

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний
(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему «Тиристорний збуджувач для асинхронного електродвигуна
вібраційного типу 383 Рм, 8 кВт»

Виконав: студент 4 курсу, групи Е-412

спеціальності 141- "Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка"

(код і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Дмитро КВАС

(ім'я та прізвище)

Керівник Людмила СКРУПСЬКА

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ

(ім'я та прізвище)

2026 рік

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

Квасу Дмитру Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) : Тиристорний збуджувач для асинхронного електродвигуна вібраційного типу 383 Рм, 8 кВт

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 22 ” 04 2026 року № 189

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Номінальна потужність: 8 кВт, номінальна напруга збудника 42 В, номінальний струм збудника 16 А, Тип обладнання: асинхронний електродвигун вібраційного типу 383 Рм.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз об'єкта та вибір напрямку проєктування. 2 Структурна та функціональна схема тиристорного збуджувача. 3 Розрахунок тиристорного збуджувача вібраційного електродвигуна. 4 Конструктивне виконання та опис силового блоку. 5 Технологічні аспекти виготовлення та складання тиристорного збуджувача.

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

1. НУЗП.656111.007 01СК – Силовий блок - 1 арк. А1;
2. НУЗП.656335.007 Е1 – Схема тиристорного збудника - 1 арк. А1;
3. НУЗП.687436.007 – Двері – 1 арк. А2 та НУЗП.745513.007 – Двері – 1 арк. А2 ;
4. НУЗП.656335.007 Е2 .– Електро схема збудника - 1 арк. А2 та НУЗП.684411.007 .– Двигун коливання - 1 арк. А2.

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 р.

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)

Дмитро КВАС
 (ім'я та прізвище)

Керівник проєкту (роботи)


 (підпис)

Людмила Скрупська
 (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 71 стор., 18 рисунок, 16 таблиць, 12 джерел.

ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВІБРАЦІЙНИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, СИСТЕМА ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО КЕРУВАННЯ, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ.

Об'єкт проєктування – силова частина та система керування тиристорного збуджувача, призначеного для живлення вібраційного електродвигуна типу 383Рм номінальною потужністю 8 кВт.

Мета роботи полягає у створенні високоефективного перетворювального пристрою, що забезпечує точне регулювання діючого значення струму в обмотках збудження. Це необхідно для керування силовими характеристиками вібраційного приводу та адаптації його роботи до змінних технологічних умов. Регулювання здійснюється шляхом зміни кута відкриття тиристорів у відповідності до закону керування:

$$U_d = U_{do} \cdot \cos(\alpha)$$

де:

U_d — середня вихідна напруга перетворювача,

α — кут керування тиристорами.

Методологія дослідження базується на комплексному використанні аналітичних методів розрахунку електричних ланцюгів та комп'ютерного моделювання. Для верифікації отриманих теоретичних даних та аналізу електромагнітної сумісності було залучено спеціалізоване програмне забезпечення: Mathcad 5.1 (математичне обґрунтування), Matlab 6.5 (моделювання динамічних режимів) та Orcad 9.2 (схемотехнічний аналіз).

Наукова та практична цінність. Спроектований збуджувач дозволяє здійснювати безступінчасте регулювання амплітуди механічних коливань

вібродвигуна 383Рм шляхом зміни кута керування тиристорами. Завдяки модульній структурі, розроблене рішення має високий ступінь уніфікації та може бути адаптованим для роботи з серіями вібраційних машин меншої одиничної потужності.

Основні результати роботи:

- Синтезовано функціонально-алгоритмічну схему збуджувача з контуром зворотного зв'язку за струмом.
- Проведено вибір силового обладнання (тиристорів, засобів захисту та комутаційної апаратури) з урахуванням пускових режимів вібродвигуна.
- Розраховано параметри системи охолодження, що забезпечують стабільну температуру р-п переходів при тривалій експлуатації.

Економічний ефект. Впровадження розробленого пристрою дозволяє оптимізувати енерговитрати виробництва. Очікувана економічна вигода з'являється від заміни застарілих аналогів на нову систему обладнання.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Зміст.....	5
Вступ.....	6
1 Аналіз об'єкта та вибір напрямку проєктування.....	10
1.1 Призначення та принцип дії вібраційних електродвигунів.....	11
1.2 Конструктивні та електромеханічні особливості вібраційного електродвигуна типу 383Рм.....	14
1.3 Аналіз існуючих схем збудження вібраційних електродвигунів.....	17
1.4 Порівняльний аналіз тиристорних збуджувачів для вібраційних електроприводів.....	21
1.5 Обґрунтування вибору тиристорного збуджувача як системи збудження.....	23
2. Структурна та функціональна схема тиристорного збуджувача.....	26
2.1 Загальна структурна схема системи збудження	27
2.2 Опис принципової електричної схеми тиристорного збуджувача	28
2.3 Алгоритм роботи системи керування тиристорами	29
3 Розрахунок тиристорного збуджувача вібраційного електродвигуна.....	31
3.1 Вибір та розрахунок параметрів силового випрямного блоку.....	32
3.2 Вибір тиристорів та розрахунок їх електричних і теплових режимів.....	37
3.3 Розрахунок системи керування тиристорного збуджувача.....	39
3.4 Розрахунок згладжувальних елементів та захисних ланцюгів.....	43
4 Конструктивне виконання та опис силового блоку.....	47
4.1 Конструкція силового блоку тиристорного збуджувача	48
4.2 Система охолодження та забезпечення теплового режиму	50
4.3 Заходи електробезпеки та надійності роботи.....	52
4.4 Компонування елементів у шафі керування.....	53
5 Технологічні аспекти виготовлення та складання тиристорного збуджувача.....	57

5.1 Технологічний процес складання силового блоку.....	58
5.2 Методи контролю якості та програма випробувань збуджувача.....	62
5.3 Вимоги до монтажу, налагодження та введення тиристорного збуджувача в експлуатацію	64
Висновки.....	68
Перелік джерел посилання	71

ВСТУП

Потреба у неухильному підвищенні ефективності суспільної праці в сучасних умовах зумовлює необхідність розширення динамічного діапазону роботи промислового обладнання. Ця тенденція найбільш чітко проявляється в процесах комплексної автоматизації технологічних ліній, де гнучкість та швидкість реагування систем керування стають вирішальними факторами. Автоматизація виробництва сьогодні є потужним інструментом для розв'язання не лише технічних, а й складних економічних і соціальних завдань, забезпечуючи істотне підвищення стандартів якості та інтелектуалізацію праці.

Сучасний стан промисловості характеризується переходом від тотальної автоматизації великих комплексів до інтенсивного впровадження систем інтелектуального керування окремими установками. Така стратегія дозволяє досягти зростання продуктивності безпосередньо на кожному робочому місці, що в кінцевому підсумку веде до суттєвого зниження собівартості продукції та оптимізації виробничих циклів.

Проте, аналіз структури промислових підприємств свідчить про наявність великої кількості допоміжного обладнання. Хоча такі агрегати, як вібраційні двигуни, безпосередньо не визначають основний технологічний маршрут, вони забезпечують безперебійність транспортування, дозування та сепарації сировини. Отже, допоміжне обладнання вимагає такої ж прецизійної перевірки та стабільного керування, як і основні виробничі потужності.

Проблема окупності та технічного рішення

На сьогодні спостерігається критична невідповідність між вартістю апаратури контролю та вартістю самих установок, якими вона керує. У багатьох випадках ціна складної системи автоматизації є співмірною з вартістю виконавчого механізму, що розтягує період окупності капіталовкладень на десятиліття. В контексті експлуатації вібраційних двигунів потужністю 8 кВт (типу 383Рм), виникає гостра потреба у створенні сучасних, але при цьому доступних та ефективних пристроїв керування.

Шляхи вирішення та мета роботи Перспективним напрямком розробки таких систем є використання методів контролю на базі сучасних електронних компонентів та інтегральних схем. Застосування тиристорних силових блоків у поєднанні з аналоговими та цифровими контролерами дозволяє досягти:

1. Високої точності регулювання струму збудження.
2. Стійкості до мережевих та механічних завад.
3. Мінімальної вартості при збереженні високих експлуатаційних характеристик.

Метою даної роботи є проєктування та дослідження перетворюючого пристрою (тиристорного збуджувача), призначеного для плавного та точного регулювання струму в обмотці збудження вібраційного електродвигуна потужністю 8 кВт. Реалізація даного проєкту дозволить створити надійну систему керування, яка задовольнить вимоги сучасного автоматизованого виробництва при забезпеченні швидкої окупності та високої енергоефективності.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ТА ВИБІР НАПРЯМУ ПРОЄКТУВАННЯ

Ефективна робота вібраційних електроприводів у промислових установках значною мірою визначається стабільністю та керованістю процесу збудження електродвигуна. Вібраційні електродвигуни широко застосовуються у гірничо-металургійній, будівельній, хімічній та харчовій промисловості для приводу грохотів, живильників, транспортерів та інших технологічних механізмів, де необхідне формування коливальних рухів з регульованими параметрами. У цьому контексті система збудження відіграє ключову роль, оскільки саме вона визначає амплітуду коливань, динамічні характеристики привода та його енергоефективність.

Даний розділ присвячений аналізу об'єкта проєктування — вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт — та обґрунтуванню вибору напрямку розробки тиристорного збуджувача для нього. У підрозділі 1.1 розглядається призначення та принцип дії вібраційних електродвигунів, а також основні вимоги, що висуваються до систем їх збудження з точки зору керованості та надійності.

У підрозділі 1.2 наведено аналіз конструктивних і електромеханічних особливостей електродвигуна типу 383Рм, які безпосередньо впливають на вибір структури та параметрів збуджувача. Особлива увага приділяється режимам роботи, характеру навантаження та специфіці електромагнітних процесів у двигуні.

Підрозділ 1.3 містить огляд і аналіз існуючих схем збудження вібраційних електродвигунів, з визначенням їх переваг і недоліків з позицій енергетичної ефективності, точності регулювання та складності реалізації. На основі цього у підрозділі 1.4 виконується порівняльний аналіз тиристорних збуджувачів, що застосовуються у вібраційних електроприводах, з метою вибору найбільш доцільного технічного рішення для подальшого проєктування.

Результати аналізу, наведені в даному розділі, слугують теоретичною та практичною основою для формування вимог до тиристорного збуджувача і

визначення оптимального напрямку його проектування з урахуванням умов експлуатації

та характеристик електродвигуна 383Рм.

1.1 Призначення та принцип дії вібраційних електродвигунів

Електровібраційні двигуни серій РМ та ГВК1-08 є спеціалізованими електричними машинами зворотньо-поступальної дії. Згідно з технічною документацією [1], їх основним призначенням є забезпечення приводного руху вібраційних конвеєрів, просіювальних установок (грохотів), живильників та іншого транспортувального обладнання.

Крім базових галузей, дані агрегати широко застосовуються для віброущільнення бетонних сумішей, насипних ґрунтів та інтенсифікації процесів згущення матеріалів у хімічній промисловості.

Ключовою конструктивною особливістю вібраційних двигунів цього типу є повна відсутність вузлів, що обертаються (підшипників, валів, редукторів). Це зумовлює високу експлуатаційну надійність, мінімізує витрати на технічне обслуговування та значно подовжує міжремонтний інтервал.

Двигуни спроектовані для роботи в екстремальних умовах: при високому рівні запиленості повітря, у температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості до 97 %. При цьому стабільність напруги живлення повинна підтримуватися в межах $\pm 10\%$ від номінального значення.

З точки зору механіки, вібраційний двигун являє собою двомасову коливальну систему, де активна та реактивна маси з'єднані між собою пружними зв'язками (еластичною системою корпусів).

Реактивна маса складається з підкладки і перехресних спиць з електромагнітним осердям. Активна містить скобу з якорем електромагніту, металеве кільце та прикріплений до нього силовий привод (резервуар машин просіювання, камери живлячої лінії, і т.д.).

Склад цих мас наведено у таблиці 1.1.

Ескіз вібраційного двигуна показується на рисунку 1.1. А схеми з'єднання обмоток присутні на рисунку 1.2.

Таблиця 1.1 — Структурний склад мас вітрогенератора

Тип маси	Складові елементи	Функціональне призначення
Реактивна маса	Основа (підкладка), перехресні спиці, електромагнітне осердя	Створення опорного магнітного поля та інерційної противаги
Активна маса	Скоба з якорем електромагніту, металеве кільце, робочий орган (резервуар, лоток)	Безпосереднє виконання корисної механічної роботи (вібрації)

Принцип роботи віброперетворювача базується на взаємодії двотактного електромагнітного двигуна з двома робочими зазорами. Магнітопровід осердя та якоря набраний з тонколистової електротехнічної сталі для зниження втрат на вихрові струми. Осердя містить два типи обмоток: змінного та постійного струму.

При живленні електромагніту лише змінним струмом, сила притягання виникає двічі за період, що призводить до вібрацій з подвійною частотою мережі — 100 Гц (6000 коливань/хв). Однак для більшості технологічних процесів необхідна частота 50 Гц (3000 коливань/хв). Це досягається шляхом подачі в обмотки постійного струму збудження.

$$F_{\Sigma} = F_{\sim} + F_{=}$$

Взаємодія постійного магнітного потоку зі змінним викликає появу циклічних сил у робочих зазорах, що діють по чергові. Як наслідок, активна та реактивна маси рухаються у протилежних напрямках вздовж осі електромагніту,

створюючи стабільну вібрацію на частоті 50 Гц. Продуктивність двигуна та амплітуда коливань регулюються плавно — шляхом зміни величини електричного струму в діапазоні від нуля до номіналу.



1 – кільце; 2 – основа; 3 – джерело пружної сили; 4 – скоба; 5 – електромагніт;
 6 – якір

Рисунок 1.1 – Конструктивна схема вібродвигуна

Для досягнення оптимального режиму роботи двигун необхідно налаштувати так, щоб його власна фізична частота перевищувала частоту мережі на 10–15 %. Це забезпечує стабільність амплітуди при коливаннях навантаження. У правильно скоректованому режимі збільшення струму збудження призводить до зменшення споживання змінного струму, що свідчить про енергетичну оптимізацію привода.

Варто зауважити, що попри уніфікацію структури двигунів серії 383Рм, схеми з'єднання їхніх обмоток можуть суттєво варіюватися залежно від конкретних паспортних даних та вимог до тягового зусилля у кожному окремому випадку.



Рисунок 1.2 – Схеми комутації обмоток збудження та змінного струму

Вібраційні двигуни, встановлені на промислових фабриках сьогодні, подібні один до одного. Вони мають аналогічну структуру, але різні розміри, які головним чином залежать від серії електродвигуна і паспортних даних. Єдина істотна відмінність полягає в тому, що з'єднання обмотки залежить від безліччі факторів та варіюється в кожному окремо взятому двигуні.

1.2 Конструктивні та електромеханічні особливості вібраційного електродвигуна типу 383Рм

Вібраційний електродвигун типу **383Рм** потужністю 8 кВт є складним об'єктом електромеханічного перетворення енергії, робота якого базується на

принципах вимушених механічних коливань. На відміну від традиційних двигунів обертального руху, даний агрегат характеризується специфічною конструктивною архітектурою, де електрична енергія безпосередньо трансформується у зворотно-поступальний рух активних мас.

Електромеханічна стабільність двигуна визначається параметрами його магнітного кола та жорсткістю пружних елементів. Ключовою особливістю серії 383Рм є наявність **двотактного електромагнітного механізму**. Це означає, що силові притягання діє по чергову в двох робочих повітряних зазорах, забезпечуючи симетрію механічного зусилля. Оскільки двигун працює в умовах постійних ударних та вібраційних навантажень, його конструктивні елементи (корпус, скоби, кріплення) мають підвищений коефіцієнт механічної міцності (рис.1.3).



Рисунок 1.3 - Особливості конструкції вібраційного електродвигуна

Згідно з принципами теорії електропривода, ефективність вібраційного двигуна максимальна при роботі системи в режимі, близькому до механічного резонансу, що вимагає прецизійного узгодження частоти мережі та частоти власних коливань установки.

Для аналізу електромеханічних процесів необхідно враховувати структуру силових обмоток. Двигун 383Рм обладнаний двома функціональними групами котушок, кожна з яких відіграє критичну роль у формуванні тягового зусилля:

Таблиця 1.2 — Електромеханічні характеристики обмоток двигуна 383Рм

Тип обмотки	Характер живлення	Функціональне призначення	Вплив на режим роботи
Робоча обмотка	Змінний струм (50 Гц)	Генерація змінного магнітного потоку	Визначає динамічну складову сили притягання та енергоспоживання з мережі
Обмотка збудження	Постійний струм (регульований)	Створення поля постійного підмагнічування	Регулює амплітуду коливань, частоту вібрації (перехід зі 100 Гц на 50 Гц) та продуктивність

Електромеханічне зусилля F_{em} , що виникає в робочих зазорах, є квадратичною функцією сумарного магнітного потоку. У разі відсутності постійного підмагнічування ($I_{exc} = 0$), двигун вібрує з подвійною частотою мережі. Подача постійного струму в обмотку збудження дозволяє отримати лінійну залежність сили від змінного струму, що описується спрощеним рівнянням:

$$F_{em} \approx k \cdot \Phi_{=} \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t)$$

де:

k — конструктивний коефіцієнт двигуна;

$\Phi_{=}$ — постійний магнітний потік збудження;

Φ_m — амплітуда змінного магнітного потоку.

Однією з найважливіших електромеханічних особливостей є **реакція якоря** та зміна індуктивності обмоток залежно від положення активної маси. Оскільки

повітряний зазор постійно змінюється під час вібрації, індуктивний опір обмоток також є функцією часу $L(t)$, що вносить нелінійні спотворення у форму споживаного струму. Це накладає жорсткі вимоги до тиристорного збуджувача, який повинен підтримувати задане значення струму I_{exc} незалежно від динамічних змін параметрів навантаження.

Також слід відзначити температурний режим: потужність 8 кВт при високій індуктивності зумовлює значне виділення тепла в обмотках. Враховуючи, що двигун 383Рм часто працює в закритих кожухах для зниження шуму, система збудження повинна мати вбудовані алгоритми температурної компенсації або обмеження струму при перегріві, щоб запобігти деградації ізоляції котушок.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що проєктований тиристорний збуджувач повинен враховувати двофазний характер навантаження, високу індуктивну складову імпедансу та необхідність динамічного підлаштування під механічний стан системи для забезпечення максимального ККД вібропривода.

1.3 Аналіз існуючих схем збудження вібраційних електродвигунів

Згідно з класифікацією, наведеною в літературних джерелах [1], сучасний напівпровідниковий перетворювач логічно поділяється на дві ключові підсистеми: силову частину (виконавчі вентилі) та систему керування (інформаційно-логічний блок). Еволюція цих підсистем відбувалася паралельно з розвитком компонентної бази електроніки — від громіздких магнітних та обертальних перетворювачів до компактних статичних пристроїв на базі тиристорів та IGBT-модулів.

Варто зауважити, що попри домінування напівпровідникових технологій у приводах малої та середньої потужності (до яких належить і двигун 383Рм на 8 кВт), обертальні машинні перетворювачі все ще знаходять застосування на надпотужних енергооб'єктах. Проте для вібраційних установок статичні тиристорні збуджувачі є безальтернативним рішенням завдяки вищому ККД, відсутності механічного зносу та швидкодії.

1.3.1 Типологія та архітектура систем керування

Найбільш розповсюдженою в історичному аспекті є багатоканальна синхронна система керування (MSCS) з вертикальним принципом побудови. Її архітектурна особливість полягає в автономному формуванні імпульсів для кожного окремого плеча багатофазного випрямляча. Типовий канал такої системи включає синхронізований генератор розгортки (ГР) та пороговий пристрій, який порівнює опорну напругу з напругою керування.

Перевагою MSCS є простота візуалізації процесів, проте критичним недоліком вважається фазова асиметрія (зазвичай на рівні 2–5%), що спричинена розкидом параметрів компонентів у різних каналах. Це призводить до виникнення небажаних гармонік у струмі збудження. Розвиток мікросхемотехніки дозволив перейти до одноканальних синхронних систем (рис. 1.4), де кількість фазозсувних вузлів зменшена вдвічі, що суттєво спрощує налагодження.



Рисунок 1.4 – Структурна схема одноканальної СУ для антифазних тиристорів

Особливої уваги заслуговують асинхронні системи, де формування імпульсів здійснюється автономним генератором, а синхронізація відбувається

через контур зворотного зв'язку за вихідним параметром. Це забезпечує ідеальну фазову симетрію, що є критичним для прецизійних установок.

1.3.2 Порівняльний аналіз методів реалізації СУ

На сучасному етапі проектування вибір між цифровою та аналоговою реалізацією системи керування (СУ) визначається економічною доцільністю та складністю алгоритму.

Таблиця 1.3 — Порівняння цифрових та аналогових систем керування

Параметр порівняння	Цифрова СУ (мікроконтролерна)	Аналогова СУ (інтегральна)
Складність реалізації	Висока (потребує програмування)	Середня (схемотехнічна)
Функціональна надмірність	Значна для простих об'єктів	Відсутня (оптимальна)
Вартість компонентів	Висока (контролер, АЦП, ЦАП)	Низька (ОП, компаратори)
Завадостійкість	Чутлива до температур та ЕМЗ	Стабільна при коректному екрануванні

Цифрові системи на базі мікроконтролерів (MCS) дозволяють перенести процес розробки у віртуальну область програмування, що зручно для складних обчислень. Проте для вібродвигуна потужністю 8 кВт використання дорогого контролера з АЦП часто є ірраціональним через високу ціну та надмірність функцій. Крім того, швидкодія цифрових систем часто обмежується "повільними" периферійними пристроями ізоляції (рис. 1.5).

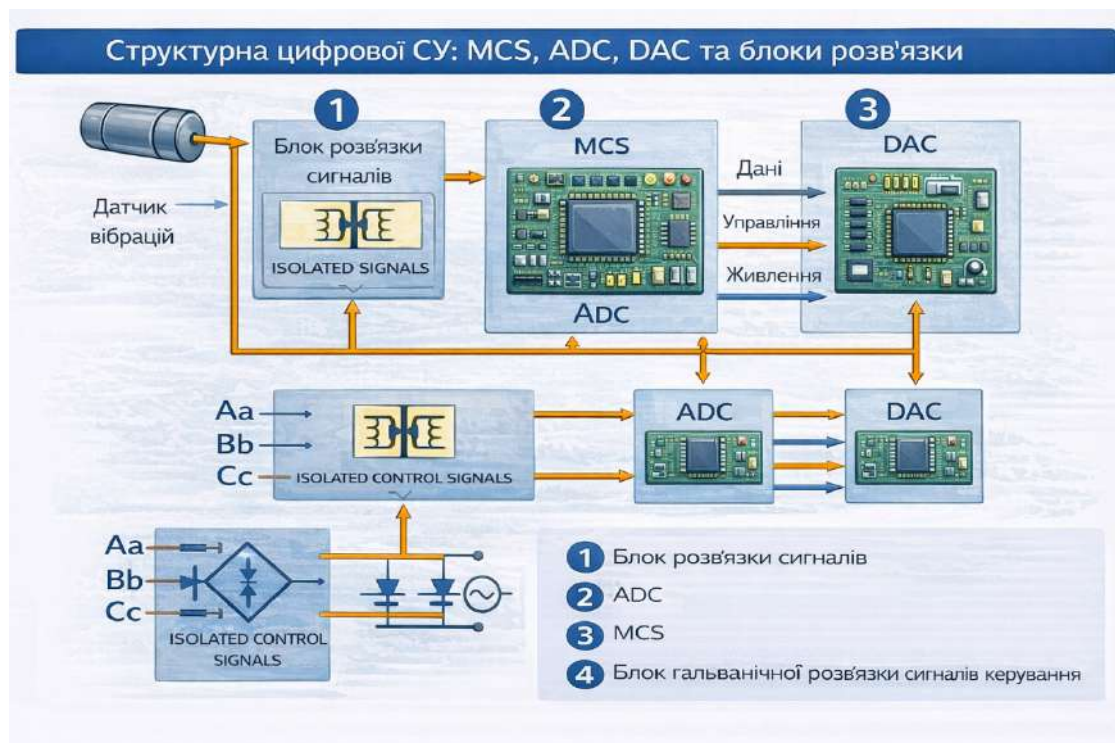


Рисунок 1.5 – Структура цифрової СУ: MCS, ADC, DAC та блоки розв'язки

Аналогові СУ залишаються конкурентоспроможними завдяки низькій вартості, ремонтпридатності та відсутності затримок на обробку сигналу. Сучасні оптико-електронні інтегральні схеми (опторозв'язки) з лінійними характеристиками дозволили вирішити головну проблему аналогових систем — якісну гальванічну ізоляцію сигналів без використання громіздких трансформаторів.

1.3.3 Обґрунтування вибору силової та керуючої частини

Враховуючи проведені дослідження, для вібродвигуна 383Рм обрано однофазну мостову схему випрямлення. Хоча вона потребує чотирьох напівпровідникових ключів (тиристорів), її перевага полягає у кращому використанні потужності трансформатора та менших пульсаціях вихідної напруги порівняно зі схемою з нульовою точкою. Оскільки струми збудження для 8 кВт двигуна не є критично високими, вартість додаткових тиристорів не суттєво впливає на загальний бюджет проєкту.

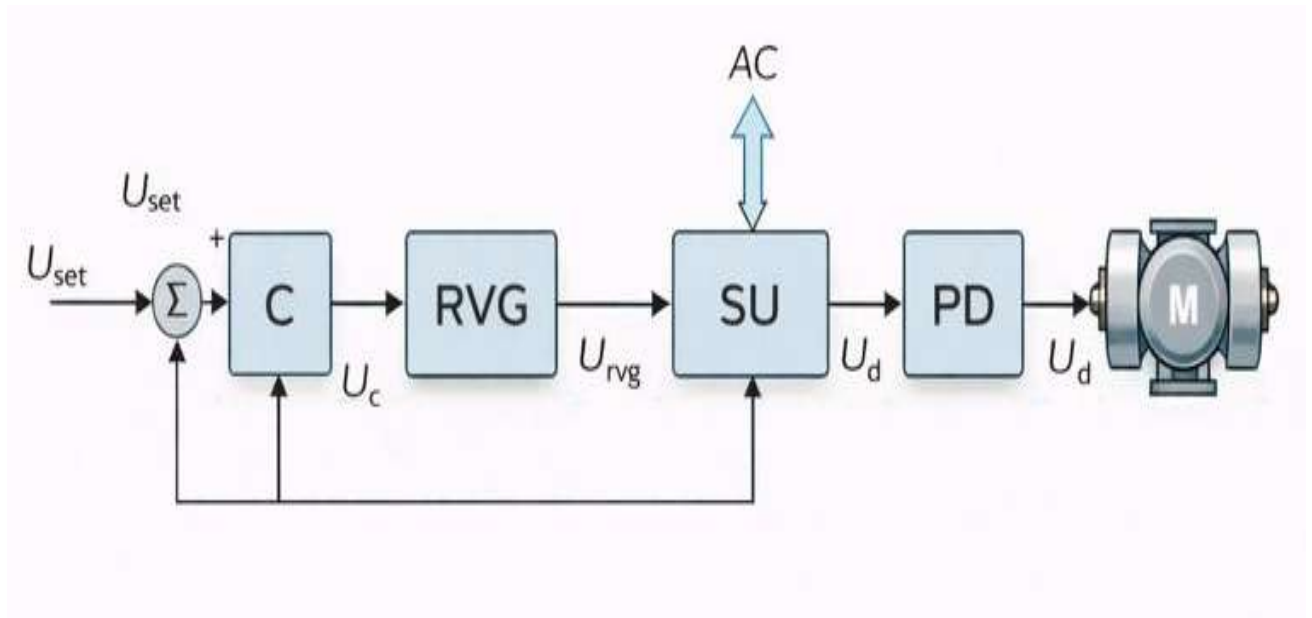


Рисунок 1.6 – Функціональна схема обраної аналогової СУ: блоки C, RVG, SU, PD

Система керування планується як замкнута синхронна аналогова структура. Це рішення є оптимальним, оскільки логіка керування вібродвигуном не передбачає складних матричних обчислень, а аналогова реалізація забезпечить найвищу надійність та мінімальну собівартість пристрою, що повністю відповідає завданням автоматизації допоміжного обладнання.

1.4 Порівняльний аналіз тиристорних збуджувачів для вібраційних електроприводів

Ефективність функціонування вібраційного двигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт безпосередньо корелює з топологією силової частини тиристорного збуджувача. Аналіз існуючих технічних рішень дозволяє виділити два основні підходи до побудови випрямних схем збудження: однофазні схеми з нульовим виводом та однофазні мостові схеми. Вибір конкретної конфігурації є компромісом між складністю системи керування, вартістю напівпровідникових приладів та якістю вихідної напруги.

Однофазна схема з нульовим виводом (двонапівперіодна) історично вважалася найбільш економічною через використання лише двох тиристорів. Проте, з погляду електромеханіки вібродвигуна, вона має суттєві обмеження. Високий коефіцієнт пульсацій вихідного струму призводить до додаткових втрат у магнітопроводі двигуна через явище гістерезису та вихрові струми. Крім того, така схема вимагає використання спеціального трансформатора з виводом середньої точки, що збільшує його габаритну потужність S_{tr} порівняно з корисною потужністю навантаження P_d .

$$S_{tr} = 1.48 \cdot P_d \text{ (для схеми з нульовою точкою)}$$

Альтернативним та більш прогресивним рішенням є **однофазна мостова схема**. Незважаючи на збільшення кількості силових вентилів до чотирьох, вона забезпечує кращу якість випрямленої напруги. У контексті вібраційного привода 383Рм, де обмотка збудження має значну індуктивність, мостова схема дозволяє досягти стабільнішого магнітного потоку при менших габаритах живильного трансформатора.

Таблиця 1.4 — Порівняльна оцінка техніко-економічних показників схем збуджувачів

Показник аналізу	Схема з нульовим виводом	Мостова схема випрямлення
Кількість тиристорів	2	4
Коефіцієнт використання трансформатора	Низький (0.67)	Високий (0.81)
Зворотна напруга на вентилі (U_{rev})	$3.14 \cdot U_d$	$1.57 \cdot U_d$
Рівень пульсацій струму збудження	Середній	Мінімальний
Масогабаритні показники	Значні	Оптимальні

Особливе місце в аналізі посідають напівкеровані мостові схеми (два тиристири та два діоди). Вони дозволяють дещо спростити систему імпульсно-фазового керування, однак обмежують діапазон регулювання струму збудження та

погіршують коефіцієнт потужності системи ($\cos \varphi$). Для вібраційного двигуна потужністю 8 кВт, де критично важливо забезпечити плавність регулювання амплітуди вібрації від 0 до 100%, доцільним є використання повністю керованої мостової схеми.

Сучасні тенденції проектування збуджувачів також передбачають інтеграцію вузлів гальванічної розв'язки. Встановлено, що цифрові системи розв'язки (оптопари) у поєднанні з аналоговим керуванням забезпечують найвищу швидкість реакції системи на зміну навантаження. Це дозволяє компенсувати "реакцію якоря", яка у вібраційних двигунах проявляється значно сильніше, ніж у машинах обертового руху.

Підсумовуючи порівняльний аналіз, для реалізації в даній бакалаврській роботі обрано повністю керований однофазний мостовий тиристорний випрямляч. Даний вибір обґрунтований необхідністю забезпечення високої точності підтримки струму збудження, мінімізацією пульсацій магнітного потоку та можливістю ефективного використання масогабаритних параметрів силового трансформатора.

1.5 Обґрунтування вибору тиристорного збуджувача як системи збудження

Остаточний вибір тиристорного збуджувача (ТЗ) для керування вібраційним електродвигуном типу 383Рм потужністю 8 кВт базується на комплексному аналізі режимів роботи електропривода та специфіки навантаження. Оскільки обмотки збуджувача мають значну індуктивність та працюють у режимі постійних циклічних навантажень, система живлення повинна забезпечувати високу перевантажувальну здатність та стійкість до комутаційних перенапруг.

Порівняно з альтернативними варіантами (наприклад, транзисторними ШІМ-перетворювачами на IGBT або застарілими магнітними підсилювачами), тиристорні системи мають низку переваг, що є критичними для важкої промисловості. Основні аргументи на користь ТЗ наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 — Порівняльний аналіз систем збудження за технічними критеріями

Критерій вибору	Тиристорний збуджувач (SCR)	Транзисторний перетворювач (IGBT)	Магнітний підсилювач
Надійність при індуктивному навантаженні	Висока (стійкість до di/dt)	Середня (потребує складних демпферів)	Дуже висока
ККД системи	96–98%	94–97%	85–90%
Складність силової схеми	Мінімальна	Висока	Середня
Вартість на 1 кВт потужності	Низька	Висока	Середня

Одним з вирішальних факторів є здатність тиристорів витримувати значні імпульсні струми. Для двигуна потужністю 8 кВт пускові струми та струми при форсуванні збудження можуть перевищувати номінальні у 2–3 рази. Тиристори, на відміну від транзисторів, мають значно більшу теплову інерцію кремнієвої структури, що дозволяє їм без пошкоджень переносити короткочасні перевантаження.

З точки зору енергетики, використання фазового керування тиристорами дозволяє забезпечити необхідну точність підтримки середнього значення струму збудження I_d . Регулювальна характеристика системи визначається кутом керування α :

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos(\alpha) - \Delta U_v$$

де:

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

ΔU_v — падіння напруги на вентилях.

Такий закон керування дозволяє реалізувати закриту систему автоматичного регулювання (САР) з високим коефіцієнтом підсилення, що необхідно для стабілізації амплітуди вібрації при зміні навантаження на лотку вібромашини.

Додатковим аргументом є економічна доцільність. Для потужності 8 кВт вартість силових тиристорів класу T161 або аналогічних є суттєво нижчою за вартість IGBT-модулів з відповідними драйверами та системами захисту від перенапруг, що виникають при розриві індуктивного ланцюга обмотки збудження.

Висновок по розділу 1: На основі проведеного аналізу об'єкта проектування (вібродвигун 383Рм), огляду існуючих схем керування та порівняння систем живлення, для подальшої розробки обрано **керований тиристорний збуджувач за однофазною мостовою схемою** з аналоговою системою керування. Дане рішення забезпечує оптимальний баланс між надійністю, вартістю та якістю регулювання технологічних параметрів вібраційного привода.

Розділ 2. СТРУКТУРНА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ТИРИСТОРНОГО ЗБУДЖУВАЧА

У сучасних системах силової електроніки та перетворювальної техніки тиристорні збуджувачі відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного керування електродвигунами, зокрема вібраційними, які застосовуються в промисловості для задач транспортування, сортування та обробки матеріалів. Тема проектування тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт передбачає детальний аналіз структурної та функціональної організації пристрою, що є фундаментальним етапом для досягнення ефективної роботи системи. Цей розділ присвячено розкриттю архітектури збуджувача, яка забезпечує точне регулювання параметрів збудження, мінімізацію втрат енергії та надійну діагностику стану двигуна.

У попередньому розділі було проведено аналіз об'єкта проектування – вібраційного електродвигуна типу 383Рм, визначено вимоги до системи збудження та обґрунтовано вибір тиристорної схеми як оптимального рішення для забезпечення плавного регулювання амплітуди вібрацій та потужності. На основі цього, у розділі 2 розглядаються ключові аспекти структурної організації: від загальної схеми системи до алгоритмів керування (рис.2.1).

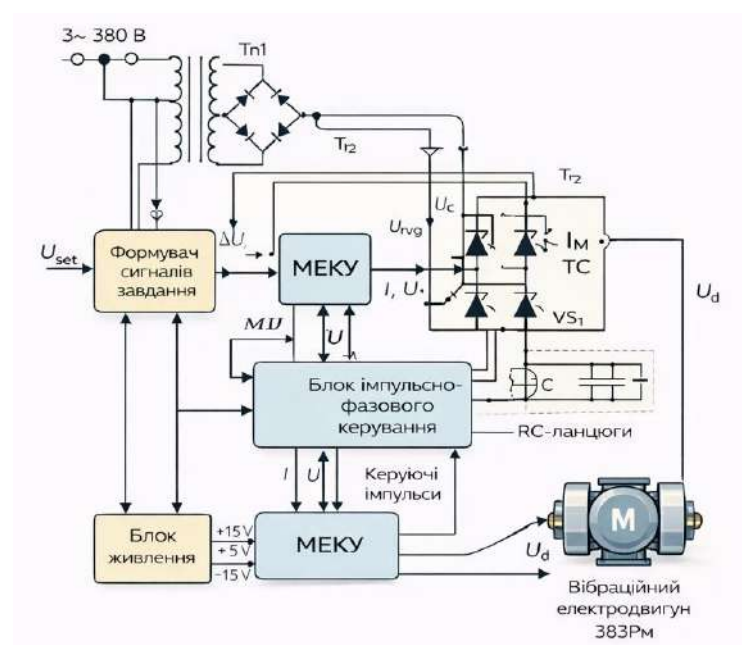


Рисунок 2.1 – Структурна та функціональна схема тиристорного збуджувача

Підрозділ 2.1 присвячено загальній структурній схемі системи збудження, де описано взаємодію основних блоків: джерела живлення, тиристорного перетворювача, датчиків зворотного зв'язку та блоку керування. Це дозволяє зрозуміти інтеграцію компонентів для досягнення стабільності роботи двигуна в режимах пуску, номінального навантаження та зупинки.

У підрозділі 2.2 надається опис принципової електричної схеми тиристорного збуджувача, включаючи вибір тиристорів, схеми комутації та захисту від перевантажень. Акцент робиться на розрахунках параметрів схеми для забезпечення потужності 8 кВт, з урахуванням особливостей вібраційного двигуна, таких як змінна індуктивність та необхідність імпульсного керування.

Нарешті, підрозділ 2.3 детально аналізує алгоритм роботи системи керування тиристорами, включаючи фазове регулювання, імпульсне формування сигналів та інтеграцію зворотного зв'язку для адаптивної діагностики. Це забезпечує автоматизацію процесів та підвищення надійності системи.

Загалом, цей розділ формує основу для подальшого проектування та моделювання, підкреслюючи роль структурної організації в оптимізації ефективності та безпеки тиристорного збуджувача. Результати аналізу дозволять перейти до розрахунків та вибору елементної бази в наступних розділах.

2.1 Загальна структурна схема системи збудження

Проектована система збудження для вібродвигуна 383Рм будується за принципом замкнутої системи автоматичного регулювання (САР). Структурна організація ТЗ обумовлена необхідністю перетворення енергії промислової мережі у регульований постійний струм збудження з високою точністю підтримки заданих параметрів.

Основними функціональними блоками системи є: силове трансформаторне устаткування, тиристорний випрямний міст, блок імпульсно-фазового керування (БІФК) та контур зворотного зв'язку за струмом (рис.2.2). На відміну від

розімкнутих систем, наявність зворотного зв'язку дозволяє стабілізувати амплітуду коливань двигуна навіть при зміні технологічного навантаження на вібрлотку або коливаннях напруги живлення.



Рисунок 2.2 — Узагальнена структурна схема тиристорного збуджувача

2.2 Опис принципової електричної схеми тиристорного збуджувача

Силовая частина збуджувача реалізована на базі повністю керованого однофазного моста. Вибір такої конфігурації забезпечує можливість рекуперації енергії, накопиченої в індуктивності обмотки збудження, назад у мережу при різкому зниженні сигналу керування, що підвищує динамічні характеристики привода.

Для захисту напівпровідникових елементів від комутаційних перенапруг, що виникають при замиканні та розмиканні тиристорів (явище di/dt), паралельно кожному плечу моста встановлюються RC-ланцюги (демпфери). Трансформатор

TV1 виконує функцію узгодження рівнів напруги та забезпечує гальванічну ізоляцію силового кола від промислової мережі 220/380 В.

Таблиця 2.1 — Призначення основних вузлів принципової схеми

Позначення	Назва вузла	Електромеханічна функція
VS1...VS4	Тиристорний міст	Кероване випрямлення та дозування енергії в обмотку збудження
L1 (O3)	Обмотка збудження	Навантаження з високою індуктивністю (8 кВт двигун)
БС	Блок синхронізації	Визначення моментів переходу напруги через нуль для відліку кута α
БГІ	Блок генерації імпульсів	Формування пускових струмів для відкриття тиристорів

2.3 Алгоритм роботи системи керування тиристорами

Функціонування системи керування ґрунтується на вертикальному принципі імпульсно-фазового регулювання. Робочий цикл алгоритму можна розділити на декілька послідовних етапів (рис.2.3), які повторюються кожного напівперіоду напруги живлення (кожні 10 мс для частоти 50 Гц).

Етап 1: Синхронізація. Блок синхронізації фіксує момент природної комутації (перехід синусоїди через нуль). Ця точка стає початком відліку для таймера або генератора розгортки.

Етап 2: Порівняння та затримка. Напруга розгортки U_{saw} (пилкоподібна форма) порівнюється з напругою керування U_{ctrl} , що надходить від регулятора струму. Момент їх рівності визначає кут затримки відкриття тиристорів α .

$$\alpha = \arcsin(U_{\text{ctrl}} / U_{\text{max}}) \cdot (180^\circ / \pi)$$

Етап 3: Формування імпульсу. У визначений момент часу БГІ генерує пачку високочастотних імпульсів (частота заповнення 5–10 кГц), що подаються на керуючі електроди тиристорів через імпульсні трансформатори розв'язки. Використання пачки імпульсів замість поодинокого сигналу гарантує надійне відкриття вентилів при індуктивному характері навантаження.

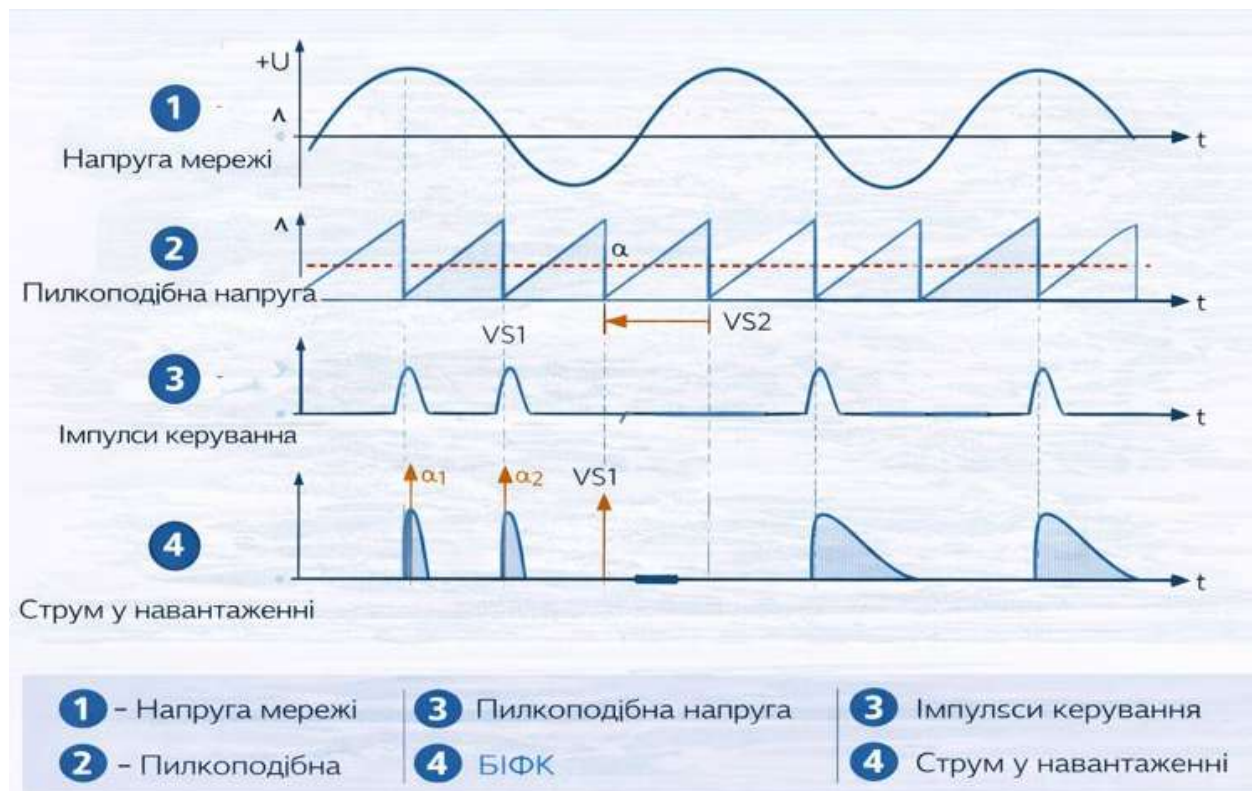


Рисунок 2.3 — Часові діаграми роботи алгоритму керування: напруга мережі, пилкоподібна напруга, імпульси керування та струм у навантаженні]

Застосування даного алгоритму дозволяє реалізувати лінійну регульовальну характеристику збуджувача, що спрощує налаштування загальної системи автоматизації вібропривода та забезпечує стабільну роботу двигуна 383Рм у всьому діапазоні продуктивності.

З РОЗРАХУНОК ТИРИСТОРНОГО ЗБУДЖУВАЧА ВІБРАЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Проектування тиристорного збуджувача вібраційного електродвигуна потребує детального інженерного розрахунку силових, керувальних та захисних елементів, оскільки саме від їх правильного вибору залежать надійність роботи привода, стабільність параметрів збудження та енергетична ефективність електромеханічної системи в цілому. В умовах змінних режимів навантаження, характерних для вібраційних механізмів, система збудження повинна забезпечувати точне та швидкодієне регулювання струму збудження, а також стійку роботу тиристорного перетворювача.

У даному розділі виконується комплексний розрахунок тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт. Розрахунки базуються на технічних вимогах до електропривода, характеристиках електродвигуна та обраній структурі системи керування.

У підрозділі 3.1 здійснюється вибір схеми та розрахунок основних параметрів силового випрямного блоку, з урахуванням необхідної напруги і струму збудження, режимів роботи двигуна та параметрів живильної мережі.

У підрозділі 3.2 наведено вибір силових тиристорів і виконано розрахунок їх електричних та теплових режимів, що дозволяє оцінити допустимі навантаження, втрати потужності та умови охолодження напівпровідникових приладів.

Підрозділ 3.3 присвячений розрахунку системи керування тиристорного збуджувача, включаючи визначення параметрів керуючих сигналів, діапазону регулювання кута керування та вимог до синхронізації з мережею живлення.

У підрозділі 3.4 виконано розрахунок згладжувальних елементів і захисних ланцюгів, призначених для зменшення пульсацій випрямленої напруги, обмеження комутаційних перенапруг та підвищення надійності роботи тиристорного збуджувача в експлуатаційних режимах.

Результати розрахунків, отримані в даному розділі, є основою для подальшого конструктивного виконання тиристорного збуджувача та

підтверджують доцільність обраних технічних рішень для застосування у вібраційному електроприводі.

3.1 Вибір та розрахунок параметрів силового випрямного блоку

Проектований силовий вузол живлення тиристорного збуджувача призначений для сталого забезпечення енергією обмотки вібраційного двигуна 383Рм. Концептуальна електрична схема блока, наведена на рис. 3.1, базується на комбінованому використанні керованих та некерованих напівпровідникових елементів. До складу модуля входять: діодний блок А1, оптотиристорний модуль А2, демпфуючі RC-ланцюги (R1C1, R2C2), напівпровідниковий обмежувач напруги (супресор) V1, а також комутаційно-захисна апаратура у вигляді автоматичного вимикача QF1 та вимірювального шунта RS1.

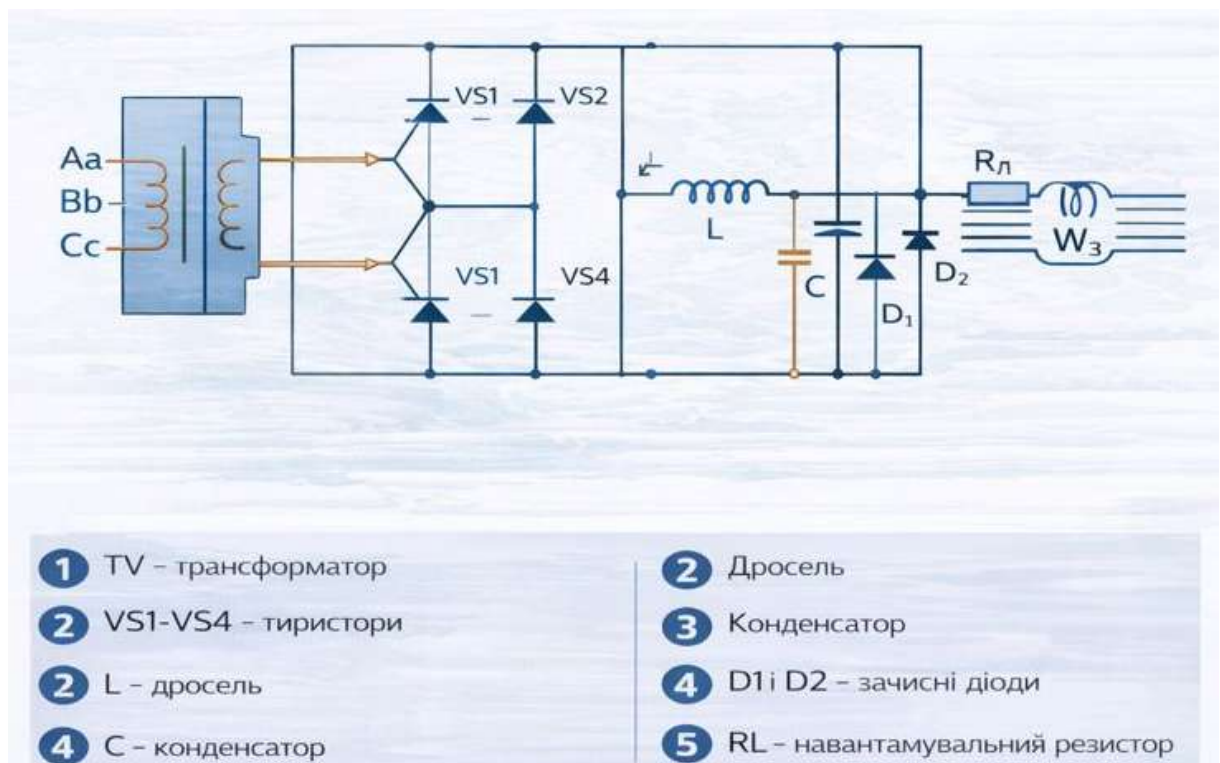


Рисунок 3.1 – Принципова схема силового випрямного вузла перетворювача

Особливістю даної топології є формування однофазного мосту на базі модулів, що не групуються за традиційною ознакою спільного анода чи катода. У

такій конфігурації обидва керовані вентиля приєднані до одного фазного виводу трансформатора, що дозволяє оптимізувати габарити охолоджувальних пристроїв та спростити топологію друкованої плати системи керування.

Методика вибору силових напівпровідників базується на розрахунку максимальних значень напруги та струму, що виникають у контурі при номінальному навантаженні та аналізі внутрішнього теплового опору структури.

Максимальна зворотна напруга на вентилі блоку $U_{rev.max}$ визначається з урахуванням амплітуди вторинної напруги трансформатора та коефіцієнта запасу за напругою $k_{z.u} = 1,5 \dots 2$

$$U_{rev.max} = k_{z.u} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 \quad (3.1)$$

Середнє значення струму, що протікає через кожен тиристор силового блоку $I_{T(AV)}$, розраховується через середнє значення струму випрямленого навантаження I_d для мостової схеми:

$$I_{T(AV)} = \frac{I_d}{2} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ A}$$

З урахуванням пускових режимів двигуна та коефіцієнта запасу за струмом $k_{z.i} \approx 2,5$, обираємо тиристорний модуль, що відповідає умові $I_{T.nom} \geq k_{z.i} \cdot I_{T(AV)}$

Для перевірки теплового режиму роботи блоку розраховуємо максимально допустимий середній струм $I_{T(AV)}$, виходячи з умов природного охолодження:

$$I'_{T(AV)} = \frac{-U_{(TO)} + \sqrt{U_{(TO)}^2 + 4 \cdot k_f^2 \cdot r_T \cdot \frac{T_{j,max} - T_a}{R_{th(j-a)}}}}{2 \cdot k_f^2 \cdot r_T} \quad (3.2)$$

де:

U_0 — порогова напруга;

r_T — динамічний опір напівпровідника;

k_f — коефіцієнт форми струму;

T_j, T_a — температури структури та середовища відповідно;

$R_{th(j-a)}$ — сумарний тепловий опір «перехід-середовище».

Сумарний тепловий опір системи «перехід-середовище $R_{th(j-a)}$ складається з внутрішнього опору приладу та опору встановленого охолоджувача:

$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)} \quad (3.3)$$

Для реалізації силової частини обрано **оптотиристорний модуль МТОТО4-40-8**. Вибір модуля з номінальним струмом 40 А створює необхідний технологічний запас, що підвищує надійність системи за умов циклічного навантаження вібропривода. Експлуатаційні параметри обраного компонента систематизовано в табл. 3.1 та 3.2

Таблиця 3.1 – Основні параметри оптотиристорного модуля МТОТО4-40-8

U_{DRM} , В	I_{DRM} , мА	$I_{T(AV)}$, А	I_{TSM} , кА	U_{GTM} , В	I_{GTM} , мА	$R_{th(j-c)}$, С/Вт
800	4	40	1.25	2.5	120	1.25

Таблиця 3.2 – Характеристики силового блоку на базі МТОТО4-40-8

Параметр	Позначення	Значення	Од. вим.
Гранична напруга модуля	U_{DRM}/U_{RRM}	800	В
Максимальний середній струм	$I_{T(AV)}$	40	А
Порогова напруга	$U_{(TO)}$	1,15	В
Динамічний опір	r_T	8,0	мОм

Для обмеження швидкості наростання прямої напруги d_U/d_t та захисту від перенапруг при комутаціях, паралельно силовому блоку встановлюється демпфуючий RC-ланцюг. Параметри ланцюга розраховуються за формулами:

$$C = \frac{L_{tr} \cdot I_d^2}{U_{max}^2 - U_m^2}; R = 2 \cdot \zeta \cdot \sqrt{\frac{L_{tr}}{C}}$$

де:

L_{tr} — індуктивність розсіювання трансформатора;

ζ — коефіцієнт демпфування (приймається 0,7...1,0).

Обрані номінали компонентів захисту: $R=51\ \Omega$, $C=0,5\ \mu\text{Ф}$.

Динамічний опір r_T визначається як котангенс кута нахилу апроксимованої вольтамперної характеристики (ВАХ). Розрахунок проводиться за двома реперними точками (порогова напруга та амплітудна напруга при піковому струмі):

$$r_T \gg \frac{(U_{TM} - U_{T(TO)})}{I_{TM}}, \quad (3.4)$$

Враховуючи високу індуктивність обмотки збудження двигуна 383Рм (електромагнітна стала $\tau = 0.62\ \text{с}$), режим роботи випрямляча можна вважати ідеалізованим із нескінченною індуктивністю ($L \rightarrow \infty$). За таких умов форма струму наближається до прямокутної (рис. 3.2), що дозволяє визначити коефіцієнт форми струму k_f наступним чином:

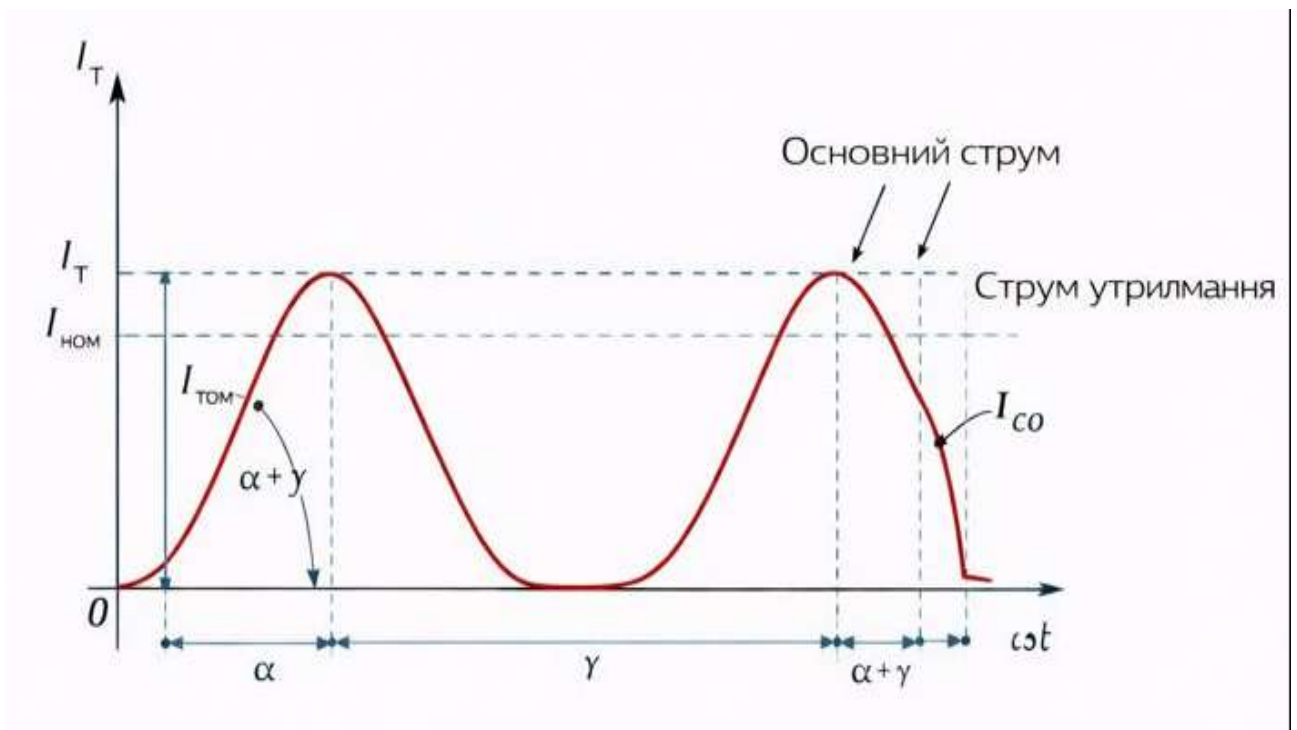


Рисунок 3.2 – Осцилограма струму тиристора у квазістаціонарному режимі

Підстановка отриманих значень у вираз (3.2) дає результат $I_{T(AV)} \approx 69\text{А}$. Оскільки розрахункове значення експлуатаційного струму суттєво перевищує

необхідні 25 А, обраний модуль МТОТ04-40-8 працюватиме у полегшеному тепловому режимі із коефіцієнтом запасу 2.8, що відповідає рекомендаціям. Аналогічно для некерованої групи обираємо **діодний модуль МДД4-40-8**, параметри якого ідентичні за тепловим опором та класом напруги.

Захист напівпровідників від комутаційних сплесків напруги, що виникають внаслідок ефекту накопичення заряду в базі при вимкненні, реалізується через RC-ланцюги. Розрахунок ємності конденсатора базується на поглинанні енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивності розсіювання трансформатора L_{Σ} :

$$W = \frac{L_r I_h^2}{2} = 0.012 \text{ Дж}$$

Приймаючи граничну напругу заряду $U_C = 200 \text{ В}$, необхідна ємність становить

$$C = 2 \cdot W_L \cdot U_{C2} = 0.6 \text{ мкФ}.$$

Зі стандартного ряду номіналів обираємо конденсатор типу МБГЧ 1 мкФ, 500 В. Опір резистора R обмежує розрядний струм при ввімкненні тиристора на рівні 7 А:

$$R = \frac{U_C}{I_{dis}} = 28.5 \text{ Ом}$$

Обираємо дротяний резистор **C5-35В 30 Ом, 10 Вт** в більшу сторону з ряду номеналів. Як датчик струму для моніторингу навантаження застосовано шунт **75ШИСВ 50 А, 75 мВ** в більшу сторону з ряду номеналів. Номінальний струм шунта не повинен призвести до перегріву. У той же час номінальний струм шунта не повинен бути надзвичайно високим, тому що в цьому випадку вихідний сигнал зміниться в невеликому діапазоні.

Захист від перегріву та функції захисту від коротких замикань забезпечує автоматичний вимикач **ТІ 2р30** для номінального струму **50 А**.

3.2 Вибір тиристорів та розрахунків їх електричних і теплових режимів

Процес вибору силових напівпровідникових приладів для тиристорного збуджувача є критичним етапом проєктування, оскільки надійність системи за потужності 8 кВт безпосередньо залежить від стійкості вентилів до струмових перевантажень та ефективності відведення теплової енергії. Для вібраційного електродвигуна типу *383Рм* характерними є перехідні процеси з високою амплітудою струму, що вимагає ретельного аналізу як статичних, так і динамічних параметрів тиристорів.

Основними критеріями вибору силових напівпровідників є середнє значення струму $I_{T(AV)}$ та максимальна повторювана імпульсна напруга у закритому стані U_{DRM} . З огляду на мостову схему випрямлення, середній струм, що протікає через один тиристор, становить половину струму навантаження I_d . З урахуванням коефіцієнта запасу за струмом $k_{z.i}$, що для систем з індуктивним навантаженням становить 1,5–2,5, розрахунковий струм вентиля визначається за виразом:

$$I_{T(AV).calc} = k_{z.i} \cdot \frac{I_d}{2} = 2,5 \cdot \frac{34,8}{2} \approx 43,5 \text{ A}$$

Максимальна зворотна напруга на вентилі $U_{rev,max}$ при нормальному режимі роботи мережі живлення 220 В та коефіцієнті трансформації одиниця визначається як:

$$U_{rev,max} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,41 \cdot 230 \approx 325 \text{ В}$$

Згідно з рекомендаціями щодо проєктування силової електроніки, повторювана імпульсна напруга тиристора повинна перевищувати максимальну робочу напругу мінімум у два рази: $U_{DRM} \geq 2 \cdot U_{rev,max} \approx 650 \text{ В}$. Враховуючи отримані дані, для реалізації збуджувача обрано тиристорний модуль серії *T132-40-8* (або еквівалентний оптотиристорний модуль), основні параметри якого наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Технічні характеристики силового тиристора T132-40-8

Позначення параметра	Назва параметра	Значення	Одиниця виміру
$I_{T(AV)}$	Максимально допустимий середній струм	40	А
U_{DRM}/U_{RRM}	Максимальна повторювана напруга	800	В
$U_{(TO)}$	Порогова напруга (Cut-off voltage)	1,1	В
r_T	Динамічний опір у відкритому стані	0,009	Ом
$T_{j,max}$	Гранична температура переходу	125	°C

Тепловий розрахунок напівпровідникового елемента виконується для перевірки відповідності обраного охолоджувача умовам експлуатації. Сумарні втрати потужності в тиристорі P_{loss} складаються переважно з втрат у відкритому стані:

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

де $I_{T(RMS)}$ — діюче (середньоквадратичне) значення струму тиристора.

Для прямокутної форми струму $I_{T(RMS)} = I_{T(AV)} \cdot k_f$,

де $k_f = 1,41$.

Температура р-п переходу T_j не повинна перевищувати критичного значення $T_{j,max}$:

$$T_j = T_a + P_{loss} \cdot (R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)}) \leq 125^\circ\text{C}$$

де:

T_a — розрахункова температура середовища (приймається 40°C);

$R_{th(j-c)}$ — внутрішній тепловий опір вентиля;

$R_{th(c-h)}$ — опір контакту;

$R_{th(h-a)}$ — тепловий опір радіатора.

Використання алюмінієвого радіатора з площею поверхні не менше 400 см² забезпечує стабільну роботу пристрою без примусового обдування (рис. 3.3).

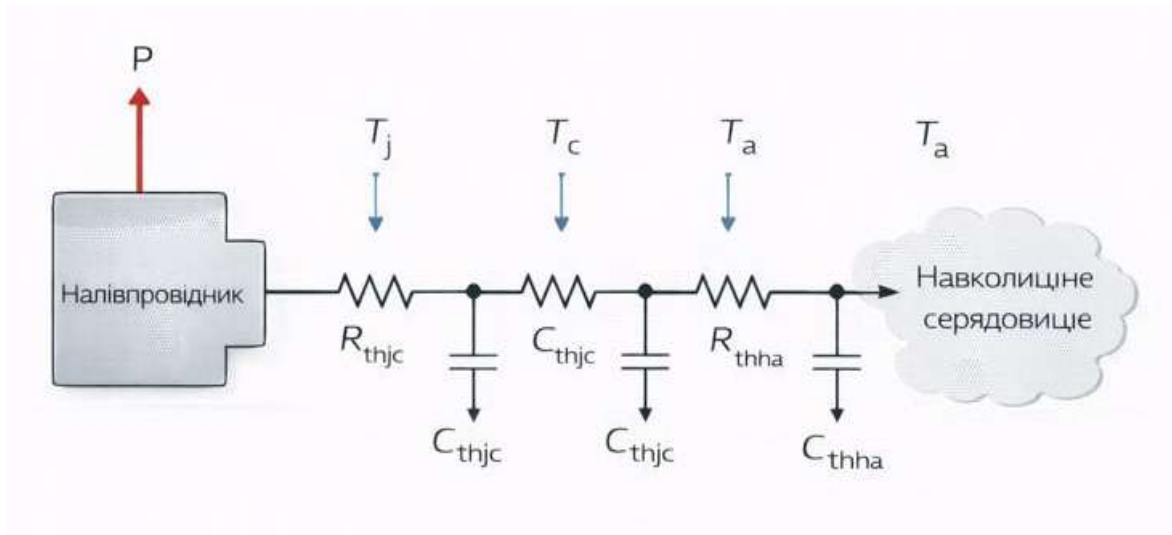


Рисунок 3.3 — Еквівалентна теплова схема заміщення силового напівпровідника

Таким чином, обраний тиристорний модуль задовольняє вимогам надійності за умови забезпечення належного теплового контакту та використання термопасты. Розрахункова температура переходу при максимальному навантаженні 8 кВт становить приблизно 95°C, що забезпечує необхідний температурний запас $\Delta T = 30^\circ\text{C}$.

3.3 Розрахунок системи керування тиристорного збуджувача

Ефективне функціонування тиристорного збуджувача для вітродвигуна 383Рм вимагає прецизійного формування імпульсів керування, що неможливо без точного визначення моментів природної комутації вентилів. Для обраної однофазної мостової схеми ці точки збігаються з моментами переходу синусоїдної

напруги живлення через нульове значення. Система синхронізації повинна забезпечувати жорстку прив'язку часових інтервалів формування імпульсів до фази джерела живлення.

Реальна напруга промислової мережі зазвичай спотворена високочастотними завадами (шумом), зумовленими роботою інших споживачів та комутаційними процесами самих вентилів перетворювача. Наявність таких гармонік створює ризик хибного спрацьовування вузла синхронізації, що призводить до нестабільності кута відмикання тиристорів. Для нівелювання впливу цих факторів та стабілізації сигналу переходу через нуль необхідно застосовувати спеціалізовані активні фільтри.

До фільтруючого пристрою висуваються наступні технічні вимоги:

- а) забезпечення низькочастотної фільтрації для пригнічення імпульсних завад;
- б) стійкість до короткочасних провалів напруги;
- в) мінімізація фазового зсуву між вхідною та вихідною напругою (відхилення не повинно перевищувати $0,5^\circ$).

Для реалізації цих вимог обрано активний фільтр другого порядку на базі операційного підсилювача LM2904. Схема містить (рис. 3.4) два взаємопов'язані контури зворотного зв'язку: зовнішній диференціальний RC-ланцюг для відсікання високочастотного спектру та внутрішній інтегруючий контур для обробки низькочастотної складової.

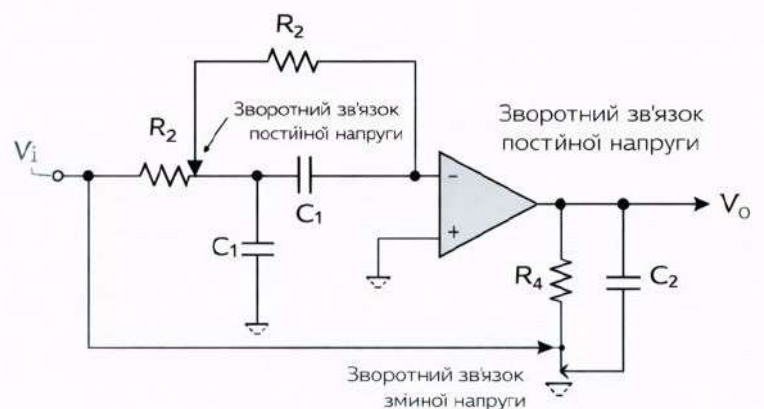


Рисунок 3.4 – Схема активного фільтра другого порядку з подвійним зворотним зв'язком

При аналізі схеми вважаємо операційний підсилювач ідеальним, тобто вхідний струм $I_{in} = 0$, а різниця потенціалів між входами прямує до нуля. Розрахунок характеристик передачі базується на законах Кірхгофа для вузлів схеми:

$$\frac{U_{in}(s) - U_A(s)}{R_1} + \frac{U_{out}(s) - U_A(s)}{1/sC_1} + \frac{0 - U_A(s)}{R_2} = 0$$

$$\frac{U_A(s) - 0}{R_2} + \frac{U_{out}(s) - 0}{1/sC_2} = 0$$

Передавальна функція $W(s)$ для даної топології описується виразом:

$$W(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{-K}{s^2T^2 + sT(3 - K) + 1}$$

Для забезпечення однакової амплітуди вихідного сигналу при номінальній частоті $f = 50$ Гц, параметри компонентів розраховуються з умови рівності постійних часу. Приймаючи базову сталу $\tau = 10$ мс та ємність $C_2 = 220$ нФ, отримуємо наступні номінали:

$$R_1 = R_2 = \frac{\tau}{C_2} = \frac{0.01}{220 \cdot 10^{-9}} \approx 45.4 \text{ кОм}$$

Для точного узгодження фаз у схему вводиться підстроювальний потенціометр. Пороговий блок (компаратор) налаштовується на певне значення упередження $\beta = 1.5^\circ$. Необхідний опорний потенціал E_{ref} для компаратора визначається за формулою:

$$E_{ref} = U_{max} \cdot \sin(\beta) = 15 \cdot \sin(1.5^\circ) \approx 0.39 \text{ В}$$

Цей рівень напруги формується резистивним дільником (R_{21}, R_{22}). Оскільки сигнали порогового пристрою мають бути гальванічно розв'язані від силової мережі, застосовано оптрони TLP621. Вхідний струм світлодіода оптрона обмежується резистором R_{27} :

$$R_{27} = \frac{U_{puls} - U_{fd}}{I_f} = \frac{12 - 1,2}{0,006} \approx 1,8 \text{ кОм}$$

Сигнали з опторозв'язки використовуються для ініціалізації вузла формування пилкоподібної напруги (RVG — Ramp Voltage Generator). RVG базується на інтеграторі, скидання якого здійснюється коротким імпульсом тривалістю t_{imp} :

$$t_{imp} = R_{reset} \cdot C_{int} \cdot \ln(2) \approx 10 \text{ мкс}$$

Струм у збуджувачі регулюється за принципом підпорядкованого регулювання. Основним елементом є PI-регулятор, який дозволяє усунути статичну похибку регулювання (астатизм першого порядку). Передавальна функція такого регулятора $W_{reg}(p)$ має вигляд:

$$W_{reg}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{int} \cdot p} \right)$$

де:

K_p — коефіцієнт підсилення;

T_{int} — стала часу інтегрування, що обирається рівною електромагнітній сталій обмотки збудження τ_{em} :

$$\tau_{em} = \frac{L_w}{R_w} = \frac{0.35}{4.2} \approx 0.083 \text{ с}$$

Всі основних елементів силової та керуючої частини показані в табл. 3.4

Таблиця 3.4 — Специфікація основних елементів силової та керуючої частини

№	Тип обладнання / Модуль	Позначення	Примітка
1	Оптотиристорний модуль МТОТО4-40-8	A2	Силовий вентиль
2	Датчик струму (шунт) 75ШПСВ 50А	RS1	Зворотний зв'язок
3	Операційний підсилювач LM2904	DA1	Активний фільтр / RVG
4	Оптичний ізолятор TLP621	U1, U2	Гальванічна розв'язка

Застосування модульної архітектури та PI-закону регулювання забезпечує стабільність амплітуди коливань вібродвигуна навіть при значних флуктуаціях напруги живлення. Обрані параметри пасивних компонентів гарантують оптимальний запас стійкості системи в замкнутому контурі автоматичного керування.

3.4 Розрахунок згладжувальних елементів та захисних ланцюгів

Експлуатація тиристорного збуджувача для живлення обмотки збудження двигуна 383Рм супроводжується виникненням значних пульсацій випрямленого струму та перенапруг комутаційного характеру. Для забезпечення стабільної роботи електромагнітної системи вібродвигуна та захисту силових напівпровідникових приладів необхідно виконати розрахунок параметрів згладжувального L-фільтра та RC-ланцюгів демпфування.

Основним завданням згладжувального елемента є обмеження коефіцієнта пульсацій випрямленого струму k_p до значень, що не перевищують допустимі для даного класу машин (зазвичай $k_p \leq 0,05 \dots 0,1$). Необхідна індуктивність згладжувального дроселя L_d визначається виходячи з амплітуди найнижчої гармоніки випрямленої напруги. Для однофазної мостової схеми частота основної гармоніки становить $f_p = 100$ Гц. Розрахунок проводиться за формулою:

$$L_d \geq \frac{U_d \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot I_{d.min} \cdot (m^2 - 1) \cdot k_p} - L_a$$

де:

U_d — номінальна випрямлена напруга, В;

m — пульсність схеми (для мостової схеми $m=2$);

L_a — власна індуктивність обмотки збудження двигуна.

Враховуючи високу індуктивність обмотки двигуна 383Рм, у більшості режимів роль фільтра виконує сама обмотка, проте для демпфування високочастотних завад доцільно використовувати додатковий малогабаритний дросель.

Захист тиристорів від високих швидкостей наростання прямої напруги dU/dt та зворотних перенапруг, що виникають при розсмоктуванні носіїв заряду в моменти комутації, здійснюється за допомогою RC-ланцюгів (так званих *снуберів*), що підключаються паралельно кожному вентилю. Енергія, накопичена в індуктивностях розсіювання трансформатора L_σ , при закритті тиристора поглинається конденсатором C_S .

Ємність демпфуючого конденсатора C_S розраховується на основі енергетичного балансу комутаційного процесу:

$$C_S = \frac{L_\sigma \cdot I_{rec}^2}{(U_{max} - U_m)^2}$$

де:

I_{rec} — струм зворотного відновлення тиристора;

U_{max} — максимально допустима напруга на вентилі;

U_m — амплітуда напруги живлення.

Опір резистора R_S обирається з умови забезпечення аперіодичного характеру перехідного процесу в контурі комутації:

$$R_s = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{L_\sigma}{C_s}}$$

де ξ — коефіцієнт демпфування (зазвичай $\xi \approx 0,7 \dots 1$).

Для обраного силового модуля МТОТО4-40-8 розраховані номінали захисних елементів наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Параметри елементів захисту та фільтрації

Найменування елемента	Позначення	Розрахункове значення	Обраний номінал / Тип
Конденсатор снубера	Cs	0,38 мкФ	0,47 мкФ, 630 В (МБГЧ)
Резистор снубера	Rs	42 Ом	47 Ом, 10 Вт (ПЕВ)
Індуктивність фільтра	Ld	12 мГн	Дросель серії Д31

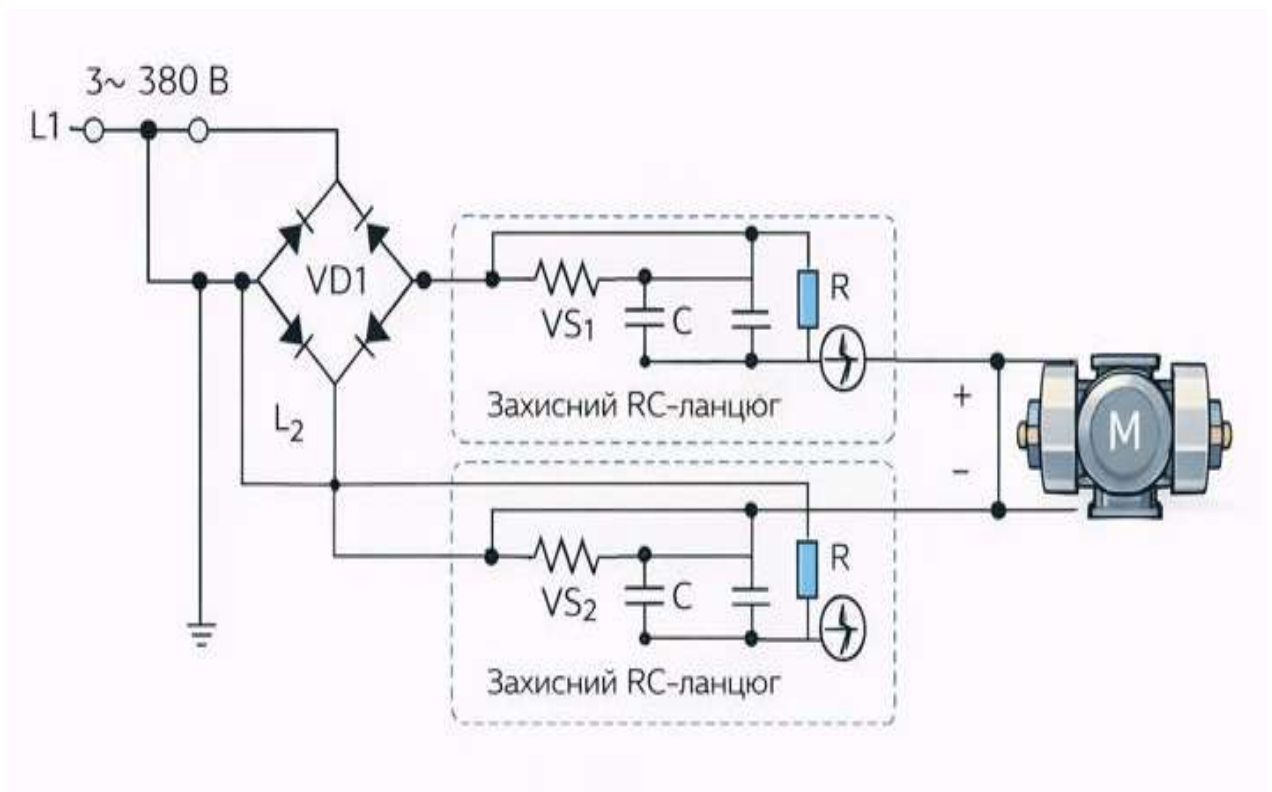


Рисунок 3.14 — Схема розміщення захисних RC-ланцюгів у силовій частині збуджувача

Додатково, для захисту від імпульсних перенапруг зі сторони мережі живлення 220 В передбачено встановлення варисторів паралельно входу випрямного моста. Це дозволяє обмежити енергію сплесків напруги, спричинених комутацією потужних індуктивних навантажень у спільній мережі підприємства, що є критичним для збереження структури напівпровідникових переходів тиристорів.

Таким чином, розрахований комплекс захисних та згладжувальних засобів забезпечує електромагнітну сумісність перетворювача з мережею та гарантує стабільність вихідних параметрів збуджувача у всьому діапазоні регулювання кута α .

4 КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА ОПИС СИЛОВОГО БЛОКУ

Надійність, довговічність та безпечність роботи тиристорного збуджувача значною мірою визначаються його конструктивним виконанням і правильністю реалізації силового блоку. Для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт силовий блок працює в умовах підвищених динамічних навантажень, імпульсних струмів та теплових впливів, що висуває підвищені вимоги до механічної міцності, тепловідведення та електричної ізоляції елементів.

У даному розділі розглядаються конструктивні рішення тиристорного збуджувача, які забезпечують стабільну роботу силових напівпровідникових приладів у тривалому та перехідних режимах, а також відповідність вимогам електробезпеки та промислової експлуатації. Особлива увага приділяється вибору конструкції силового блоку, способам монтажу тиристорів, організації ефективної системи охолодження та мінімізації теплових і електромагнітних впливів.

У підрозділі **4.1** наведено опис конструкції силового блоку тиристорного збуджувача, розглянуто склад і взаємне розташування силових елементів, струмопровідних шин та допоміжних вузлів.

У підрозділі **4.2** проаналізовано систему охолодження та заходи щодо забезпечення допустимого теплового режиму силових тиристорів і допоміжних компонентів.

У підрозділі **4.3** розглянуто заходи електробезпеки та підвищення надійності роботи, зокрема питання ізоляції, заземлення, захисту від аварійних режимів і відмов елементів.

У підрозділі **4.4** наведено принципи компонування елементів у шафі керування з урахуванням вимог зручності обслуговування, вентиляції, зниження електромагнітних завад та відповідності нормативним вимогам.

Результати цього розділу є основою для обґрунтування вибраних конструктивних рішень та підтверджують можливість практичної реалізації тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна заданої потужності.

4.1 Конструкція силового блоку тиристорного збуджувача

Конструкція силового блоку тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна типу 383Рм номінальною потужністю 8 кВт розроблена з урахуванням характерних умов його експлуатації у промисловому середовищі. До таких умов належать підвищений рівень механічних вібрацій, можливі значні коливання температури навколишнього середовища, а також наявність виробничого пилу й аерозолів. У сукупності ці фактори суттєво впливають на вимоги до механічної міцності, електричної надійності та довговічності силового обладнання.

Основним конструктивним принципом, покладеним в основу проєктування силового блоку, є блочно-модульна архітектура. Такий підхід дозволяє підвищити ремонтпридатність збуджувача, забезпечити швидку заміну окремих силових вузлів без демонтажу всієї установки, а також спростити регламентні та профілактичні роботи. Кожен функціональний елемент (тиристорний модуль, захисні ланцюги, система охолодження) виконаний у вигляді окремого конструктивно завершеного блока.

Силова частина збуджувача змонтована на діелектричній основі з текстоліту марки СТЕФ-1, який характеризується достатньою механічною жорсткістю, стійкістю до вібрацій та високими електроізоляційними властивостями. Використання діелектричної основи знижує ризик міжфазних пробіїв та забезпечує необхідні повзучі відстані відповідно до вимог чинних нормативних документів. Кріплення силових елементів виконане з урахуванням демпфування вібрацій, що додатково зменшує механічне навантаження на контактні з'єднання.

Основним силовим вузлом збуджувача є тиристорний випрямний міст, реалізований на базі напівпровідникових модулів змішаного типу. Така реалізація дозволяє оптимально поєднати компактність конструкції та ефективне відведення тепла. Корпусні елементи шафи керування обрані відповідно до ступеня захисту IP54 згідно з ДСТУ EN 60529:2018, що гарантує захист внутрішніх компонентів від пилу та бризок води, які можуть виникати у виробничих умовах.

При виборі силових тиристорів враховано електричні та теплові режими роботи вібраційного електродвигуна. Для двигуна типу 383Рм з номінальною потужністю $P_n=8$ кВт та з урахуванням пускових і динамічних перевантажень середній робочий струм тиристорів $I_{T(AV)}$ повинен мати запас по струму не менше ніж у 1,5–2,0 рази. Розрахунковий максимальний струм збудження становить приблизно 25–30 А, що обґрунтовує доцільність застосування тиристорних модулів типу МТОТО4-40-8, які забезпечують необхідний рівень надійності та теплової стійкості.

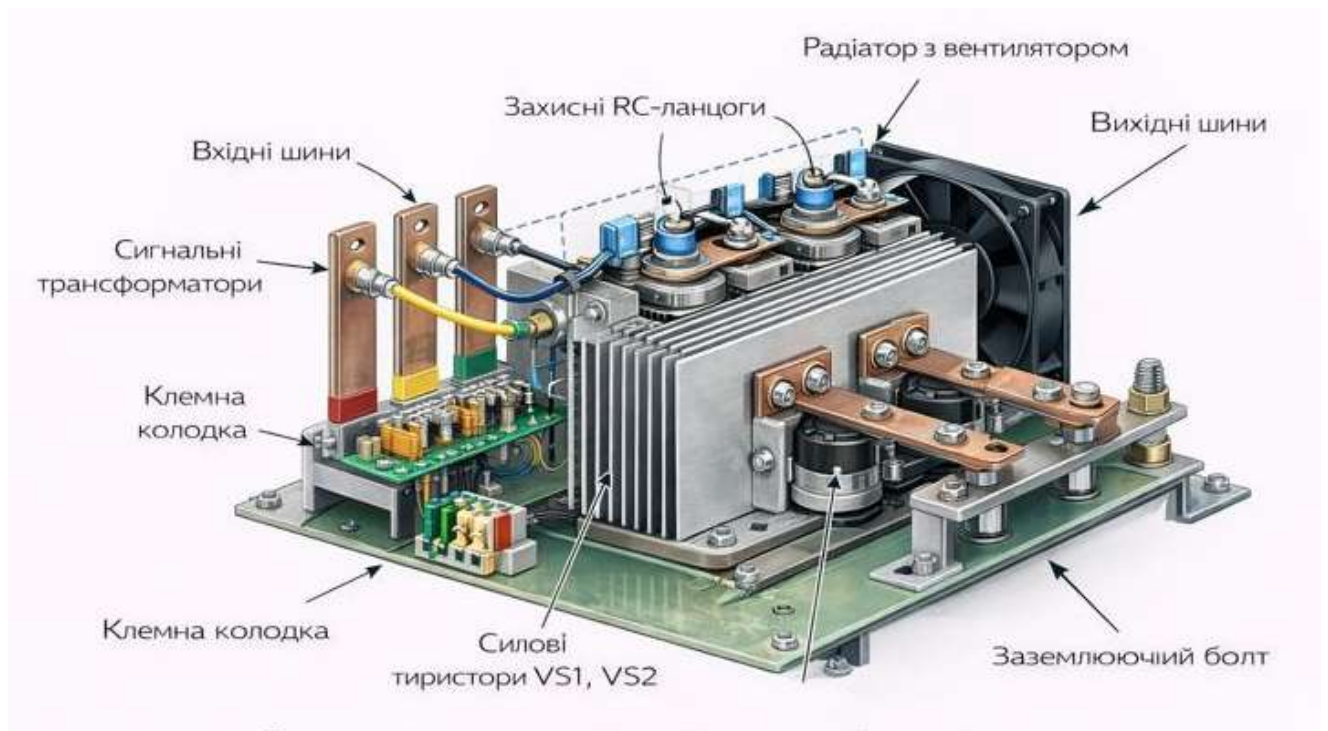


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд конструкції силового блоку збуджувача

Електричні з'єднання всередині силового блоку виконані за допомогою мідних шин перерізом 15×3 мм. Такий вибір перерізу забезпечує допустиму густину струму та мінімальні втрати потужності на нагрів. Крім того, застосування жорстких шин дозволяє зменшити паразитну індуктивність розсіювання L_σ , що є критично важливим для тиристорних перетворювачів з фазовим керуванням. Зменшення L_σ сприяє зниженню амплітуди комутаційних перенапруг і підвищенню електромагнітної сумісності збуджувача.

Для захисту напівпровідникових приладів від швидких перенапруг du/dt у конструкції силового блоку передбачено використання демпфуючих RC-ланцюгів (снуберів). Вони монтуються безпосередньо на виводи тиристорних модулів, що дозволяє мінімізувати індуктивність з'єднувальних провідників і підвищити ефективність придушення комутаційних викидів напруги. Типова схема такого захисту наведена на рис. 4.1, а номінали елементів RC-ланцюгів визначаються за умовами граничних швидкостей наростання напруги та струму.

Таким чином, запропонована конструкція силового блоку тиристорного збуджувача поєднує вимоги електричної надійності, механічної міцності та технологічності, що є необхідним для стабільної роботи вібраційного електродвигуна типу 383Рм у важких промислових умовах.

4.2 Система охолодження та забезпечення теплового режиму

Тепловий розрахунок є визначальним етапом проектування, оскільки перевищення температури р - п-переходу вище за $T_{j,max}=125^{\circ}\text{C}$ призводить до незворотної деградації структури напівпровідника та втрати керованості.

4.2.1 Розрахунок втрат потужності та вибір радіатора

Сумарна потужність втрат у статичному режимі ΔP_{stat} для одного тиристора визначається за апроксимованою характеристикою прямого падіння напруги:

$$\Delta P_{stat} = F \cdot (V_{T0} \cdot I_{T(AV)} + r_T \cdot I_{T(RMS)}^2)$$

де:

V_{T0} – порогова напруга (для обраного модуля $V_{T0} \approx 0.9 \text{ В}$);

r_T – динамічний опір ($r_T \approx 0.015 \text{ Ом}$);

F – коефіцієнт форми струму.

Враховуючи трифазну мостову схему, загальні втрати блоку складуть:

$$\Delta P_{total} = 6 \cdot \Delta P_{stat}$$

За розрахунками, при повному навантаженні $\Delta P_{total} \approx 180\text{--}220$ Вт. Для відведення такої кількості тепла при природній конвекції необхідний радіатор з тепловим опором $R_{th(s-a)}$:

$$R_{th(s-a)} \leq \frac{T_{j,max} - T_a}{\Delta P_{total}} - (R_{th(j-c)} + R_{th(c-s)})$$

де:

$R_{th(j-c)}$ – внутрішній тепловий опір "перехід-корпус";

$R_{th(c-s)}$ – опір контакту "корпус-радіатор".

Отримане значення $R_{th(s-a)} \approx 0.45$ К/Вт диктує використання алюмінієвого профілю площею не менше 1200 см².

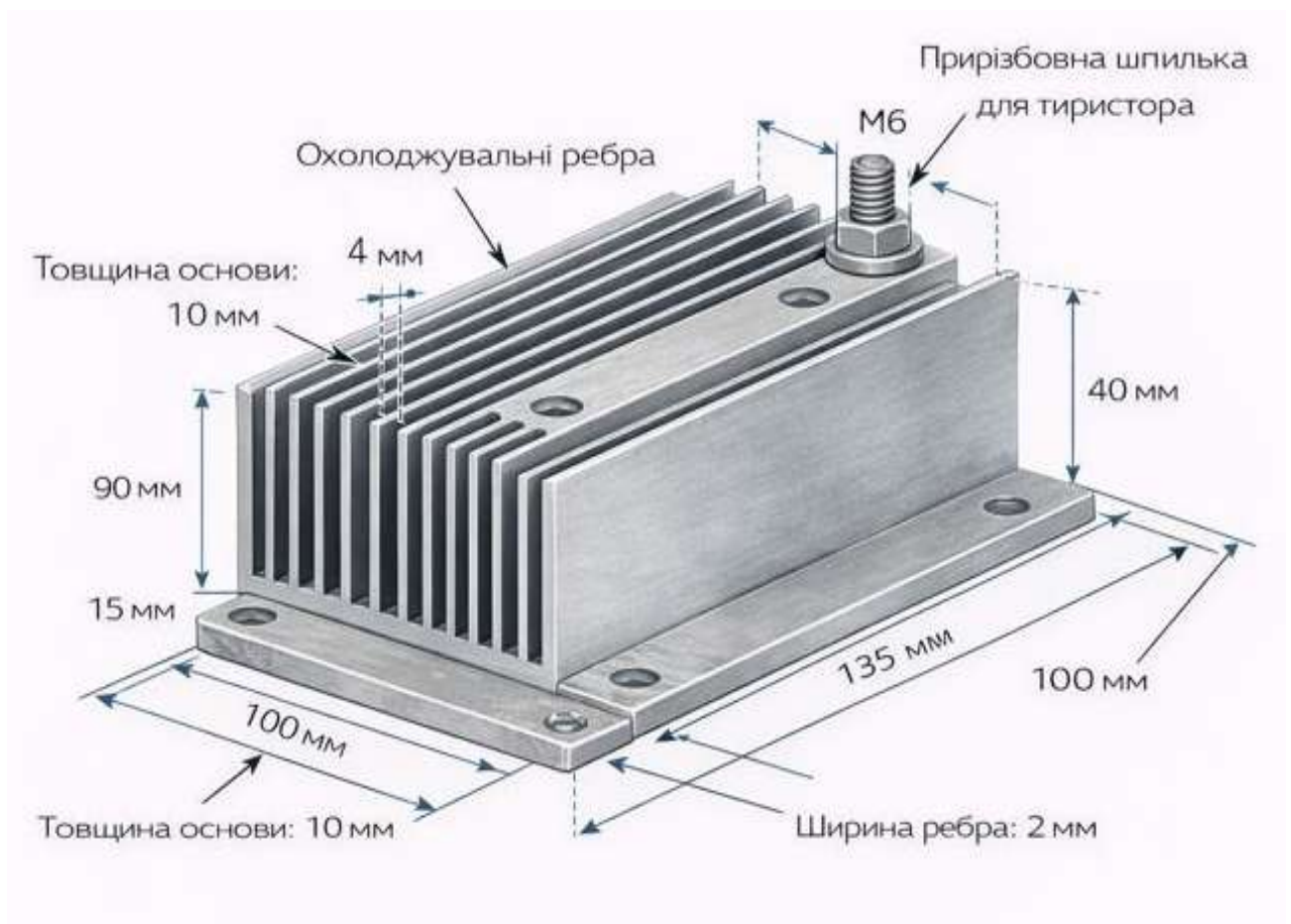


Рисунок 4.2 – Геометрія охолоджувача силового модуля

4.2.2 Динаміка теплових процесів

Вібродвигун 383Рм працює в режимі S3 (повторно-короткочасний). Це дозволяє використовувати теплову інерцію радіатора. Постійна часу нагріву радіатора τ_{th} визначається як добуток теплоємності на тепловий опір. Це враховується при виборі уставки теплового захисту, що реалізується на базі цифрового датчика *DS18B20*, розташованого у геометричному центрі підшви радіатора.

4.3 Заходи електробезпеки та надійності роботи

Електробезпека при експлуатації тиристорного збуджувача забезпечується комплексом технічних та організаційних заходів згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75.

4.3.1 Схема захисту та фільтрації

Для захисту від комутаційних перенапруг, що виникають в мережі живлення, на вході силового блоку встановлено блок варисторів *VNR*. Захист від критичних швидкостей наростання струму di/dt та напруги du/dt реалізовано за допомогою насичуваних дроселів та снуберних ланцюгів.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики системи захисту

Вид захисту	Елемент реалізації	Параметр спрацювання
Струмове відсікання	Запобіжники <i>SQB</i>	$I_a=63$ А
Захист від перенапруг	Варистори <i>S₂₀K₄₂₀</i>	$U_{clamp}=680$ В
Тепловий захист	Термостат <i>KSD301</i>	$T_{off}=85^{\circ}\text{C}$
Контроль фаз	Реле контролю напруги	$\Delta U > 15\%$

4.3.2 Конструкція заземлення та EMC

Для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та захисту персоналу:

1. Всі металеві дверцята шафи мають гнучкі мідні перемички для зв'язку з

контуром заземлення.

2. Силові кабелі та кабелі керування рознесені в просторі на відстань не менше 150 мм або розділені сталевую перегородкою.

3. Корпус збуджувача обладнаний болтом заземлення з відповідним маркуванням за ДСТУ.

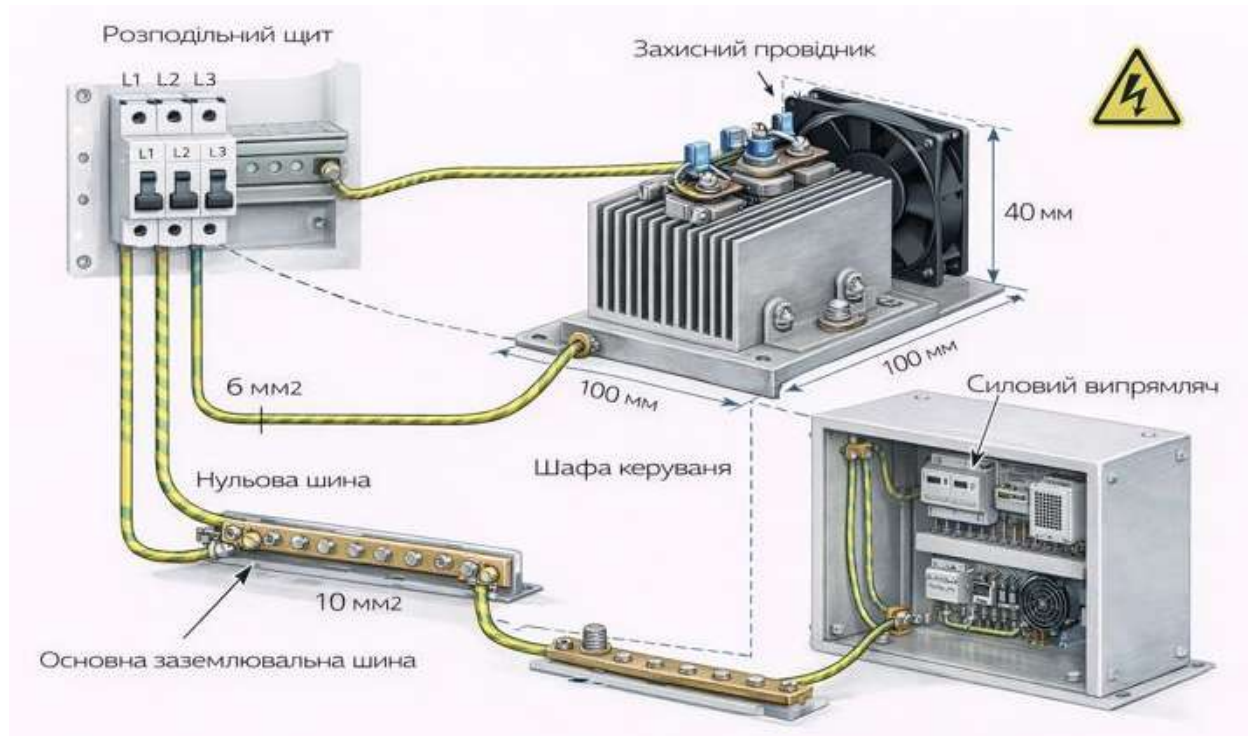


Рисунок 4.3 – Схема електрична підключення захисних провідників

4.4 Компонування елементів у шафі керування

Компонування елементів тиристорного збуджувача у шафі керування виконано з урахуванням вимог електробезпеки, ергономіки обслуговування, теплових режимів роботи та електромагнітної сумісності. Прийнята структура розміщення обладнання безпосередньо впливає на надійність функціонування збуджувача, зручність експлуатації та довговічність його основних вузлів.

Загальне компонування пристрою реалізоване за **вертикальним принципом**, що є типовим та обґрунтованим рішенням для шаф керування силовими перетворювачами середньої потужності. Вертикальне зонування

дозволяє логічно розділити силові, керувальні та допоміжні елементи, а також забезпечити ефективну природну вентиляцію.

У **нижній частині шафи** розміщені ввідні комутаційні та захисні апарати, зокрема:

- автоматичний вимикач вводу;
- запобіжники силових кіл;
- контактор або рубильник аварійного відключення;
- силовий трансформатор (у разі його наявності за схемним рішенням).

Таке розміщення обумовлене як вимогами електробезпеки, так і необхідністю зниження механічного навантаження на конструкцію шафи, оскільки найбільш масивні елементи розташовуються внизу. Крім того, це спрощує підведення живильних кабелів знизу шафи, що відповідає промисловим стандартам монтажу.

У **середній частині шафи**, яка є найбільш доступною для технічного обслуговування, встановлений силовий блок тиристорів, змонтований на алюмінієвому радіаторі. Саме ця зона вважається робочою, оскільки тут зосереджені основні елементи, що підлягають регламентному контролю та можливій заміні. Розташування тиристорного блока на середньому рівні дозволяє:

- мінімізувати довжину силових з'єднань;
- зменшити паразитні індуктивності та наведення;
- забезпечити оптимальний тепловідвід.

Верхня частина шафи відведена для елементів керування, сигналізації та контролю, зокрема:

- плати керування тиристорами;
- мікроконтролерний або аналоговий регулятор;
- індикатори режимів роботи;
- клеми допоміжних кіл та інтерфейсні роз'єми.

Таке розташування знижує вплив теплових та електромагнітних завад від силової частини на чутливу електроніку керування, що є особливо важливим для стабільної роботи системи автоматичного регулювання струму збудження.

Схематично вертикальне компонування елементів у шафі керування можна подати у вигляді структурної схеми на рис. 4.4

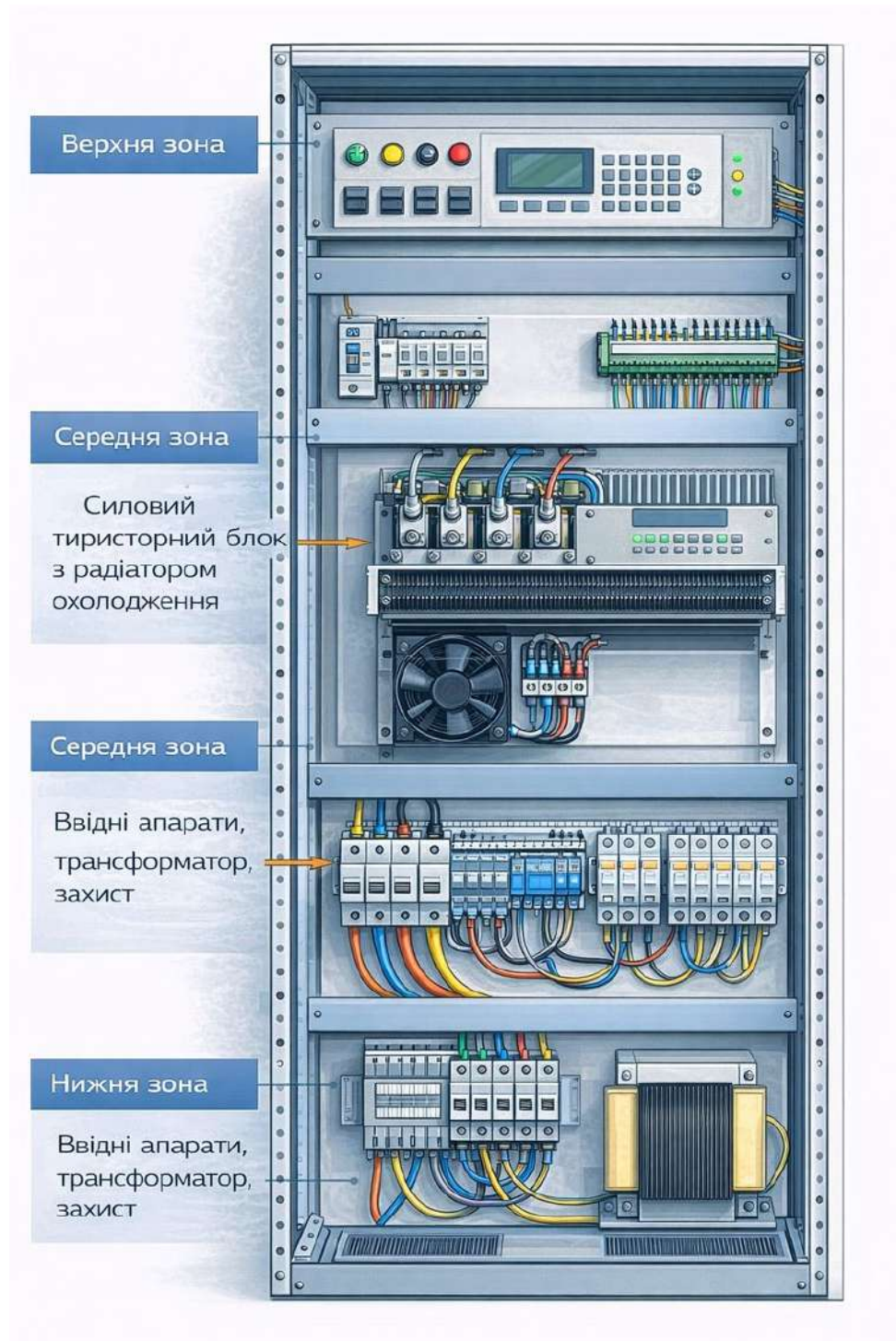


Рисунок 4.4 - Структурна схема вертикального компонування елементів у шафі керування.

Запропоноване компонування сприяє **природній циркуляції повітря** усередині шафи. Холодне повітря надходить через вентиляційні отвори в нижній частині, підіймається вгору, нагріваючись на радіаторі силового блоку, та виходить через верхні жалюзі або вентиляційні решітки.

Для наочності розміщення основних груп елементів у шафі керування доцільно навести узагальнену таблицю.

Таблиця 4.2 – Розміщення елементів у шафі керування

Зона шафи	Основні елементи	Функціональне призначення
Нижня	Автоматичні вимикачі, трансформатор	Ввід живлення, захист
Середня	Тиристорний блок, радіатор	Формування струму збудження
Верхня	Контролер, індикація	Керування та контроль

Для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт таке компонування є раціональним і технічно обґрунтованим, оскільки забезпечує стабільний тепловий режим, зручність експлуатації та відповідність вимогам промислової автоматизації. Прийняте рішення підвищує загальну надійність тиристорного збуджувача та дозволяє застосовувати його у режимі тривалої безперервної роботи на підприємствах з підвищеними вібраційними навантаженнями.

5. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА СКЛАДАННЯ ТИРИСТОРНОГО ЗБУДЖУВАЧА

Проектування тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт не обмежується лише електричними та тепловими розрахунками, а потребує ґрунтовного опрацювання технологічних аспектів його виготовлення, складання та контролю якості. Саме на етапі реалізації проектних рішень у матеріальній формі визначається реальна надійність, довговічність і експлуатаційна придатність розробленого пристрою.

Особливістю тиристорного збуджувача, призначеного для роботи у складі вібраційного електродвигуна, є підвищені механічні навантаження, наявність значних струмів, теплових втрат і впливу електромагнітних завад. У зв'язку з цим технологія складання силового блоку та системи керування повинна забезпечувати високу механічну міцність конструкції, стабільні електричні з'єднання, ефективний тепловідвід і відповідність вимогам електробезпеки та стандартів промислової експлуатації.

У даному розділі розглядаються ключові технологічні етапи виготовлення тиристорного збуджувача, починаючи від складання силового блоку і закінчуючи організацією монтажних робіт. Особлива увага приділяється послідовності виконання операцій, вибору технологічних методів монтажу силових напівпровідникових елементів, шинних з'єднань та елементів системи керування. Окремо аналізуються питання контролю якості, які включають електричні, теплові та функціональні випробування збуджувача перед введенням його в експлуатацію.

Також у розділі розглядаються питання нормування трудових витрат та організації монтажних робіт, що є важливим з погляду промислового впровадження розробленого пристрою. Раціональна організація технологічного процесу дозволяє знизити собівартість виготовлення, скоротити час складання та підвищити повторюваність параметрів виробу.

Таким чином, даний розділ спрямований на комплексне обґрунтування технологічних рішень, які забезпечують практичну реалізацію тиристорного

збуджувача для вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт з дотриманням вимог надійності, якості та безпеки.

5.1 Технологічний процес складання силового блоку

Виготовлення силового блоку тиристорного збуджувача для вібродвигуна типу 383Рм є критичним етапом, що визначає експлуатаційну надійність всієї системи. Процес складання базується на принципах агрегатно-вузлового монтажу, що забезпечує високу якість з'єднань та зручність контролю на кожному етапі.

Послідовність операцій інженерного процесу регламентується технологічною картою та конструкторською документацією. Основні стадії монтажу наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Алгоритм технологічного процесу складання силового модуля

№ п/п	Назва технологічної операції	Зміст робіт
1	Підготовча стадія	Комплектування деталей, вузлів та металовиробів згідно зі специфікацією.
2	Вхідний контроль	Верифікація технічних параметрів та цілісності отриманих компонентів.
3	Монтаж охолоджувальної системи	Складання вузла охолоджувача (поз. 1) та підготовка поверхонь.
4	Вузлове складання резистивного блоку	Збирання компонентів дільників напруги та демпфуючих ланцюгів (поз. 3).
5	Підготовка корпусних елементів	Інсталяція монтажних стійок (поз. 7) та шарнірних механізмів (поз. 36) на панель.
6	Встановлення регулювальних вузлів	Монтаж блоків керування на основну конструкцію.

№ п/п	Назва технологічної операції	Зміст робіт
7	Складання електронних плат	Встановлення друкованої плати (поз. 9) на діелектричні стійки (поз. 8).
8	Формування комутаційного вузла	Монтаж клемних колодок, конденсаторів та вимірювальних шунтів.
9	Інсталяція напівпровідникових модулів	Монтаж тиристорних та діодних модулів на охолоджувач з термопастою.
10	Загальне складання (агрегатування)	Механічне об'єднання охолоджувача з основною рамою блоку.
11	Фінальна фіксація	Закріплення захисних панелей та перевірка механічної міцності з'єднань.

5.1.1 Комплектування та підготовка виробництва

Перед початком складальних робіт здійснюється відбір компонентів відповідно до відомості специфікації. Важливо забезпечити ідентичність серійних номерів силових напівпровідникових модулів для ідентичності їхніх вольт-амперних характеристик. Перелік основних складальних одиниць наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Специфікація компонентів для формування силового блоку

Поз.	Найменування (галузевий термін)	Синонімічна назва	Кіль-сть
1	Система охолодження	Охолоджувач (радіатор)	1
2	Блок баластних резисторів	Резистивна збірка	1
3	Модуль гальванічної розв'язки	Блок ізоляції та індикації	1
4	Вузол автоматичного регулювання	Плата керування	1

Поз.	Найменування (галузевий термін)	Синонімічна назва	Кіль-сть
7, 8	Монтажні стійки	Дистанційні тримачі плати	12
9	Друкована плата (РСВ)	Електронна субплата	1
11	Фасадна панель	Обкладинка (кришка) корпусу	1
32	Клемна шина	Блок гвинтових затискачів	14
33	Фільтруючий конденсатор	Ємнісний елемент фільтра	2
34	Оптотиристорний модуль	Силовий ключ з фоторозв'язкою	1
35	Діодний модуль	Випрямний напівпровідник	1
37	Вимірювальний шунт	Перетворювач струму в напругу	1

5.1.2 Методика вхідного контролю та верифікації компонентів

Вхідний контроль є превентивним заходом, що дозволяє виключити використання дефектних елементів, які не відповідають вимогам ГСТУ. Для силових напівпровідників критично важливою є перевірка напруги перегину та струмів витоку.

Випробування тиристорів та діодів проводяться на автоматизованому комплексі **АПК-201**. Вимірюється зворотний струм I_{RRM} та імпульсна напруга у закритому стані V_{DRM} . Резистивні елементи проходять верифікацію на посту **АПК-1Р**, де контролюється відхилення опору від номіналу:

$$\Delta R = \frac{|R_{fact} - R_{nom}|}{R_{nom}} \cdot 100\% \leq \delta$$

де δ — клас точності резистора (зазвичай $\pm 5\%$).

5.1.3 Монтаж силової частини та тепловий менеджмент

Якість теплового контакту між силовим модулем та охолоджувачем безпосередньо впливає на надійність пристрою. Поверхня радіатора (поз. 1) повинна бути оброблена до шорсткості не нижче Ra 2.5.

Процес інсталяції модулів (поз. 34, 35) виконується за наступним алгоритмом:

- 1. Знежирення:** Очищення контактних поверхонь ізопропіловим спиртом.
- 2. Термоінтерфейс:** Нанесення тонкого рівномірного шару термопасту марки **НС-125** (теплопровідність $\lambda \geq 0.8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Товщина шару d_{paste} повинна бути мінімальною для зменшення термічного опору:

$$R_{\theta(c-s)} = \frac{d_{\text{paste}}}{\lambda \cdot S}$$

де S — площа основи модуля.

Надлишки мастила, що видавилися після затягування гвинтів, видаляються безворсовою серветкою.

- 3. Механічна фіксація:** Затягування гвинтів здійснюється динамометричною викруткою з моментом $M = 3.5 \dots 5.0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ для забезпечення рівномірного тиску.

Складання внутрішніх вузлів (поз. 10) передбачає горизонтальне розміщення тримача резистора. Резистор (поз. 10) фіксується різьбовим штифтом (поз. 7), який проходить крізь внутрішню порожнину керамічного корпусу. Конструкція фіксується гайками з обох боків з обов'язковим використанням пружинних шайб (шайб Гровера) для запобігання самовідгвинчуванню в умовах вібрації від двигуна 383Рм.

Фінальні етапи (кроки №10–11) виконуються відповідно до складального креслення. Особлива увага приділяється прокладанню дротів керування: вони не повинні торкатися гострих крайок радіатора та мають бути дистанційовані від силових шин для мінімізації електромагнітних наводок.

5.2 Методи контролю якості та програма випробувань збуджувача

Завершальним етапом виготовлення тиристорного збуджувача для вібродвигуна 383Рм є проведення комплексу контрольно-перевірочних операцій та приймально-здавальних випробувань. Метою цих заходів є підтвердження відповідності параметрів пристрою вимогам технічного завдання, державним стандартам безпеки (ДСТУ EN 61800-5-1) та галузевим нормам електромагнітної сумісності.

5.2.1 Поопераційний контроль та перевірка монтажу

Перед подачею напруги живлення здійснюється візуальний та інструментальний контроль якості монтажу. Основна увага приділяється наступним аспектам:

1. **Перевірка цілісності ізоляції:** Вимірювання опору ізоляції між силовими колами та корпусом пристрою. Згідно з нормами, опір R_{iz} повинен бути не менше 5 МОм при випробувальній напрузі 1000 В постійного струму.

2. **Контроль контактних з'єднань:** Верифікація моментів затягування гвинтових з'єднань силових шин та тиристорних модулів за допомогою динамометричного ключа.

3. **Перевірка гальванічної розв'язки:** Тестування опору між колами керування та силовими ланцюгами для гарантування безпеки оператора та

надійності контролерної частини.

5.2.2 Налагодження системи керування та СФКУ

Первинне подання живлення здійснюється лише на низьковольтну частину (плату керування) при відключеній силовій напрузі. На цьому етапі виконуються наступні операції:

· **Перевірка синхронізації:** За допомогою двоканального осцилографа контролюється збіг моментів формування пілкоподібної напруги з моментом переходу мережевої напруги через нуль. Похибка фазового зсуву $\Delta\phi$ не повинна перевищувати $1^\circ \dots 2^\circ$.

· **Калібрування діапазону регулювання:** Встановлення меж зміни кута керування тиристорами від $\alpha_{\min}$ (забезпечення мінімального вихідного струму) до $\alpha_{\max}$ (обмеження максимальної напруги на обмотці збудження).

5.2.3 Випробування під навантаженням та температурний моніторинг

Фінальна стадія передбачає роботу збуджувача на реальне навантаження — обмотку збудження вібродвигуна 383Рм. Програма випробувань включає:

1. Перевірка статичних характеристик: Зняття регулювальної характеристики $U_d = f(U_{up})$, де U_{up} — напруга керування.

2 Динамічні випробування: Аналіз перехідних процесів при ступінчастій зміні завдання струму. Час регулювання t_{reg} та величина перерегулювання σ оцінюються за осцилограмами струму:

$$\sigma = \frac{I_{max} - I_{ust}}{I_{ust}} \cdot 100\% \leq 5\%$$

де:

I_{max} — пікове значення струму;

I_{ust} — встановлене значення.

3. Теплові випробування: Робота пристрою на номінальному струмі протягом 2 годин з безперервним контролем температури радіатора силових модулів T_s . Температурний режим вважається стабільним, якщо зміна температури за останні 30 хв не перевищує 1°C .

Таблиця 5.3 – Протокол основних параметрів випробувань

Параметр випробування	Одиниця виміру	Очікуване значення	Допуск
Опір ізоляції R_{iz}	МОм	50	> 5
Діапазон зміни кута α	град	15 ... 165	± 2
Струм спрацювання захисту I_{prot}	А	45	$\pm 5\%$
Температура радіатора T_s	$^\circ\text{C}$	65	< 85

5.2.4 Перевірка захисних функцій

Надійність роботи віброприводу залежить від коректності відпрацювання аварійних режимів. Під час випробувань імітуються наступні ситуації:

- **Обрив фази живлення:** Система повинна миттєво зняти імпульси керування тиристорами.
- **Перевищення струму (Overcurrent):** Перевірка спрацювання електронного захисту при перевищенні заданої уставки.
- **Втрата зворотного зв'язку:** Контроль поведінки регулятора при обриві ланцюга датчика струму (перехід у безпечний режим "стоп").

Результати випробувань фіксуються в акті технічного контролю, що є підставою для допуску виробу до експлуатації у складі вібраційної установки. Правильно виконане налагодження забезпечує не тільки паспортні показники двигуна 383Рм, а й продовжує термін служби силових тиристорів за рахунок відсутності ударних струмів та перенапруг.

5.3 Вимоги до монтажу, налагодження та введення тиристорного збуджувача в експлуатацію.

Процес введення в експлуатацію тиристорного збуджувача для вібраційного електродвигуна типу \$383Pm\$ є критичним етапом, що визначає надійність силової схеми та точність регулювання параметрів вібрації. Роботи виконуються згідно з вимогами ПУЕ, ПТБ та заводських інструкцій.

5.3.1 Вимоги до електричного монтажу

Монтаж збуджувача повинен забезпечувати мінімальні значення паразитних індуктивностей та високу завадостійкість системи керування. Основні правила монтажу:

1. Розділення кіл: Силові кабелі живлення тиристорів та вихідні кабелі до обмоток двигуна повинні бути просторово рознесені з контрольними кабелями системи керування (мінімальна відстань — 200 мм) для запобігання електромагнітним наводкам.

2. Заземлення: Корпус збуджувача, радіатори тиристорів (якщо вони не під потенціалом) та екрани контрольних кабелів мають бути приєднані до загального контуру заземлення. Опір заземлювального пристрою R_z має відповідати нормі:

$$R_z \leq 4 \text{ Ом}$$

3. Монтаж тиристорних модулів: Поверхні сполучення тиристора та радіатора повинні бути оброблені теплопровідною пастою. Затягування кріпильних болтів виконується динамометричним ключем з моментом M_z , що вказаний у паспорті модуля, для забезпечення оптимального теплового опору R_{thjc} .

5.3.2 Первинне налагодження та перевірка ізоляції

Перед подачею напруги проводиться візуальний контроль та інструментальна перевірка:

Перевірка опору ізоляції: Виконується мегомметром на напругу 1000 В. Опір ізоляції силових кіл відносно корпусу R_{iz} має бути не менше 0,5 МОм.

Фазування: Перевірка відповідності чергування фаз живильної мережі алгоритму роботи системи імпульсно-фазового керування (СІФК). Це необхідно для коректного формування кутів відкриття тиристорів α .

5.3.3 Послідовність налагодження системи керування

Налагодження проводиться в три етапи:

1. Перевірка живлення: Контроль напруг на виходах вторинних джерел живлення (+15 В, -15 В, +5 В).

2. Налагодження СІФК: За допомогою осцилографа перевіряється синхронізація опорної напруги з напругою мережі. Діапазон зміни кута регулювання має бути в межах:

$$\alpha_{min} \dots \alpha_{max} \approx 10^\circ \dots 170^\circ$$

3. Перевірка каналів формування імпульсів: Вимірювання параметрів керуючих імпульсів (амплітуда U_g , тривалість t_p , крутизна фронту) на керуючих електродах тиристорів.

5.3.4 Перевірка режимів роботи та введення в експлуатацію

Після перевірки системи керування проводяться випробування під навантаженням:

Режим холостого ходу: Перевірка діапазону вихідної напруги U_d при відключеному двигуні (або на еквівалентне активне навантаження).

Робочий режим з двигуном 383Рм: Контроль струму збудження I_d . Оскільки двигун є вібраційним, особлива увага приділяється стабільності струму при зміні механічного опору середовища.

Перевірка захистів: Імітація аварійних режимів (обрив фази, перевантаження по струму, перегрів радіаторів). Час спрацювання захисту t_{prot} має бути мінімальним для запобігання пошкодженню тиристорів:

$$t_{prot} < \frac{I^2 t_{perm}}{I_{sc}^2}$$

де:

$I^2 t_{\text{perm}}$ — захисний показник тиристора;

I_{sc} — струм короткого замикання.

За результатами налагодження складається акт введення в експлуатацію, що підтверджує відповідність параметрів збуджувача проектним даним та готовність до тривалої роботи в складі віброустановки.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської дипломної роботи було успішно вирішено науково-технічне завдання з проєктування та дослідження параметрів тиристорного збуджувача для живлення вібраційного електродвигуна типу 383Рм потужністю 8 кВт. На основі проведених розрахунків, конструкторських рішень та аналізу експлуатаційних характеристик отримано наступні результати:

1. Обґрунтування та вибір силового обладнання. Здійснено комплексний розрахунок параметрів силового кола, що дозволило обрати сучасну елементну базу з високим рівнем надійності:

В якості силових ключів обрано комбіновані напівпровідникові модулі: тиристорно-тиристорний МТОТО4-40-8 та діодний МДД-40-8. Зазначені модулі забезпечують необхідний запас по струму та напрузі (клас 8), що гарантує стійкість системи до пускових перевантажень та комутаційних сплесків.

Для придушення перенапруг та забезпечення м'якої комутації вентилів розраховано захисні RC-ланцюги, до складу яких увійшли конденсатори серії МБГЧ ємністю 1 нФ (номінальна напруга 500 В) та дротяні резистори типу С5-35В потужністю 10 Вт та опором 30 Ом.

Комутаційний та захисний апарати представлені автоматичними вимикачами серії ТІ (2р С 50 для силового кола та 2р С 6 для кіл керування), що забезпечує селективність захисту при виникненні аварійних режимів.

2. Синтез системи автоматичного керування. Виконано динамічний розрахунок контуру регулювання струму збудження. На основі методу послідовної корекції визначено параметри РІ-регулятора, який забезпечує аперіодичний характер перехідного процесу з мінімальним часом відгуку:

Розрахункова ємність конденсатора у зворотному зв'язку становить $C_f = 540$ нФ.

Опір резистора корекції визначено як $R_f = 1,1$ МОм. Такі параметри

дозволяють системі ефективно демпфувати коливання струму, спричинені специфічним вібраційним характером навантаження двигуна 383Рм.

3. Конструктивне виконання пристрою. Розроблена конструкція перетворювача відповідає сучасним вимогам ергономіки та промислової безпеки:

- Габаритні розміри блоку становлять 505 x 300 x 214 мм, що дозволяє раціонально розмістити його в шафах керування існуючих віброустановок.

- Ступінь захисту корпусу за класифікацією IP44 забезпечує надійну роботу обладнання в умовах цехів з помірним рівнем запиленості.

- Впроваджено модульний принцип компонування, що суттєво полегшує сервісне обслуговування та скорочує час на заміну окремих вузлів у разі несправності.

4. Безпека життєдіяльності та надійність. У розділі з охорони праці розраховано параметри захисного заземлення. Для забезпечення опору заземлювального пристрою згідно з вимогами ПУЕ ($R_z \leq 4 \text{ Ом}$), обґрунтовано використання контуру з $n = 15$ штучних вертикальних електродів, об'єднаних сталевую смугою. Це гарантує повну електробезпеку обслуговуючого персоналу при виникненні пробією на корпус.

5. Технологічні аспекти виготовлення та складання. Розроблено раціональну технологічну схему виробництва тиристорного збуджувача, що забезпечує високу якість та повторюваність виробу:

- Визначено оптимальну послідовність операцій механічного складання, монтажу силових модулів на охолоджувачі та пайки елементів системи керування.

- Обґрунтовано застосування сучасних засобів вхідного контролю комплектуючих та методів технічної діагностики готового виробу, зокрема перевірку ізоляції та випробування в режимах граничних навантажень.

Модульний підхід до збірки дозволяє застосувати методику паралельного монтажу окремих вузлів, що суттєво знижує трудомісткість виготовлення та підвищує загальну технологічність конструкції пристрою.

Підсумовуючи вищевикладене, можна стверджувати, що спроектований тиристорний збуджувач повністю реалізує вимоги проєктно-технічного завдання, має високу технологічну готовність до виробництва та забезпечує надійну експлуатацію вібродвигуна 383Рм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Правила улаштування електроустановок. Офіційне видання. Київ : Мінпаливенерго України, 2017. 760 с.
2. Системи електроприводів з регульованою швидкістю. Частина 5-1. Вимоги щодо безпеки. Електричні, термічні та енергетичні (EN 61800-5-1:2007, IDT) : ДСТУ EN 61800-5-1:2015. Київ : Держспоживстандарт України, 2016.
3. Ступені захисту, забезпечувані оболонками (Код IP) (EN 60529:1991; A1:2000; A2:2013, IDT) : ДСТУ EN 60529:2018. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
4. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98. Київ : Держнаглядохоронпраці, 2010.
5. Загірняк М. В., Невзлін М. І. Електричні машини : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Знання, 2011. 439 с.
6. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 312 с.
7. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Морозов В. Г. Перетворювальна техніка : підручник. Ч. 1. Київ : ІСДО, 2016. 448 с.
8. Методичні вказівки до виконання дипломних робіт для студентів галузі знань 14 «Електрична інженерія» / уклад. О. С. Синявський, С. С. Гнатюк. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. 56 с.
9. Кувалдін О. Б., Калініченко А. А. Системи керування електроприводами : навч. посібник. Харків : НТУ «ХП», 2014. 224 с.
10. Терещенко Т. О., Ямненко Ю. С., Безугла О. С. Напівпровідникові перетворювачі електроенергії : підручник. Київ : Кафедра, 2015. 352 с.
11. Пристрої напівпровідникові силові. Загальні технічні вимоги : ДСТУ 2814-94. Київ : Держстандарт України, 2010.
12. Електромагнітна сумісність. Частина 6-4. Загальні стандарти. Стандарт щодо випромінювання завад у промислових середовищах (EN 61000-6-4:2007; A1:2011, IDT) : ДСТУ EN 61000-6-4:2019. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.