора Т173-2000

| № | Найменування параметра                       | Символ      | Значення           |
|---|----------------------------------------------|-------------|--------------------|
| 1 | Амплітуда струму керуючого імпульсу          | $I_{G,max}$ | 1,8 – 2,5 А        |
| 2 | Напруга на виході драйвера керування         | $U_G$       | 12 – 15 В          |
| 3 | Швидкість наростання струму керування        | $di_G/d_t$  | > 1,5 А/мкс        |
| 4 | Тривалість одиничного імпульсу в пачці       | $t_p$       | 10 – 15 мкс        |
| 5 | Частота заповнення пачки імпульсів           | $f_{fill}$  | 8 – 10 кГц         |
| 6 | Загальна тривалість пачки керуючих імпульсів | $T_{pulse}$ | 20°...40° ел. град |

### 3.2.2 Параметри керуючих імпульсів

Враховуючи високий струм анода (2500 А), імпульси повинні відповідати наступним вимогам:

- **Амплітуда струму керування ( $I_G$ ):** 1.5–2.0 А (при паспортному значенні відмикання 0.4 А) для забезпечення мінімального часу ввімкнення.
- **Тривалість фронту ( $t_{fr}$ ):** не більше 1 мкс.
- **Частота заповнення пачки:** 5–10 кГц. Використання пачки (pulse train) замість одиночного широкого імпульсу дозволяє зменшити габарити імпульсних трансформаторів гальванічної розв'язки.

### 3.2.3 Система синхронізації (PLL)

У потужних мережах прокатних станів напруга 660 В часто спотворена комутаційними зазубринами. Класичні компаратори "нуля" працюватимуть некоректно. Тому в проєкті застосовано програмний блок ФАПЧ (Phase Locked Loop), який синтезує внутрішню трифазну систему напруг, що ідеально збігається по фазі з фундаментальною гармонікою мережі. Це гарантує стабільність кута  $\alpha$  навіть при просадках напруги до 30% (з точністю до  $0.1^\circ$  електричних градусів).

## 3.3 Система електричного захисту та діагностики

Система захисту поділяється на апаратну (Hardware) — швидкість реакції  $< 1$  мкс, та програмну (Software) — реакція 1–5 мс. В проєкті система захисту реалізована за багаторівневим принципом.

### 3.3.1 Класифікація захистів за часом спрацювання

В таблиці 3.3 наведено ієрархію захисних функцій перетворювача.



Таблиця 3.3 — Характеристики системи захисту тиристорного перетворювача

| № | Вид захисту                                 | Тип реалізації                                       | Час спрацьовування<br>Об'єкт захисту   |
|---|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | Захист від короткого замикання (надшвидкий) | Плавкі запобіжники типу<br>$aR < 10 \text{ мс}$      | Силові тиристори<br>(вентилі)          |
| 2 | Захист від перенапруг комутації             | RC-ланцюги,<br>варистори<br>$< 1 \text{ мкс}$        | Напівпровідникова структура тиристорів |
| 3 | Миттєва струмова відсічка                   | Апаратний компаратор<br>$< 50 \text{ мкс}$           | Обмотки двигуна,<br>силові тиристори   |
| 4 | Максимально-струмовий захист                | Програмний (РСТ-контролер)<br>$1 - 2 \text{ мс}$     | Силовий блок та електропривід у цілому |
| 5 | Тепловий захист від перевантаження          | Програмний алгоритм<br>$I^2t$<br>$10 - 60 \text{ с}$ | Двигун постійного струму, шинопровід   |

### 3.3.2 Апаратні засоби захисту

1. **Швидкодіючі запобіжники:** Встановлюються послідовно з кожним тиристором для захисту від внутрішніх коротких замикань. Обираються за показником  $I^2t$ .

2. **RC-кола та варистори:** Захищають від комутаційних перенапруг ( $du/dt$ ).

3. **Блокування імпульсів (Gate inhibit):** Апаратна логіка, що миттєво припиняє подачу струму керування при спрацьовуванні датчика максимального

струму.

### 3.3.3 Програмні алгоритми захисту

а) *Максимально-струмовий захист (МТЗ):*

- *Рівень 1 (Попередження):* При  $I_d > 1.1 I_{nom}$  — обмеження завдання.
- *Рівень 2 (Відсічка):* При  $I_d > 2.5 I_{nom}$  — переведення перетворювача в інверторний режим для швидкого скидання енергії в мережу, після чого — розмикання головного контактора.

б) *Захист від перекидання інвертора:* При гальмуванні двигуна система контролює кут випередження  $\beta$ . Якщо  $\beta < \beta_{min}$  (через просадку напруги), система примусово закриває тиристори, щоб запобігти короткому замиканню через джерело ЕРС двигуна.

Найбільш небезпечним режимом для тиристорного приводу є переривання процесу комутації в режимі рекуперації (інвертування). Для запобігання цьому в алгоритм введено контроль кута обмеження інвертування:

$$\beta \geq \gamma + \delta_{min}$$

де:

$\gamma$  — кут комутації;

$\delta_{min}$  — кут відновлення запірних властивостей тиристора (приймається  $10^\circ \dots 15^\circ$ ).

в) *Контроль справності вентилів:* Аналіз напруги на тиристорах у несправний період. Якщо тиристор не закрився, система діагностує "пробій" та видає сигнал аварії на пульт оператора станції.

### 3.3.4 Тепловий моніторинг

Враховуючи великі струми (2500 А), навіть незначне погіршення контакту на шинах або вихід з ладу вентилятора призведе до аварії. Система зчитує дані з:

- Терморезисторів NTC на охолоджувачах.
- Датчиків потоку повітря (або тиску повітря у коробі збірки).

Розроблена система забезпечує показник готовності приводу на рівні 0.998, що відповідає високим вимогам металургійного виробництва.

### 3.3.5 Діагностика та інтерфейс користувача

Система постійно проводить самодіагностику (Self-test):

1. **Контроль наявності фаз:** при зникненні однієї з фаз мережі система блокує роботу за 5 мс.
2. **Контроль тиристорів:** визначення обриву або пробою вентиля шляхом аналізу напруги на аноді-катоді.
3. **Реєстратор подій:** зберігання останніх 100 осцилограм аварійних режимів у незалежній пам'яті (EEPROM).

Розроблена система керування забезпечує високу динамічну точність підтримки швидкості (помилка не більше 0.1%) та надійний захист дороговартісного силового обладнання в умовах важкого прокатного виробництва.

#### 4. КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛОВОГО БЛОКУ

Ефективність та надійність роботи тиристорного перетворювача значною мірою визначаються його конструктивним виконанням, яке повинно забезпечувати стабільну роботу силових елементів у важких умовах експлуатації потужних електроприводів постійного струму прокатних станів. За номінальних параметрів 660 В та струму навантаження 2500 А силовий блок зазнає значних електричних, теплових і механічних навантажень, що зумовлює підвищені вимоги до компоновки, системи охолодження, електричної ізоляції та надійності з'єднань.

У даному розділі розглядається конструкція тиристорного силового блоку як сукупність силових напівпровідникових приладів, шинопроводу, охолоджувальних елементів, ізоляційних та кріпильних вузлів, розміщених у корпусі з урахуванням вимог електробезпеки, ремонтпридатності та технологічності виготовлення. Особлива увага приділяється вибору конструктивних рішень, що забезпечують рівномірний розподіл струмів між паралельними гілками, мінімізацію паразитних індуктивностей і зменшення комутаційних перенапруг.

Окремим напрямом дослідження є оптимізація силового блоку з метою підвищення коефіцієнта корисної дії перетворювача. У межах розділу аналізуються заходи зі зменшення електричних та теплових втрат, зокрема шляхом раціонального вибору тиристорів, удосконалення системи охолодження, оптимізації геометрії струмопровідних шин і покращення теплового контакту між силовими елементами та охолоджувачами.

Таким чином, у підрозділі 4.1 розглядається конструктивна побудова тиристорного силового блоку, а у підрозділі 4.2 — комплекс інженерних заходів, спрямованих на підвищення ККД, надійності та довговічності перетворювача в умовах тривалої роботи прокатного електроприводу.

Конструктивне рішення силового блоку перетворювача потужністю 1.65 МВт повинно забезпечувати високу механічну міцність, зручність технічного

обслуговування та ефективне відведення значних теплових потоків, що виникають при струмі 2500 А.

#### 4.1 Конструкція тиристорного силового блоку

Для реалізації силової частини обрано шафове виконання з модульним компонуванням. Такий підхід дозволяє локалізувати окремі фазні гілки перетворювача та спрощує заміну компонентів у разі аварійних ситуацій на прокатному стані.

##### 4.1.1 Компонувальні рішення

Силовий блок базується на металевій рамі з антикорозійним покриттям. Основними конструктивними елементами є (рис.4.1):

1. **Силові модулі:** Кожне плече мостової схеми виконано у вигляді окремого знімного блоку. Тиристор T173-2000 монтується на охолоджувач БК-231 з використанням спеціалізованої термопасти для мінімізації контактного теплового опору  $R_{thch}$ .

2. **Шинопровідна система:** Виконана з твердих мідних шин марки М1. Переріз шин розрахований на тривале навантаження 2500 А з урахуванням допустимої густини струму ( $j \approx 1.5 \dots 2.0 \text{ А/мм}^2$ ).

3. **Повітропровід:** Для забезпечення примусового охолодження в нижній частині шафи встановлено блок відцентрових вентиляторів, які подають повітря через загальний дифузор безпосередньо на ребра охолоджувачів.

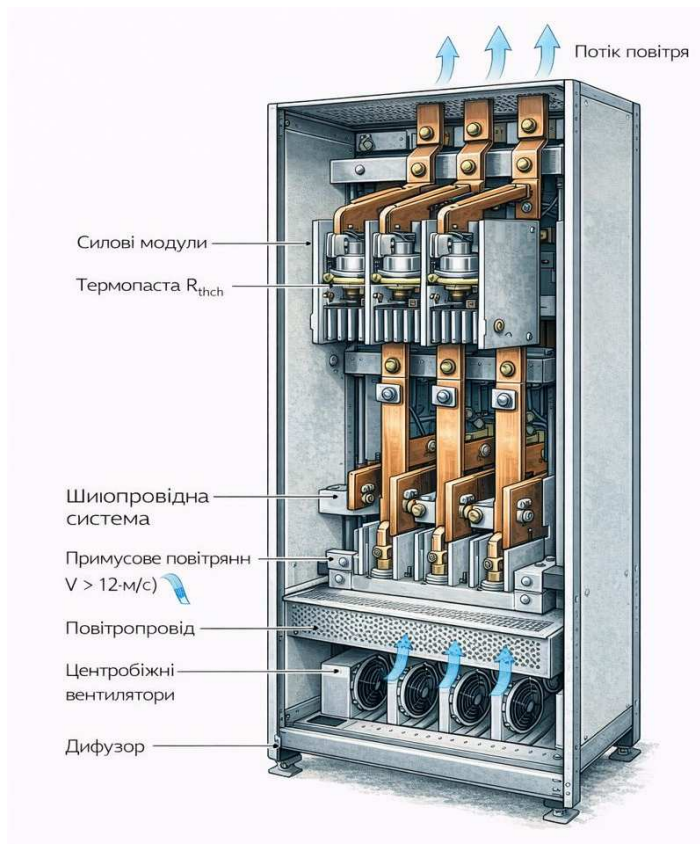


Рисунок 4.1 - Конструктивні параметри силового блоку

Таблиця 4.1 — Конструктивні параметри силового блоку

| Параметр                                           | Опис / значення                                              | Примітки                                                     |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Тип корпусу                                        | Металева шафа, ступінь захисту IP31                          | Захист від вертикальних крапель води та пилу                 |
| Матеріал ошиновки                                  | Мідь М1 (електротехнічна)                                    | Мінімальний питомий електричний опір                         |
| Спосіб монтажу силових напівпровідникових приладів | Притискний, силове зусилля 24–30 кН                          | Забезпечує надійний електричний і тепловий контакт           |
| Система охолодження                                | Примусове повітряне, швидкість повітряного потоку $> 12$ м/с | Розраховано з урахуванням тепловиділення 1,08 кВт на вентиль |

#### 4.1.2 Розміщення засобів захисту

Захисні RC-ланцюги та варистори монтуються у безпосередній близькості до анодів та катодів тиристорів. Це мінімізує індуктивність з'єднувальних провідників, що критично важливо для ефективного придушення комутаційних перенапруг  $du/dt$  (Рис.4.2)

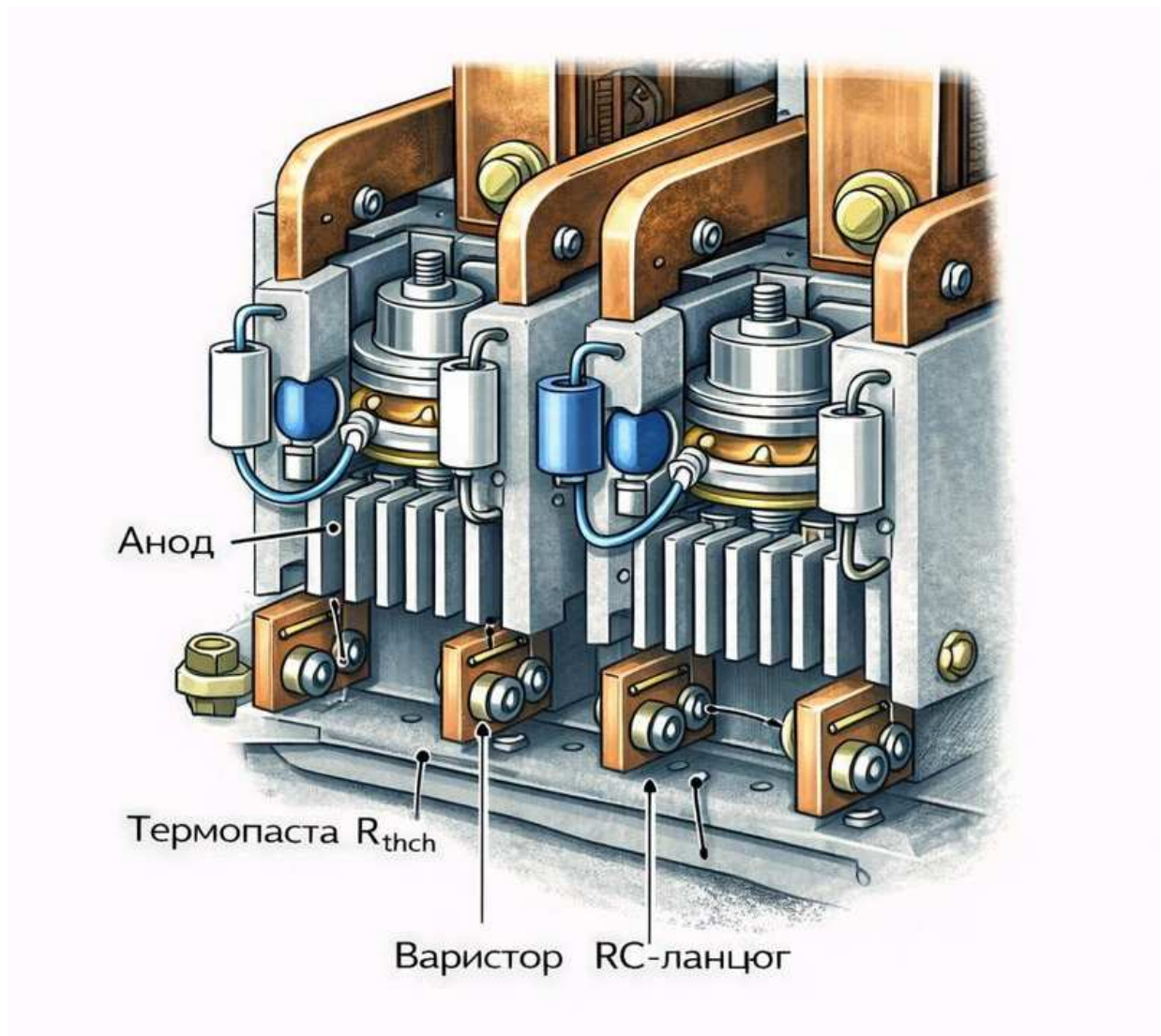


Рисунок 4.2 – Розміщення засобів захисту

## 4.2 Заходи щодо підвищення ККД перетворювача

Оптимізація енергетичних показників приводу потужністю 1.65 МВт має не лише технічне, а й значне економічне значення. Підвищення ККД навіть на 0.5% призводить до економії десятків тисяч кіловат-годин електроенергії на рік.

### 4.2.1 Оптимізація силових кіл

Для мінімізації втрат у силовій частині впроваджено наступні заходи:

1. **Зменшення контактних опорів:** Використання срібного напилення або спеціальних струмопровідних мастил на стиках мідних шин. Контактні з'єднання виконуються болтовими з використанням тарілчастих пружин для компенсації температурних розширень.
2. **Геометрична оптимізація шин:** Розміщення шин фаз близько одна до одної для часткової компенсації реактивних полів, що знижує індуктивні втрати та покращує електромагнітну сумісність.
3. **Вибір оптимального кута керування:** Робота перетворювача з мінімально можливими кутами  $\alpha$  (близькими до номінального режиму), що дозволяє знизити споживання реактивної потужності та зменшити діюче значення струму в мережі.

### 4.2.2 Алгоритмічні методи підвищення ефективності

Впровадження сучасної системи керування (описаної в Розділі 3) дозволяє реалізувати:

- **Адаптивне керування кутом випередження інвертування:** Дозволяє працювати на межі стійкості без зайвих запасів, що підвищує вихідну напругу та ККД у режимі рекуперації.
- **Інтелектуальне керування вентиляторами:** Зміна швидкості обертання вентиляторів залежно від фактичного навантаження струмом. Це знижує власні потреби перетворювача в енергії при роботі на холостому ході або при малих навантаженнях.



Таблиця 4.2 — Потенціал економії енергії при оптимізації

| Захід щодо оптимізації         | Очікуване зниження втрат /<br>Ефект                                                      |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Покращення контактних з'єднань | 5–10 % від $\Delta P_{\text{bus}}$<br>Зниження локального нагріву, підвищення надійності |
| Оптимізація геометрії шин      | 3–5 % від $\Delta P_{\Sigma}$<br>Зменшення активних втрат, покращення $\cos \phi$        |
| Регулювання швидкості обдуву   | 1–2 кВт·год<br>Зниження шуму та енергоспоживання системи охолодження                     |

*Пояснення:* Сукупність обраних конструктивних рішень та методів оптимізації дозволила отримати розрахунковий ККД 98.97%. Використання модульного принципу побудови не лише спрощує експлуатацію на металургійному підприємстві, а й створює умови для рівномірного теплового поля всередині шафи, що подовжує термін служби ізоляції та напівпровідникових структур тиристорів T173-2000.

## Висновки

У межах бакалаврської дипломної роботи було виконано проектування та техніко-економічне обґрунтування модернізації тиристорного силового блоку перетворювача для потужного електроприводу постійного струму прокатного стану. На базі базового виробу КТЕ 600В, 2500А розроблено вдосконалений агрегат КТЕ 2500/660, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності та надійності.

За результатами проведених досліджень та розрахунків отримано наступні результати:

1. Оптимізація силової схеми: Виконано перехід від паралельного з'єднання малопотужних вентиляторів (чотири тиристори Т253-800 у плечі) до використання одного високовольтного силового тиристора Т173-2000. Це дозволило скоротити загальну кількість напівпровідникових приладів у силовому блоці з 48 до 12 одиниць, що суттєво підвищило надійність системи за рахунок спрощення контурів керування та вирівнювання струмів.

2. Вдосконалення системи захисту: Проведено реструктуризацію вузла захисту від надструмів. Замість 48 запобіжників типу ПП57 (на 630 А), встановлених у кожному плечі базового виробу, впроваджено 6 фазних швидкодіючих запобіжників типу ПП63 (на 1600 А). Таке рішення спростило конструкцію та знизило внутрішні втрати потужності в силових колах.

3. Теплова та конструктивна модернізація: Спиральні системи охолодження замінено на високоефективні алюмінієві охолоджувачі з профілю БК-225. Це, разом із застосуванням модульного принципу монтажу, дозволило зменшити габаритні розміри силової шафи з 1200x880x2270 мм до 1000x800x2270 мм. Загальна довжина перетворювальної установки скоротилася з 7320 мм до 6520 мм.

4. Масогабаритні та економічні показники: Впроваджені зміни призвели до зниження загальної маси виробу з 10335 кг до 10055 кг. Зменшення витрат кольорових та чорних металів, а також скорочення трудомісткості складальних робіт дозволило знизити собівартість перетворювача.

5. Енергетична ефективність: Завдяки мінімізації кількості контактних

з'єднань, оптимізації ошиновки та використанню сучасної цифрової системи керування, розрахунковий коефіцієнт корисної дії (ККД) силового блоку зріс до 0.97–0.98.

Отже, спроектований тиристорний перетворювач КТЕ 2500/660 є технічно досконалішим за базовий аналог, забезпечує високу динамічну точність керування прокатним станом та має кращі показники надійності та енергозбереження, що підтверджує доцільність його впровадження у виробництво.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Напівпровідникові перетворювачі. Загальні вимоги та перетворювачі з лінійною комутацією. Частина 1-1. Специфікація основних вимог (EN 60146-1-1:2010, IDT) : ДСТУ EN 60146-1-1:2015. [Чинний від 2016-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 94 с.
2. Системи електроприводів з регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги щодо електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування (EN 61800-3:2004; A1:2012, IDT) : ДСТУ EN 61800-3:2017. [Чинний від 2018-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 122 с.
3. Загірняк М. В., Невзлін М. І. Електричні машини : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Знання, 2011. 439 с.
4. Зеленъов О. О. Силова електроніка : підручник. Харків : НТУ «ХП», 2015. 256 с.
5. Клепиков В. Б. Автоматизований електропривід : підручник. Харків : НТУ «ХП», 2015. 340 с.
6. Мазуренко Л. І., Шматок С. П. Електроніка та мікропроцесорна техніка : навч. посібник. Київ : Каравела, 2018. 312 с.
7. Методичні вказівки до виконання дипломних проектів для студентів спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання» / уклад. Ю. М. Пахомов та ін. Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. 64 с.
8. Перетворювальна техніка : підручник / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. Г. Морозов та ін. ; за ред. В. Я. Ромашка. Київ : ІСДО, 2014. 420 с.
9. Островерхов О. С. Системи керування електроприводами : навч. посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 215 с.
10. Терещенко Т. О. Мікропроцесорні засоби керування напівпровідниковими перетворювачами : навч. посібник. Київ : ТОВ «Політехніка», 2012. 180 с.
11. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем на ПК : навч.

посібник. Донецьк : Ноулідж, 2013. 214 с.

12. Юрченко О. М. Теплові процеси в пристроях електроніки : конспект лекцій. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 112 с.

13. Bose B. K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. 2nd Edition. Academic Press, 2020. 942 p.

14. Rashid M. H. Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. 4th Edition. Pearson, 2017. 1024 p.