

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 « Силовий блок високовольтного випрямляча 8 кВ, 315 А для електромеханічних систем із регульованою швидкістю обертання.»

Виконав: студент 4 курсу, групи Ез-412

спеціальності 141- "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"
(код і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Сергій Переверзєв

(ім'я та прізвище)

Керівник Ст. викл. Скрупська Л.С.

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ

(ім'я та прізвище)

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) Електричних та електронних апаратів
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри П. Д. Андрієнко

“ 24 ” квітня  2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Переверзєву Сергію Сергійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Силовий блок високовольтного випрямляча 8 кВ, 315 А для електромеханічних систем із регульованою швидкістю обертання»

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 22 ” 04 2024 р. № 189

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Номінальна лінійна напруга мережі (U_n) 6 кВ, номінальна випрямлена напруга (U_{dn}) 8 кВ; номінальний випрямлений струм (I_{dn}) 315 А; тип схеми випрямлення - трифазна мостова.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз об'єкта керування та обґрунтування напряму проєктування. 2 Розрахунок електричних параметрів високовольтного випрямляча. 3 Розрахунок захистів, теплових режимів та надійності силового блоку). 4 Конструктивне виконання та система керування силового блоку.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. НУЗП.656151.050 01СК – плече тиристорне - 1 арк. А1; 2. НУЗП.656151.050 02СК – блок тиристорний - 1 арк. А2 та ; НУЗП. 656151.050 03СК – охолоджувач - 1 арк. А2; 3. НУЗП.656151.050 Е1 – схема електрична плеча тиристорного - 1 арк. А1. 4. НУЗП.674591.050 Е2 – схема шафи силової – 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, 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 Переверзєв

(ім'я та прізвище)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Людмила Скрупська

(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 86 стор., 19 рисунків, 20 таблиць., 10 джерел, 3 додатка.

ВИПРЯМЛЯЧ, СИЛОВИЙ БЛОК ТИРИСТОРА, СИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ПУСК, СТАТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ТИРИСТОР, ВАРИСТОРНИЙ ЗАХИСТ, СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ.

Об'єкт розробки – силова частина блоку випрямляча (далі — СБВ), що інтегрується у структуру високовольтного перетворювача частоти. Даний пристрій призначений для забезпечення керованого енергоспоживання, плавної синхронізації при частотному пуску та динамічного регулювання кутової швидкості обертання потужних агрегатів, оснащених синхронними двигунами.

Мета роботи – комплексне розрахунково-конструкторське проектування силового модуля випрямляча з номінальними параметрами напруги 8 кВ та струму 315 А, що передбачає вибір напівпровідникових приладів, розрахунок режимів їх роботи та координацію захисних пристроїв..

Методи розробки базуються на аналітичному апараті теорії електричних кіл та напівпровідникової техніки. Виконано розрахунок параметрів гілок послідовно з'єднаних тиристорів для забезпечення рівномірного розподілу напруги в статичних та динамічних режимах. Обрано елементи вентильного комплекту, розраховано параметри захисної апаратури та систем контролю стану силових ключів.

Отримані результати: У ході роботи спроектовано високовольтний силовий блок випрямляча, конструкція якого оптимізована для роботи у складі частотно-регульованого електропривода. Основні інженерні рішення включають:

1. **Удосконалену систему захисту:** впровадження варисторних

обмежувачів та демпфуючих ланцюгів для захисту тиристорних структур від перенапруг, характерних для перехідних процесів у високовольтних мережах.

2. **Ефективну систему термостабілізації:** розраховано параметри спеціалізованих охолоджувачів, що забезпечують інтенсивне відведення тепла від напівпровідникових переходів при протіканні номінального струму $I_d = 315 \text{ A}$.

3. **Модульну архітектуру:** компоновання силової частини виконано з урахуванням специфіки високовольтних ізоляційних проміжків, що підвищує експлуатаційну надійність при пуску та регулюванні частоти синхронних машин.

Розроблений блок СБВ дозволяє мінімізувати пускові струми в мережі та забезпечити стабільну роботу промислових агрегатів у широкому діапазоні регулювання частоти.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	8
1 Аналіз об'єкта керування та обґрунтування наряду проектування.....	10
1.1 Аналіз схемних рішень високовольтних випрямлячів для електроприводів з регульованою частотою обертання.....	10
1.2 Огляд конструктивних виконань силових випрямних блоків.....	14
1.3 Обґрунтування вибору схеми та принципу керування випрямлячем.....	17
1.4 Формування технічних вимог і постановка завдання на проектування.....	20
2 Розрахунок електричних параметрів високовольтного випрямляча.....	24
2.1 Визначення номінальних електричних параметрів випрямляча.....	24
2.2 Вибір та розрахунок силового трансформатора.....	27
2.3 Вибір і перевірка параметрів вентильного комплексу.....	32
2.4 Розрахунок згладжувальних та вхідних індуктивних елементів.....	36
2.5 Визначення кутів керування в номінальному та регульовальному режимах.....	40
2.6 Аналіз роботи випрямляча при перевантаженнях і змінних режимах.....	43
3 Розрахунок захистів, теплових режимів та надійності силового блоку.....	46
3.1 Аналіз та розрахунок аварійних режимів роботи високовольтного випрямляча	46
3.2 Розрахунок і вибір елементів електричного захисту силових вентилів.....	50
3.3 Розрахунок теплових втрат у вентильному комплекті.....	54
3.4 Проектування та тепловий розрахунок системи охолодження силового блоку.....	57
3.5 Аналіз енергетичної ефективності та розрахунок	

коефіцієнта корисної дії випрямляча	61
4 Конструктивне виконання та система керування силового блоку.....	65
4.1 Конструкція та компонування силового блоку	
високовольтного випрямляча.....	65
4.2 Шинопровідна система та ізоляційні рішення силового блоку	69
4.3 Система керування випрямлячем та механізми	
синхронізації з мережею живлення.....	72
4.4 Система захисту та діагностики роботи силового блоку.....	75
Висновки.....	78
Перелік джерел посилання	80
Додаток А.....	81
Додаток Б.....	82
Додаток В.....	84

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промислової електротехніки характеризується стрімкою експансією перетворювальної техніки в усі сфери енергоємних виробництв. Застосування напівпровідникових статичних перетворювачів є ключовим фактором технічного переозброєння, що дозволяє оптимізувати режими енергоспоживання та автоматизувати складні технологічні процеси.

Класифікація та роль перетворювальних пристроїв

Ефективність функціонування сучасних електротехнічних систем базується на перетворенні параметрів електричної енергії відповідно до потреб споживача. До основних типів перетворювачів належать:

- **Випрямлячі:** пристрої для конвертації енергії змінного струму в постійний, що є базовою ланкою більшості частотно-регульованих приводів.
- **Інвертори:** здійснюють зворотне перетворення постійної напруги у змінну з регульованими параметрами.
- **Перетворювачі частоти (ПЧ):** найбільш складні системи, що забезпечують зміну частоти змінного струму, що є критичним для регулювання швидкості синхронних та асинхронних машин.
- **Імпульсні перетворювачі:** пристрої для трансформації рівнів напруги постійного або змінного струму шляхом модуляції.
- **Спеціалізовані системи:** перетворювачі числа фаз та пристрої формування імпульсів складної конфігурації.

Удосконалення архітектури напівпровідникових елементів та розробка високоефективних методів математичного моделювання дозволяють проектувати пристрої з ККД понад 98%, що суттєво покращує техніко-економічні показники виробництва.

Промислова база та конструктивні інновації

Одним із лідерів вітчизняного ринку в галузі силової електроніки є ВАТ «Перетворювач», чия номенклатура охоплює широкий спектр високовольтного обладнання для металургії та машинобудування.

Проектування силових блоків випрямляча (СБВ) у складі ПЧ базується на використанні напівпровідникових приладів таблеткової конструкції.

Порівняно зі штирьовими аналогами, таблеткові тиристори забезпечують:

1. **Двостороннє відведення тепла**, що покращує термічну стабільність переходу.
2. **Зменшення масогабаритних показників** силової шафи на 15-20\%\$.
3. **Зниження перехідного електричного опору** за рахунок більшої площі контакту.

Використання таких рішень сприяє імпортозаміщенню, дозволяючи вітчизняним підприємствам замінювати застаріле обладнання на сучасні аналоги, що відповідають світовим стандартам якості за меншої вартості інвестицій.

Мета та завдання дипломної роботи

Основною метою даної роботи є проектування силового блоку високовольтного випрямляча, інтегрованого у структуру перетворювача частоти для плавного пуску та регулювання обертів синхронних електродвигунів.

Функціональне призначення СБВ:

- Робота у **режимі випрямлення**: перетворення вхідної напруги мережі $U_{\text{sim}} = 6 \text{ кВ}$ у постійну напругу шин ПЧ.

- Робота у **режимі рекуперації**: повернення енергії гальмування двигуна та енергії, накопиченої у згладжувальному реакторі, назад у мережу живлення.

Проектований блок СБВ дозволяє не лише забезпечити надійний пуск двигуна, а й суттєво знизити енерговитрати завдяки ефективній рекуперації та вдосконаленій системі термостабілізації.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ПРОЕКТУВАННЯ

Сучасні електроприводи з регульованою частотою обертання широко застосовуються у промисловості завдяки високій енергоефективності, гнучкості керування та можливості роботи в широкому діапазоні навантажень. Важливим елементом таких систем є високовольтний випрямляч, який забезпечує перетворення змінної напруги мережі у стабілізовану напругу постійного струму для живлення інверторних або двигунних ланок електропривода.

Метою даного розділу є аналіз об'єкта керування та існуючих технічних рішень у галузі високовольтних випрямлячів, що застосовуються в електроприводах із регульованою частотою обертання. У розділі розглядаються основні схемні та конструктивні рішення силових блоків, оцінюються їх переваги та недоліки з точки зору надійності, енергоефективності та придатності до роботи в промислових умовах. На основі проведеного аналізу формується обґрунтований вибір напрямку проєктування та визначаються технічні вимоги до силового блоку випрямляча, що проєктується.

1.1 Аналіз схемних рішень високовольтних випрямлячів для електроприводів з регульованою частотою обертання

Вибір топології випрямного модуля визначає не лише якість випрямленої напруги, а й енергетичні показники всієї системи електропривода. Класифікація сучасних випрямлячів базується на їхній структурі (прості, складні), кратності пульсацій (однотактні, двотактні) та кількості фаз джерела живлення. В окремих випадках застосовують специфічні схеми з множенням напруги або проміжним перетворенням частоти для оптимізації маси трансформаторів.

Зважаючи на значну встановлену потужність об'єкта розробки ($P = 8 \text{ кВ} \cdot 315 \text{ А}$), безальтернативним є використання трифазних систем, які забезпечують рівномірне навантаження мережі живлення та кращі показники електромагнітної сумісності.

Трифазна схема з нульовим виводом (схема Миткевича)

Історично першою багатофазною топологією є трифазна однотактна схема з середньою точкою (рис. 1.1). Первинні обмотки живильного трансформатора зазвичай з'єднуються у «зірку» або «трикутник», тоді як вторинні — обов'язково у «зірку» з виведенням нейтралі.

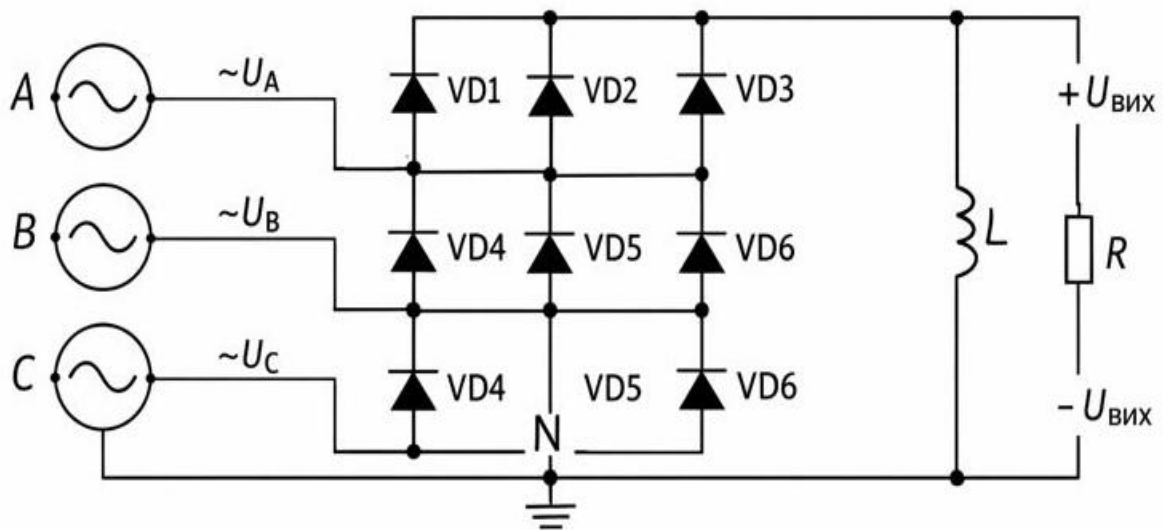


Рисунок 1.1 – Топологія трифазного випрямляча з нульовим виводом

Головним недоліком даної схеми при роботі на потужне навантаження є виникнення явища **вимушеного намагнічування** осердя трансформатора. Оскільки струм через кожен вторинну обмотку протікає лише протягом однієї третини періоду і має постійну складову $I_d / 3$, в магнітопроводі створюється некомпенсований потік постійного напрямку Φ_0 .

Наслідки цього явища:

1. **Насичення сталі:** Робоча точка на кривій намагнічування зміщується в область насичення, що призводить до несинусоїдальності

струму холостого ходу I_0 та зростання його амплітуди.

2. **Додаткові втрати:** Потік вимушеного намагнічування частково замикається через конструктивні металеві елементи (бак, шпильки), викликаючи їх нагрів вихровими струмами.

3. **Збільшення габаритів:** Для запобігання перегріву необхідно знижувати розрахункову магнітну індукцію $B_{\max}$ або суттєво збільшувати переріз магнітопроводу S_{mag} , що веде до зростання габаритної потужності трансформатора $S_{\text{твр}}$.

Для мінімізації цих ефектів застосовують з'єднання первинних обмоток у «трикутник» (Δ), що дозволяє локалізувати третю гармоніку струму, або використовують схему «зигзаг», яка дозволяє взаємно компенсувати ампер-витки постійного струму в стрижнях.

Трифазна мостова схема (схема Ларіонова)

Найбільш досконалою з точки зору використання трансформаторного обладнання є трифазна мостова схема (двотактна), зображена на рис. 1.2. Вона складається з двох груп тиристорів: катодної (VS_1, VS_3, VS_5) та анодної (VS_2, VS_4, VS_6).

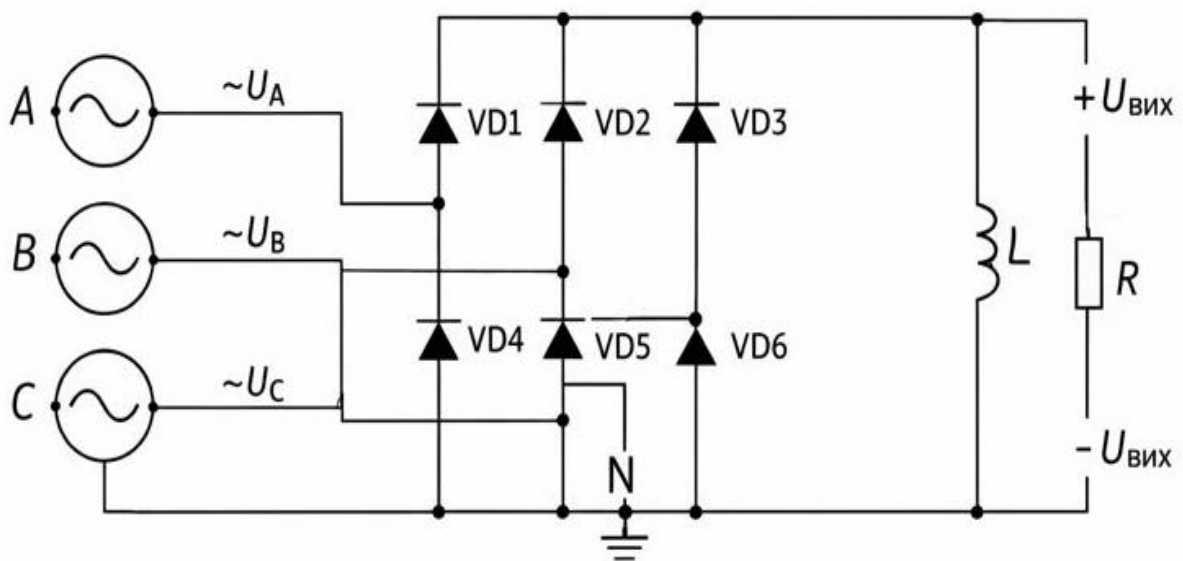


Рисунок 1.2 – Схема трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова)

Ключові переваги мостової топології:

1. Відсутність вимушеного намагнічування: Струм у вторинній обмотці протікає двічі за період в обох напрямках (інтервал провідності 120°), що забезпечує нульову постійну складову магнітного потоку.

2. Висока якість напруги: Кратність пульсацій випрямленої напруги m дорівнює 6, що значно знижує вимоги до згладжуючих фільтрів. Частота основної гармоніки пульсацій становить:

$$f_p = 6 \cdot f_{net} = 300 \text{ Гц}$$

3. Ефективність: Габаритна потужність трансформатора $S_{\text{тип}}$ у мостовій схемі є мінімальною і складає приблизно $1.045 \cdot P_d$, тоді як у схемі з нульовим виводом вона сягає $1.35 \cdot P_d$.

Порівняльні характеристики схем наведено в таблиці 1.1.

Параметр	Символ	Схема з нульовим виводом	Мостова схема (Ларіонова)
Кратність пульсацій	m	3	6
Середня напруга холостого ходу	U_{d0}	$1.17 U_2$	$2.34 \cdot U_2$
Діюче значення струму вентилів	I_v	$0.577 I_d$	$0.577 \cdot I_d$
Габаритна потужність трансформатора	$S_{\text{тип}}$	$1.35 \cdot P_d$	$1.045 \cdot P_d$
Вимушене намагнічування	—	Наявне	Відсутнє

Резюме: Враховуючи високу номінальну напругу проєктованого блоку (8 кВ) та необхідність мінімізації масогабаритних показників високовольтного трансформатора, трифазна мостова схема є найбільш раціональним вибором. Вона забезпечує високий коефіцієнт потужності, відсутність підмагнічування та найкращу якість вихідної напруги, що критично для частотно-регульованих електроприводів синхронних машин.

1.2 Огляд конструктивних виконань силових випрямних блоків

Сучасні керовані тиристорні випрямлячі (КТВ) у складі електроприводів із регульованою частотою обертання виконують роль ключового енергетичного вузла, що забезпечує перетворення енергії змінного струму трифазної мережі в постійний струм із заданими параметрами. Основними функціональними можливостями таких пристроїв є прецизійне регулювання вихідної напруги від $U_d=0$ до максимального розрахункового значення, а також, за умови відповідної топології, зміна полярності напруги та напрямку протікання випрямленого струму I_d .

а) Класифікація та функціональні особливості

Залежно від вимог технологічного процесу та архітектури системи керування, силові перетворювальні агрегати класифікують за декількома ознаками, що наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація силових випрямних установок

Ознака класифікації	Типи та варіанти виконання
Здатність до реверсування	Реверсивні (забезпечують роботу у чотирьох квадрантах) та нереверсивні.
Функціональне призначення	Для живлення якірних ланцюгів двигунів постійного струму або обмоток збудження синхронних машин.
Тип зв'язку з мережею	Трансформаторна схема або підключення через струмообмежувальні реактори.
Алгоритм керування	Системи з роздільним або узгодженим (спільним) керуванням групами тиристорів.

При проєктуванні високовольтних блоків на 8 кВ особлива увага приділяється способу підключення до мережі. Використання узгоджувального трансформатора дозволяє не лише отримати необхідний рівень напруги на вході випрямляча, а й забезпечити гальванічну розв'язку та знизити рівень

гармонійних спотворень.

б) Умови експлуатації та стійкість системи

Конструктивне виконання агрегатів загальнопромислового призначення передбачає їх розміщення у закритих приміщеннях із контрольованим середовищем. Важливим аспектом є дотримання параметрів навколишнього повітря, оскільки вони безпосередньо впливають на діелектричну міцність ізоляції та ефективність тепловідведення:

- діапазон робочих температур: від $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (номінальний розрахунок проводиться за температури $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- вологість повітря: до 90% при $T = +20^{\circ}\text{C}$ або до 50% при підвищенні температури до $+40^{\circ}\text{C}$;
- барометричний тиск: експлуатація на висоті не більше 1000 м над рівнем моря (при перевищенні цієї позначки необхідно враховувати зниження електричної міцності повітряного проміжку згідно із законом Пашена);
- склад атмосфери: відсутність вибухонебезпечних сумішей, агресивних газів та струмопровідного пилу, що здатні ініціювати пробій ізоляції.

Енергоживлення силової частини здійснюється від високовольтних мереж 6 або 10 кВ з відхиленням не більше $\pm 5\%$, тоді як кола власних потреб (системи керування, охолодження) живляться від стандартної мережі 380 В (415 В для окремих експортних варіантів) або від шин постійного струму 220 В.

в) Конструктивні принципи побудови силового блоку

Для забезпечення високої надійності при параметрах 8 кВ та 315 А конструкція випрямляча базується на **модульному (блочному) принципі**. Це дозволяє уніфікувати виробництво та спростити сервісне обслуговування. Силовий блок є закінченим конструктивним елементом, що містить тиристорні збірки, засоби захисту та елементи охолодження.

З огляду на значну щільність потужності, критичним параметром є термічна та електродинамічна стійкість до струмів короткого замикання I_{sc} .

Випрямляч повинен витримувати термічну дію струму протягом часу t_{off} , необхідного для спрацювання швидкодіючих запобіжників або релейного захисту.

Для відведення джоулевих втрат потужності P_{Δ} , що виникають у напівпровідникових структурах, використовується примусове повітряне охолодження. Тепловий потік від корпусу тиристора передається на охолоджувач (радіатор), який обдувається вентилятором. Рівняння теплового балансу для силового модуля можна представити у вигляді:

$$P_{\Delta} = \frac{T_j - T_a}{R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}}$$

де:

- T_j — температура переходу тиристора;
- T_a — температура навколишнього середовища;
- $R_{thjc}, R_{thch}, R_{thha}$ — термічні опори «перехід-корпус», «корпус-охолоджувач» та «охолоджувач-середовище» відповідно.

Зазвичай вентиляційні агрегати розташовуються в нижній частині шафи для створення ламінарного потоку повітря, що проходить крізь вертикально орієнтовані ребра охолоджувачів.

Резюме: Проведений аналіз існуючих конструкцій підтверджує, що для реалізації високовольтного випрямляча з номінальним струмом 315 А найбільш доцільним є використання касетної структури з послідовним з'єднанням тиристорів для досягнення необхідного рівня напруги 8 кВ. Це вимагає впровадження систем вирівнювання напруги (RC-ланцюгів) та використання ізоляційних матеріалів із високим індексом трекінгостійкості. Майбутня розробка має базуватися на принципах максимальної компактності при збереженні регламентованих повітряних зазорів для високовольтних ланцюгів.

1.3 Обґрунтування вибору схеми та принципу керування випрямлячем

Вибір топології силової частини високовольтного випрямляча з параметрами 8 кВ та 315 А є критичним етапом проектування, оскільки він визначає не лише енергетичну ефективність перетворювача, а й показники електромагнітної сумісності з живильною мережею та масогабаритні показники фільтруючих пристроїв.

1.3.1 Вибір схеми випрямлення

Для потужних електроприводів із регульованою частотою обертання стандартним рішенням є використання трифазних схем. Розглянемо два основні варіанти:

1. **Трифазна мостова схема (схема Ларіонова)** — забезпечує низький рівень пульсацій (6-пульсне випрямлення).

2. **Дванадцятипульсна схема (послідовне або паралельне з'єднання двох мостів)** — дозволяє суттєво знизити коефіцієнт гармонік струму мережі.

Зважаючи на високу вихідну напругу ($U_d = 8$ кВ), раціональним є застосування дванадцятипульсної схеми з послідовним з'єднанням двох шестипульсних мостів, що живляться від трансформатора з різними групами з'єднання обмоток (зірка-зірка та зірка-трикутник), що створює фазовий зсув у 30° .

Переваги обраної схеми:

· **Гармонійний склад:** Перші канонічні гармоніки в струмі мережі — 11-та та 13-та, що значно полегшує фільтрацію порівняно з 5-ю та 7-ю гармоніками у 6-пульсній схемі.

· **Розподіл напруги:** Послідовне з'єднання мостів дозволяє знизити зворотну напругу на вентилях кожного моста, що підвищує надійність при роботі на рівні 8 кВ.

· **Коефіцієнт пульсацій:** Значно нижча амплітуда пульсацій

випрямленої напруги, що зменшує індуктивність згладжувального реактора.

Порівняльні характеристики схем наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 — Порівняння схем випрямлення для високовольтного привода

Показник	6-пульсна схема	12-пульсна схема (послідовна)
Коефіцієнт пульсацій k_p	0.057	0.011
Основна частота пульсацій, Гц	300	600
Навантаження на вентиль за напругою	Максимальне	Розподілене між мостами
Складність трансформатора	Низька	Висока (дві вторинні обмотки)

1.3.2 Обґрунтування принципу керування

Для забезпечення плавного регулювання швидкості електропривода необхідно змінювати вихідну напругу випрямляча. Найбільш ефективним методом для тиристорних агрегатів є **фазове керування** (зміна кута відпирання α).

Вихідна напруга керованого випрямляча без урахування падіння напруги на вентилях визначається формулою:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_\gamma$$

де:

U_{d0} — середня напруга при нульовому куті керування $\alpha = 0$);

α — кут регулювання (фазовий зсув імпульсу керування відносно точки природної комутації);

ΔU_γ — падіння напруги, зумовлене явищем комутації (вплив індуктивності розсіювання трансформатора).

Принцип вертикального керування:

Для високовольтних систем рекомендується використання цифрової

системи імпульсно-фазового керування (СІФК), що реалізує "вертикальний" принцип. Вона базується на порівнянні опорної пілкоподібної напруги U_{ref} , синхронізованої з мережею, та напруги керування U_{ctrl} .

1. **Синхронізація:** Визначення моментів переходу фазної напруги через нуль.
2. **Формування опорного сигналу:** Генерування лінійно зростаючої напруги.
3. **Компарація:** В момент рівності $U_{ref} = U_{ctrl}$ формується короткий імпульс.
4. **Підсилення та розв'язка:** Оскільки силова частина працює під потенціалом 8 кВ, передача імпульсів керування на гейти тиристорів здійснюється через **оптоволоконні канали** або високовольтні імпульсні трансформатори для забезпечення гальванічної розв'язки.

Резюме: На основі проведеного аналізу для проєктування обрано дванадцятипульсну послідовну схему випрямлення. Це дозволяє досягти високої якості вихідної напруги та знизити навантаження на напівпровідникові прилади. Система керування базуватиметься на мікропроцесорній СІФК із оптоволоконною передачею сигналів, що є стандартом де-факто для сучасного високовольтного перетворювального обладнання.

1.4 Формування технічних вимог і постановка завдання на проєктування

а) Обґрунтування та постановка задачі розробки

Високовольтні тиристорні перетворювачі (ВТП) є критично важливими компонентами сучасних енергетичних систем. Їх функціональне призначення охоплює широкий спектр промислових застосувань: від забезпечення постійним струмом високої напруги потужних радіопередавальних комплексів та установок променевої металургії до живлення генераторів

високочастотного зварювання та плазмохімічних реакторів. Крім того, такі пристрої інтегруються у високовольні системи регульованого електропривода асинхронного та синхронного типів, а також використовуються як статичні компенсатори реактивної потужності (СКП) для стабілізації параметрів мережі.

Універсальність та висока експлуатаційна надійність даних перетворювачів зумовлені наступними технічними рішеннями:

Схемні переваги: здатність витримувати значні рівні перенапруг на кожне вентильне плече, використання розширеного імпульсу керування для стійкої комутації, впровадження систем захисту за струмом із залежною від часу характеристикою, а також можливість прецизійної стабілізації вихідних параметрів U_d або I_d .

Конструктивні особливості: архітектура блоку дозволяє функціонувати як з ізольованою нейтраллю, так і з заземленням будь-якого з полюсів (анодного або катодного). Ефективна система примусового охолодження забезпечує здатність до короточасних перевантажень, зокрема двократне перевищення номінального струму протягом $t = 10$ с.

Об'єктом проєктування у даній роботі є напівпровідниковий випрямляч у блочному виконанні, що базується на трифазній мостовій схемі (схемі Ларіонова). Таке рішення дозволяє досягти оптимального балансу між питомою потужністю та надійністю. Основні розрахункові параметри перетворювача: номінальний струм $I_{dn} = 315$ А при вихідній напрузі $U_{dn} = 8$ кВ.

б) Технічне завдання на розробку силового блоку

Головною метою проєкту є розробка силового блоку (СБВ), який інтегрується у структуру високовольного перетворювача частоти. Ця система призначена для реалізації алгоритмів плавного частотного пуску та динамічного регулювання частоти обертання потужних агрегатів, оснащених синхронними двигунами.

Календарний план розробки охоплює період з 01.12.2018 р. по 31.05.2025 р. Вихідні дані для проєктування консолідовані у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Номінальні технічні параметри випрямного блоку

Найменування параметра	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Номінальна лінійна напруга мережі	$U_{\sim n}$	6	кВ
Номінальна випрямлена напруга	U_{dn}	8	кВ
Номінальний випрямлений струм	I_{dn}	315	А
Тип схеми випрямлення	-	Трифазна мостова	-

Додаткові вимоги:

1. **Стійкість до перевантажень:** здатність витримувати $2 \cdot I_{dn}$ протягом 10 с.
2. **Універсальність:** можливість роботи на половинній напрузі $U_d / 2$ протягом 15 хвилин.
3. **Електрична міцність:** ізоляція повинна витримувати випробувальну напругу U_{test} , амплітуда якої з урахуванням відхилень мережі та перенапруг.

Відповідно до технічних вимог, випрямляч повинен працювати на Г-подібний LC-фільтр, забезпечуючи стабільну роботу при зміні навантаження від режиму холостого ходу (при $U_d = 0,05 \cdot U_{dn}$) до повного номіналу.

Важливою особливістю є вимога до універсальності підключення: система має допускати формування додаткової напруги між ізольованою нейтраллю трансформатора та будь-яким вихідним полюсом. При цьому накладаються наступні обмеження на струмові режими:

1. Струм додаткового ланцюга: $I_{add} \leq 0,17 \cdot I_d$.

2. Сумарний струм (основний + додатковий): $I_{\Sigma} \leq 1,0 \cdot I_{dn}$.

Для потреб налагодження (наприклад, радіопередавальної апаратури) передбачено режим роботи на половинній напрузі $U_d / 2$ шляхом шунтування однієї з груп плечей.

Параметри цього режиму:

- Максимальний струм: $0,17 \cdot I_{dn}$;
- Тривалість циклу: не більше 15 хвилин;
- Циклічність: до 5 разів на добу.

Електрична міцність ізоляції та вибір тиристорів базуються на здатності витримувати випробувальну напругу U_m протягом 1 хвилини. Амплітуда цієї напруги розраховується з урахуванням відхилень мережі та коефіцієнта перенапруг:

$$U_m = U_{\sim n} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + K_{pos}) \cdot K_{over}$$

де:

- $K_{pos} = 0,1$ — коефіцієнт максимально допустимого позитивного відхилення вхідної напруги;
- $K_{over} = 1,4$ — розрахунковий коефіцієнт перенапруг у системі.

Також випрямляч повинен зберігати працездатність при фазній ємності обладнання відносно корпусу до $C_{ph} = 70$ нФ. Нерівномірність розподілу напруги частотою 50 Гц між послідовно з'єднаними тиристорами, оснащеними вирівнюючими RC-ланцюгами, не повинна перевищувати $\pm 10\%$ від середнього значення.

в) Умови експлуатації та вимоги до конструкції

Силовий блок проектується для кліматичного виконання **УХЛ4** згідно з ГОСТ 15150-69, що передбачає експлуатацію в опалювальних приміщеннях при температурі повітря від 274 К до 313 К (1 40°C) та відносній вологості до 80% (при 25°C). Механічна тривкість відповідає групі **M2** (вібрації 1...50 Гц з прискоренням до 0,5g).

Основні конструктивні та безпекові вимоги:

1. **Ремонтопридатність:** конструкція повинна дозволяти заміну будь-якого компонента (тиристора, резистора, конденсатора) за допомогою стандартного слюсарного інструменту.
2. **Електробезпека:** клас захисту **01** за ГОСТ 12.2.007.0-75. Кожна складова частина повинна мати візуально позначене заземлення.
3. **Пожежна безпека:** імовірність виникнення пожежі не повинна перевищувати 10^{-6} на рік згідно з ДСТУ (ГОСТ 12.1.004-91).

Таким чином, розробка має поєднувати високу енергетичну ефективність із суворим дотриманням стандартів безпеки та надійності, що висуваються до обладнання високої напруги.

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Електричні параметри силового випрямляча визначають його функціональні можливості, надійність роботи та відповідність вимогам електропривода з регульованою частотою обертання. Особливої уваги потребує проектування високовольтних випрямлячів, оскільки робота при напругах порядку кількох кіловольт супроводжується підвищеними вимогами до ізоляції, комутаційних режимів та допустимих електричних навантажень елементів.

У даному розділі виконуються розрахунки основних електричних параметрів високовольтного випрямляча напругою 8 кВ і струмом 315 А. Розглядаються питання вибору та розрахунку силового трансформатора, вентильного комплекту, індуктивних елементів, а також визначення діапазону кутів керування у номінальних та регульовальних режимах. Окрему увагу приділено аналізу роботи випрямляча при перевантаженнях, що є характерними для промислових електроприводів. Отримані результати є основою для подальшого проектування захисних та теплових систем силового блоку.

2.1 Визначення номінальних електричних параметрів випрямляча

Проектування силової частини високовольтного випрямляча (СБВ) базується на необхідності забезпечення заданого режиму роботи навантаження при одночасному дотриманні вимог щодо якості електроенергії та надійності напівпровідникових структур. Вихідними даними для розрахунку є номінальна випрямлена напруга $U_{dn} = 8$ кВ та струм $I_{dn} = 315$ А.

Згідно з обґрунтуванням, наведеним у розділі 1.3, для реалізації заданих параметрів обрано дванадцятипульсну схему з послідовним з'єднанням двох

трифазних мостів (схема Ларіонова). Таке рішення дозволяє розподілити загальну напругу навантаження між двома мостовими групами, що знижує навантаження на одиничні тиристорні касети.

2.1.1 Розрахунок середньої випрямленої напруги холостого ходу

Для забезпечення стабільної роботи при номінальному навантаженні з урахуванням регульовальних властивостей тиристорного перетворювача, напруга холостого ходу U_{d0} повинна перевищувати номінальну напругу U_{dn} . Це перевищення необхідне для компенсації внутрішніх падінь напруги в трансформаторі, комутаційних втрат та підтримки працездатності при можливих відхиленнях напруги мережі живлення.

Розрахункове значення середньої напруги випрямляча у режимі холостого ходу ($\alpha = 0$) визначається за виразом:

$$U_{d0} = \frac{U_{dn} + \Delta U_v + \Delta U_{tr} + \Delta U_l}{K_{net} \cdot \cos(\alpha_{min})}$$

де:

ΔU_v — падіння напруги на відкритих напівпровідникових вентилях;

ΔU_{tr} — активне та індуктивне падіння напруги в обмотках трансформатора;

ΔU_l — падіння напруги в лініях зв'язку та реакторах згладжування;

$K_{net} = 0.9$ — коефіцієнт, що враховує допустиме зниження напруги мережі на 10%;

$\alpha_{min} \approx 5^\circ \dots 10^\circ$ — мінімальний кут регулювання для забезпечення стійкої комутації.

Враховуючи високу напругу системи (8 кВ), падіння напруги на вентилях ΔU_v є незначним у відсотковому відношенні. Для попереднього розрахунку приймемо коефіцієнт запасу на падіння напруги $K_z = 1.05$. Тоді загальна напруга холостого ходу для обох послідовно з'єднаних мостів

складе:

$$U_{d0\Sigma} = \frac{U_{dn} \cdot K_z}{K_{net} \cdot \cos(\alpha_{min})} = \frac{8000 \cdot 1.05}{0.9 \cdot 0.99} \approx 9427 \text{ В}$$

Оскільки мости з'єднані послідовно, напруга холостого ходу одного моста U_{d0} дорівнюватиме:

$$U_{d0} = \frac{U_{d0\Sigma}}{2} = \frac{9427}{2} = 4713.5 \text{ В}$$

2.1.2 Визначення параметрів вторинної напруги трансформатора

Діюче значення лінійної напруги на вторинній обмотці силового трансформатора U_{2L} для трифазної мостової схеми пов'язане з напругою холостого ходу наступною залежністю:

$$U_{2L} = \frac{U_{d0}}{2.34} = \frac{4713.5}{2.34} \approx 2014 \text{ В}$$

З урахуванням стандартизації обладнання та падіння напруги на індуктивностях розсіювання, приймаємо лінійну напругу кожної вторинної обмотки силового трансформатора $U_{2L} = 2050 \text{ В}$.

2.1.3 Розрахунок струмових показників плеча випрямляча

Струм, що протікає через напівпровідникові елементи, визначає тепловий режим блоку. Середнє значення струму через одиничне вентильне плече $I_{v.av}$ становить:

$$I_{v.av} = \frac{I_{dn}}{3} = \frac{315}{3} = 105 \text{ А}$$

Діюче (середньоквадратичне) значення струму вентиля $I_{v.rms}$, яке використовується для розрахунку джоулевих втрат:

$$I_{v.rms} = \frac{I_{dn}}{\sqrt{3}} = \frac{315}{1.732} \approx 181.9 \text{ A}$$

Амплітудне значення струму вентиля у нормальному режимі:

$$I_{v.max} = I_{dn} = 315 \text{ A}$$

Таблиця 2.1 — Розрахункові електричні параметри СБВ

Найменування параметра	Символ	Розрахункове значення	Одиниці
Загальна напруга холостого ходу	$U_{d0\Sigma}$	9427	В
Лінійна напруга вторинної обмотки	U_{2L}	2050	В
Середній струм тиристора	$I_{v.av}$	105	А
Діючий струм тиристора	$I_{v.rms}$	181.9	А
Кратність пульсацій напруги	m	12	—

Резюме за підрозділом:

Визначені параметри U_{2L} та струмові навантаження є базовими для подальшого вибору силового трансформатора та перевірки напівпровідникових приладів на електричну та термічну тривкість. Використання дванадцятипульсної топології дозволяє знизити вимоги до напруги одиничних обмоток трансформатора до рівня 2 кВ, що підвищує надійність ізоляційної конструкції силового блоку.

2.2 Вибір та розрахунок силового трансформатора

Силовий трансформатор у складі високовольтного тиристорного випрямляча виконує функції узгодження рівнів напруги мережі живлення та перетворювача, забезпечення гальванічної розв'язки, а також формування

необхідної фазності для мінімізації пульсацій. Для обраної дванадцятипульсної послідовної схеми випрямлення необхідний трифазний триобмотковий трансформатор (або група трансформаторів), вторинні обмотки якого мають різні схеми з'єднання для отримання фазового зсуву $\Delta\varphi = 30^\circ$.

2.2.1 Визначення розрахункової потужності трансформатора

Повна типова потужність трансформатора S_{tr} для перетворювальних установок відрізняється від потужності навантаження через несинусоїдальний характер струмів. Вона визначається як середнє арифметичне потужностей первинної S_1 та вторинних S_2 обмоток:

$$S_{tr} = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

Для дванадцятипульсної схеми з послідовним з'єднанням мостів, розрахункова потужність пов'язана з потужністю випрямленого струму $P_d = U_{dn} \cdot I_{dn}$ через коефіцієнт схеми $K_s \approx 1.05 \dots 1.06$:

$$P_d = 8000 \cdot 315 = 2520000 \text{ Вт} = 2520 \text{ кВт}$$

Враховуючи необхідний запас на регулювання та можливі втрати, загальна типова потужність трансформатора складе:

$$S_{tr} = P_d \cdot K_s \cdot K_z = 2520 \cdot 1.05 \cdot 1.02 \approx 2700 \text{ кВА}$$

де K_z — коефіцієнт запасу за потужністю.

2.2.2 Розрахунок параметрів обмоток

Первинна обмотка (ВН):

Напруга первинної обмотки U_{1L} відповідає номінальній напрузі мережі живлення (6 кВ). Схема з'єднання — «зірка» (Y) для забезпечення можливості заземлення нейтралі або «трикутник» (Δ) для локалізації гармонік, кратних трьом. Прийmemo схему «зірка рис. 2.1 з виведеною нейтраллю» (Y_n).

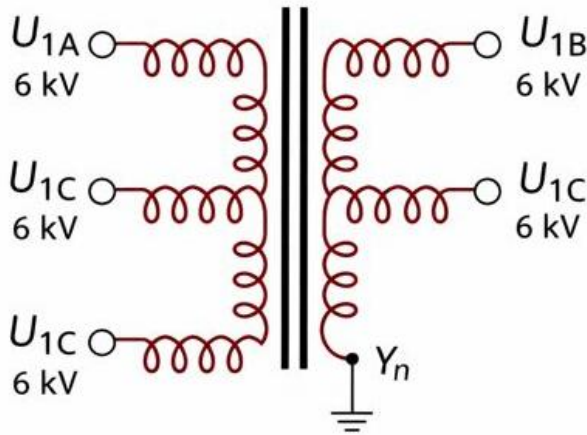


Рисунок 2.1 Первинна обмотка трансформатора

Діюче значення фазного струму первинної обмотки I_1 :

$$I_1 = \frac{S_{tr}}{\sqrt{3} \cdot U_{1L}} = \frac{2700}{\sqrt{3} \cdot 6} \approx 260 \text{ A}$$

Вторинні обмотки (НН):

Трансформатор має дві ідентичні за потужністю системи вторинних обмоток (рис.2.2). Згідно з розрахунком у п. 2.1.2, лінійна напруга кожної вторинної обмотки становить $U_{2L} = 2050 \text{ В}$.

Для забезпечення 12-пульсного режиму:

1. Перша група вторинних обмоток з'єднується у «зірку» (Y).
2. Друга група вторинних обмоток з'єднується у «трикутник» (Δ).

Діюче значення струму у вторинних обмотках I_2 (для кожної фази моста):

$$I_2 = I_{dn} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 315 \cdot 0.816 \approx 257 \text{ A}$$

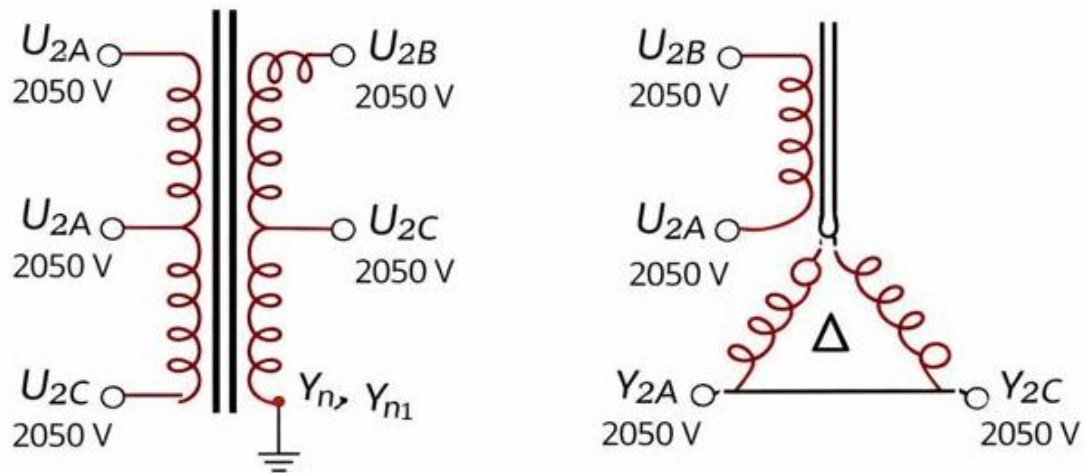


Рисунок 2.2 Вторинні обмотки трансформатора

2.2.3 Вибір конструктивного виконання

Зважаючи на високу потужність (2.7 МВА) та специфіку роботи в системах високовольтного електропривода, доцільно обрати сухий трансформатор з литою ізоляцією або масляний трансформатор герметичного виконання. Для внутрішнього встановлення у блоки СБВ перевага надається сухим трансформаторам серії ТСЗП рис. 2.3 (Трансформатор Сухий Перетворювальний Захищений).

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики обраного силового трансформатора

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна потужність	S_n	3150	кВА
Схема та група з'єднання	—	Y / Y / Δ - 11	—
Номінальна напруга ВН	U_1	6.0	кВ
Номінальна напруга НН1 та НН2	U_2	2.05	кВ
Напруга короткого замикання	u_k	6.0 ... 8.0	%
Струм холостого ходу	i_0	0.8 ... 1.2	%



Рисунок 2.3 Трансформатор сухий серії ТСЗП

2.2.4 Перевірка трансформатора за перевантажувальною здатністю

Згідно з ТЗ, система повинна витримувати двократне перевантаження за струмом протягом $t = 10$ с. Оскільки стала часу нагріву обмоток трансформатора τ значно перевищує тривалість перевантаження, перевірка здійснюється за щільністю струму j . Для мідних обмоток при короткочасних режимах допускається $j \leq 15 \dots 20$ А/мм².

При номінальному режимі щільність струму становить:

$$j = \frac{I_2}{q_w}$$

де q_w — переріз провідника обмотки.

Вибір перерізу здійснюється при детальному конструкторському розрахунку трансформатора, виходячи з умови мінімізації додаткових втрат від полів розсіювання.

Резюме :

Обраний трансформатор потужністю 3150 кВА забезпечує необхідний енергетичний потенціал для живлення випрямляча. Використання комбінованої схеми з'єднання вторинних обмоток (Y та Δ) гарантує фазовий

зсув 30° , що є базовою умовою для реалізації дванадцятипульсного алгоритму випрямлення та зниження коефіцієнта гармонік струму мережі.

2.3 Вибір і перевірка параметрів вентильного комплекту

Надійність функціонування високовольтної перетворювальної установки безпосередньо корелює з коректністю вибору напівпровідникових керованих вентилів. Даний етап проєктування передбачає ідентифікацію необхідного класу тиристорів за напругою, визначення допустимого середнього струму з урахуванням специфіки охолодження та аналіз динамічних параметрів, що забезпечують безаварійну роботу пристрою в критичних режимах експлуатації [1].

Для реалізації високовольтного випрямляча з номінальними параметрами $U_{dn} = 8 \text{ кВ}$ та $I_{dn} = 315 \text{ А}$ використовується дванадцятипульсна топологія (два послідовно з'єднані трифазні мости). Розрахункова схема одного мостового сегмента представлена на рисунку 2.4.

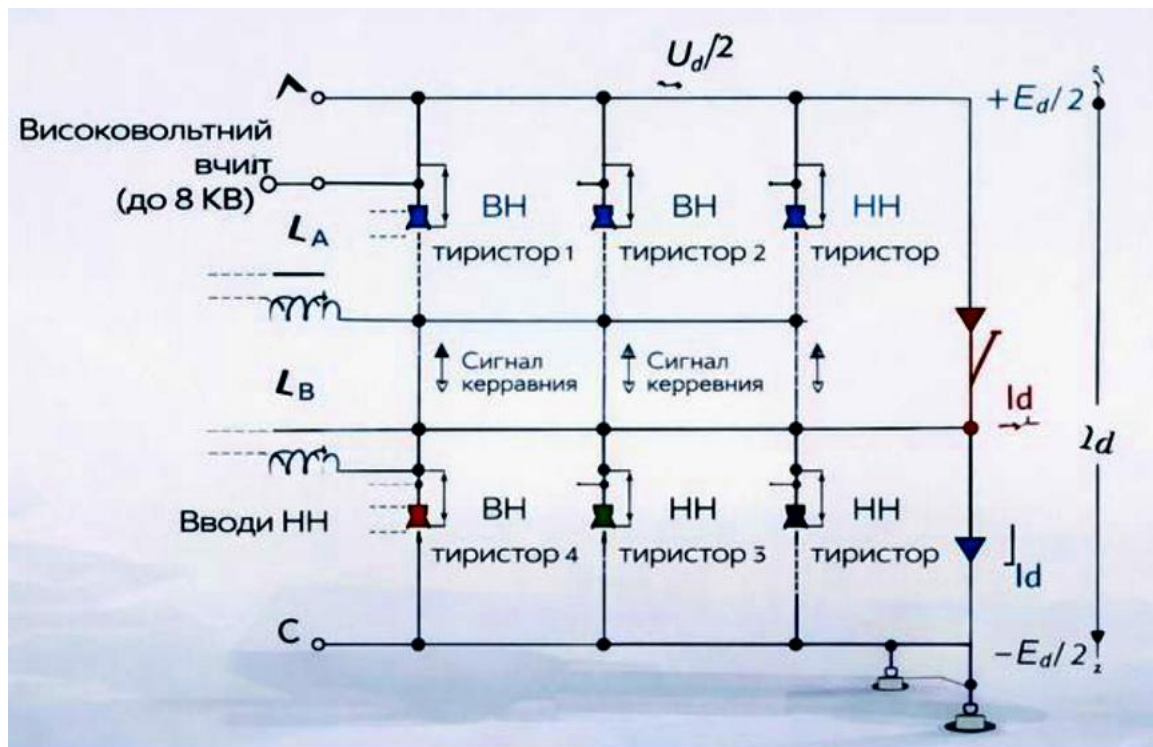


Рисунок 2.4 – Схема плеча високовольтного випрямляча (фрагмент)

2.3.1 Розрахунок струмових навантажень тиристорів

У мостовій схемі випрямлення тривалість провідного стану кожного вентиля (без урахування кута комутації γ) становить третину періоду живильної напруги:

$$\lambda = \frac{2\pi}{3}$$

Середнє значення струму, що протікає через тиристор у номінальному режимі I_{TAV} , розраховується на основі випрямленого струму I_{dn} . Оскільки в кожен момент часу в роботі знаходяться вентиля різних фаз, через які струм проходить послідовно, маємо:

$$I_{TAV} = \frac{I_{dn}}{3} = \frac{315}{3} = 105 \text{ A}$$

Максимальне (амплітудне) значення струму, яке відповідає амплітуді струму вторинної обмотки трансформатора при активно-індуктивному характері навантаження ($L_d \rightarrow \infty$), дорівнює:

$$I_{TM} = I_{dn} = 315 \text{ A}$$

Для оцінки теплових втрат у структурі напівпровідника визначається діюче (ефективне) значення струму I_{TRMS} :

$$I_{TRMS} = \frac{I_{dn}}{\sqrt{3}} = \frac{315}{1.732} \approx 181.9 \text{ A}$$

2.3.2 Розрахунок напруги та вибір класу тиристорів

Максимальна зворотна напруга $U_{rev,max}$, що прикладена до вентиляльного плеча в трифазній мостовій схемі, дорівнює амплітудному значенню

лінійної напруги вторинної обмотки:

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

де $K_{net} = 1.05$ — коефіцієнт, що враховує максимально допустиме позитивне відхилення напруги мережі згідно з нормативними вимогами.

$$U_{rev.max} = 1.414 \cdot 2050 \cdot 1.05 \approx 3043 \text{ В}$$

Враховуючи високу напругу 8 кВ та ймовірність виникнення комутаційних перенапруг, розраховуємо максимальну амплітудну напругу на плечі U_M з урахуванням коефіцієнта демпфування $K_d = 1.5$:

$$U_M = U_{rev.max} \cdot K_d = 3043 \cdot 1.5 \approx 4565 \text{ В}$$

Для забезпечення високої надійності та враховуючи необхідність послідовного з'єднання, обираємо тиристори таблеткової (пігулочної) конструкції типу Т453-630 виробництва ТОВ «Елемент-Перетворювач». Дані вентилі характеризуються високим класом напруги та покращеними динамічними параметрами.

Таблиця 2.3 — Основні технічні характеристики тиристора Т453-630

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Клас за напругою	—	38	—
Максимальна зворотна напруга	U_{RRM}	3800	В
Середній струм (при $T_c = 85^\circ\text{C}$)	I_{TAV}	630	А
Критична швидкість наростання напруги	du/dt	1000	В/мкс
Тип корпусу	—	Таблетковий	—

2.3.3 Розрахунок кількості послідовно з'єднаних вентилів

Через значну напругу плеча використання одного тиристора неможливе. Кількість послідовно з'єднаних елементів n у кожному плечі визначається за формулою:

$$n = \frac{U_M}{U_{RRM} \cdot K_s}$$

де:

U_M — пікова напруга на плечі, В;

U_{RRM} — повторювана імпульсна зворотна напруга обраного тиристора (3800 В);

$K_s = 0.7$ — коефіцієнт запасу, що враховує нерівномірність розподілу напруги між послідовними ланками.

$$n = \frac{4565}{3800 \cdot 0.7} \approx 1.71$$

Згідно з вимогами до високовольного обладнання щодо живучості системи (принцип n-1), приймаємо кількість тиристорів у кожному плечі одного моста рівною 3. Оскільки ми використовуємо дванадцятипульсну схему з двома послідовними мостами, загальна кількість тиристорів у кожній фазі (стовпі) випрямляча складе 6 шт.

Такий надлишковий вибір гарантує працездатність блоку навіть у разі пробою одного з напівпровідникових елементів, що критично для відповідальних електроприводів.

Резюме: Обраний тиристор T453-630-38 забезпечує значний запас за струмом (коефіцієнт запасу $K_f \approx 2$), що дозволяє системі стабільно працювати в режимах двократного перевантаження ($315 \cdot 2 = 630$ А). Послідовне з'єднання шести вентилів у фазній гілці створює сумарний бар'єр напруги 22.8 кВ, що більш ніж удвічі перевищує номінальний рівень 8 кВ, гарантуючи стійкість до будь-яких мережових сплесків.

2.4 Розрахунок згладжувальних та вхідних індуктивних елементів

Надійність функціонування високовольтної перетворювальної системи суттєво залежить від здатності силової схеми протистояти динамічним навантаженням у перехідних та аварійних режимах. Основним інструментом обмеження швидкості наростання струмів (di/dt) та зниження амплітуди струмів короткого замикання є вхідні фазні реактори. Крім захисної функції, індуктивності мережі та трансформатора впливають на комутаційні процеси, визначаючи тривалість перекриття фаз і рівень комутаційних провалів напруги.

Для коректного проектування силового блоку необхідно визначити сумарний індуктивний опір кола змінного струму, що включає реактивність мережі живлення та трансформаторного агрегату. Еквівалентна схема заміщення перетворювача, наведена на рисунку 2.5, дозволяє проаналізувати контур КЗ та визначити параметри обмеження аварійних струмів.

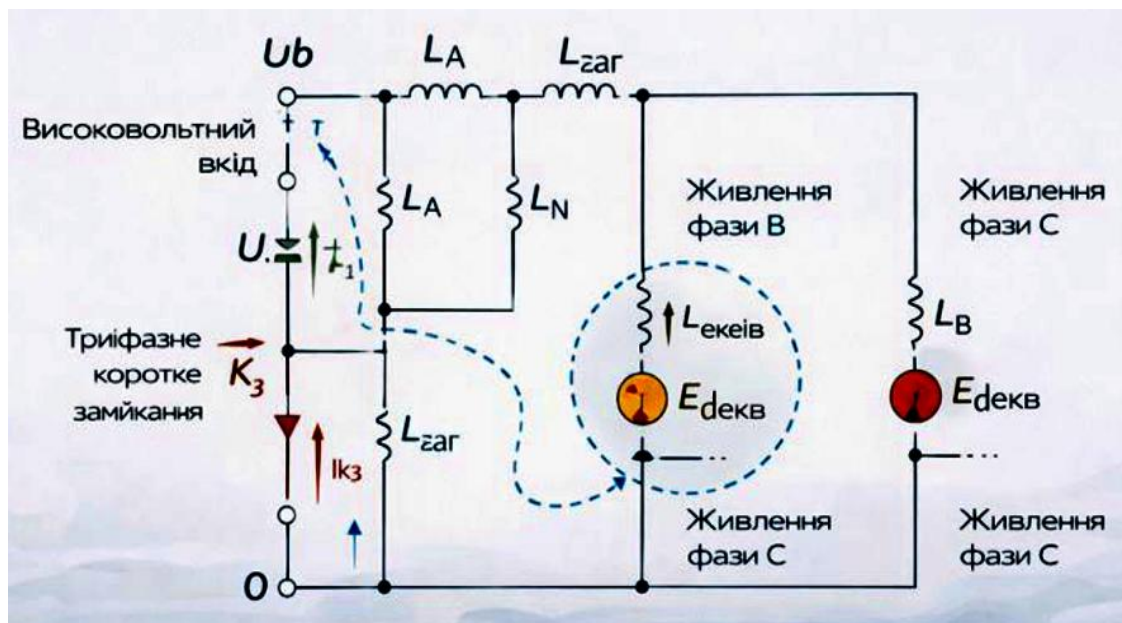


Рисунок 2.5 — Еквівалентна схема фазних індуктивностей силового кола

2.4.1 Розрахунок реактивного опору системи живлення

Еквівалентний індуктивний опір мережі X_{net} , приведений до кожної

фази на шинах підключення, розраховується на основі потужності короткого замикання в точці приєднання:

$$X_{net} = \frac{U_L^2}{S_{sc}}$$

де:

U_L — діюче значення лінійної напруги мережі живлення, кВ;

S_{sc} — потужність трифазного короткого замикання на шинах, МВА.

Згідно з технічними умовами підключення, прийемо опір мережі, приведений до вторинної сторони трансформатора, як $X_{net} \approx 0.045$ Ом.

Повний індуктивний опір фази X_{total} , що визначає комутаційні процеси у випрямлячі, складається з опору мережі та внутрішнього опору трансформатора X_{tr} :

$$X_{total} = X_{net} + X_{tr}$$

Індуктивний опір трансформатора визначається через напругу короткого замикання u_k (прийняту нами рівною 8%) за формулою:

$$X_{tr} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{2L}^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{2050^2}{3150 \cdot 10^3} \approx 0.106 \text{ Ом}$$

Отже, сумарний опір фази без додаткових реакторів:

$$X_{\Sigma} = 0.045 + 0.106 = 0.151 \text{ Ом}$$

2.4.2 Перевірка тиристорів на стійкість до ударного струму КЗ

Ударний струм у відкритому стані вентиля $I_{sc,peak}$ виникає при короткому замиканні на виході випрямляча і розраховується з урахуванням аперіодичної складової:

$$I_{sc,peak} = \frac{k_a \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2L}}{2 \cdot X_{\Sigma}}$$

де $k_a = 2.2$ — коефіцієнт, що враховує максимальне значення аперіодичного струму при найнесприятливішій фазі виникнення КЗ.

При поточному значенні опору X_{Σ} :

$$I_{sc,peak} = \frac{2.2 \cdot 1.414 \cdot 2050}{2 \cdot 0.151} \approx 21100 \text{ А} = 21.1 \text{ кА}$$

Для обраного нами тиристора Т453-630 ударний невторюваний струм у відкритому стані (I_{TSM}) становить 14.0 кА (згідно з довідковими даними при $t = 10 \text{ мс}$). Оскільки розраховане значення 21.1 кА значно перевищує гранично допустиме ($I_{sc,peak} > I_{TSM}$), необхідно застосувати додаткові обмежувальні реактори.

2.4.3 Розрахунок параметрів обмежувальних реакторів

Необхідний сумарний опір фази X_{req} , що забезпечить безпечне значення струму КЗ:

$$X_{req} = \frac{k_a \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2L}}{2 \cdot I_{TSM} \cdot K_z} = \frac{2.2 \cdot 1.414 \cdot 2050}{2 \cdot 14000 \cdot 0.9} \approx 0.253 \text{ Ом}$$

де $K_z = 0.9$ — коефіцієнт безпеки.

Необхідний опір додаткового реактора X_r складе:

$$X_r = X_{req} - X_{\Sigma} = 0.253 - 0.151 = 0.102 \text{ Ом}$$

Розрахункова індуктивність захисного реактора L_r при промисловій

частоті $f = 50$ Гц:

$$L_r = \frac{X_r}{2\pi \cdot f} = \frac{0.102}{314.16} \approx 0.00032 \text{ Гн} = 0.32 \text{ мГн}$$

Приймаємо до встановлення стандартний трифазний реактор типу РТСТ (Реактор Струмообмежувальний Сухий Трифазний) з номінальною індуктивністю 0.35 мГн.

Перевіримо нове значення ударного струму з урахуванням обраного реактора:

$$X_{new} = 0.151 + (314.16 \cdot 0.35 \cdot 10^{-3}) = 0.261 \text{ Ом}$$

$$I_{sc.new} = \frac{2.2 \cdot 1.414 \cdot 2050}{2 \cdot 0.261} \approx 12213 \text{ А} = 12.2 \text{ кА}$$

Результат розрахунку:

Впровадження додаткової індуктивності 0.35 мГн у кожну фазу дозволило знизити амплітуду аварійного струму з 21.1 кА до 12.2 кА. Отримане значення є нижчим за класифікаційний параметр тиристора (14.0 кА), що забезпечує термічну та динамічну стійкість вентильного блоку при виникненні зовнішніх коротких замикань.

Таблиця 2.4 — Параметри захисних та індуктивних елементів

Параметр	Символ	Значення	Одиниці
Опір трансформатора	X_{tr}	0.106	Ом
Необхідна додаткова індуктивність	L_r	0.35	мГн
Ударний струм КЗ (після корекції)	$I_{sc.new}$	12.2	кА
Граничний струм тиристора	I_{TSM}	14.0	кА

2.5 Визначення кутів керування в номінальному та регульовальному режимах

Процес переходу струму з одного вентиля на інший у реальних випрямних установках не відбувається миттєво через наявність індуктивностей у контурі комутації (індуктивність розсіювання трансформатора та входні реактори). Феномен одночасної провідності двох вентилів однієї анодної або катодної групи називається комутацією, а часовий інтервал, протягом якого цей процес триває, визначається кутом комутації γ .

На рисунку 2.6 зображено еквівалентний контур комутації. Під дією лінійної ЕРС вторинної обмотки виникає комутуючий струм i_k , який за своєю фізичною природою є струмом двофазного короткого замикання.

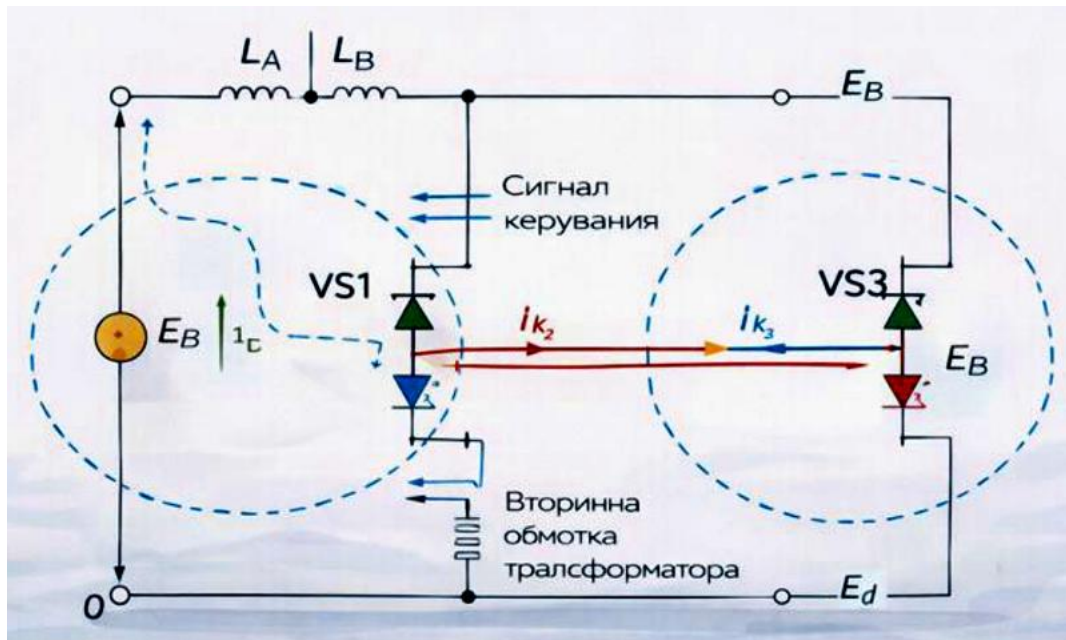


Рисунок 2.6 — Схема контуру комутації при переході струму з тиристора VS1 на VS3

2.5.1 Математичне обґрунтування процесу комутації

У процесі комутації струм у вентилі, що виходить з роботи (наприклад, VS1), поступово зменшується, тоді як у вентилі, що вступає в роботу (VS3), — зростає. Рівняння для миттєвого значення комутуючого струму i_k має вигляд:

$$i_k(\theta) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2L}}{2 \cdot X_{\Sigma}} \cdot (\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma))$$

Завершення стадії переходу струму настає в момент $\Theta = \alpha + \gamma$, коли струм у фазі, що вступає в роботу, досягає значення струму навантаження I_{dn} . Виходячи з цієї умови, зв'язок між параметрами схеми та кутами регулювання описується виразом:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 \cdot X_{\Sigma} \cdot I_{dn}}{\sqrt{2} \cdot U_{2L}}$$

Звідси косинус кута сумарного зсуву ($\alpha + \gamma$):

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \cdot X_{\Sigma} \cdot I_{dn}}{U_{2L}}$$

2.5.2 Розрахунок кутів для номінального режиму

Для забезпечення мінімальних пульсацій та найвищого коефіцієнта потужності в номінальному режимі, кут керування α обирається мінімально можливим, що дозволяє компенсувати падіння напруги в системі. Прийmemo початковий кут регулювання $\alpha = 10^\circ$.

Вихідні дані для розрахунку:

- Номінальний струм: $I_{dn} = 315 \text{ A}$;
- Лінійна напруга вторинної обмотки: $U_{2L} = 2050 \text{ V}$;
- Повний опір фази (з урахуванням реакторів): $X_{\Sigma} = 0.261 \text{ Ом}$.

Розрахуємо значення допоміжної величини (комутаційної реактивності):

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot X_{\Sigma} \cdot I_{dn}}{U_{2L}} = \frac{1.414 \cdot 0.261 \cdot 315}{2050} \approx 0.0567$$

Визначаємо косинус кута завершення комутації:

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos(10^\circ) - 0.0567 = 0.9848 - 0.0567 = 0.9281$$

Звідси:

$$\alpha + \gamma = \arccos(0.9281) \approx 21.86^\circ$$

Отже, кут комутації γ у номінальному режимі складе:

$$\gamma = 21.86^\circ - 10^\circ = 11.86^\circ$$

2.5.3 Аналіз впливу комутації на зовнішню характеристику

Наявність кута комутації призводить до додаткового зниження середнього значення випрямленої напруги ΔU_γ . Для дванадцятипульсної послідовної схеми (два мости) це падіння напруги розраховується як:

$$\Delta U_{\gamma\Sigma} = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot X_\Sigma \cdot I_{dn} = \frac{6}{\pi} \cdot 0.261 \cdot 315 \approx 157 \text{ В}$$

Таблиця 2.5 — Розрахункові кути та параметри комутації

Параметр	Символ	Значення	Одиниці
Мінімальний кут керування	α	10	град.
Кут комутації	γ	11.86	град.
Кут провідності двох вентилів	$\alpha + \gamma$	21.86	град.
Комутаційне падіння напруги	$\Delta U_{\gamma\Sigma}$	157	В

Резюме: Отримане значення кута комутації $\gamma \approx 12^\circ$ свідчить про помірний вплив індуктивностей кола на тривалість перехідних процесів. Це дозволяє зберігати високу жорсткість зовнішньої характеристики випрямляча. При глибокому регулюванні напруги (збільшенні кута α) кут комутації буде зменшуватися, що покращує умови відновлення запірних властивостей тиристорів, проте дещо погіршує спектральний склад споживаного струму.

2.6 Аналіз роботи випрямляча при перевантаженнях і змінних режимах

Стабільність роботи силового блоку високовольтного випрямляча в умовах динамічної зміни навантаження є критичним фактором для надійності

регульованого електропривода. Згідно з технічним завданням, проектована система повинна забезпечувати стійку роботу при двократному короточасному перевантаженні за струмом ($K_{ov} = 2.0$), що відповідає значенню струму навантаження $I_{d,max} = 630$ А протягом заданого інтервалу часу.

2.6.1 Аналіз теплової стійкості вентиляного комплекту

При виникненні перевантаження основним лімітуючим фактором є температура р-п структури тиристорів. Для обраних тиристорів Т453-630-38 номінальний середній струм становить 630 А при температурі корпусу $T_c = 85^\circ\text{C}$. Оскільки номінальний струм випрямляча $I_{dn} = 315$ А, то середній струм вентиля у сталому режимі складає:

$$I_{v,av} = \frac{315}{3} = 105 \text{ А}$$

У режимі максимального перевантаження середній струм через тиристор зростає до:

$$I_{v,max} = \frac{630}{3} = 210 \text{ А}$$

Незважаючи на те, що $I_{v,max}$ значно нижчий за класифікаційний струм тиристора (630 А), необхідно враховувати перегрів структури щодо охолоджувального середовища. Температура структури T_j розраховується за формулою:

$$T_j = T_a + P_v \cdot (R_{thjc} + R_{thcf} + R_{thfa})$$

де:

T_a — температура навколишнього середовища;

P_v — потужність втрат у тиристорі;

R_{thjc} , R_{thcf} , R_{thfa} — теплові опори «структура-корпус», «корпус-охолоджувач» та «охолоджувач-середовище» відповідно.

Зважаючи на таблеткову конструкцію вентилів та використання двостороннього примусового повітряного охолодження, сумарний тепловий опір мінімізується, що дозволяє системі витримувати тривалі перевантаження без ризику теплового пробою.

2.6.2 Вплив перевантаження на зовнішню характеристику

Зі зростанням струму навантаження збільшується падіння напруги в комутаційному контурі. Зовнішня характеристика випрямляча описується рівнянням:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_\gamma - \Delta U_v - \Delta U_r$$

де:

ΔU_γ — комутаційне падіння напруги, пропорційне струму I_d ;

ΔU_r — падіння напруги на активних опорах обмоток та шинопроводів.

При двократному перевантаженні комутаційне падіння напруги ΔU_γ зростає пропорційно струму:

$$\Delta U_{\gamma\Sigma(630A)} = \Delta U_{\gamma\Sigma(315A)} \cdot \frac{I_{d.max}}{I_{dn}} = 157 \cdot 2 = 314 \text{ В}$$

Це призводить до "просідання" вихідної напруги, яке повинна компенсувати система імпульсно-фазового керування (СІФК) шляхом зменшення кута регулювання α .

Таблиця 2.6 — Параметри випрямляча в різних режимах завантаження

Режим роботи	Струм I_d , А	Кут γ , град.	Падіння ΔU_γ , В	Напруга U_d (при $\alpha=10^\circ$), В
Номінальний	315	11.86	157	7850
Перевантаження ($2.0 \cdot I_{dn}$)	630	17.2	314	7693
Холостий хід	0	0	0	8023

2.6.3 Робота в режимі переривчастих струмів

При малих навантаженнях (менше 5...10% від номінального) випрямляч може перейти в режим переривчастих струмів. Це явище супроводжується різким зростанням вихідної напруги та погіршенням регулювальної характеристики. Для запобігання цього режиму в схему електропривода зазвичай включають баластні резистори або забезпечують мінімальний струм збудження через індуктивність згладжувального реактора L_d .

Умова безперервності струму для 12-пульсної схеми:

$$L_{d.min} \geq \frac{0.005 \cdot U_{dn}}{f \cdot I_{d.min}}$$

З огляду на високу індуктивність обмоток високовольного двигуна, режим переривчастих струмів у даній системі малоімовірний, проте він враховується при налаштуванні регуляторів струму.

Резюме:

Аналіз підтвердив, що обрана силова схема та вентильний комплект мають необхідний тепловий запас для забезпечення двократного перевантаження. Використання тиристорів класу 630 А при номінальному робочому струмі 315 А дозволяє експлуатувати силовий блок у жорстких динамічних режимах, що характерно для частотно-регульованих електроприводів великої потужності.

З РОЗРАХУНОК ЗАХИСТІВ, ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ТА НАДІЙНОСТІ СИЛОВОГО БЛОКУ

Надійність і довговічність роботи високовольтного випрямляча значною мірою визначаються ефективністю систем електричного захисту та відведення тепла від силових напівпровідникових елементів. В умовах високих напруг і струмів навіть короточасні аварійні режими можуть призвести до виходу з ладу вентильного комплексу або суміжного обладнання електропривода.

У цьому розділі розглядаються можливі аварійні та нештатні режими роботи високовольтного випрямляча, а також виконується розрахунок і вибір елементів захисту тиристорів від перенапруг, перевантажень за струмом та теплових перевищень. Значну увагу приділено аналізу теплових режимів силових елементів, розрахунку теплових втрат і проектуванню системи охолодження силового блоку. Завершальним етапом розділу є оцінка коефіцієнта корисної дії та загальних енергетичних показників випрямляча.

3.1 Аналіз та розрахунок аварійних режимів роботи високовольтного випрямляча

Експлуатація високовольтних перетворювачів потужністю 315 А при напрузі 8 кВ супроводжується ризиками виникнення аномальних режимів, зумовлених як зовнішніми чинниками (порушення в мережі живлення або навантаженні), так і внутрішніми дефектами (пробій напівпровідникових структур, збої в СІФК). Своєчасна ідентифікація та кількісна оцінка аварійних струмів є базисом для проектування системи захисту та вибору комутаційної апаратури [2].

3.1.1 Класифікація та умови виникнення аварійних процесів

У межах даного проекту розглядаються наступні критичні сценарії:

1. **Зовнішнє коротке замикання (КЗ)** на вихідних шинах випрямляча (до згладжувального реактора).
2. **Внутрішнє КЗ**, спричинене пробоем одного або кількох послідовно з'єднаних тиристорів у плечі моста.
3. **КЗ у колі навантаження** за наявності згладжувальної індуктивності L_d , що характеризується меншою швидкістю наростання струму.

Для математичного моделювання аварійних процесів прийнято такі наукові допущення:

- вентилі розглядаються як ідеальні ключі (падіння напруги в провідному стані не враховується);
- напруга мережі живлення вважається симетричною та синусоїдальною;
- нехтуємо струмами намагнічування трансформаторного обладнання та власними ємностями елементів схеми;
- активні опори та ємності захисних RC-ланцюгів у розрахунку контуру КЗ не враховуються;
- аварія виникає у сталому режимі роботи мережі;
- при аналізі внутрішніх пошкоджень струмом корисного навантаження нехтують порівняно зі струмом КЗ.

3.1.2 Розрахунок параметрів контуру короткого замикання

Базовий (амплітудний) струм схеми I_m визначає теоретичний максимум аварійного струму при нульовому активному опорі:

$$I_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2f}}{Z_f}$$

де:

U_{2f} — діюче значення фазної напруги вторинної обмотки, В;

Z_f — повний опір фази контуру аварійного струму, Ом.

Повний індуктивний опір фази X_f включає реактивності мережі, трансформатора та встановлених раніше захисних реакторів:

$$X_f = X_{net} + X_{tr} + X_r = 0.045 + 0.106 + 0.11 = 0.261 \text{ Ом}$$

Активний опір фази R_f переважно визначається втратами в міді обмоток трансформатора та реакторів. Прийmemo $R_r \approx 0.1 \cdot X_r$ та розрахуємо опір трансформатора R_{tr} :

$$R_{tr} = \frac{P_{sc}}{3 \cdot I_2^2}$$

$$R_f = R_{net} + R_{tr} + R_r \approx 0.04 \text{ Ом}$$

Параметр затухання контуру (відношення реактивного опору до активного):

$$\frac{X_f}{R_f} = \frac{0.261}{0.04} \approx 6.5$$

3.1.3 Кількісна оцінка струмів КЗ та теплової дії

Аварійний струм у будь-який момент часу $i(\Theta)$ розраховується через відносне значення $i^*(\Theta)$, що залежить від моменту подачі (або блокування) імпульсів керування:

$$i = I_m \cdot i^*$$

Нижче наведено результати розрахунку для найбільш важких умов — блокування імпульсів після виникнення аварії.

Таблиця 3.1 — Динаміка аварійного струму при зовнішньому КЗ

Кут Θ , град.	Відносний струм i^*	Миттєвий струм i , кА
30	0.45	1.54
90	1.05	3.59
120	1.08	3.69
180	0.50	1.71

Ударне значення аварійного струму за графічними залежностями [Додаток В] становить $I_{\text{shock}} = 3.69$ кА при зовнішньому КЗ та $I_{\text{shock}} = 5.13$ кА при внутрішньому пробі (з урахуванням підживлення від сусідніх фаз).

3.1.4 Розрахунок теплової дії струму (Інтеграл Джоуля)

Для перевірки термічної стійкості тиристорів та вибору запобіжників визначається інтеграл Джоуля $A = i^2 dt$, який у відносних одиницях для нашої схеми становить:

- При блокуванні до першої комутації: $A_1^* = 2.5$;
- При блокуванні до другої комутації: $A_2^* = 6.0$.

Абсолютне значення теплової дії розраховується за формулою:

$$A = \frac{I_m^2}{2\pi \cdot f} \cdot A^*$$

Для найбільш критичного випадку (друга комутація):

$$A_{\text{abs}} = \frac{(3.4 \cdot 10^3)^2}{314} \cdot 6.0 \approx 2.2 \cdot 10^5 \text{ A}^2\text{s}$$

Резюме:

Проведений аналіз показує, що ударні струми КЗ у системі не перевищують 5.13 кА, що знаходиться в межах динамічної стійкості обраних

тиристорів Т453-630 (до 14 кА). Однак розрахована теплова дія A_{abs} вимагає встановлення швидкої електронної системи захисту, яка блокує імпульси керування протягом перших 5...10 мс після виникнення аварії, щоб запобігти термічному руйнуванню напівпровідникових структур.

3.2 Розрахунок і вибір елементів електричного захисту силових вентилів

Забезпечення надійної роботи послідовно з'єднаних тиристорів у високовольтному випрямлячі потребує вирішення двох основних задач: захисту від комутаційних перенапруг (di/dt , du/dt) та рівномірного розподілу напруги між вентилями в статичних і динамічних режимах. Для досягнення цієї мети застосовується комбінована система, що складається з демпфуючих RC-ланцюгів та нелінійних обмежувачів напруги (варисторів).

Типова схема одного плеча випрямляча з елементами захисту представлена на рисунку 3.1.

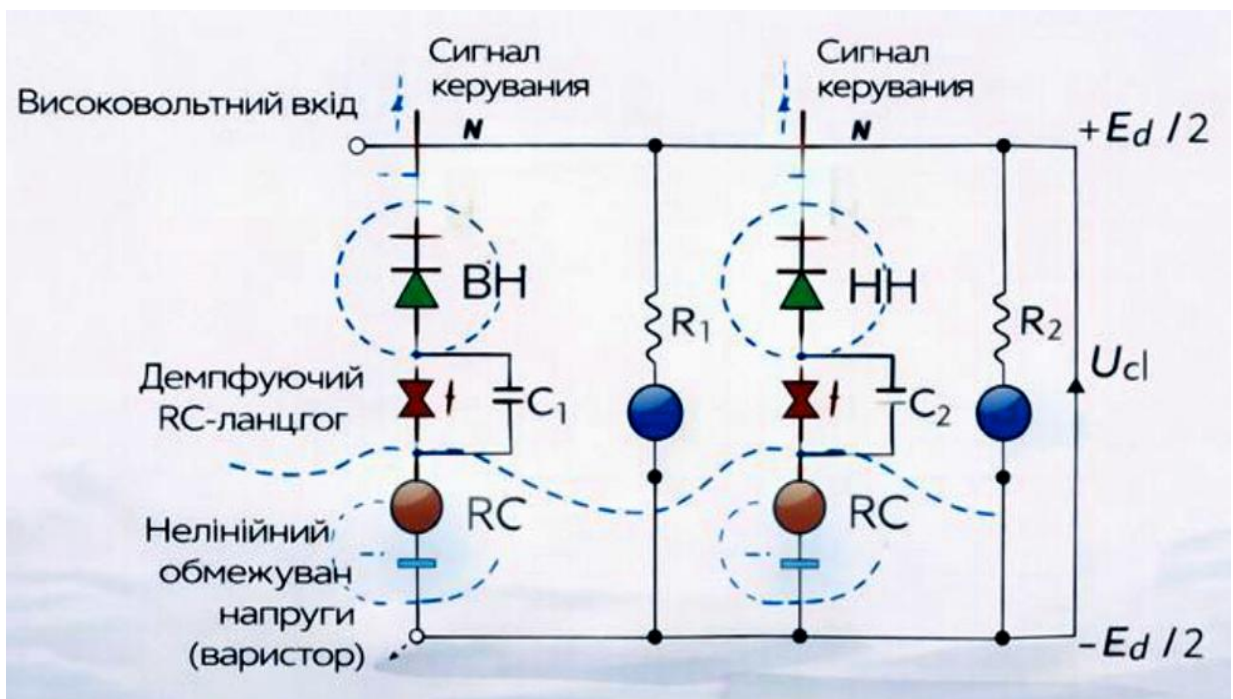


Рисунок 3.1 — Схема силового плеча з інтегрованими засобами захисту та вирівнювання напруги

3.2.1 Розрахунок демпфуючого RC-ланцюга

Основним призначенням RC-ланцюга є обмеження швидкості наростання прямої напруги та зниження амплітуди зворотних перенапруг, що виникають при розсмоктуванні зарядів відновлення тиристорів.

Для кожного тиристора передбачено паралельне підключення двох ємностей C_1 , C_2 типу **Electronic E62.C58-471E40**. Сумарна ємність захисного вузла становить:

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

Послідовно з конденсаторами встановлюються демпферні резистори R_d . Їх номінал обирається з умови аперіодичного характеру розряду ємності, щоб уникнути високочастотних коливань у контурі:

$$R_d \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_d}{C_{\Sigma}}}$$

де: $L_d \approx 25 \text{ мкГн}$ — власна індуктивність резистивного елемента та монтажних шин.

Розрахункове мінімальне значення:

$$R_d \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{25 \cdot 10^{-6}}{0.94 \cdot 10^{-6}}} \approx 10.3 \text{ Ом}$$

Згідно з рядом номіналів обираємо дрітаний резистор типу **C5-35B** потужністю 25 Вт з опором 15 Ом.

3.2.2 Система статичного вирівнювання напруги

Через розкид параметрів струмів витоку та часів відновлення (t_q), напруга по ланцюгу послідовних тиристорів розподіляється нерівномірно.

Для вирівнювання напруги в інтервалах 5...10 мс встановлюються шунтуючі резистори R_{sh} . Номінальна величина опору розраховується через постійну часу τ , яка має бути співрозмірною з періодом напруги мережі:

$$R_{sh} = \frac{\tau}{C_{\Sigma}} \approx \frac{0.005}{0.235 \cdot 10^{-6}} \approx 21.2 \text{ кОм}$$

Приймаємо до встановлення резистори номіналом 22 кОм з допустимим відхиленням $\pm 10\%$.

3.2.3 Вибір та розрахунок варисторного захисту

Варистори забезпечують жорстке обмеження амплітуди напруги на рівні, що не перевищує повторювану напругу тиристора U_{DRM}/U_{RRM} . Використовуємо варистори серії **СН2-2В** з коефіцієнтом нелінійності β :

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

Для тиристорів 38-го класу ($U_{RRM} = 3800 \text{ В}$) необхідно, щоб напруга обмеження при струмі відновлення тиристора ($I_{\text{т}} \approx 30 \text{ А}$) була нижчою за 3800 В.

Розрахуємо напругу на варисторі U_{var} при струмі 30 А:

$$U_{var} = U_1 \cdot \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^{\frac{1}{\beta}} = 1500 \cdot (30 \cdot 10^3)^{0.05} \approx 2510 \text{ В}$$

Оскільки $2510 \text{ В} < 3800 \text{ В}$, вибір двох послідовно з'єднаних варисторів СН-2-2В-1500В забезпечує надійний захист плеча.

Таблиця 3.2 — Результати енергетичного розрахунку варисторів

Режим експлуатації	Напруга U_{mv} , В	Струм витоку i , мА	Потужність втрат P , Вт
Номинальний (6 тиристорів у плечі)	778	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$
Аварійний (один тиристор пробитий)	648	0.206	$22.6 \cdot 10^{-3}$

3.2.4 Аналіз стійкості при відмові одиничного вентиля

Важливою особливістю проєктованого плеча є його надлишковість. При пробі одного тиристора напруга перерозподіляється між рештою справних вентилів. Максимальна напруга на тиристорі $U_{m.t.}$ при струмі через варистор 100 А (режим глибокого обмеження):

$$U_{m.t.} = U_1 \cdot (I_2/I_1)^{1/\beta} = 1500 \cdot (100)^{0.05} \approx 3150 \text{ В}$$

Отримане значення 3150 В не перевищує допустимі 3800 В для 38-го класу, що підтверджує живучість випрямляча: вихід з ладу одного тиристора не призводить до ланцюгової реакції руйнування всього плеча.

Резюме: Обрана комбінація RC-ланцюгів (0.94 мкФ, 15 Ом) та варисторів СН-2-2В забезпечує комплексний захист силового блоку. Розрахунки підтвердили, що рівень обмеження перенапруг (3150 В) узгоджується з класом напруги тиристорів, а потужність, що розсіюється на елементах захисту в номінальному режимі, є мізерною (< 1 Вт), що свідчить про високу енергоефективність системи захисту.

3.3 Розрахунок теплових втрат у вентиляльному комплекті

Ефективність функціонування високовольтного силового блоку безпосередньо залежить від коректності оцінки теплових втрат, що виникають у напівпровідникових структурах тиристорів. Тепловий розрахунок дозволяє визначити вимоги до системи охолодження та забезпечити роботу р-п переходів у межах допустимого температурного діапазону ($T_j \leq 125^\circ\text{C}$), що є критичним для запобігання тепловому пробою.

Сумарна потужність втрат у тиристорі P_{tot} складається з трьох основних компонентів:

1. Втрати у провідному стані (статичні втрати) P_{on} .
2. Втрати при ввімкненні та вимкненні (динамічні втрати) P_{sw} .
3. Втрати від струмів витоку в закритому стані та втрати у ланцюгах керування (ними зазвичай нехтують через їх малість).

3.3.1 Визначення статичних втрат у провідному стані

Статичні втрати потужності зумовлені падінням напруги на тиристорі при проходженні через нього прямого струму. Для апроксимації вольтамперної характеристики (ВАХ) тиристора використовується модель з пороговою напругою $U_{(T0)}$ та динамічним опором r_T .

Середня потужність втрат за період для одного тиристора розраховується як:

$$P_{\text{on}} = U_{(T0)} \cdot I_{v.av} + r_T \cdot I_{v.rms}^2$$

де:

$I_{v.av}$ — середнє значення струму вентиля;

$I_{v.rms}$ — діюче (середньоквадратичне) значення струму вентиля.

Для трифазної мостової схеми при номінальному струмі $I_{dn} = 315 \text{ A}$:

$$I_{v.av} = \frac{I_{dn}}{3} = \frac{315}{3} = 105 \text{ A}$$

$$I_{v.rms} = \frac{I_{dn}}{\sqrt{3}} = \frac{315}{1.732} \approx 181.9 \text{ A}$$

Використовуючи параметри тиристора Т453-630 ($U_{(T0)} \approx 1.1 \text{ В}$, $r_T \approx 0.45 \text{ мОм}$):

$$P_{on} = 1.1 \cdot 105 + 0.00045 \cdot 181.9^2 \approx 115.5 + 14.9 \approx 130.4 \text{ Вт}$$

3.3.2 Розрахунок динамічних втрат та загального тепловиділення

Динамічні втрати P_{sw} стають відчутними при роботі на високих частотах або при значних індуктивностях комутації. Для промислової частоти 50 Гц у високовольтних випрямлячах основну частку складають втрати при вимкненні, зумовлені зарядом зворотного відновлення Q_{rr} .

Оціночне значення сумарних втрат на один тиристор з урахуванням коефіцієнта запасу на нерівномірність розподілу струмів ($K_z = 1.1$):

$$P_{v.tot} = P_{on} \cdot K_z \approx 130.4 \cdot 1.1 \approx 143.4 \text{ Вт}$$

Оскільки в одному плечі випрямляча встановлено $n = 6$ послідовних тиристорів, а загальна кількість плечей у 12-пульсній схемі (два мости) дорівнює 12, сумарні втрати всього вентиляного комплексу P_Σ складуть:

$$P_\Sigma = P_{v.tot} \cdot n \cdot 12 = 143.4 \cdot 6 \cdot 12 \approx 10325 \text{ Вт} \approx 10.3 \text{ кВт}$$

3.3.3 Обґрунтування вибору системи охолодження

Для відведення 10.3 кВт теплової енергії від малогабаритних напівпровідникових структур необхідно застосовувати примусове охолодження. Враховуючи високу напругу блоку (8 кВ), пріоритетним є

примусове повітряне охолодження, яке забезпечує необхідну діелектричну міцність порівняно з водяним.

Необхідна витрата повітря V_{air} для підтримання температури в шафі на рівні $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ вище навколишнього середовища:

$$V_{air} = \frac{P_{\Sigma}}{c \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

де:

$c = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ — питома теплоємність повітря;

$\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$ — густина повітря.

$$V_{air} = \frac{10325}{1005 \cdot 1.2 \cdot 15} \approx 0.57 \text{ м}^3/\text{с} \approx 2050 \text{ м}^3/\text{год}$$

Таблиця 3.3 — Результати теплового розрахунку силового блоку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Втрати одного тиристора	$P_{v.tot}$	143.4	Вт
Кількість тиристорів у блоці	N_{tot}	72	шт
Загальна теплова потужність	P_{Σ}	10.33	кВт
Необхідний потік повітря	V_{air}	2050	м ³ /год

Резюме :

Розрахована сумарна теплова потужність втрат (10.3 кВт) складає близько 0.4% від номінальної потужності випрямляча ($P_d \approx 2.5 \text{ МВт}$), що свідчить про високий ККД силової частини. Для надійного відведення тепла вибрано два відцентрові вентилятори з сумарною продуктивністю 2500 м³/год, що забезпечує необхідний технологічний запас на випадок запылення фільтрів або підвищення температури в цеху.

3.4 Проектування та тепловий розрахунок системи охолодження силового блоку

Надійність високовольтного випрямляча визначається здатністю системи охолодження підтримувати температуру напівпровідникових структур у заданих межах. Для силового блоку 8 кВ, 315 А проектування охолодження базується на точному визначенні сумарних втрат енергії у всіх компонентах та розрахунку теплового опору системи «тиристор-охолоджувач-середовище».

3.4.1 Аналіз втрат потужності в елементах перетворювача

Сумарні втрати потужності складаються з втрат у напівпровідникових вентилях, пасивних елементах захисту (резисторах, конденсаторах) та магнітних компонентах (дроселях насичення).

1. Втрати в тиристорах. Статичні втрати при проходженні прямого струму для трифазної мостової схеми визначаються через апроксимовані параметри ВАХ тиристора:

$$P_{T.on} = U_{(T0)} \cdot I_{T.AV} + r_T \cdot I_{T.RMS}^2$$

де:

$U_{(T0)}$ — порогова напруга;

r_T — динамічний опір;

$I_{T.AV}$, $I_{T.RMS}$ — середній та діючий струми вентиля відповідно.

Додатково враховуються втрати від протікання струму витоку I_{RRM} під дією зворотної напруги:

$$P_{T.leak} = 0.5 \cdot U_m \cdot I_{RRM}$$

де U_m — амплітудне значення робочої напруги.

Загальні втрати одного тиристора $P_{T.\Sigma} = P_{T.on} + P_{T.leak}$.

2. Втрати в шунтуючих та демпферних ланцюгах.

Втрати в резисторах вирівнювання напруги $P_{R.sh}$ залежать від діючого значення напруги на плечі U_{arm} :

$$P_{R.sh} = \frac{(K_f \cdot U_{arm})^2}{R_{sh} \cdot n}$$

де:

$K_f \approx 0.63$ — коефіцієнт форми напруги для мостової схеми;

R_{sh} — опір шунта;

n — кількість вентилів.

Для паралельних ланцюжків втрати подвоюються, що для даного проекту становить $P_{R.total} \approx 2.4$ кВт.

Енергія, що розсіюється в RC-ланцюгах (P_{RC}), зумовлена процесами перезаряду ємностей C_d :

$$P_{RC} = n \cdot f \cdot C_d \cdot U_{arm}^2 \cdot \Phi(\alpha, \gamma)$$

де $\Phi(\alpha, \gamma)$ — функція, що враховує кути регулювання та комутації.

При $U_{arm} = 6.9$ кВ сумарні втрати в демпферах складають $P_{RC.\Sigma} \approx 3.45$ кВт.

3. Втрати в дроселях насичення.

Для обмеження di/dt використовуються дроселі, втрати в яких (P_L) складаються з втрат у міді обмотки та сталі осердя:

$$P_L = (K_f \cdot I_{arm})^2 \cdot R_{Cu} + V_{Fe} \cdot \Delta B \cdot f \cdot H \cdot \dots$$

де:

V_{Fe} — об'єм магнітопроводу;

ΔB — приріст індукції.

Розрахункові втрати у дроселях перетворювача складають $P_{L.\Sigma} \approx 1.2$ кВт.

3.4.2 Геометричний та тепловий розрахунок охолоджувача

Для відведення тепла обрано груповий охолоджувач (рис. 3.2) з примусовою конвекцією (швидкість повітря $v = 20$ м/с).

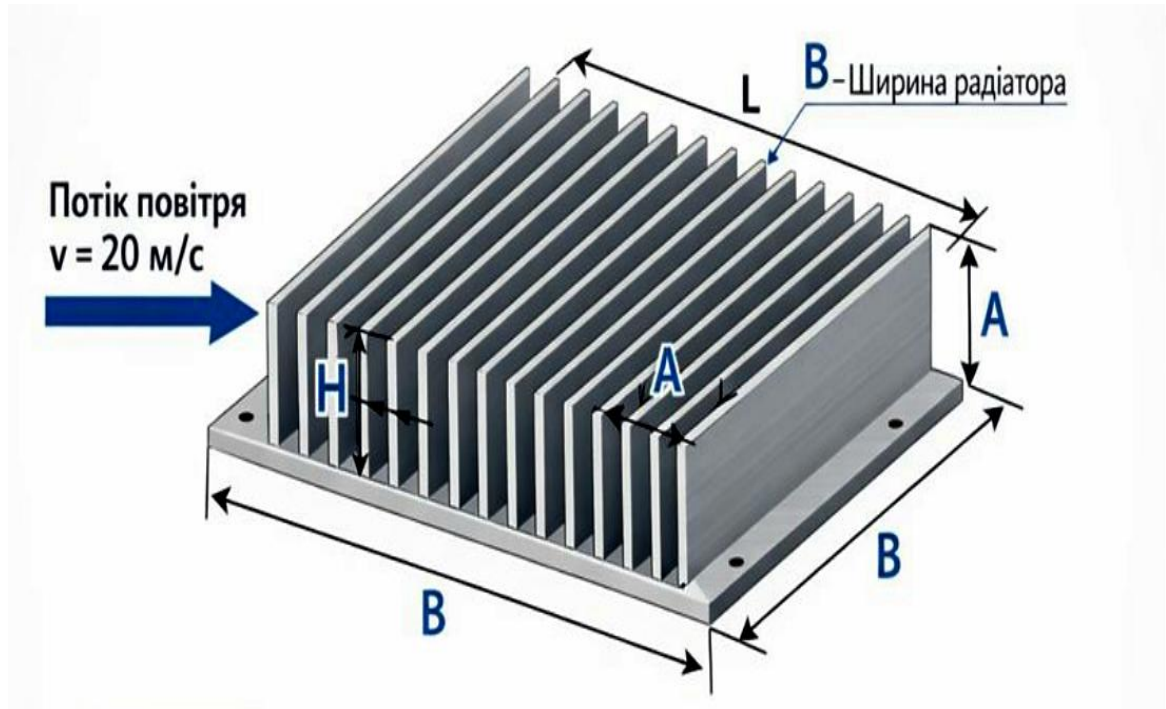


Рисунок 3.2 — Геометрія ребер охолоджувача ГКІЮ.301415.035 СБ

Основні етапи розрахунку параметрів теплообміну:

1. Середня товщина ребра (a_{cp}) та коефіцієнт форми (ψ):

$$a_{cp} = \frac{a_{min} + a_{max}}{2}; \quad \psi = 1 + \frac{a_{max} - a_{min}}{2 \cdot h}$$

2. Приведена висота (H_{red}): Враховує кількість ребер $N=15$ та площу основи. Для даної конструкції $H_{red} \approx 0.12$ м.

3. Критерій Рейнольдса (Re): Визначає режим руху повітря між ребрами:

$$Re = \frac{v_{cp} \cdot \delta_{cp}}{\nu} \approx 12400$$

де ν — кінематична в'язкість повітря.

Таке значення Re відповідає розвиненому турбулентному режиму, що сприяє високій тепловіддачі.

4. *Коефіцієнт тепловіддачі (α)*: Для алюмінієвого сплаву ($\lambda = 190$ Вт/м·К) розрахунковий $\alpha \approx 85$ Вт/(м²·К).

Ефективність охолоджувача (η) визначається як добуток ефективності ребер та основи. Підсумковий тепловий опір охолоджувача:

$$R_{\theta.o} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{calc} \cdot \eta} \approx 0.144 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$$

3.4.3 Розрахунок теплового опору системи «тиристор-середовище»

Для аналізу теплових потоків використовується схема заміщення (рис. 3.3), де враховуються опори внутрішніх переходів тиристора та контактних з'єднань.

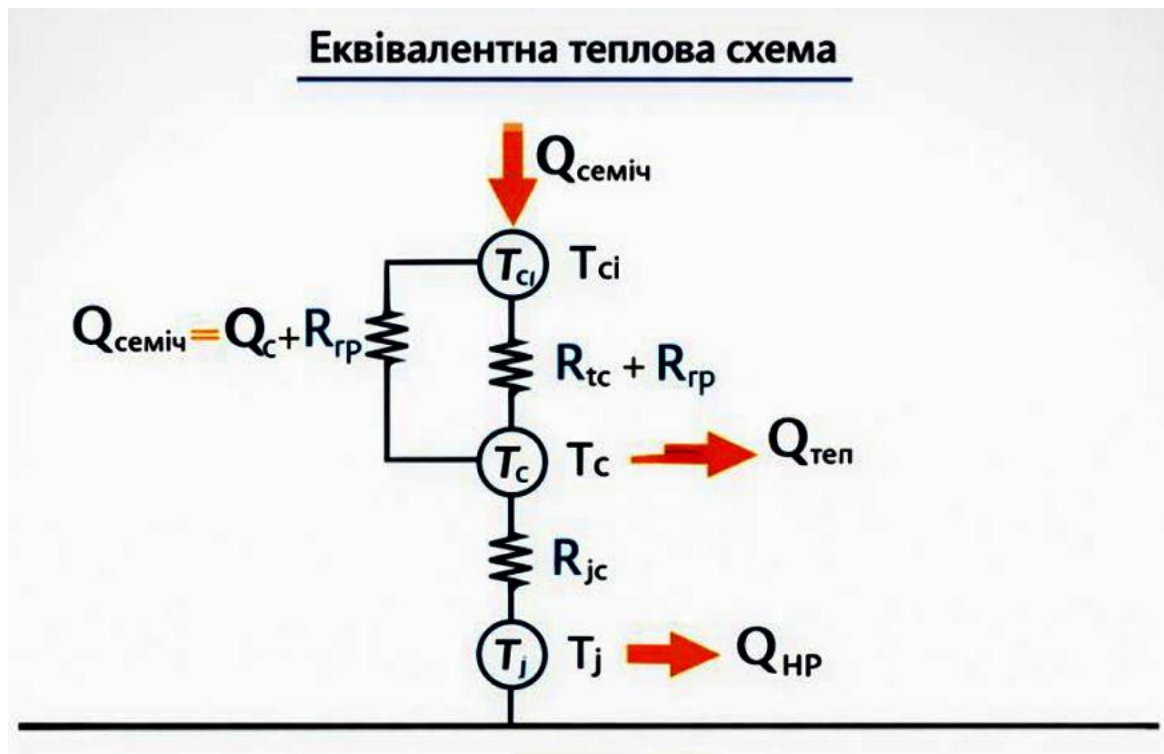


Рисунок 3.3 — Еквівалентна теплова схема

Розрахункові значення опорів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Параметри теплової схеми

Елемент теплового ланцюга	Позначення	Значення, °C/Вт
Внутрішній опір тиристора (анод/катод)	$R_{\Theta.ta}, R_{\Theta.tk}$	0.044
Контактний опір (паста КПТ-8)	$R_{\Theta.k}$	0.005
Загальний опір системи	$R_{\Theta.syst}$	0.094

3.4.4 Перевірка перегріву охолоджувального повітря

При проходженні повітря через вертикальний стовп тиристорів (стек) його температура зростає. Витрата повітря Q при швидкості 20 м/с становить:

$$Q = v \cdot S_{cross} \cdot 3600 \approx 1958.4 \text{ м}^3/\text{год}$$

Перегрів повітря ΔT_{air} на виході зі стовпа з $n=6$ тиристорів:

$$\Delta T_{air} = \frac{P_T \cdot n}{Q \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{143 \cdot 6}{1958.4 \cdot 1.1 \cdot 0.28} \approx 1.42 \text{ °C}$$

Резюме: Незначне підвищення температури повітря (1.42°C) та низький тепловий опір системи (0.094°C/Вт) гарантують, що температура переходу тиристора при температурі навколишнього середовища 40°C не перевищить 55-60°C. Це забезпечує значний тепловий запас (до 125°C), що дозволяє випрямлячу надійно працювати в режимах перевантаження.

3.5 Аналіз енергетичної ефективності та розрахунок коефіцієнта корисної дії випрямляча

Оцінка енергетичної ефективності високовольного перетворювача є завершальним етапом проектування, який дозволяє визначити доцільність

обраних технічних рішень. Коефіцієнт корисної дії (ККД) системи враховує не лише втрати у напівпровідникових структурах, а й витрати енергії на допоміжні системи, такі як примусове охолодження та система керування [6].

3.5.1 Розрахунок потужності власних потреб

До складу потужності власних потреб P_{aux} входять енерговитрати на функціонування системи імпульсно-фазового керування (СІФК), систем моніторингу, діагностики та захисту, а також електроприводів вентиляторів системи охолодження:

$$P_{aux} = P_{ctrl} + P_{fan}$$

де:

$P_{ctrl} = 1.0$ кВт — сумарна потужність споживання електронних плат керування та засобів автоматизації;

$P_{fan} = 5.0$ кВт — номінальна потужність електродвигунів вентиляційних установок, що забезпечують необхідну витрату повітря.

Таким чином, загальна потужність власних потреб становить:

$$P_{aux} = 1.0 + 5.0 = 6.0 \text{ кВт}$$

3.5.2 Аналіз втрат у демпферних ланцюгах

Втрати у демпфуючих RC-ланцюгах мають значний вплив на загальний тепловий баланс. Потужність, що виділяється в демпферних резисторах $P_{d.res}$, залежить від енергії перезаряду ємності та динамічних параметрів комутації:

$$P_{d.res} = n \cdot f \cdot C_{\Sigma} \cdot U_{L.m}^2 \cdot \sin^2(\alpha + \gamma/2)$$

де:

$n = 6$ — кількість послідовних ступенів у плечі;

$f = 50$ Гц — частота мережі;

$C_{\Sigma} = 0.94 \cdot 10^{-6}$ Ф — сумарна ємність захисту;

$U_{L.m}$ — амплітуда лінійної напруги;

$\alpha = 12.3^\circ$, $\gamma = 26.75^\circ$ — кути запалювання та комутації відповідно.

Після підстановки розрахункових значень для одного плеча ($P_{arm.d} = 533.3$ Вт), сумарні втрати у демпферних ланцюгах перетворювача $P_{RC.\Sigma}$ складають:

$$P_{RC.\Sigma} = P_{arm.d} \cdot 12 \approx 6.4 \text{ кВт}$$

3.5.3 Визначення підсумкового ККД перетворювача

Для високовольтного випрямляча доцільно розрізняти ККД силового блоку η_{conv} та повний ККД установки η_{full} . Розрахунок здійснюється на основі номінальної активної потужності P_n , яка для даного випрямляча (8 кВ, 315 А) становить:

$$P_n = U_d \cdot I_d = 8000 \cdot 315 = 2520 \text{ кВт}$$

Повний ККД системи визначається за формулою:

$$\eta_{full} = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_{\Sigma} + P_{reac} + P_{aux} + P_{RC.\Sigma}} \cdot 100\%$$

де:

ΔP_{Σ} — сумарні втрати в тиристорах;

P_{reac} — втрати у входних та вихідних реакторах (приймаємо на рівні 0.5% від P_n).

Проведемо розрахунок ККД власне напівпровідникового перетворювача (без урахування реакторів та СІФК):

$$\eta_{conv} = \frac{2520}{2520 + 26.21} \approx 0.9897$$

З урахуванням усіх складових втрат, результати енергетичного балансу представлені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Енергетичні показники високовольтного випрямляча

Складова енергобалансу	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна вихідна потужність	P_n	2520	кВт
Сумарні втрати в тиристорах	ΔP_Σ	10.33	кВт
Втрати у власних потребах	P_{aux}	6.0	кВт
Втрати у демпферних ланцюгах	$P_{RC,\Sigma}$	6.4	кВт
Втрати у дроселях та реакторах	P_L	3.48	кВт
Загальний ККД системи	η_{full}	98.9	%

Висновки : Отримане значення ККД на рівні 98.9% свідчить про високу енергетичну ефективність спроектованого силового блоку. Основними джерелами втрат є статичні втрати у тиристорах та втрати у демпферних ланцюгах, що є характерним для високовольтних систем з великою кількістю послідовно з'єднаних вентилів. Завдяки оптимізації кутів керування та вибору сучасних напівпровідникових приладів вдалося мінімізувати питомі енерговтрати, що забезпечує конкурентоспроможність установки у складі регульованого електропривода.

4 КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИЛОВОГО БЛОКУ

Конструктивне виконання силового блоку високовольтного випрямляча має відповідати не лише електричним і тепловим вимогам, а й умовам експлуатації у промисловому середовищі, таким як підвищені електромагнітні завади, механічні навантаження та обмежений простір для монтажу. Рациональне компонування елементів та правильна організація системи керування є ключовими чинниками стабільної та безпечної роботи електропривода.

У даному розділі розглядаються конструктивні рішення силового блоку випрямляча, включаючи компонування силових елементів, шинопровідної системи та ізоляційних вузлів. Описується структура системи керування випрямлячем, принципи синхронізації з мережею та реалізація захисних і діагностичних функцій. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності, зручності обслуговування та відповідності сучасним вимогам до високовольтних перетворювальних пристроїв.

4.1 Конструкція та компонування силового блоку високовольтного випрямляча

Проектування конструкції силового блоку високовольтного випрямляча 8 кВ, 315 А базується на принципах модульності, забезпечення необхідних ізоляційних відстаней та мінімізації паразитних індуктивностей силових шин. Оскільки пристрій працює в складі високовольтного електропривода, особлива увага приділяється механічній міцності та зручності обслуговування компонентів.

4.1.1 Загальна архітектура та шафове виконання

Силовий блок реалізовано у вигляді вертикально орієнтованої металевій шафи з класом захисту не нижче IP21 (для внутрішньої установки). Каркас виготовляється із полегшеного сталевого профілю з антикорозійним покриттям.

Просторове компонування шафи розділене на функціональні зони:

1. **Нижня зона:** вхідні комутаційні апарати та система примусового нагнітання повітря (вентиляторний вузол).
2. **Середня (основна) зона:** силові модулі (фазні плечі) випрямляча, розташовані у вигляді ізольованих стовпів.
3. **Верхня зона:** вихідні шини, датчики струму та напруги, а також система фільтрації повітря на виході.
4. **Відсік керування:** ізольована секція, де розміщені плати формування імпульсів та інтерфейси зв'язку з мікропроцесорною системою керування.

4.1.2 Конструкція силового плеча (вентильного стовпа)

Кожне плече випрямляча складається з $n = 6$ послідовно з'єднаних тиристорів. Для забезпечення компактності та ефективного притискання вентилів використовується конструкція типу «сендвіч» (таблеткове виконання).

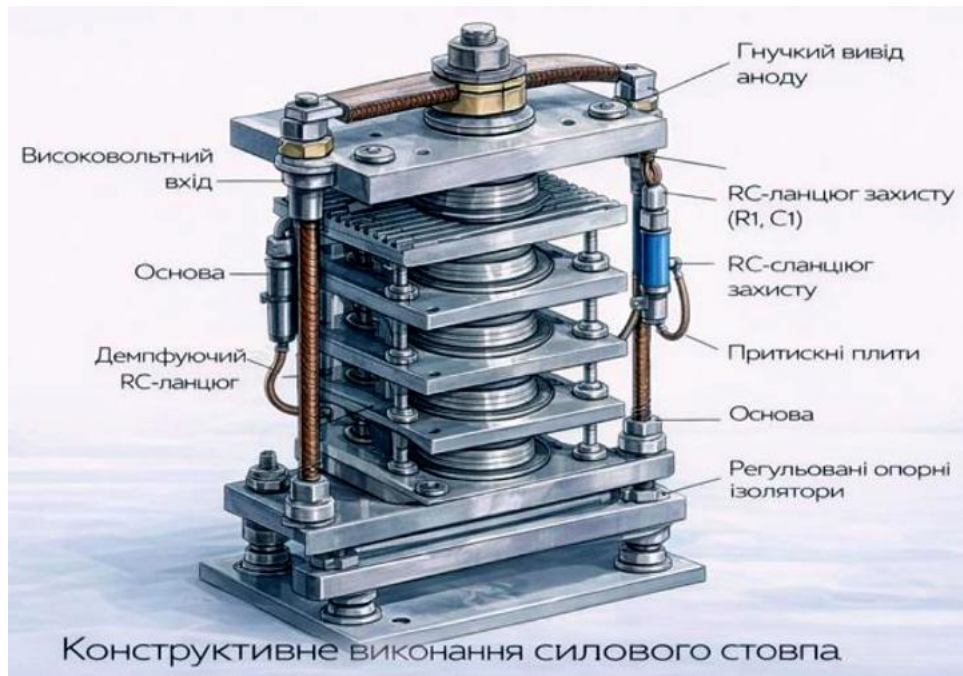


Рисунок 4.1 — Конструктивне виконання силового стовпа

Ключові елементи збірки:

- **Тиристори:** розташовуються між груповими охолоджувачами. Для забезпечення рівномірного контактного тиску ($P_{\text{cont}} \approx 20 \dots 30 \text{ кН}$) застосовується спеціальна траверса з тарілчастими пружинами.
- **Ізоляційні стійки:** весь вентильний стовп монтується на опорних ізоляторах з литої епоксидної смоли, що розраховані на повну напругу 8 кВ з урахуванням коефіцієнта запасу.
- **Обв'язка RC-ланцюгів:** резистори та конденсатори захисту монтуються безпосередньо поблизу кожного тиристора для мінімізації довжини з'єднувальних провідників.

4.1.3 Забезпечення ізоляційних відстаней та безпеки

При компонованні блоку 8 кВ критичним параметром є довжина шляху витоку та повітряні проміжки. Відповідно до норм ПУЕ та стандартів на високовольтне перетворення, встановлюються наступні вимоги:

- Мінімальна повітряна відстань між струмопровідними частинами різних фаз ($L_{\text{ph-ph}}$) — не менше 120 мм.

Відстань від струмопровідних частин до заземленого корпусу (L_{ph-gnd}) — не менше 100 мм.

Для підвищення електричної міцності в обмеженому просторі використовуються діелектричні перегородки зі склотекстоліту марки СТЕД.

4.1.4 Оптимізація системи охолодження

Для запобігання утворенню «застійних зон» гарячого повітря компонування елементів усередині шафи виконано за принципом висхідного потоку.

Таблиця 4.1 — Компоненти системи охолодження та їх розташування

Елемент	Функція	Матеріал / Тип
Вентиляторний агрегат	Нагнітання повітря під тиском	Відцентровий вентилятор
Повітроводи	Направлення потоку на ребра охолоджувачів	Поліпропілен (діелектрик)
Охолоджувачі	Відведення тепла від р-п переходу	Алюмінієвий сплав АД31
Повітряні фільтри	Захист від запилення компонентів	Змінні касети класу G4

Аналітичне обґрунтування компонування:

Обране вертикальне розташування вентильних стовпів дозволяє використовувати ефект природної конвекції як додатковий до примусового обдуву. Шунтуючі резистори винесені в окремий потік повітря, щоб їх висока температура (до 90°C) не впливала на тепловий режим напівпровідникових структур тиристорів.

Резюме :

Запропонована конструкція силового блоку забезпечує високу щільність компонування при збереженні всіх вимог електробезпеки. Модульний підхід дозволяє проводити заміну одиничного тиристора або плати керування без

демонтажу всього плеча, що скорочує середній час відновлення (MTTR) системи.

4.2 Шинопровідна система та ізоляційні рішення силового блоку

Проектування шинопровідної системи високовольтного випрямляча (8 кВ, 315 А) вимагає комплексного підходу, що поєднує забезпечення високої провідності, термічної стійкості при коротких замиканнях та гарантовану діелектричну міцність міжфазної ізоляції.

4.2.1 Розрахунок та вибір силових шин

Основним матеріалом для шинопровідної системи обрано електротехнічну мідь марки М1, оскільки вона володіє оптимальним поєднанням питомого опору ($\rho \approx 0.0178 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$) та механічної міцності.

а). Розрахунок за тривалим допустимим струмом. Для номінального струму $I_d = 315 \text{ А}$ мінімальний переріз шини S_{bus} визначається з умови допустимого нагріву (згідно з ПУЕ для мідних шин у закритих приміщеннях):

$$S_{bus} \geq \frac{I_d}{j}$$

де j — економічна щільність струму.

Проте для напівпровідникових перетворювачів частіше використовують критерій допустимого перегріву $\Delta T \leq 30 \dots 40^\circ\text{C}$ відносно середовища. Прийнято шину прямокутного перерізу $40 \cdot 5 \text{ мм}$ ($S = 200 \text{ мм}^2$), що забезпечує щільність струму:

$$j = \frac{315}{200} = 1.575 \text{ А/мм}^2$$

Таке значення гарантує мінімальні втрати енергії та відсутність перегріву контактних з'єднань.

б) Перевірка на електродинамічну стійкість.

При виникненні ударного струму короткого замикання I_{sh} між шинами виникають зусилля взаємодії. Максимальна сила F_{max} на одиницю довжини шини:

$$F_{max} = \frac{\mu_0 \cdot I_{sh}^2 \cdot l}{2\pi \cdot a}$$

де:

$a = 120$ мм — відстань між осями шин;

l — відстань між опорними ізоляторами.

Геометрія шинопровода розрахована так, щоб механічні напруження не перевищували межу пластичності міді.

4.2.2 Конфігурація та трасування шин

З метою мінімізації паразитної індуктивності L_{σ} , яка призводить до виникнення комутаційних перенапруг на тиристорах, шинопровідна система спроектована з використанням наступних рішень:

Копланарне розташування: силові шини позитивної та негативної полярності розташовані максимально близько одна до одної (з урахуванням діелектричного бар'єру), що сприяє взаємній компенсації магнітних полів.

Мінімізація контурів: довжина з'єднань між тиристорними плечами та вихідними клемми скорочена до технологічного мінімуму.

4.2.3 Обґрунтування ізоляційних рішень

Для забезпечення безпечної роботи при напрузі 8 кВ (амплітудне значення до 11.3 кВ) застосовано комбіновану систему ізоляції.

Таблиця 4.2 — Параметри ізоляційних матеріалів та рішень

Компонент	Матеріал / Тип	Функція
Опорні ізолятори	Епоксидний компаунд (типу IOP)	Механічна підтримка шин під напругою
Фазні перегородки	Склотекстоліт СТЕД-1 (товщина 5 мм)	Запобігання перекриттю дугою між фазами
Ізоляція шин	Термоусадочна трубка (поліолефін)	Додатковий захист від випадкового дотику
Кріпильні елементи	Латунь / Нержавіюча сталь	Забезпечення стабільного перехідного опору

Особливості виконання контактних з'єднань: Всі з'єднання шин виконані болтовим способом із застосуванням тарілчастих пружин (шайб Гровера або Бельвіля). Це критично важливо для компенсації температурних розширень міді та запобігання "послабленню" контакту, що у високовольтних установках може призвести до виникнення іскріння та іонізації повітря.

4.2.4 Коронний розряд та заходи його обмеження

При роботі з напругою понад 1 кВ на гострих кромках шин можливе виникнення коронного розряду. Для його усунення в конструкції передбачено:

- Радіусна обробка кромek:** всі торці шин мають закруглення радіусом не менше 2 мм.
- Герметизація:** місця виходу болтових з'єднань закриваються діелектричними ковпачками.
- Контроль градієнта поля:** вирівнювання напруженості електричного поля E досягається за рахунок відсутності різких згинів шинопровідної системи.

Резюме: Обрана конфігурація мідних шин $40 \cdot 5$ мм та використання епоксидних опорних ізоляторів класу напруги 10 кВ забезпечують необхідну

експлуатаційну надійність. Застосування склотекстолітових бар'єрів дозволяє зменшити габарити силового блоку на 15% без зниження рівня електричної міцності, що є важливим фактором для компактного розміщення перетворювача в модульних приміщеннях.

4.3 Система керування випрямлячем та механізми синхронізації з мережею живлення

Ефективність функціонування високовольтного випрямляча у складі частотно-регульованого електропривода визначається точністю та надійністю системи керування (СК). Основним завданням СК є формування послідовності керуючих імпульсів для тиристорів з динамічно змінним кутом керування α , що забезпечує регулювання вихідної напруги та стабільну роботу при змінах параметрів живлячої мережі.

4.3.1 Структура системи імпульсно-фазового керування (СІФК)

Для 12-пульсної схеми випрямлення (два послідовно з'єднані трифазні мости) застосовується цифрова багатоканальна СІФК. Вона реалізує вертикальний принцип керування, де момент подачі імпульсу визначається порівнянням опорної напруги (пилкоподібної форми) з напругою керування U_{ctrl} .

Функціональні вузли СІФК:

1. **Модуль синхронізації:** забезпечує прив'язку часової шкали СК до фазних напруг високовольтної мережі.
2. **Генератор опорних напруг (ГОН):** формує лінійно зростаючі напруги, синхронізовані з точками природної комутації вентилів.
3. **Логічний пристрій розподілу імпульсів:** формує послідовність імпульсів для кожного з 72 тиристорів (12 плечей по 6 вентилів).

4. **Драйвери силових тиристорів:** забезпечують посилення сигналу та надійну гальванічну розв'язку.

4.3.2 Синхронізація з високовольтною мережею

У високовольтних установках (8 кВ) пряме зняття сигналу синхронізації є неможливим. Для цього використовуються спеціальні вимірювальні трансформатори напруги (ТН) або дільники напруги з високою лінійністю.

Синхронізація реалізується за алгоритмом автопідстроювання частоти (Phase-Locked Loop, PLL). Це дозволяє системі стабільно працювати навіть при значних гармонійних спотвореннях або коливаннях частоти мережі $f_{\text{grid}} = 50 \pm 1$ Гц.

Кут керування α розраховується відносно точки природної комутації за виразом:

$$\alpha = \arccos \frac{U_{d.out}}{U_{d0}}$$

де:

$U_{d.out}$ — задане значення середньої випрямленої напруги;

U_{d0} — максимально можлива середня випрямлена напруга при $\alpha = 0$.

4.3.3 Організація гальванічної розв'язки та передачі імпульсів

Оскільки потенціал катодів тиристорів у верхніх поверхах високовольтного стовпа сягає 8 кВ відносно "землі", забезпечення ізоляції ланцюгів керування є пріоритетним завданням.

Використовуються два основні методи передачі сигналу:

1. **Оптичний метод (Fiber Optic):** Сигнал керування передається від центрального контролера до драйверів через волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). Це гарантує абсолютну завадостійкість та ідеальну ізоляцію.

2. **Імпульсні трансформатори:** Застосовуються у локальних групах тиристорів з посиленою міжобмотковою ізоляцією, розрахованою на напругу не менше 15 кВ.

Таблиця 4.3 — Характеристики імпульсів керування тиристорами

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Амплітуда струму імпульсу	$I_{G.m}$	2.5 ... 5.0	А
Швидкість наростання струму	di_G/dt	≥ 2	А/мкс
Тривалість імпульсу	t_p	100 ... 500	мкс
Напруга ізоляції каналу	U_{iso}	15	кВ

4.3.4 Алгоритм захисту та блокування

Система керування виконує функцію швидкого захисту. При виникненні аварійних ситуацій (коротке замикання, пробій тиристора, перегрів) СК реалізує один із двох сценаріїв:

- **"Фазовий зсув":** миттєве переведення випрямляча в інверторний режим для швидкого скидання енергії, накопиченої в індуктивності навантаження.

- **"Імпульсне блокування":** припинення подачі відпираючих імпульсів на всі вентиля.

Аналітичне пояснення логіки керування: Застосування 12-пульсної схеми вимагає синхронізації двох мостів із фазовим зсувом 30° між ними. Це досягається за допомогою трансформатора зі схемами з'єднання обмоток «зірка-зірка» та «зірка-трикутник». СК повинна враховувати цей зсув при формуванні сітки імпульсів, щоб забезпечити мінімальний коефіцієнт пульсацій вихідної напруги ($k_p \leq 1.0\%$).

Резюме:

Інтеграція цифрової СІФК з оптичною розв'язкою дозволяє досягти високої точності регулювання (до 0.1°) та забезпечує живучість силового блоку в умовах інтенсивних електромагнітних завад, що виникають при роботі потужного високовольтного електропривода.

4.4 Система захисту та діагностики роботи силового блоку

Надійність високовольтного випрямляча (8 кВ, 315 А) значною мірою залежить від ефективності системи захисту та безперервного моніторингу його параметрів. Оскільки силовий блок є ключовим вузлом частотно-регульованого електропривода, будь-яка відмова або некоректна робота тиристорів може призвести до значних економічних збитків та пошкодження суміжного обладнання.

4.4.1 Багаторівнева структура захисту

Система захисту силового блоку спроектована за ієрархічним принципом і включає три основні рівні:

1. **Пасивний захист (елементний рівень):** реалізується за допомогою RC-ланцюгів та дроселів насичення, які обмежують швидкість наростання напруги (du/dt) та струму (di/dt) безпосередньо на напівпровідникових структурах.
2. **Швидкодіючий апаратний захист:** використовує сигнали від датчиків струму (датчики Холла або трансформатори струму) для миттєвого блокування імпульсів керування при перевищенні порогових значень (струмова відсічка).
3. **Програмно-логічний захист:** реалізується в контролері системи керування; він аналізує тренди параметрів та формує попереджувальні сигнали або здійснює планову зупинку пристрою.

4.4.2 Види захистів та їх функціональне призначення

У таблиці 4.4 наведено перелік основних видів захисту, впроваджених у конструкцію силового блоку.

Таблиця 4.4 — Основні види захистів силового випрямляча

Вид захисту	Первинний датчик	Метод реалізації	Уставка / Умова
Від внутрішніх КЗ	Датчики струму в плечах	Блокування імпульсів + спрацювання вимикача	$I \geq 2.5 \cdot I_{dn}$
Від перенапруг	Подільники напруги	Спрацювання обмежувачів напруги (ОПН)	$U \geq 1.25 \cdot U_{max}$
Тепловий захист	Термістори на охолоджувачах	Зниження навантаження або зупинка	$T_{hs} \geq 85^{\circ}\text{C}$
Контроль охолодження	Датчик потоку повітря	Блокування роботи при зупинці вентиляторів	$V_{air} \leq V_{min}$

4.4.3 Система діагностики та моніторингу стану тиристорів

Для високовольтних систем із послідовним з'єднанням вентилів критично важливою є функція **діагностики цілісності кожного тиристора**. Оскільки випрямляч має надмірність (запас за напругою), пробій одного вентиля в плечі не призводить до негайної аварії, але вимагає оперативної ідентифікації.

Алгоритм діагностики включає:

- **Моніторинг зворотного опору:** система керування аналізує падіння напруги на кожному тиристорі в непровідну фазу. При виявленні відсутності напруги на конкретному вентилі фіксується його "пробій".

Діагностика кіл керування: перевірка цілісності ліній передачі імпульсів (контроль струму споживання драйвера).

4.4.4 Реалізація захисту від комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги, що виникають при вимкненні тиристорів, придушуються за допомогою демпфуючих контурів. Розрахунок енергії, яку має поглинути захисна система, здійснюється за виразом:

$$W_{sw} = \frac{1}{2} \cdot L_{\sigma} \cdot I_m^2$$

де L_{σ} — паразитна індуктивність шинопровода;

I_m — амплітудне значення струму в момент комутації.

Для захисту від зовнішніх (атмосферних та комутаційних) перенапруг на вході силового блоку встановлюються нелінійні обмежувачі напруги (ОПН) на базі оксидно-цинкових варисторів.

Пояснювальний зв'язок: Інтегрована діагностика дозволяє реалізувати стратегію "обслуговування за станом". Замість регламентної перевірки всіх 72 тиристорів, персонал отримує точні координати несправного елемента (номер шафи, номер плеча, порядковий номер у стовпі), що значно скорочує час простою електропривода.

Резюме:

Впровадження комплексної системи захисту та діагностики забезпечує не лише збереження силового обладнання в аварійних режимах, а й надає повну інформаційну картину щодо поточного ресурсу напівпровідникових приладів. Це дозволяє гарантувати безперебійну роботу випрямляча з коефіцієнтом готовності $K_g \geq 0.99$.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської дипломної роботи було проведено комплексне проектування силового блоку високовольтного випрямляча (8 кВ, 315 А), який є ключовим вузлом системи частотного регулювання для потужних синхронних електроприводів. На основі отриманих результатів можна сформулювати наступні висновки:

1. **Функціональне призначення та системна інтеграція.** Розроблений силовий модуль успішно інтегрується у структуру високовольтного перетворювача частоти. Його архітектура забезпечує надійну реалізацію алгоритмів плавного синхронного частотного пуску та точного регулювання швидкості обертання агрегатів, що дозволяє мінімізувати пускові струми та механічні навантаження на приводне обладнання.

2. **Оптимізація схемотехнічних рішень.** Завдяки впровадженню силових напівпровідникових приладів високого класу напруги (тиристори Т453-630 38-го класу виробництва ТОВ «Елемент-Перетворювач»), вдалося суттєво модернізувати конструкцію випрямного стовпа. Перехід від стандартного 24-го класу до 38-го дозволив зменшити кількість послідовно з'єднаних приладів у кожному плечі випрямляча. Це безпосередньо призвело до покращення масогабаритних характеристик силової шафи та підвищення загальної надійності системи за рахунок зменшення кількості потенційних точок відмови.

3. **Економічна ефективність та імпортозаміщення.** Використання компонентної бази вітчизняного виробництва забезпечило вагомому економічну перевагу проекту. Аналіз ринку показав, що вартість іноземних аналогів у рази перевищує ціну обраних тиристорів, що робить розроблений пристрій конкурентоспроможним за показником капітальних витрат при збереженні високих експлуатаційних параметрів.

4. **Інноваційні рішення в системі охолодження.** Особливу увагу в

роботі приділено забезпеченню теплового режиму напівпровідникових вузлів. Застосування вдосконаленої конструкції охолоджувачів, виготовлення яких передбачено безпосередньо на базі виробничого підприємства, дозволило оптимізувати площу теплообміну та знизити тепловий опір системи «перехід–середовище». Такий підхід не лише гарантує стабільну роботу випрямляча при номінальних струмах у 315 А, але й додатково знижує собівартість виготовлення блоку.

5. Технічні характеристики виробу. Результатом проектування є силовий блок із загальною вагою 1026 кг та ергономічними габаритними розмірами 2700x1200x1200 мм. Параметри пристрою повністю відповідають галузевим стандартам для високовольтного енергетичного обладнання та дозволяють проводити монтаж у стандартних машинних залах без значної реконструкції приміщень.

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. 92 с.
2. Зезекало І. Г. Силова електроніка : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 258 с.
3. Загірняк М. В., Невзлін М. П. Електричні машини : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Кременчук : КНУ, 2015. 522 с.
4. Тиристори силові серії T453. Технічні характеристики та параметри : каталог продукції / ТОВ «Елемент-Перетворювач». Запоріжжя, 2022. 12 с.
5. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 312 с.
6. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Видання 4-те, перероблене і доповнене. Київ : Форт, 2017. 760 с.
7. Бур'ян С. О., Печеник М. В. Напівпровідникові перетворювачі частоти в електромеханічних системах : навч. посібник. Київ : Каравела, 2020. 232 с.
8. Електричні перетворювачі електроенергії напівпровідникові. Терміни та визначення : ДСТУ 2815-94. [Зі змінами від 2010 р.]. Київ : Держстандарт України, 1995. 45 с.
9. Терещенко Т. О., Ямненко Ю. С. Моделювання пристроїв сигової електроніки : навч. посібник. Київ : ТОВ «Едельвейс», 2015. 180 с.
10. Технічний опис охолоджувачів для силових напівпровідникових приладів. Методика розрахунку теплового опору / ТОВ «Елемент-Перетворювач». Запоріжжя, 2021. 8 с.

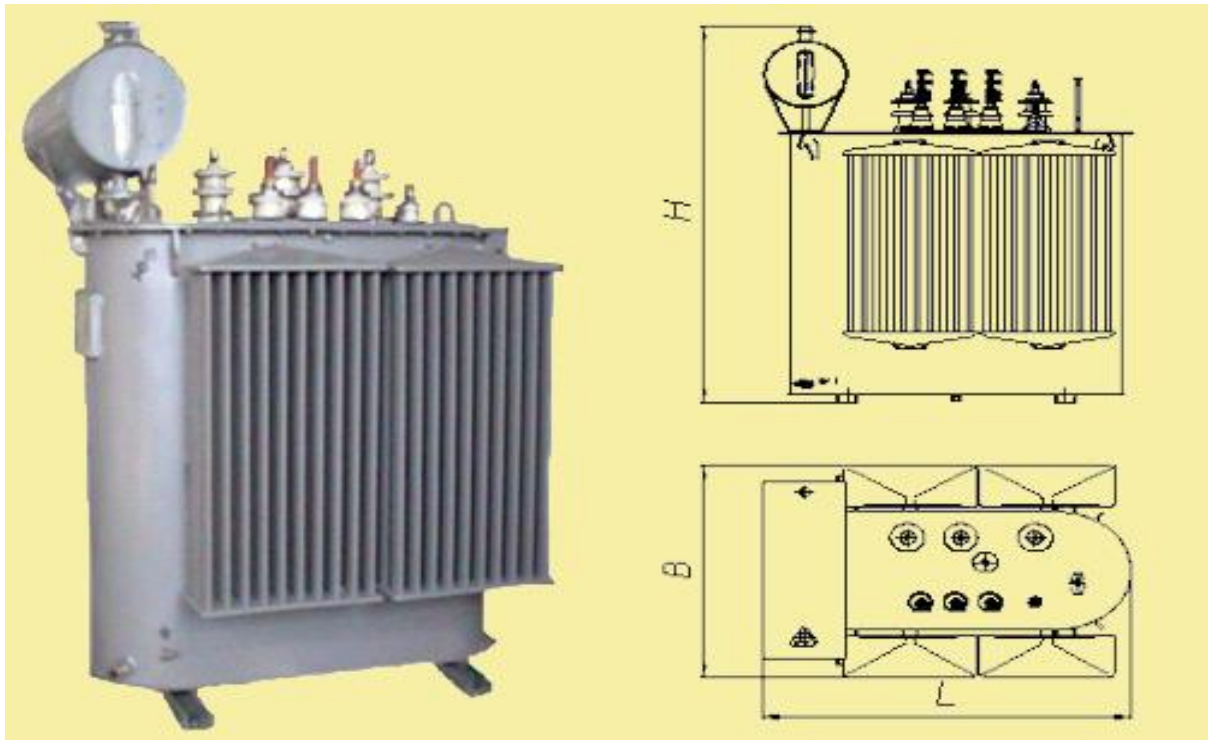


Рисунок А.1 – Трансформатор масляний ТМ-3150-10/6,3

Таблиця А.1 – Технічні характеристики трансформатора

Потужність, кВА	3150
Напруга мережева ВН, кВ	10
Напруга вторинної обмотки НН, кВ	6,3
Втрати х/х, кВт	5,2
Втрати к/з, кВт	33,5
Напруга КЗ, %	7,5
Струм х/х, %	0,9

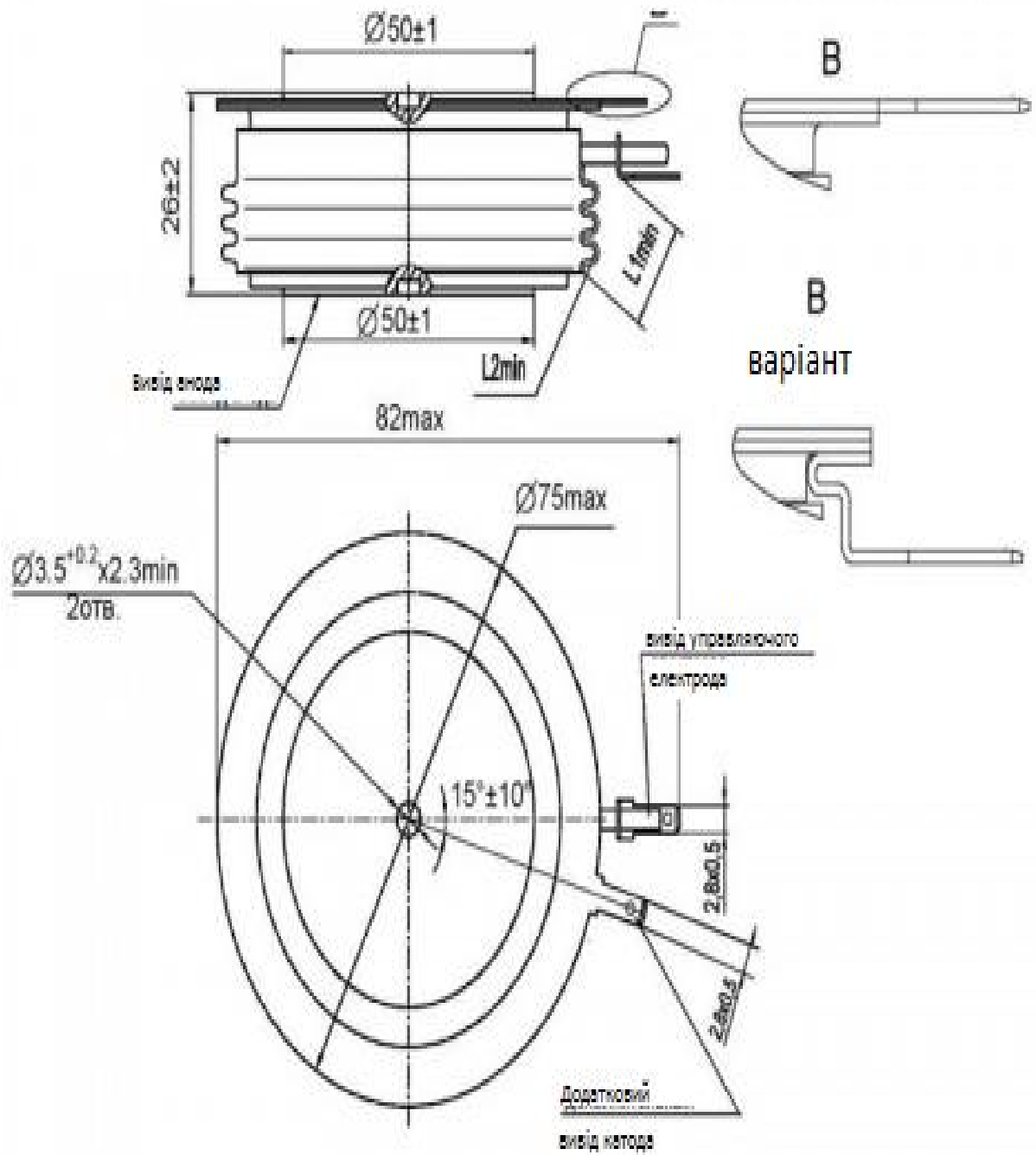


Рисунок Б.1 – Тиристори 453-630

Таблиця Б.1 – Параметри тиристора Т453-630

Параметри закритого стану	
Повторююча імпульсна напруга в закритому стані U_{DRM} , В і повторююча імпульсна зворотна напруга U_{RRM} , В	3800
Не повторююча імпульсна напруга в закритому стані U_{DSM} , В і не повторююча імпульсна зворотна напруга U_{RSM} , В	4000
Робоча імпульсна напруга в закритому стані U_{DWM} , В і робоча імпульсна зворотна напруга U_{RWM} , В	$0,8 U_{DRM}$
	$0,8 U_{RRM}$
Постійна напруга в закритому стані U_D , В і постійна зворотна напруга U_R , В	$0,6 U_{DRM}$
	$0,6 U_{RRM}$
Повторюючий імпульсний струм в закритому стані і повторюючий імпульсний зворотний струм, мА не більше	5
	100
Максимально допустимий середній прямий струм у відкритому стані I_{TAVM} , А	630
Фактичний максимально допустимий середній прямий струм у відкритому стані, А	990
Діючий струм у відкритому стані I_{TRMS} , А	990
Ударний струм у відкритому стані I_{TSM} , кА	15,0
Імпульсна напруга у відкритому стані U_{TM} , В, не більше	2,5
Порогова напруга у відкритому стані, $U_{T(ТО)}$, В	2,2
Динамічний опір у відкритому стані r_T , мОм	0,305
Струм утримання I_H , мА, не більше	300
Середній струм у відкритому стані I_{TAV} , А (з типовим охолоджувачем)	200
Теплові параметри	
Тепловий опір перехід-корпус R_{thjc} , °С/Вт, не більше	0,022
Тепловий опір корпус-охолоджувач R_{thch} , °С/Вт, не більше	0,005
Тепловий опір перехід-середовище (з охолоджувачем) R_{thja} , °С/Вт, не більше	0,329
Захисний показник термодинамічної стійкості корпусу, $A^2 \cdot s$	$13 \cdot 10^6$

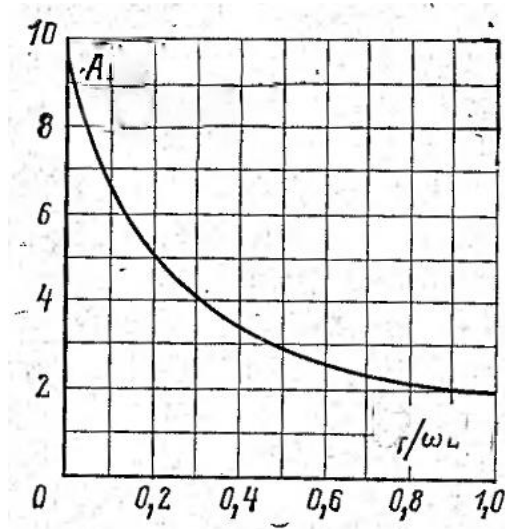
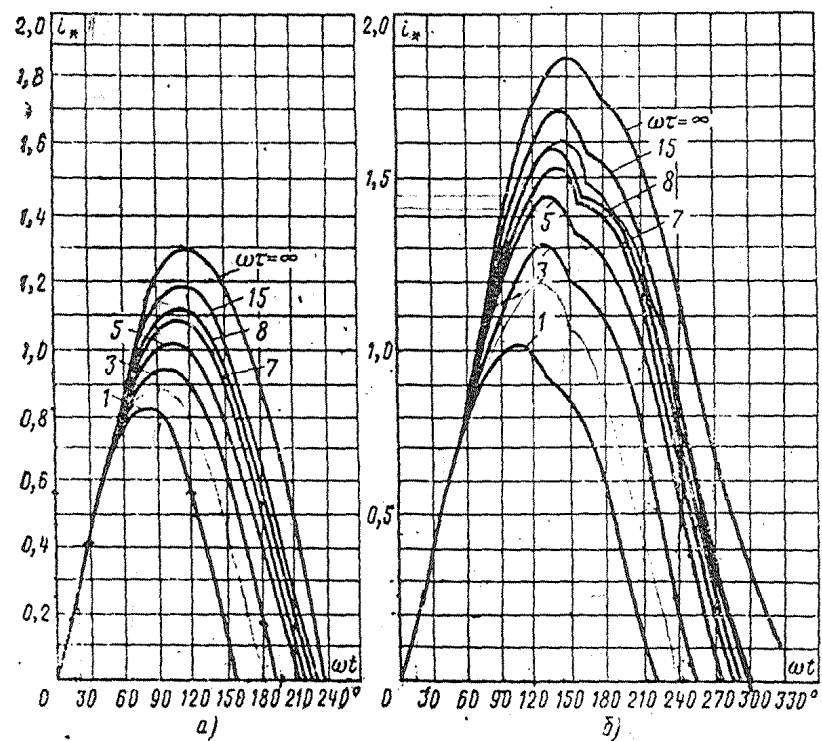


Рисунок В.1 – Залежність коефіцієнта теплової дії найбільш завантаженого вентиля від параметрів аварійного ланцюга.



а – при блокуванні керуючих імпульсів до першої комутації; б –
те ж до другої комутації

Рисунок В.2 – Криві миттєвих значень аварійних струмів тиристора при зовнішньому короткому замиканні.

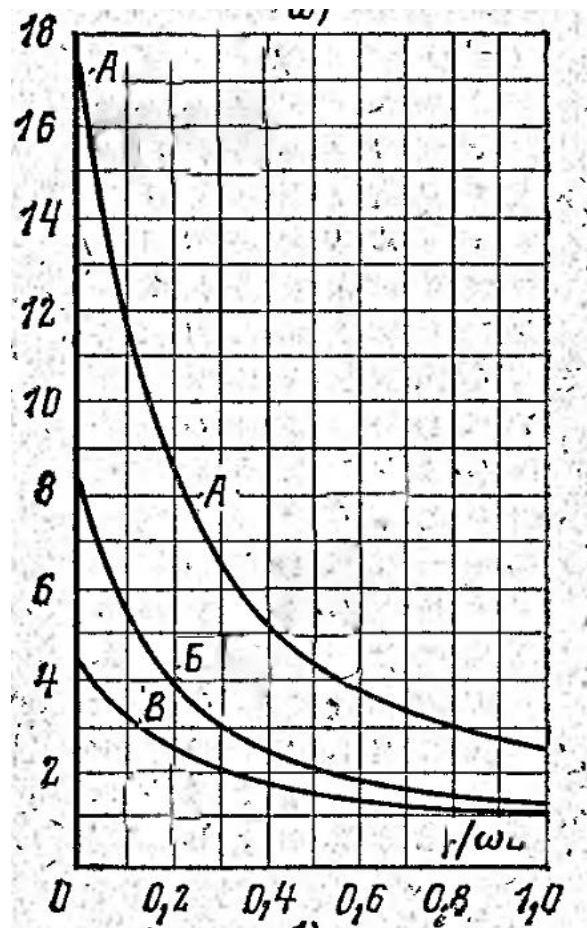


Рисунок В.5 – Криві теплового еквіваленту при внутрішньому короткому замиканні при блокуванні керуючих імпульсів до першої комутації (Б) і при блокуванні керуючих імпульсів після першої комутації для пробитого тиристора 1 (крива А) і тиристорів ланцюга підживлення (В).