

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет

(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему Випрямляч для живлення гальванічних ванн 24 В, 200 А
з мікроконтролерним управлінням

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи Ез-413сп

Спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

ГУРЕНКО Н.А.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВАСИЛЕВСЬКИЙ В.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ДОНОВСЬКА І.С.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Електротехнічний

Кафедра Електричні та електронні апарати

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Електричні та електронні апарати

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Андрієнко П.Д.



«24» квітня 2026 року

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

ГУРЕНКО Наталія Анатоліївна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Випрямляч для живлення гальванічних ванн 24 В, 200 А з мікроконтролерним управлінням

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «22» квітня 2026 року №189

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 03.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) _____

Номінальна вихідна напруга $U=24\text{В}$; номінальний вихідний струм $I=200\text{ А}$; номінальний вхідний струм $I_n = 14\text{ А}$; коефіцієнт пульсації струму – менше 1%; відхилення від встановлених вимог – не більше 2%; діапазон регулювання – от 1% до макс.; спосіб охолодження БСТ – водний; спосіб охолодження трансформатора – природний повітряний

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1.Огляд схем і конструкцій; 2.Розрахункова частина; 3.Дослідження мікроконтролерів для системи управління випрямлячем.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

НУЗП 435111.053 Схеми електричних принципів – 1 арк. А1; НУЗП 435111.053 СК Випрямляч. Складальне креслення – 1 арк. А1; НУЗП 685627.053 Жгут. Складальне креслення – 1 арк. А1; НУЗП 436231.053 Модуль джерел живлення. Складальне креслення 1 арк. А1

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович	24.04.2026	03.06.2026
			

7. Дата видачі завдання «24» квітня 2026 року.

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(ка)


(підпис)

Наталія ГУРЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

– **Володимир ВАСИЛЕВСЬКИЙ**
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 70 с., 22 рис., 6 табл., 1 дод., 8 джерел.

ВИПРЯМЛЯЧ, ТРАНСФОРМАТОР, ВЕНТИЛЬ, ГАЛЬВАНІКА, РЕАКТОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ШУНТ

Об'єкт проєктування – випрямляч для живлення гальванічних ванн, з номінальною вихідною напругою 24В, номінальним вихідним струмом 200А, номінальним вхідним струмом 14А.

Мета роботи – технічне обґрунтування, розрахунок електричних параметрів, вибір сучасної елементної бази та розробка конструкції випрямляча з мікроконтролерним управлінням, що забезпечує високу точність стабілізації та надійність у промислових умовах.

Методи дослідження: Порівняльно-аналітичний метод – використаний для огляду та критичного аналізу існуючих силових схем та конструкторських рішень світових лідерів. Математичне та електричне моделювання – застосоване для розрахунку параметрів силового трансформатора, вибору тиристорів та визначення характеристик зрівняльного реактора.

Метод системного аналізу – використаний при виборі оптимальної архітектури мікроконтролера на основі багатокритеріального порівняння технічних характеристик та вартості периферійних модулів.

Виконано аналіз існуючих схем та конструкцій випрямлячів для гальваніки. Проведено розрахунки та обґрунтовано вибір силового трансформатора, зрівняльного реактора, тиристорів і елементів захисту. За результатами дослідження характеристик сучасних однокристальних мікроконтролерів визначено оптимальний для застосування у системі управління випрямлячем.

ЗМІСТ

	С.
Вступ	6
1. Огляд схем і конструкцій.....	8
1.1 Тиристорні перетворювачі для гальваніки	8
1.2 Огляд силових схем випрямляча для гальваніки	11
1.3 Трифазний випрямляч з нульовим виводом.....	12
1.4 Трифазний мостовий випрямляч	13
1.5 Подвійна трифазна схема із зрівняльним реактором	16
1.6 Огляд конструкторських рішень.....	18
1.7 Постановка завдання.....	30
1.8 Проектно-технічне завдання	31
2 Розрахункова частина.....	33
2.1 Розрахунок електричних параметрів та вибір трансформатора	33
2.2 Розрахунок електричних параметрів та вибір вентилів	35
2.3 Розрахунок електричних параметрів зрівняльного реактора	38
2.4 Вибір автоматичного вимикача	41
2.5 Енергетичні показники випрямляча	47
3 Дослідження мікроконтролерів для системи управління випрямлячем...	55
3.1 Критерії порівняння мікроконтролерів різних фірм	55
3.2 Порівняння мікроконтролерів.....	59
Висновки.....	68
Перелік джерел посилання.....	69
Додаток А	70

ВСТУП

Невпинний прогрес у галузі силової електроніки зумовлює систематичне вдосконалення елементної бази електронних пристроїв, відкриваючи широкі можливості для розроблення принципово нових технічних рішень. Сучасні силові напівпровідникові компоненти дозволяють створювати керовані випрямлячі, які за своїми характеристиками суттєво перевершують раніше розроблені аналоги. До ключових переваг таких рішень належать:

- покращення основних технічних параметрів – підвищення точності стабілізації вихідної напруги та струму, зменшення коефіцієнта пульсацій;
- підвищення надійності та довговічності – завдяки застосуванню сучасної елементної бази з покращеними характеристиками відмовостійкості;
- спрощення схемної реалізації – скорочення кількості компонентів і міжелементних зв'язків, що знижує ймовірність відмов у промислових умовах експлуатації;
- зручність в обслуговуванні – можливість цифрового контролю та налаштування параметрів без втручання у силову частину;
- універсальність – можливість роботи в широкому діапазоні режимів, зокрема при глибокому регулюванні від 1% до номінального значення;
- зниження собівартості – скорочення витрат на зовнішні компоненти за рахунок раціонального вибору елементної бази.

Виробничі процеси гальванічного нанесення покриттів висувають жорсткі вимоги до якості електроживлення: необхідні стабільна вихідна напруга 24 В, великий номінальний струм 200 А, плавне та глибоке регулювання, автоматична стабілізація вихідних параметрів та надійний захист від аварійних режимів. Виконання цих вимог традиційними засобами – на базі електромашинних або електромагнітних перетворювачів – пов'язане зі значними масогабаритними, енергетичними та експлуатаційними витратами. Розвиток тиристорної

техніки, зокрема поява оптотиристорів, розрахованих на великі струми та напруги, відкрив реальну можливість проектування керованих випрямлячів за спрощеними схемотехнічними рішеннями.

Подальший розвиток мікропроцесорної галузі відкриває додаткові можливості для підвищення якості керування випрямлячем. Сучасний ринок мікроконтролерів відзначається широкою різноманітністю моделей з різними технічними характеристиками та вбудованою периферією. Грамотний вибір мікроконтролера дозволяє досягти суттєвої економії не лише за рахунок нижчої вартості самої мікросхеми, але й завдяки скороченню кількості зовнішніх компонентів – шляхом максимального використання вбудованих апаратних ресурсів: таймерів, АЦП, ШІМ-модуляторів та інтерфейсів зв'язку. Це особливо актуально для системи управління випрямлячем гальванічних ванн, де потрібне точне формування імпульсів керування тиристорами, вимірювання струму через шунт і забезпечення захисних функцій в режимі реального часу.

Метою даного проекту є розроблення модернізованого випрямляча для живлення гальванічних ванн з номінальною вихідною напругою 24 В та номінальним струмом 200 А на основі критичного аналізу існуючих конструкторських рішень і схем. Досягнення поставленої мети передбачає застосування сучасних силових напівпровідникових компонентів, вибір оптимальної архітектури мікроконтролерної системи управління, а також всебічне врахування техніко-економічних аспектів виробництва: технологічності конструкції, забезпечення водяного охолодження блока силових тиристорів та природного повітряного охолодження трансформатора.

1. ОГЛЯД СХЕМ І КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Тиристорні перетворювачі для гальваніки

Виробництво електричної енергії на сучасних електростанціях здійснюється переважно на змінному струмі, оскільки саме такий вид енергії найбільш зручний для передачі на великі відстані та трансформування. Проте значна частина промислових споживачів – гальванічне виробництво, електролізні установки в хімічній та металургійній промисловості, електрифікований транспорт, автоматизований електропривод металообробних верстатів і промислових роботів — потребує живлення на постійному струмі. Це зумовлює необхідність перетворення змінної напруги мережі в постійну за допомогою відповідних перетворювальних пристроїв.

Перетворення електричної енергії з первинної змінної напруги в нерегульовану вторинну постійну здійснюється за допомогою діодних випрямлячів. Однак у тих випадках, коли випрямлена напруга має регулюватися в широкому діапазоні або коли потрібна її стабілізація з відхиленнями, меншими ніж у напруги живильної мережі, застосовуються тиристорні випрямлячі. Завдяки своїм перевагам – високому ККД, широким можливостям регулювання, надійності та порівняно невисокій вартості – цей вид керованих перетворювачів фактично витіснив з промислового вжитку всю різноманітність магнітних та електромагнітних регуляторів, які застосовувалися раніше.

Створення потужних низьковольтних напівпровідникових перетворювачів дозволило позбутися суттєвих недоліків, характерних для електромашинних перетворювачів: значних масогабаритних показників, низького ККД, складності обслуговування та підвищеного рівня шуму. Масове впровадження низьковольтних напівпровідникових перетворювачів на промислових підприємствах спричинило якісні зміни у гальванічному виробництві: суттєво покращилася якість гальванічних покриттів та точність технологічних процесів об-

робки поверхні, що, у свою чергу, створило умови для впровадження прогресивних технологій нанесення покриттів [1].

Перетворювачі для живлення гальванічних ванн функціонують в умовах підвищеної вологості, агресивного хімічного середовища та значних теплових навантажень, що висуває до них ряд специфічних технічних вимог. Зокрема, такі перетворювачі повинні забезпечувати:

- вихідну напругу в діапазоні від 12 до 115 В залежно від технологічного процесу;
- номінальні струми навантаження від 100 до 25 000 А;
- плавне та глибоке регулювання вихідної напруги – від нуля до номінального значення – без розривів у діапазоні;
- автоматичну стабілізацію вихідних параметрів: струму, напруги та густини струму в гальванічній ванні у всьому робочому діапазоні незалежно від коливань напруги мережі та зміни опору навантаження;
- надійний захист від коротких замикань на стороні постійного та змінного струму, перевантажень і теплового перегріву тиристорів;
- функцію автоматичного реверсування вихідного струму для реалізації реверсивних технологічних режимів;
- конструктивне виконання, придатне для встановлення безпосередньо біля гальванічної ванни з урахуванням вимог до захисту від зовнішніх впливів.

У загальному вигляді структурна схема перетворювача наведена на рисунку 1.1. Вона відображає основні функціональні вузли, взаємодія яких забезпечує нормальну роботу всього пристрою.

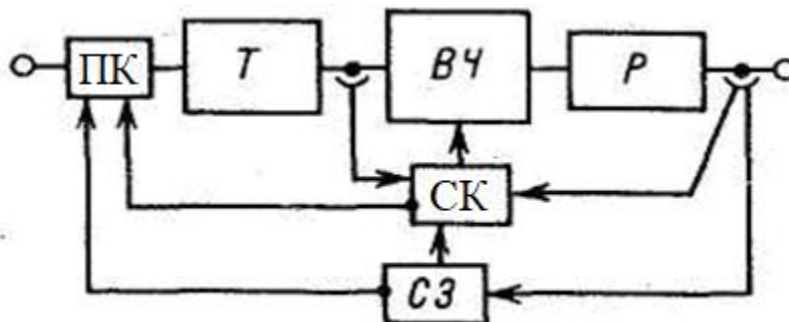


Рисунок 1.1 – Структурна схема перетворювача

Пристрій комутації (ПК) здійснює підключення та відключення силового ланцюга перетворювача від живильної мережі й одночасно виконує функції одного з головних виконавчих органів системи захисту. Як правило, пристрій комутації комплектується стандартними комутаційними апаратами — автоматичними швидкодіючими вимикачами, що забезпечують необхідний час відключення при аварійних режимах.

Трансформатор (Т) забезпечує узгодження рівнів вхідної та вихідної напруги відповідно до вимог технологічного процесу, а також гальванічну розв'язку живильної мережі від ланцюга навантаження, що є обов'язковою умовою безпечної експлуатації гальванічного обладнання. Параметри трансформатора визначаються типом і характеристиками обраної силової схеми випрямлення, а також видом і режимом роботи навантаження.

Силовa вентильна частина (ВЧ) є базовим функціональним вузлом перетворювача: саме вона здійснює безпосереднє перетворення змінної напруги в постійну та забезпечує управління потоком електричної енергії, що передається до навантаження.

Згладжуючий реактор (Р) призначений для зменшення пульсацій випрямленого струму до допустимого рівня, що визначається технологічними вимогами гальванічного процесу. Застосування реактора підвищує якість постійного струму та зменшує вплив вищих гармонік на мережу.

Система керування (СК) реалізує функції управління та автоматичного регулювання вихідних параметрів перетворювача в заданому діапазоні. Крім того, вона може виконувати роль первинного безконтактного виконавчого органу системи захисту, формуючи сигнали блокування при виявленні аварійних ситуацій.

Система захисту (СЗ) забезпечує захист насамперед силової вентильної частини від перевищення допустимих значень струму і напруги. У розширеному варіанті до функцій системи захисту відноситься також захист навантаження від аварійних та нештатних технологічних режимів роботи.

Таким чином, сукупність перелічених функціональних вузлів утворює єдину технічну систему, в якій силова та керуюча частини працюють у тісній взаємодії. Ефективність роботи перетворювача в цілому визначається не лише правильним вибором кожного окремого елемента, але й узгодженістю їх характеристик між собою. Саме тому при проектуванні випрямляча для живлення гальванічних ванн 24 В, 200 А особливу увагу приділено комплексному підходу: вибору раціональної силової схеми, розрахунку параметрів трансформатора та зрівняльного реактора, обґрунтованому вибору тиристорів і елементів захисту, а також визначенню оптимальної архітектури мікроконтролерної системи управління. Такий підхід дозволяє забезпечити задані технічні характеристики виробу при мінімальних матеріальних витратах і високій надійності в умовах промислової експлуатації.

1.2 Огляд силових схем випрямляча для гальваніки

Живлення промислових установок, що працюють на постійному струмі, як правило, здійснюється від випрямляючих перетворювачів трифазного струму середньої та великої потужності [2].

Кількість фаз випрямної схеми визначається виразом

$$m = p \cdot z \quad (1)$$

де p – кількість фаз вторинної обмотки трансформатора;

z – число, що характеризує тактність випрямної схеми (для однокатних схем $z = 1$, для двокатних $z = 2$).

Основними показниками, за якими проводиться порівняння різних схем випрямлення, є:

- режим роботи трансформатора та його відносна типова потужність, що характеризується коефіцієнтом підвищення розрахункової потужності K_p ;
- ефективності використання вентилів за напругою та струмом;

- гармонійний склад випрямленої напруги U_d споживаного струму I_1 , який характеризується кратністю вищих гармонік у кривих U_d і I_1 відносними значеннями амплітуд цих гармонік U_{nm}^* і I_{nm}^* .

1.3 Трифазний випрямляч з нульовим виводом

Трифазний випрямляч з нульовим виводом (рис. 1.2) містить три вентиля (VD1, VD2, VD3), приєднані анодами до вільних кінців фаз вторинних обмоток живлення трифазного трансформатора TV. З'єднання первинної та вторинної обмоток трансформатора виконано за схемою «зірка».

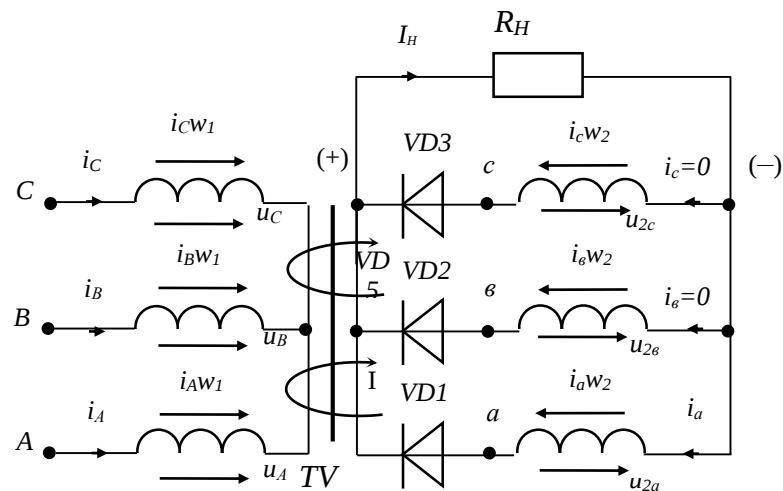


Рисунок 1.2 – Схема однотактного випрямляча з нульовим виводом.

Катооди вентилів (VD1 – VD3) при цьому об'єднані у загальну точку. При роботі випрямляча вентиля по черзі пропускають струм у ланцюг навантаження. Загальна точка катодів вентилів для ланцюга навантаження є позитивним полюсом, а нульова точка вторинної обмотки трансформатора – негативним полюсом. Робота схеми показана часовими діаграмами, наведеними на рис. 1.3.

Переваги: можливе створення випрямлячів великої потужності, високий ККД, низька пульсація випрямленої напруги, простота реалізації.

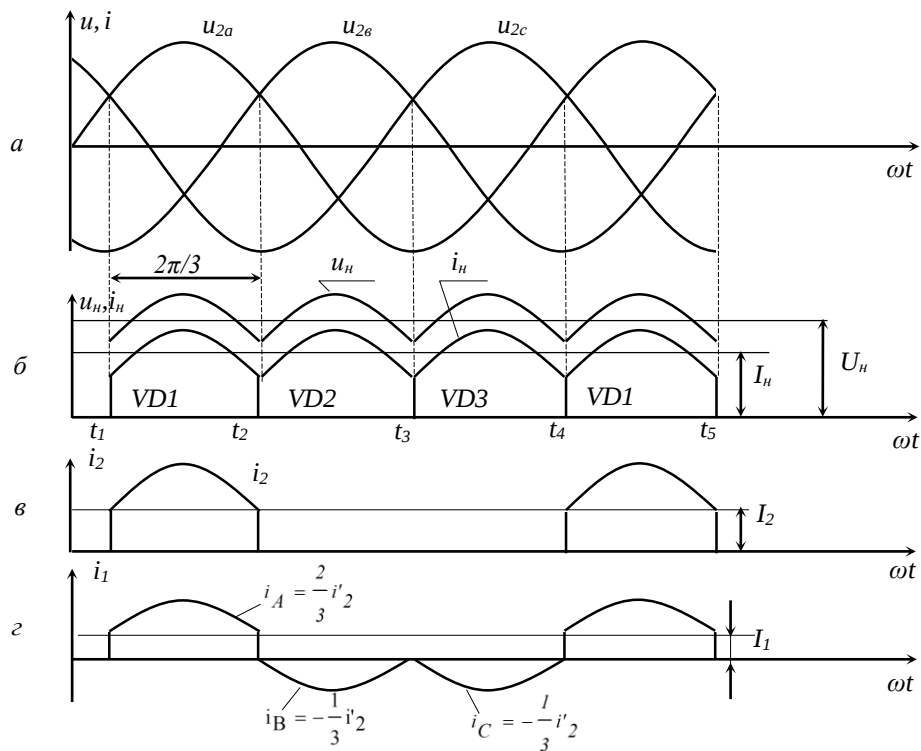


Рисунок 1.3 – Часові діаграми трифазного випрямляча з нульовим виводом: а – фазна напруга вторинної обмотки трансформатора; б – струм через вентиль; в – струм у вторинній обмотці трансформатора; г – струм у первинних фазових обмотках трансформатора

Недоліки: складна система управління, неефективне використання можливостей трансформатора

1.4 Трифазний мостовий випрямляч

Схема трифазного мостового випрямляча (рис. 1.4) знайшла широке застосування у випрямлячах великої та середньої потужності [4].

У розглянутій схемі непарна група вентилів VD1, VD3, VD5 об'єднана між собою з боку катодів, утворюючи так звану катодну групу. Парна група вентилів VD2, VD4, VD6, навпаки, з'єднується між собою з боку анодів, формуючи анодну групу, при цьому катоди вентилів парної групи електрично з'єд-

нані з анодами вентилів непарної групи. Аноди вентилів непарної групи підключаються до відповідних виводів фаз вторинних обмоток силового трансформатора TV, що забезпечує трифазне живлення схеми. Опір навантаження R_H увімкнено між загальною точкою катодів непарної групи та загальною точкою анодів парної групи. Завдяки такому з'єднанню загальна точка катодів є позитивним полюсом випрямленої напруги відносно зовнішнього ланцюга, тоді як загальна точка анодів відіграє роль негативного полюса. Таким чином, через навантаження протікає однонаправлений (випрямлений) струм, а наявність шести вентилів, що рівномірно розподілені по фазах, забезпечує більш рівну форму випрямленої напруги порівняно з однофазними та трифазними трипульсними схемами.

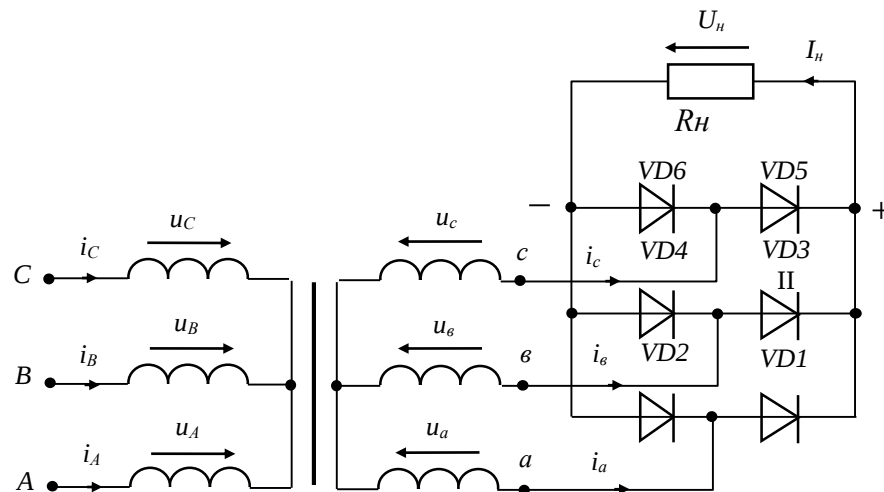


Рисунок 1.4 – Схема трифазного мостового випрямляча

Принцип роботи непарної групи вентилів аналогічний роботі трифазної схеми з нульовим дротом: протягом кожної третини періоду провідний стан має той вентиль, анод якого у даний момент має найвищий потенціал. У парній групі ситуація дещо інша – потенціали анодів усіх вентилів цієї групи в будь-який момент однакові, тому відкритим залишається той вентиль, катод якого має найбільш негативний потенціал у відповідну частину періоду. Таким чином, у мостовій схемі одночасно завжди задіяні два вентиля — по одному з

кожної групи, що й забезпечує безперервне протікання струму через навантаження. Часові діаграми напруги та струмів трифазного мостового випрямляча, наведені на рис. 1.5.

До основних переваг трифазної мостової схеми належать: можливість створення випрямлячів значної потужності, високий коефіцієнт корисної дії, низький рівень пульсацій випрямленої напруги, відносна простота схемної реалізації, а також ефективне використання потужності трансформатора.

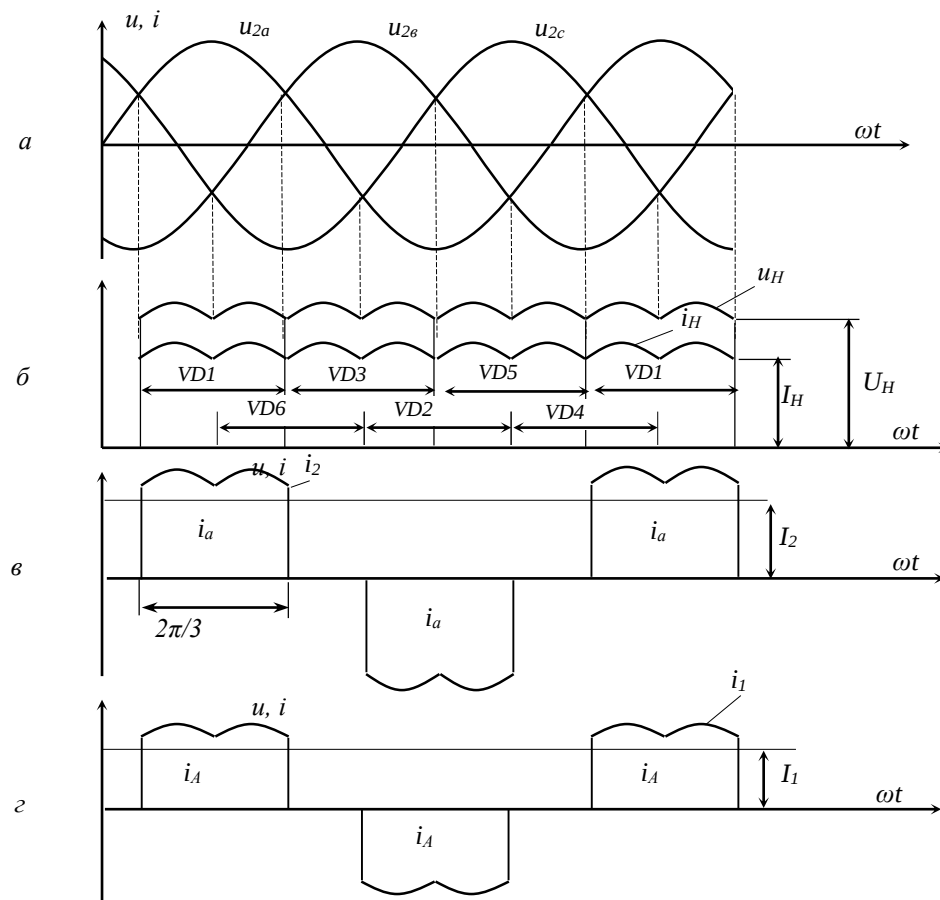


Рисунок 1.5 – Часові діаграми характеристики трифазного мостового випрямляча : а – фазна напруга вторинної обмотки трансформатора; б – струм через вентиль; в – струм у вторинній обмотці трансформатора; г – струм у первинних фазових обмотках трансформатора

Недоліки: складна система керування, велика кількість елементів схеми випрямлення.

1.5 Подвійна трифазна схема із зрівняльним реактором

Для живлення потужних тиристорних або діодних випрямлячів широко застосовується схема шестифазного випрямлення (рис. 1.6, а). До складу такого випрямляча входять силовий трансформатор TV, увімкнений за схемою «зірка – подвійна зірка», зрівняльний реактор (індуктивність) L , а також шість вентилів $VD1$ – $VD6$, які, відповідно до свого функціонального призначення, розподіляються на непарну та парну групи.

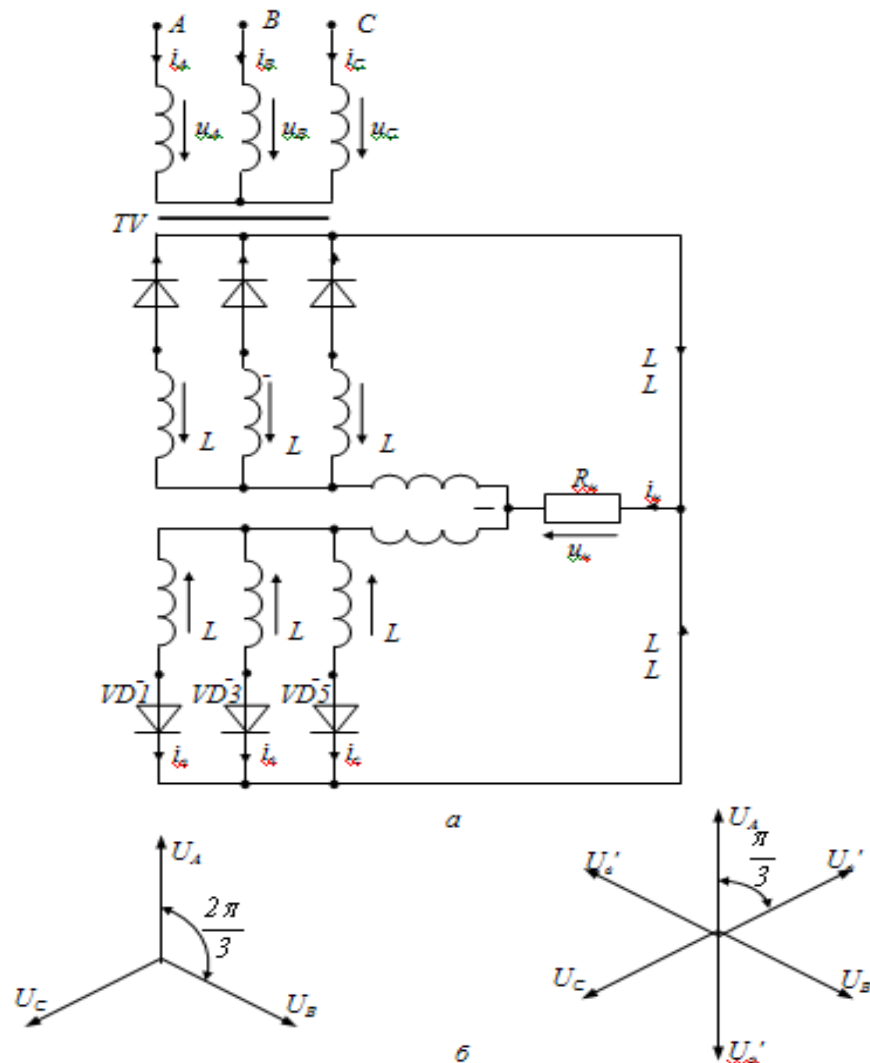


Рисунок 1.6 – Схема трифазного випрямляча із зрівняльним реактором:
а – принципова схема; б – векторна діаграма фазної напруги живильного трансформатора.

Застосування схеми подвійної зірки в поєднанні зі зрівняльним реактором дозволяє забезпечити рівномірне навантаження обмоток трансформатора та знизити рівень пульсацій випрямленої напруги, що є критично важливим для стабільної роботи гальванічного обладнання.

У даній схемі первинна обмотка трансформатора з'єднана за схемою «зірка» та підключається до трифазної мережі живлення (ABC). Вторинні обмотки трансформатора також з'єднані зіркою, однак таким чином, що вектори напруг відповідних фаз двох вторинних обмоток зсунуті між собою на кут 180° (рис. 1.66). При цьому одна з трифазних зірок підключається до анодів непарної групи вентилів, а інша – до анодів парної групи.

Фази вторинних обмоток розподілені по стрижнях магнітопроводу трифазного трансформатора таким чином, що на кожному стрижні, окрім однієї фази первинної обмотки, розміщені дві фази вторинної обмотки, які належать різним групам вентилів. Між нульовими точками O_1 та O_2 двох вторинних зірок увімкнено зрівняльний реактор L , середня точка обмотки якого є негативним полюсом випрямляча. Позитивним полюсом слугує спільна точка катодів вентилів.

Введення зрівняльного реактора до схеми забезпечує одночасну роботу двох вентилів – по одному з парної та непарної груп – підключених до живильних обмоток, розташованих на різних стрижнях магнітопроводу. Завдяки цьому досягається повна компенсація магніторушійних сил, що створюються струмами первинної та вторинної обмоток на кожному з осердь трансформатора, що виключає виникнення підмагнічування його магнітного потоку.

Характер роботи трифазного випрямляча із зрівняльним реактором наочно ілюструється часовими діаграмами напруги та струмів, наведеними на рис. 1.7.

Шестифазна схема із зрівняльним реактором і трифазна мостова схема мають суттєву схожість: обидві забезпечують однакову кратність пульсацій у кривій випрямленої напруги, а також однаковий гармонійний склад струму, що споживається від мережі.

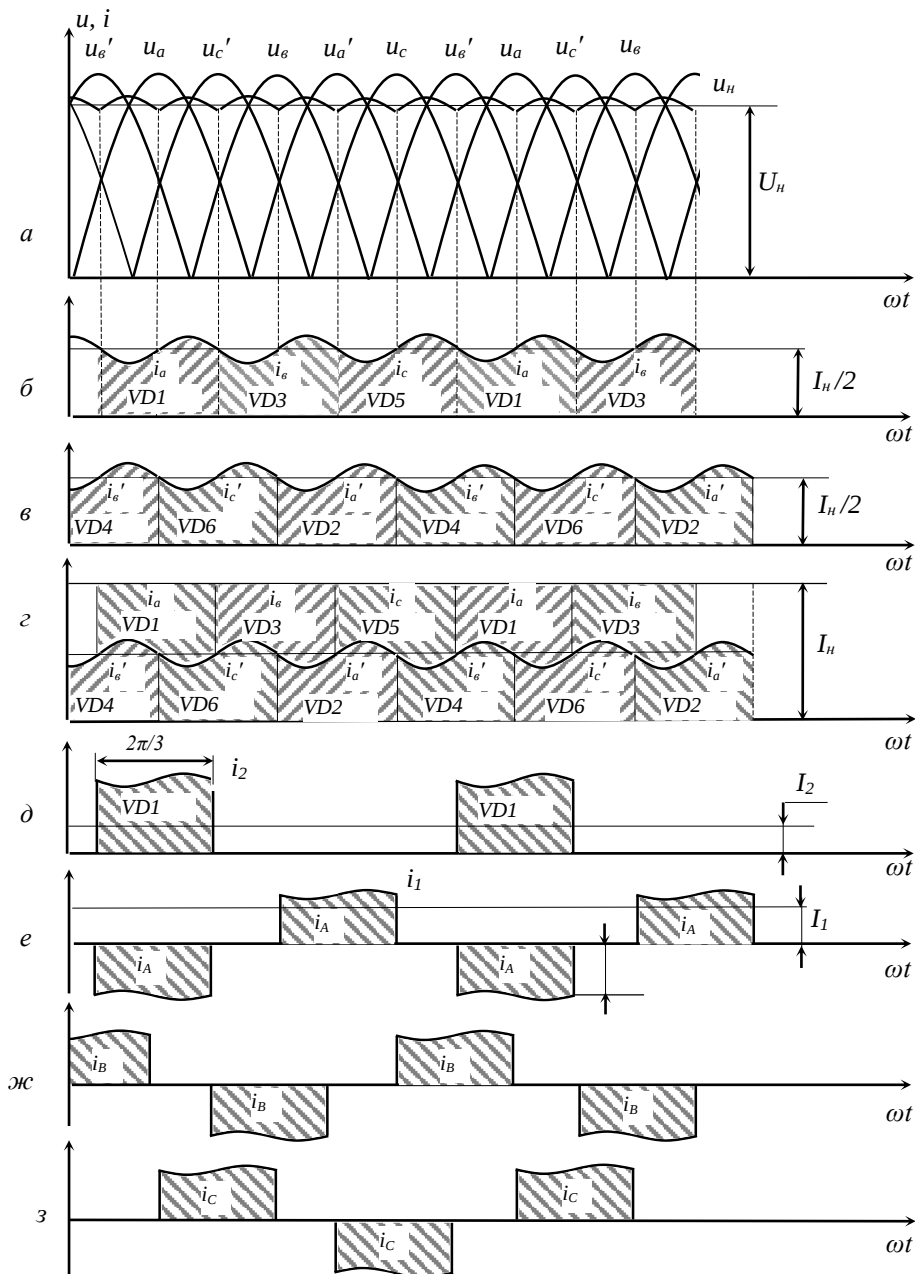


Рисунок 1.7 – Часові діаграми струмів та напруг трифазного випрямляча із зрівняльним реактором

1.6 Огляд конструкторських рішень

Серед зарубіжних виробників випрямлячів для гальванічних ванн, що найширше представлені на світовому ринку, виокремлюють компанії з Шве-

ції, Німеччини та Китаю. Нижче розглядаються чотири представники, що відповідають сучасним вимогам до точності, надійності та енергетичної ефективності перетворювачів, які застосовуються в електрохімічних технологічних процесах.

Випрямляч FlexKraft компанії KraftPowercon (Швеція)

KraftPowercon – шведська компанія у галузі промислового перетворення електроенергії, заснована у 1935 році. Виробник спеціалізується на джерелах постійного струму для електрохімічних процесів та є одним із провідних постачальників у даному сегменті ринку.

Випрямляч FlexKraft (рисунок 1.8) є модульним імпульсним джерелом постійного струму (SMPS), призначеним для живлення електрохімічних процесів. Апарат виконується як з повітряним, так і з водяним охолодженням (опційний модуль CoolKraft), а також передбачає опцію реверсування полярності. Кожна стійка складається з 1–10 силових модулів; до 5 стійок можуть об'єднуватися у конфігурацію «ведучий/ведомий».



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд випрямляча FlexKraft

Діапазон вихідного струму – від 200 А до 30 кА. Випрямляч підтримує режими стабілізації напруги (CV) та струму (CC) з роздільним заданням кожного параметра, що забезпечує повний контроль над процесом. Модульна конструкція дозволяє замінити несправний модуль менш ніж за 15 хвилин без зупинки лінії.

Випрямляч ModuPulse компанії KraftPowercon (Швеція) (рис. 1.9).

Серія ModuPulse – це імпульсний реверсивний випрямляч для прецизійних електрохімічних процесів, розроблений спільно з провідними виробниками друкованих плат і напівпровідникових компонентів. Цифрова платформа керування підтримує до 40 програмованих ступенів струму; форма імпульсів є складно-конфігурованою, а амплітуда струму регулюється в діапазоні від -1000% до $+1000\%$. Реверсна імпульсна функція дозволяє усунути вузлові дефекти покриття та вирівняти мікроструктуру поверхні, зменшуючи потребу у коригувальних хімічних добавках. Це скорочує витрати на хімічні матеріали та подовжує ресурс гальванічної ванни.



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд випрямляча ModuPulse компанії KraftPowercon

Випрямлячі серії POWER STATION та POWER PULSE компанії plating electronic GmbH (Німеччина) є одним із технологічних лідерів у галузі джерел постійного струму та імпульсних реверсивних джерел живлення для електрохімічних процесів. Розробка і виробництво зосереджені в Німеччині; розповсюдження здійснюється через мережу дочірніх підприємств, партнерів і дистриб'юторів у Європі, Північній Америці та Азії. Серія POWER STATION охоплює широкий спектр електрохімічних застосувань: гальванізацію, фінішну обробку поверхонь, електрофорезне лакування, анодування, електроліз і очищення стічних вод. Компанія пропонує джерела постійного струму як на базі сучасної імпульсної технології (SMPS), так і на базі тиристорної (SCR), що дає замовнику можливість вибору оптимального рішення відповідно до вимог технологічного процесу. Серія POWER PULSE забезпечує реверсний імпульсний режим для прецизійних застосувань.

Випрямлячі Liyuan Haina Rectifier Group (Китай)

Liyuan Haina Rectifier Group – провідний китайський виробник промислових силових випрямлячів, заснований у 1997 році. Компанія спеціалізується на IGBT- та SCR-випрямлячах, імпульсних джерелах живлення та системах підвищення якості електроенергії. Загальна виробнича площа становить понад 53 000 м² (виробничі бази у Китаї та Таїланді), функціонують три центри НДДКР. Продукція сертифікована за стандартами CE та CSA і відповідає вимогам системи менеджменту якості ISO 9001. У 2015 році компанія отримала статус національного підприємства у сфері високих технологій.

Випрямлячі на базі IGBT забезпечують ефективність перетворення до 94 %, низький коефіцієнт пульсацій і підтримують мережеве цифрове керування (інтерфейси RS485, PLC, сенсорний екран). Реверсний імпульсний режим (Positive & Negative Pulse) забезпечує рівномірність покриття у прецизійних застосуваннях – виробництво друкованих плат, напівпровідникових компонентів. Силові модулі підтримують функцію гарячої заміни без зупинки виробничої лінії. Ряд вихідних струмів охоплює від малопотужних лабораторних зразків до важкопромислових установок з вихідним струмом понад 12 000 А.

Розглянемо конструкторські рішення на базі випрямляча для живлення гальванічних ванн серії «ІОН» Запорізького заводу ВАТ Перетворювач.

Випрямляч «ІОН» конструктивно являє собою шафу випрямляча та пульт дистанційного керування ПДУ-6, з'єднані між собою спеціальним джгутом, що входить до комплекту постачання.

Пристрій призначений для перетворення трифазного змінного струму промислової частоти у постійний (випрямлений) струм. Живлення здійснюється від трифазної мережі змінного струму з напругою (380 ± 38) В та частотою (50 ± 1) Гц.

За функціональним принципом випрямляч поділяється на такі складові частини: силову частину, систему фазового управління, регулювання та захисту, а також систему завдання режимів роботи і контролю (ПДК).

До складу силовій частини входять такі елементи:

- автоматичний вимикач вхідної напруги, що забезпечує комутацію та захист силового ланцюга;
- силовий трансформатор, який виконує зниження напруги до необхідного рівня та забезпечує електричну розв'язку навантаження від живильної мережі;
- зрівняльний реактор, що згладжує пульсації випрямленого струму;
- блок силових тиристорів – основний функціональний елемент, безпосередньо відповідальний за випрямлення змінного струму.

Панель вихідних пристроїв ПВУ, яка містить ланцюги керування тиристорами.

Усередині шафи розміщені:

1. Силовий трансформатор. Параметри трансформатора головним чином визначаються типом силовій схеми перетворювача та її характеристиками, видом та режимом роботи навантаження.

2. Блок силових тиристорів БСТ. В «ІОН-9» використовується шестифазна схема з зрівняльним реактором, оскільки вона має низку переваг перед однофазними. А саме: менші вищі гармоніки в кривій випрямленої напруги та кривої споживаного струму, гарне використання трансформатора та вентилів, а також симетричне навантаження фаз мережі живлення.

3. Зрівняльний реактор. Призначений для рівномірного розподілу струму навантаження між прямими та зворотними зірками вторинних обмоток трансформатора.

4. Система керування. Реалізована на друкованій платі K1 із мікропроцесором ATmega 128.

5. Блок живлення плати з мікропроцесором K1.

6. Автоматичний вимикач вхідної напруги. Автоматичний вимикач кріпиться на DIN-рейку разом із клемниками та затискачами системи управління та захисту;

7. Шунт контролю вихідного струму.

8. Елементи сигналізації. Елементами сигналізації в «ІОН» є лампочки, які сигналізують про наявність на вході напруги мережі живлення.

Всі елементи випрямляча розміщені в пиловологозахищених відсіках з метою зменшення впливу на них агресивного середовища.

Усі прилади контролю та органи управління випрямлячем знаходяться у пульті ПДК. Пульти дистанційного керування встановлюється та закріплюється безпосередньо на даху шафи випрямляча або може встановлюватись окремо на відстані від шафи.

Пульти ПДК забезпечує:

- вмикання, вимикання випрямляча та світлову індикацію;
- вибір режиму стабілізації струму або напруги;
- ручне вимірювання полярності вихідної напруги;
- регулювання вихідного струму та напруги від нуля до номінальних значень;
- контроль вихідної напруги за допомогою стрілочного вольтметра;

- контроль вихідного струму за допомогою цифрового амперметра;
- світлову індикацію про стан випрямляча;
- роботу у режимі ручного чи програмного керування.

У режимі ручного керування перемикання полярності вихідної напруги та тривалість роботи в цій полярності визначається оператором. У режимі програмного керування перемикання з однієї полярності вихідної напруги на іншу та назад, а так само тривалість роботи в тій та іншій полярності здійснюється автоматично за попередньо заданою оператором програмі;

- у режимі програмного управління тривалість установок робіт;
- у прямій полярності – 15с, 25с, 50с, 100с, 150с, 200с, 250с, 300с, 400с, 500с, 600с, 700с;
- у зворотній полярності – 1с, 2с, 4с, 6с, 10с, 15с, 20с, 25с, 30с, 35с, 40с, 50с;
- завдання та контроль часу процесу покриття за допомогою таймера. Після закінчення заданого часу видаються звуковий та світловий сигнали;
- спрощення контролю товщини покриття за допомогою лічильника, ампер-годин із цифровою індикацією значень, що контролює протікання тільки прямого струму.

Команди та сигнали, що надходять від зовнішньої СК:

- 1) вмикання / вимикання випрямляча (ввімкнути +24В, вимкнути -0В);
- 2) вибір режиму стабілізації, (стабілізація напруги +24В, стабілізація струму – 0В);
- 3) зміна полярності вихідної напруги (зворотна полярність +24В, пряма – 0В);
- 4) завдання вихідного струму (напруга).

Сигнали, що видаються ПДК-6 у зовнішню систему керування:

- 1) вихідний струм (лінійно $(1-10) \pm 0,2В$) незалежно від полярності, 10В відповідає I_n ;
- 2) вихідна напруга (лінійно $(1-10) \pm 0,2В$) незалежно від полярності, 10В відповідає U_n ;

3) готовність випрямляча до роботи (+24В, 0,1 А);

4) аварія випрямляча (+24В, 0,1 А).

Усі команди та сигнали мають гальванічну розв'язку між зовнішньою системою управління та випрямлячем.

На задній кришці ПДК-6 встановлене гніздо для підключення зовнішніх ланцюгів керування.

На лицьовій панелі ПДК встановлений знакосинтезуючий індикатор, елементи світлової сигналізації, а також клавіатура. На пульті виконані відповідні написи, які пояснюють призначення всіх елементів.

З'єднання пульта з шафою здійснюється спеціальним джгутом, що входить до комплекту.

Випрямлячі забезпечують роботу в режимі стабілізації вихідного струму з точністю не гірше 2% і в режимі стабілізації вихідної напруги з точністю не гірше 1%. Випрямлячі допускають перевантаження по струму до $1,1 I_{\text{ном}}$ протягом часу, що не перевищує 2 год.

Випрямлячі мають захист, що забезпечує його вимкнення за наступних режимів:

1) перезавантаження – збільшення вихідного струму до значення $1,15 I_{\text{ном}}$ і більше протягом більше 1,5 с;

2) зовнішнє коротке замикання-установка спрацьовування за струмом (1,6- 2,0) $I_{\text{ном}}$;

3) внутрішнє коротке замикання – пробій тиристора в силовому блоці;

4) перегрів – перевищення допустимої температури нагріву силових тиристорів – при підвищенні $(65 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ у місці встановлення датчика температури на шині силового блоку.

Мікропроцесор ATmega 128 (рис. 1.10) фірми ATmel є основним елементом системи керування випрямляча «ІОН-9-2».

Мікроконтролер ATmega128 є одним із найбільш функціонально насичених представників сімейства AVR і являє собою малопотужний 8-розрядний

КМОП-мікроконтролер, побудований на основі вдосконаленої RISC-архітектури AVR. Завдяки виконанню переважної більшості інструкцій за один машинний цикл мікроконтролер забезпечує продуктивність до 1 MIPS (мільйон операцій на секунду) на кожен МГц тактової частоти, що дозволяє розробнику гнучко оптимізувати співвідношення між швидкодією та енергоспоживанням відповідно до вимог конкретного застосування. Для системи управління випрямлячем гальванічних ванн така продуктивність є цілком достатньою для своєчасного формування керуючих імпульсів тиристорів, обробки сигналів зворотного зв'язку за струмом і напругою та реалізації алгоритмів захисту в режимі реального часу.

До складу мікроконтролера ATmega128 входять такі функціональні елементи:

- 128 кбайт внутрішньосистемно програмованої флеш-пам'яті програм з підтримкою режиму читання під час запису, що забезпечує можливість оновлення програмного забезпечення безпосередньо в складі готового виробу без демонтажу мікроконтролера;
- 4 кбайт статичного ОЗП для зберігання змінних, стеку та проміжних результатів обчислень;
- 53 лінії універсального введення-виведення, що забезпечують підключення необхідної кількості периферійних пристроїв системи управління випрямлячем;
- 32 універсальні робочі регістри та апаратний лічильник реального часу (RTC) для підтримки часових програм технологічного процесу;
- чотири гнучкі таймери-лічильники з режимами порівняння та широтно-імпульсної модуляції, що є ключовим елементом для точного формування імпульсів керування тиристорами у визначені моменти часу;
- двопровідний послідовний інтерфейс (TWI/I²C), орієнтований на побайтову передачу даних, та 8-канальний 10-розрядний АЦП для точного вимірювання аналогових сигналів — вихідного струму через шунт і вихідної напруги випрямляча;

- програмований сторожовий таймер із вбудованим автономним генератором для автоматичного відновлення роботи мікроконтролера у разі зависання програми в аварійних ситуаціях;
- послідовний порт SPI для високошвидкісного обміну даними із зовнішніми пристроями та для внутрішньосистемного програмування;
- інтерфейс JTAG, сумісний зі стандартом IEEE 1149.1, що забезпечує доступ до вбудованої системи налагодження та програмування безпосередньо на платі;
- шість програмних режимів зниження енергоспоживання, що дозволяють оптимізувати споживану потужність у паузах між активними фазами технологічного процесу.

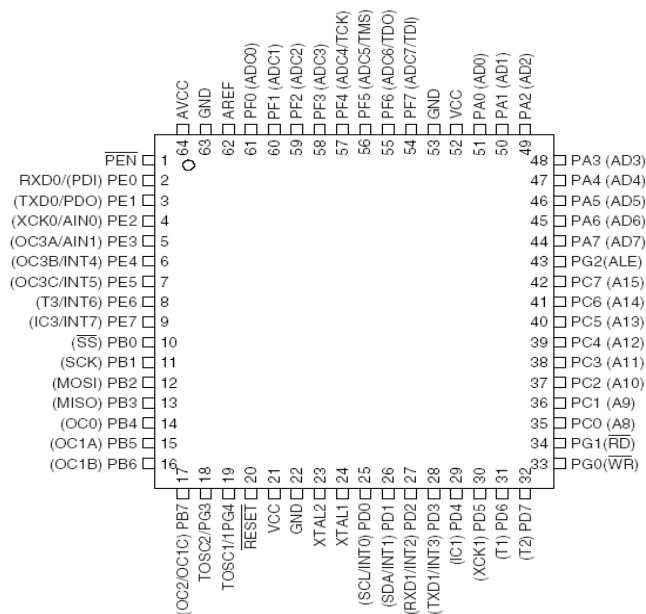


Рисунок 1.10 – Мікропроцесор ATmega128

Функціональна схема мікропроцесора ATmega128 зображена на рис. 1.11.

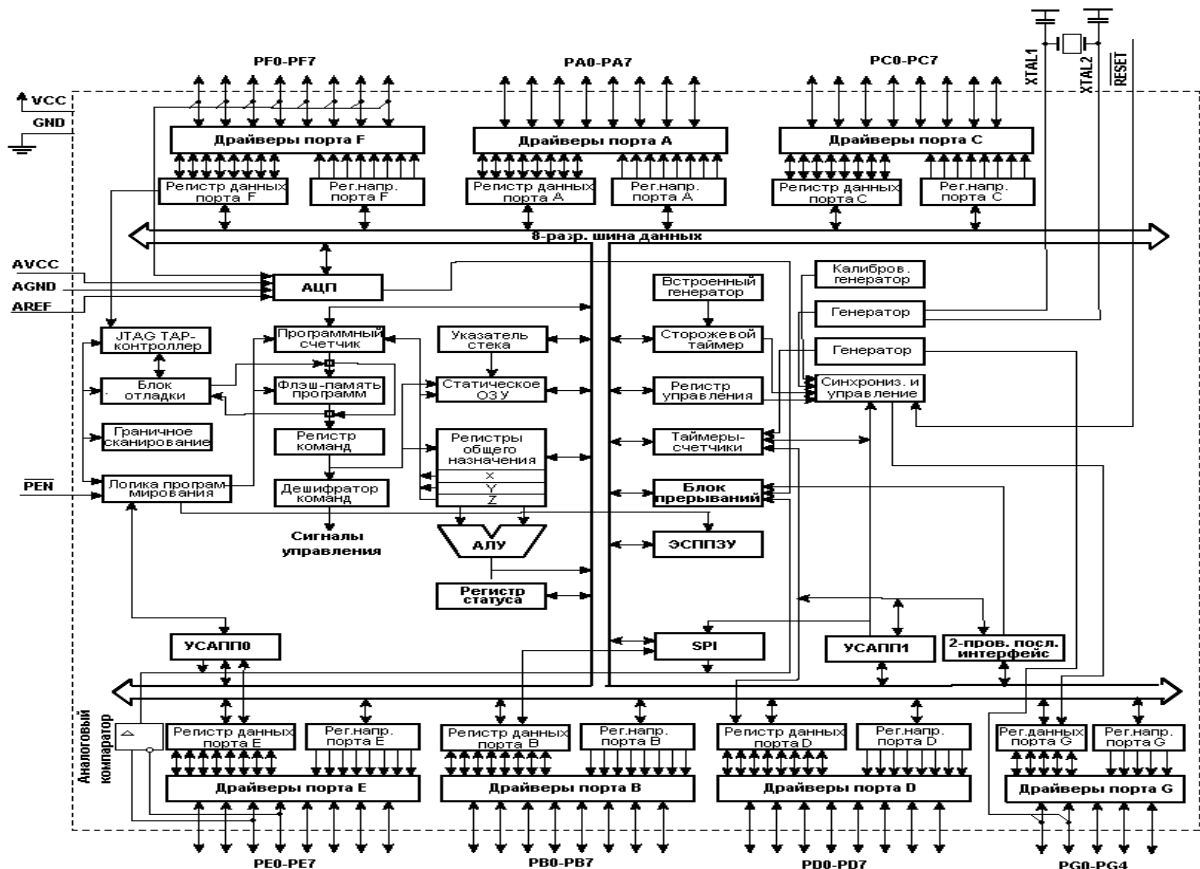


Рисунок 1.11 – Функціональна схема

Важливою характеристикою мікроконтролера, що визначає його придатність для застосування у системі управління випрямлячем гальванічних ванн, є наявність розвиненої системи енергозберігаючих режимів роботи. В умовах промислової експлуатації, коли випрямляч може тривалий час перебувати в режимі очікування технологічної команди або між циклами гальванічного осадження, здатність мікроконтролера знижувати енергоспоживання без втрати контролю над процесом є суттєвою перевагою. Досліджуваний мікроконтролер підтримує шість режимів зниженого енергоспоживання.

Режим холостого ходу (Idle) зупиняє виконання команд обчислювальним ядром, однак зберігає функціонування статичного ОЗУ, таймерів-лічильників, SPI-порту та системи переривань. Для системи управління випрямлячем це означає, що апаратні таймери продовжують формувати імпульси синхронізації та керування тиристорами навіть при зупиненому ЦПУ.

Режим вимкнення (Power-down) забезпечує збереження вмісту всіх регістрів при повністю зупиненому тактовому генераторі та відключених вбудованих периферійних модулів. Вихід з цього режиму здійснюється за зовнішнім перериванням або апаратним скиданням, що може використовуватися для пробудження мікроконтролера за командою від зовнішньої системи автоматизації гальванічної лінії.

Економічний режим (Power-save) відрізняється від режиму вимкнення тим, що асинхронний таймер продовжує роботу навіть при зупиненому основному генераторі. Це дозволяє підтримувати функцію відліку реального часу, що є важливим для реалізації часових програм гальванічного процесу — витримки технологічних пауз між стадіями нанесення покриття.

Режим зниження шумів АЦП (ADC Noise Reduction) зупиняє ЦПУ та всі модулі введення-виведення, за винятком асинхронного таймера та аналого-цифрового перетворювача. Цей режим є особливо актуальним для системи управління випрямлячем, оскільки вимірювання вихідного струму через шунт та вихідної напруги потребує високої точності АЦП-перетворення, а придушення імпульсних завад від силової частини є критично важливим для забезпечення достовірності результатів вимірювання.

Режим очікування (Standby) підтримує роботу кварцового або резонаторного генератора при зупиненому рештою мікроконтролера. Завдяки цьому даний режим поєднує мінімальне енергоспоживання з найкоротшим часом повернення в повністю активний робочий стан, що є важливим при необхідності швидкого реагування на зміну режиму роботи випрямляча або спрацювання системи захисту.

Розширений режим очікування (Extended Standby) забезпечує одночасну роботу основного тактового генератора та асинхронного таймера при зупиненому ЦПУ та периферії. Це поєднання гарантує як швидкий вихід з режиму сну, так і безперервний відлік часу, що робить даний режим оптимальним для застосування у циклічних технологічних процесах гальванічного виробництва з чітко регламентованими часовими інтервалами між стадіями обробки.

За рахунок поєднання 8-розр. RISC ЦПУ із внутрішньосистемно-самопрограмованою флеш-пам'яттю в одній мікросхемі ATmega128 є потужним мікроконтролером, що дозволяє досягти високого ступеня гнучкості та ефектної вартості при проектуванні більшості додатків вбудованого керування. ATmega128 підтримується повним набором програмних та апаратних засобів для проектування, у т.ч.: Сі-компілятори, макроасемблери, програмні відладники/симулятори, внутрішньосистемні емулятори та оціночні набори.

1.7 Постановка завдання

Метою даного дипломного проекту є розробка випрямляча для живлення гальванічних ванн із системою управління реалізованою на базі мікроконтролера.

Найбільш оптимальною схемою випрямлення для даного дипломного проекту є подвійна трифазна схема з зрівняльним реактором, перевагою даної схеми, є необхідність у менш потужних тиристорах.

Після огляду сучасних випрямлячів для живлення гальванічних ванн, за аналог вибираємо випрямляч серії «ІОН-9-2» Запорізького заводу ВАТ Перетворювач, оскільки він має наступні переваги в технічних характеристиках:

- спрощена система керування,
- менша кількість елементів схеми випрямлення,
- пульт дистанційного керування встановлюється та закріплюється безпосередньо на даху шафи випрямляча або може встановлюватись окремо на відстані від шафи до 300 м, що полегшує роботу оператора.

Даний випрямляч має наступний недолік, а саме: застарілі тиристори Т106-10-6, трансформатор, систему керування реалізовану на базі застарілого мікроконтролера ATmega 128 фірми ATmel, який на даний момент вже знятий з виробництва.

В результаті роботи необхідно спроектувати випрямляч із модернізованими комплектуючими.

Застосування системи керування випрямляча для живлення гальванічних ванн реалізованої на базі мікроконтролера дозволить покращити споживчі властивості випрямляча:

- можливість роботи випрямляча при будь-якому чергуванні фаз мережі живлення;
- включити в себе функцію контролю вхідних та вихідних параметрів;
- можливість віддаленого контролю та управління випрямлячем.

Необхідно провести дослідження порівняно існуючих однокристальних мікроконтролерів різних фірм і вибрати оптимальний для проєктованого випрямляча.

Правильний вибір мікроконтролера дозволить заощадити як на вартості самого мікроконтролера, так і вартості зовнішніх компонентів за рахунок використання вбудованих апаратних .

1.8 Проектно-технічне завдання

В якості аналогу обираємо випрямляч для живлення гальванічних ванн типу В-ТПВ-200/200-24 серії «ІОН-9-2» Запорізького заводу ВАТ Перетворювач .

Випрямляч для живлення гальванічних ванн відповідає наступним технічним вимогам:

- номінальна вихідна напруга $U = 24 \text{ В}$;
- номінальний вихідний струм $I = 200 \text{ А}$;
- номінальний вхідний струм $I_n = 14 \text{ А}$;
- коефіцієнт пульсації струму – менше 1%;
- відхилення від встановлених значень – не більше 2% ;
- діапазон регулювання – від 1% до макс.;
- спосіб охолодження БСТ-водний;
- спосіб охолодження трансформатора-природний повітряний;
- мікропроцесорне управління;

- реверсивний.

Випрямляч призначений для роботи в закритих приміщеннях або під навісом за відсутності прямого потрапляння сонячної радіації та атмосферних опадів у таких кліматичних умовах:

- температура навколишнього повітря від 1 до 40°C;
- висота над рівнем моря не більше 1000 м;
- середньомісячне значення відносної вологості повітря не більше 80% при температурі 25°C;
- навколишнє середовище не пожежонебезпечне, невибухонебезпечне.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок електричних параметрів та вибір трансформатора

На часових діаграмах (див. рис. 1.7, е, ж, з) представлені діаграми фазних струмів первинної обмотки трансформатора, які побудовані на основі рівнянь Кірхгофа для балансу магніторухливих сил по замкнутим магнітним контурам трансформатора. Виходячи з цих діаграм, значення первинного струму можна знайти з виразу

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_d}{2K_{tr}}\right)^2 \cdot 2 \cdot \frac{2}{3} \pi} = \frac{I_d}{K_{tr} \sqrt{6}}, \quad (2.1)$$

де K_{tr} – коефіцієнт трансформації, значення якого визначається з виразу:

$$K_{tr} = \frac{U_1}{U_{dn}}, \quad (2.2)$$

$$K_{tr} = \frac{380}{24} = 15,8,$$

$$I_1 = \frac{200}{15,8\sqrt{6}} = 5,16 \text{ A}.$$

Чинне значення фазної напруги первинної обмотки трансформатора визначаємо:

$$U_1 = \frac{K_{tr} \cdot U_d}{1,17}, \quad (2.3)$$

звідси

$$U_1 = \frac{15,8 \cdot 24}{1,17} = 324,10 \text{ В}.$$

За діючими значеннями струмів і напруг первинної та вторинної обмоток трансформатора, розрахункова потужність дорівнюватиме:

$$P_T = \frac{3U_1 I_1 + 6U_2 I_2}{2} = 1,26P_d, \quad (2.4)$$

тоді

$$P_T = 1,26 \cdot 2400 = 3024 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт пульсації в схемі, що розглядається.

$$K_n = \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (2.5)$$

підставимо значення числа фаз і отримаємо

$$K_n = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057.$$

Коефіцієнт підвищення розрахункової потужності трансформатора дорівнює

$$k_n = 1,26.$$

На підставі отриманих даних оберемо силовий трифазний трансформатор з двома вторинними обмотками типу ТСП-380/24-Г у захищеному виконанні з наступними параметрами:

- потужність трансформатора – 4 кВт;
- напругою первинної обмотки – 380 В;
- струм первинної обмотки – 14 А;
- напруга вторинної обмотки – 24 В;
- ККД – 88%.

2.2 Розрахунок електричних параметрів та вибір вентилів

Нормальний режим роботи випрямляча настає при струмах, що більше ніж I_{dk} . При зменшенні струму навантаження до деякого критичного значення, коли струм вентиля стає рівним амплітуді намагнічувального струму, виникає переривчастий режим роботи вентиля. По мірі подальшого зменшення струму навантаження кожен вентиль починає працювати лише шосту частину періоду, тобто. випрямляч працюватиме за схемою шестифазна зірка. При цьому кожен вентиль пропускає струм протягом $\pi/3$ періоду.

При достатньому за величиною струмі навантаження ($I_d > I_{dk}$) в обмотці реактора наводиться ЕРС самоіндукції, яка при досягненні певної величини, вирівнює різницю потенціалів між анодами вентилів парної та непарної груп і випрямляч переходить у трифазний режим роботи. В результаті цього протікає струм одночасно в ланцюгах двох вентилів, що належать різним групам вторинної обмотки трансформатора. При цьому кожен вентиль буде відкритий по $2\pi/3$ періоду, отже середнє значення випрямленої напруги в цьому режимі:

$$U_{TAV} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2} U_{2\phi} \cos \omega t \, d\omega t = 1,17 U_2, \quad (2.6)$$

де U_{TAV} – номінальна напруга споживача, В;

U_2 – фазна напруга вторинної обмотки трансформатора.

$$U_{TAV} = 1,17 \cdot 20,51 = 24.$$

Зворотна напруга на вентилі внаслідок незалежної роботи обох трифазних схем нічим не відрізняється від зворотної напруги у трифазній схемі із середньою точкою.

Максимальне значення зворотної напруги дорівнює:

$$U_{RM1} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = 2,45U_{2\phi}, \quad (2.7)$$

тоді

$$U_{RM1} = 2,45 \cdot 20,51 = 50,24.$$

Оскільки в схемі, що розглядається, середнє значення випрямленого струму I_d складається з середніх значень струмів шести вентилів, то середнє значення струму вентиля:

$$I_{AV} = \frac{I_{TAV}}{6}, \quad (2.8)$$

$$I_{AV} = \frac{200}{6} = 33,3 \text{ A.}$$

Величина зворотної напруги на закритому вентилі в цьому випадку (як у трифазному випрямлячі з нульовим виводом) дорівнює лінійній напрузі, тому максимальна зворотна напруга на тиристорі:

$$U_{RM} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 \quad (2.9)$$

З урахуванням (2.6):

$$U_{RM} = 2,09 U_d,$$

$$U_{RM} = 2,09 \cdot 24 = 50,16.$$

Оскільки в ланцюзі кожної фази вторинної обмотки трансформатора проходить струм вентиля ($i_v=i_2$) протягом $2\pi/3$ періоду (див. рис. 1.7, г), то, нехтуючи змінною складовою випрямленого струму, його діюче значення буде дорівнювати:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_d}{2}\right)^2 \cdot \frac{2}{3} \pi} = \frac{\sqrt{3}}{6} I_{TAV}, \quad (2.10)$$

звідси

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot 200 = 57,7 \text{ A}.$$

У первинній обмотці трансформатора одночасно у всіх трьох фазах протікає змінний струм, який пов'язаний із струмом вторинної обмотки трансформатора та коефіцієнтом трансформації ($i_1 = i_2/n = i'_2$) [4]. У схемі, що розглядається, відсутнє підмагнічування магнітопроводу трансформатора, тому позитивна напівхвиля струму дорівнює за величиною i в часі негативній напівхвилі в первинній обмотці трансформатора (див. рис. 1.7, е).

Важливим параметром, що визначає роботу вентиля, а також в цілому випрямляча, є швидкість наростання прямого струму di/dr , розрахункове значення якого знаходиться наступним чином: в контурі комутації, складеному з двох вентилів і фаз обмотки трансформатора, значення лінійної діючої напруги врівноважується електрорушійною силою ЕРС самоіндукції:

$$di = \frac{\sqrt{2} \cdot \omega \cdot I_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right)}{U_k}, \quad (2.11)$$

де m – кількість фаз випрямляча;

ω – кутова частота.

Підставимо значення та отримаємо:

$$di = \frac{1,41 \cdot 435 \cdot 200}{8} \cdot 0,5 = 15,33 \cdot 10^6 \text{ A/c}.$$

З розрахунків вибираємо оптотиристорний модуль – МТОТО8/3-160-4-2 У2, який задовольняє всім пред'явлені щодо нього вимогам. Характеристики МТОТО8/3-160-4-2 У2 представлені у додатку А.

2.3 Розрахунок електричних параметрів зрівняльного реактора

Крива напруги на зрівняльному реакторі формується з ділянок синусоїд фазної напруги.

$$U_{K.ср} = \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} U_2 \sin \vartheta d\vartheta, \quad (2.12)$$

звідси:

$$U_{K.ср} = \frac{6\sqrt{2}(1-\frac{\sqrt{3}}{2})}{\pi} U_2 = 0,32 U_2,$$

підставимо значення та отримаємо:

$$U_{K.ср} = 0,32 \cdot 20,51 = 6,56 \text{ В.}$$

Напруга $U_{K.ср}$ приводиться до еквівалентної синусоїдальної напруги U_e , що діє при частоті мережі живлення наступним чином:

$$U_e = \frac{U_{K.ср}}{3} \cdot kf, \quad (2.13)$$

де $k_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ – коефіцієнт форми.

Коефіцієнт 3 у формулі (2.3) відображає перерахунок з потрійної частоти, на якій працює зрівняльний реактор, частоту мережі [7].

Враховуючи, що:

$$U_{2\phi} = \frac{2\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot U_d \quad (2.14)$$

Отримаємо:

$$U_{\phi} = 0.11 \cdot U_d,$$

$$U_{\phi} = 0.11 \cdot 24 = 2,64 \text{ В.}$$

Типова потужність зрівняльного реактора S_{yp} може бути підрахована за формулою:

$$S_{yp} = \frac{1}{2} \cdot U_{\phi} \cdot \frac{1}{2} \cdot Id \cdot K_c = 0.0286 \cdot K_c \cdot P_d. \quad (2.15)$$

Коефіцієнт $Do > 1$ враховує роботу сталі зрівняльного реактора на підвищеній частоті в реальній схемі. Величина k_z зазвичай приймається рівною 2.

$$S_{yp} = 0.0572 \cdot P_d.$$

Звідси отримуємо, для реального зрівняльного реактора:

$$S_{yp} = 0.0572 \cdot 2400 = 137,28 \text{ Вт.}$$

Режим роботи керованого випрямляча на активне навантаження зустрічається дуже рідко, і тому доцільно відразу розглянути режим роботи схеми зі згладженим випрямленим струмом. Припускаємось, що $Ld = \infty$. У цьому випадку, так само, як і в схемі некерованого випрямляча, обидві паралельно - включені трифазні схеми з середньою точкою працюють незалежно одна від

одної [2]. Середнє значення результуючої випрямленої напруги дорівнює середньому значенню випрямленої напруги трифазної схеми із середньою точкою:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha,$$

приймаємо кут керування $\alpha = \frac{\pi}{3}$, тоді:

$$U_d = 24 \cdot 0.95 = 22,8\text{В}.$$

Розрахунок середнього значення напруги на зрівняльному реакторі зручніше розбити на два діапазони (по куту α). Перший діапазон охоплює кути регулювання, а не більше від 0 до $\pi/6$, а другий – не більше від $\pi/6$ до $\pi/2$.

Для першого діапазону зміни кута α ($\pi/6 > \alpha > \pi/2$) величина середнього значення напруги на зрівняльному реакторі дорівнює:

$$U_{K.cp} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_{2\Phi} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \alpha \right), \quad (2.16)$$

Для другого діапазону зміни кута α ($\pi/2 > \alpha > \pi/6$) величина $U_{K.cp}$ може бути отримана наступним чином:

$$U_{K.cp} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\Phi} \cdot \sin \alpha. \quad (2.17)$$

На рис. 2.1 наведено криву, що показує залежність величини середнього значення напруги на реакторі $U_{K.cp}$ від кута керування α . Крива побудована у відносних одиницях, де за базисну величину прийнято величину $U_{K.cp}$ – напругу на реакторі при $\alpha = 0$.

Маючи в своєму розпорядженні залежність середнього значення напруги на реакторі від кута керування, можна визначити залежність величини його типової потужності від максимального кута керування, з яким працює випрямляч.

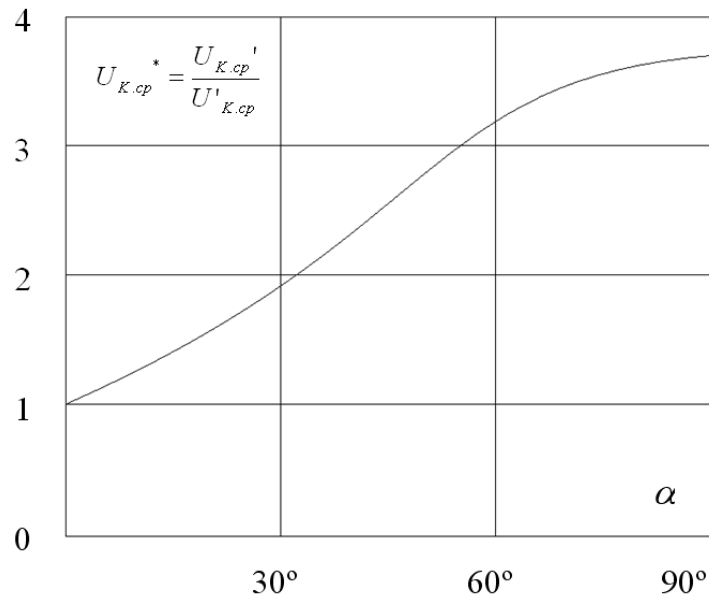


Рисунок 2.1 – Залежність середнього значення напруги на зрівняльному реакторі від кута керування

2.4 Вибір автоматичного вимикача

У процесі експлуатації випрямляча можливе виникнення аварійних режимів, які супроводжуються протіканням через вентилі струмів, неприпустимих як за величиною, так і за тривалістю. До основних причин виникнення таких режимів належать:

Зовнішні короткі замикання виникають у ланцюзі навантаження внаслідок порушення ізоляції, механічних пошкоджень або помилкових дій персоналу. При цьому через вентилі протікають значні аварійні струми, що можуть призвести до теплового або механічного руйнування напівпровідникових елементів.

Внутрішні короткі замикання є наслідком пробою або відмови одного чи кількох вентилів силової схеми. Такі аварії особливо небезпечні, оскільки виникають безпосередньо у силовій частині перетворювача і можуть спричинити лавиноподібний вихід з ладу суміжних елементів.

Мимовільне відмикання тиристорів у неробочій групі є характерним аварійним режимом для реверсивних випрямлячів із роздільним керуванням вентильними групами. У цьому випадку одночасно виявляються відкритими тиристири обох груп, що призводить до так званого режиму «робота групи на групу» – виникнення зрівняльного струму між групами, не обмеженого навантаженням. Такий режим є надзвичайно небезпечним і може за лічені мілісекунди вивести з ладу силові вентиля обох груп за відсутності надійного та швидкодіючого захисту.

Наявність перелічених аварійних режимів зумовлює необхідність застосування комплексної системи захисту випрямляча, яка забезпечує своєчасне виявлення аварійної ситуації та відключення силового ланцюга до того, як струм через вентиля досягне критичного значення. При зовнішніх к.з. розрахунок струмів ведеться у припущенні, що кут регулювання випрямляча $\alpha = 0$, причому струми к.з. максимальні.

Для знаходження ударного струму глухого зовнішнього к.з. спочатку знаходиться амплітуда базового струму к.з.

$$I_{k3} = \frac{U_{cf}}{\sqrt{x_{2k}^2 + r_{2k}^2}}, \quad (2.18)$$

де U_{cf} – фазна напруга мережі;

x_{2k}, r_{2k} – наведені опори трансформатора.

$$I_{k3} = \frac{220}{\sqrt{1,37_{2k}^2 + 0,43_{2k}^2}} = 154.$$

Ударний струм глухого зовнішнього к.з.

$$I_{yd} = I_{kz} \cdot i_{yd}^*, \quad (2.19)$$

де $i_{yd}^* = 1$ отримується з рис. 2.2, залежно від $\text{ctg} \varphi_k$.

$$\text{ctg} \varphi_k = \frac{r_{2k}}{x_{2k}}, \quad (2.20)$$

$$\text{ctg} \varphi_k = \frac{0.43}{1.37} = 0.31.$$

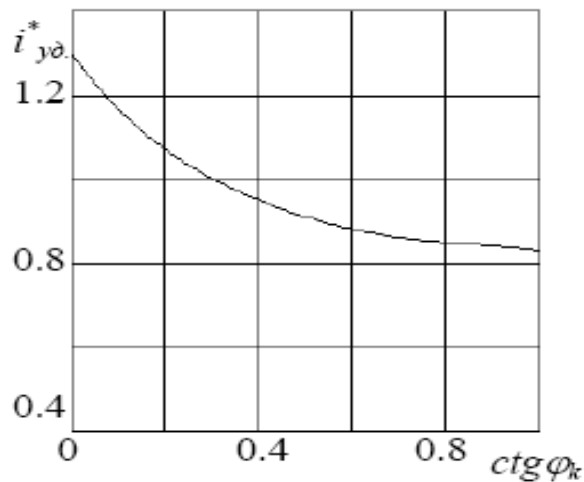


Рисунок 2.2 – Залежність i_{yd}^* від $\text{ctg} \varphi_k$ глухого зовнішнього к.з.

Інтеграл граничного навантаження при глухому зовнішньому к.з. визначається за формулою

$$I^2 t = I_{kz}^2 \cdot (I^{*2} t), \quad (2.21)$$

де $I^{*2} t = 6 \cdot 10^{-3}$, визначається залежно від $\text{ctg} \varphi_k$ кривої рис. 2.3.

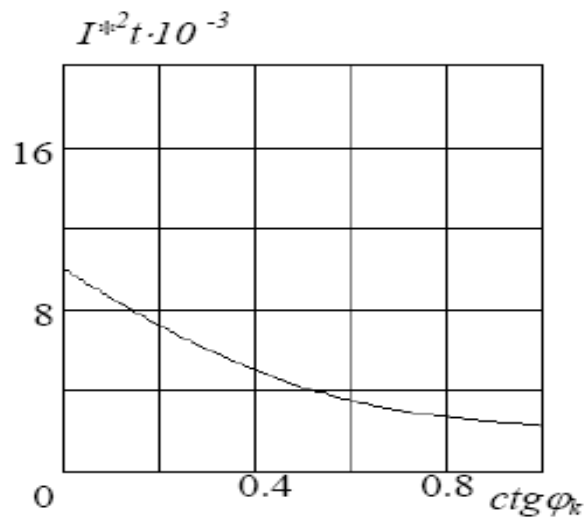


Рисунок 2.3 – Залежність I^2t від $\text{ctg } \varphi_k$ глухого зовнішнього к.з.

$$I^2t = 23716 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 142,3A.$$

Розрахунок струмів при внутрішньому короткому замиканні виконується за аналогічним припущенням – кут керування приймається рівним $\alpha = 0^\circ$. Додатково вважається, що момент виникнення внутрішнього короткого замикання збігається з моментом відмикання чергового тиристора, тобто з початком його робочого інтервалу. Саме за такого збігу умов струм внутрішнього короткого замикання досягає свого максимального значення, що і є розрахунковим випадком при визначенні навантажень на силові елементи схеми та виборі засобів захисту.

Ударний струм внутрішнього к.з. знаходиться:

$$I_{yd} = I_{kz} \cdot i_{yd}^*, \quad (2.22)$$

де i_{yd}^* береться з рис. 2.4, залежно від $\text{ctg } \varphi_k$.

$$I_{yd} = 154 \cdot 1,25 = 192,5A.$$

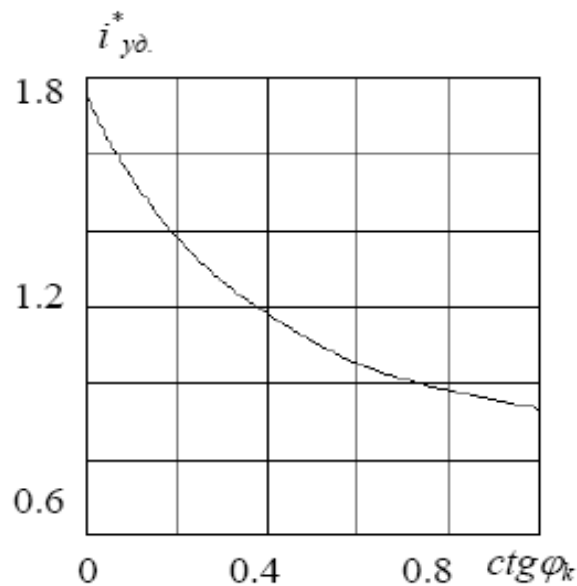


Рисунок 2.4 – Залежність i_{yo}^* від $\text{ctg} \varphi_k$ внутрішнього к.з.

Інтеграл граничного навантаження знаходиться за формулою

$$I^2 t = I_{kz}^2 \cdot (I^{*2} t) = 23716 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 166 A,$$

де $I^{*2} t$ визначається залежно від $\text{ctg} \varphi_k$ кривої Рисунок 2.5.

Миттєве значення струму[2]:

$$i_k = 189,4 A.$$

Захист випрямляча від струмів короткого замикання забезпечується комплексом захисних апаратів. Основними елементами захисту слугують швидкодіючі запобіжники, які завдяки малому часу спрацювання здатні відключити аварійний ланцюг раніше, ніж струм короткого замикання досягне руйнівного для тиристорів значення. Поряд із запобіжниками застосовуються автоматичні вимикачі, що виконують як захисну, так і комутаційну функції, а також інші спеціалізовані засоби захисту залежно від конкретних вимог схеми та умов експлуатації.

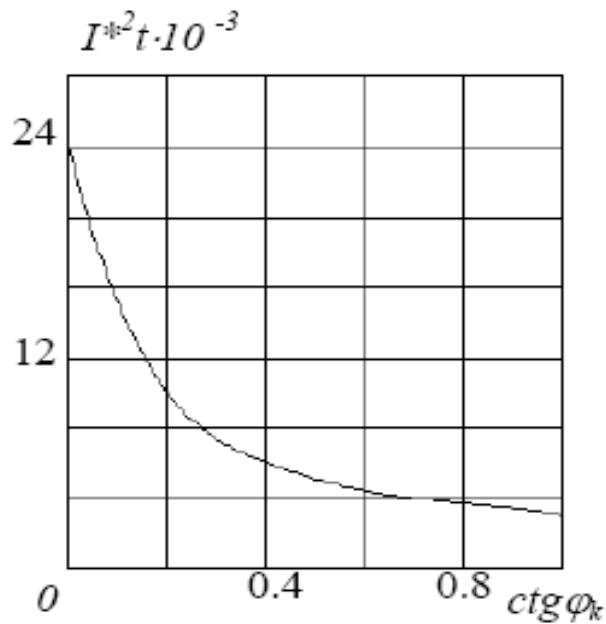


Рисунок 2.5 – Залежність I^2t від $\text{ctg} \varphi_k$ внутрішнього к.з.

Вибір запобіжників здійснюється за співвідношенням

$$W_{\text{ПП}} = \frac{W_B}{K_3}, \quad (2.23)$$

де $W_{\text{пп}}$ – інтеграл плавлення плавкою вставки, що обчислюється $\text{А}^2 \cdot \text{с}$ і визначає кількість енергії, необхідне для розплавлення плавкою вставки;

W_B – максимально допустиме значення інтеграла квадрата аварійного струму, що обчислюється в $\text{А}^2 \cdot \text{с}$ при тривалості імпульсу струму $t_{\text{имн}} = 1 \text{ мс}$ і заданій температурі структури;

K_3 – коефіцієнт запасу ($K_{3.1,2}$).

$$W_B = \int i_{\text{ав}}^2 \cdot dt, \quad (2.24)$$

$$W_B = I_{\text{ав}}^2 \cdot t_{\text{имн}}, \quad (2.25)$$

де $I_{\text{ав}}$ – аварійний струм.

$$W_B = 189,4^2 \cdot 0,01 = 358,$$

$$W_B = \frac{358}{1,2} = 298.$$

$$I_{пл.ном} \geq \lambda \cdot I_H \cdot K_{зап} = 2,5 \cdot 7,5 \cdot 1,2 = 22,5 \text{ А}$$

За знайденим значенням аварійного струму $I_{пл.ном}$ обирається плавкий запобіжник ПНБ-7-380/100 з номінальним струмом плавкої вставки 25 А, напругою змінного струму 380 В.

Автоматичний вимикач обирається на підставі кратності пускового струму $K_I = 25$. Встановлюється між мережею та трансформатором.

Обираємо швидкодіючий автоматичний вимикач АЕ2036ММ-20Н-00УЗ, з номінальною частотою $f = 50 \div 60$ Гц, номінальною напругою автоматичного вимикача $U_H = 380\text{В}$, номінальним струмом $I_H = 14$ А.

2.5 Енергетичні показники випрямляча

При загальному розгляді роботи схеми в першому наближенні активними опорами елементів та падіннями напруги на вентилях нехтують. Оцінку їх впливу на форму зовнішньої характеристики доцільно виконувати лише в діапазоні нормального навантаження випрямляча.

Перший режим роботи шестифазної схеми із зрівняльним реактором реалізується в діапазоні навантажень від холостого ходу ($I_d = 0$) до так званого критичного струму ($I_{дкр}$). Критичний режим настає тоді, коли постійна складова струму навантаження, що протікає через обмотки зрівняльного реактора, досягає значення його намагнічувального струму. Величина $I_{дкр}$ у частках від номінального струму $I_{дн}$, як правило, є незначною і становить близько 1–2%. В області першого режиму ($0 < I_d < I_{дкр}$) взаємна компенсація магніторушійних сил від постійних складових струмів окремих трифазних груп відсутня, тому

струм навантаження, що протікає через зрівняльний реактор, одночасно є його намагнічувальним струмом. За таких умов зрівняльний реактор втрачає свою основну функцію — вирівнювання випрямленої напруги двох трифазних груп — і випрямляч переходить у режим роботи за шестифазною схемою із середньою точкою.

Наявність значної індуктивності в контурі комутації призводить до зростання кута комутації γ та затягування перехідного процесу. Внаслідок цього, незважаючи на відносно невеликі значення струму навантаження в даній області, кут комутації зі збільшенням навантаження різко зростає, що спричиняє крутопадаючий характер зовнішньої характеристики в цьому діапазоні.

Напруга холостого ходу шестифазної схеми із зрівняльним реактором U_{d00} збігається з напругою холостого ходу шестифазної схеми із середньою точкою.

$$U_{d00} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} = 1,35 \cdot U_{2\phi}, \quad (2.26)$$

підставимо значення та отримаємо

$$U_{d00} = 1,35 \cdot 20,51 = 27,68 \text{ Ст.}$$

У момент, коли струм навантаження I_d перевищує критичне значення I_{dkp} , випрямляч переходить із шестифазного режиму в так званий подвійний трифазний режим, тобто в режим паралельної роботи двох трифазних груп. Кут комутації при цьому різко зменшується, оскільки в контурі комутації тепер присутні лише реактивні опори трансформатора та живильної мережі, тоді як індуктивність зрівняльного реактора вже не впливає на процес комутації. Значення випрямленої напруги в момент переходу між режимами відповідає випрямленій напрузі трифазної схеми із середньою точкою, яку з достатньою для практичних розрахунків точністю можна вважати рівною напрузі умовного холостого ходу шестифазної схеми із зрівняльним реактором.

$$U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2\pi} U_{2\phi} = 1,17 U_{2\phi}, \quad (2.27)$$

звідси:

$$U_{d0} = 1,17 \cdot 20,51 = 23,99 \text{ Ст.}$$

Зі зіставлення формул (2.24) і (2.25) видно, що з переході від режиму умовного холостого ходу до справжнього холостого ходу напруга на виході випрямляча може зрости на 15,4 %. На рис. 2.2 показані зовнішні характеристики шестифазного випрямляча з зрівняльним реактором в області критичного та нормального режимів.

Як видно з рис. 2.6, зі зростанням кута регулювання зростає і величина критичного струму I_{dkp} . Це пояснюється тим, що із збільшенням кута зростає величина напруги на зрівняльному реакторі, що призводить до підвищення потоку в його осерді, а отже, намагнічувального струму. З погляду режиму роботи навантаження різке підвищення напруги в області малих струмів I_d може виявитися небажаним. Для усунення даного явища можна використовувати включення баластного навантаження або вимушене підмагнічування зрівняльного реактора струмом потрібної частоти.

Другий (нормальний) режим роботи схеми існує у сфері навантажень $I_d > I_{dkp}$ за умови, що кут $\gamma < \pi/3$.

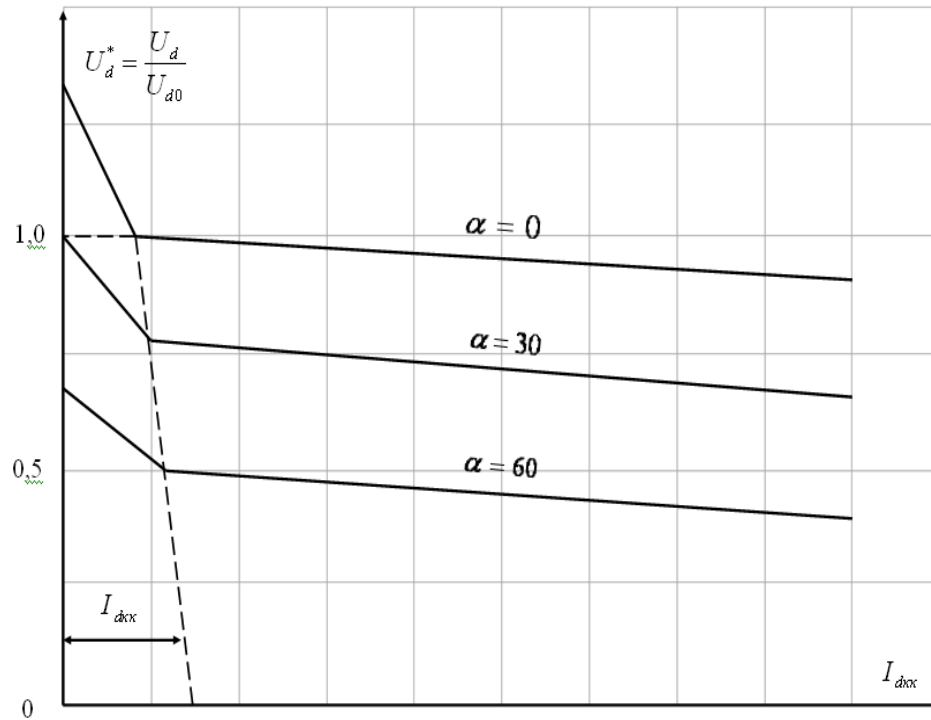


Рисунок 2.6 – Зовнішні характеристики випрямляча в областях критичного та нормального режимів

другому режимі роботи схеми вентиля функціонують по чергові групи по два та по три прилади. Характерною особливістю даного режиму є те, що комутаційні процеси відбуваються незалежно в кожній із трифазних груп, не впливаючи одна на одну, що суттєво спрощує аналіз роботи схеми порівняно з режимами, в яких інтервали комутації перекриваються. Зовнішня характеристика випрямляча в межах другого режиму має лінійний характер і описується таким рівнянням:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha - \frac{3 \cdot I_d \cdot X_B}{4\pi}. \quad (2.28)$$

При куті регулювання $\alpha = \frac{\pi}{6}$ випрямна напруга у відносних одиницях дорівнюватиме:

$$U_d = 12 \cdot \cos \frac{\pi}{6} - \frac{3 \cdot 200 \cdot 0.001}{4 \cdot 3.14} = 10,3B.$$

При куті регулювання $\alpha = \frac{\pi}{3}$ випрямна напруга у відносних одиницях:

$$U_d = 12 \cdot \cos \frac{\pi}{3} - \frac{3 \cdot 200 \cdot 0.001}{4 \cdot 3.14} = 5,4B.$$

При збільшенні струму навантаження I_d виникає і починає зростати фактичний кут регулювання α' , що відповідає затримці початку комутації на черговий вентиль. Вентилі у третьому режимі працюють групами по три. Рівняння зовнішньої характеристики схеми у третьому режимі має такий вигляд

$$\frac{8 \cdot \pi^2 \cdot U_d^2}{81 \cdot U_{2\phi}^2} + \frac{X_s^2 \cdot I_d^2}{6 \cdot U_{2\phi}^2} = 1. \quad (2.29)$$

Як видно з (2.29), зовнішня характеристика в третьому режимі описується дугою еліпса.

Струм $I_{d(2-3)}$ і напругу $U_{d(2-3)}$, у яких другий режим перетворюється на третій, може бути знайдено з виразів:

$$I_{d(2-3)} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{2 \cdot X_s}, \quad (2.30)$$

$$U_{d(2-3)} = \frac{9\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{8 \cdot \pi}. \quad (2.31)$$

Четвертий режим роботи схеми настає при такому значенні струму навантаження $I_{d(3-4)}$, за якого фактичний кут регулювання α' досягає значення $\pi/6$. Характерною особливістю цього режиму є те, що подальше збільшення струму навантаження вже не супроводжується зменшенням кута α' – він фіксується на

рівні $\pi/6$ і залишається незмінним протягом усього четвертого режиму. Натомість зі зростанням навантаження знову починає збільшуватися кут комутації γ , що свідчить про ускладнення перехідних процесів у силовій схемі.

Принципова відмінність четвертого режиму від попередніх полягає в характері перекриття інтервалів комутації. Якщо в третьому режимі комутаційні процеси в окремих випрямляльних групах були розділені в часі, то тепер інтервали комутації починають перекриватися на певних ділянках періоду, утворюючи так звані зони подвійного перекриття. Це означає, що одночасно відбуваються два комутаційні процеси в різних групах схеми, що суттєво змінює характер розподілу струмів між вентилями. У результаті вентилялі схеми працюють почергово групами по три та чотири прилади, що відображає підвищену завантаженість силової вентиляльної частини в цьому режимі.

Зовнішня характеристика схеми в четвертому режимі має лінійний характер і описується наступним виразом:

$$U_d = \frac{9\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{2 \cdot \pi} \left(1 - \frac{I_d \cdot X_B}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\phi}} \right). \quad (2.32)$$

З рівняння комутації та формули (2.17), підставивши $\alpha' = \pi/6$ і $\gamma = \pi/3$, можна отримати значення струму і напруги, при яких почнеться четвертий режим:

$$I_{d(3-4)} = \frac{3\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{2 \cdot X_s}, \quad (2.33)$$

$$U_{d(2-3)} = \frac{9 \cdot U_{2\phi}}{4 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi}. \quad (2.34)$$

При подальшому зростанні струму навантаження зовнішня характеристика продовжує спадати до тих пір, поки випрямлена напруга U_d не досягає нульового значення. Цей момент відповідає граничному режиму роботи схеми

– режиму короткого замикання, за якого вихідна напруга випрямляча повністю відсутня, а струм навантаження набуває максимального значення, обмеженого лише реактивними опорами трансформатора та живильної мережі. Значення струму короткого замикання I_{dK} може бути отримано з виразу (2.29), прийнявши $U_d = 0$.

$$I_{dKK} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{X_s}, \quad (2.35)$$

$$I_{dKK} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 10,256}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 8204,8 \text{ А.}$$

На рис. 2.7, а б представлено сімейство зовнішніх характеристик шести-фазної схеми з зрівняльним реактором.

Зовнішні параметри наведені у відносних одиницях.

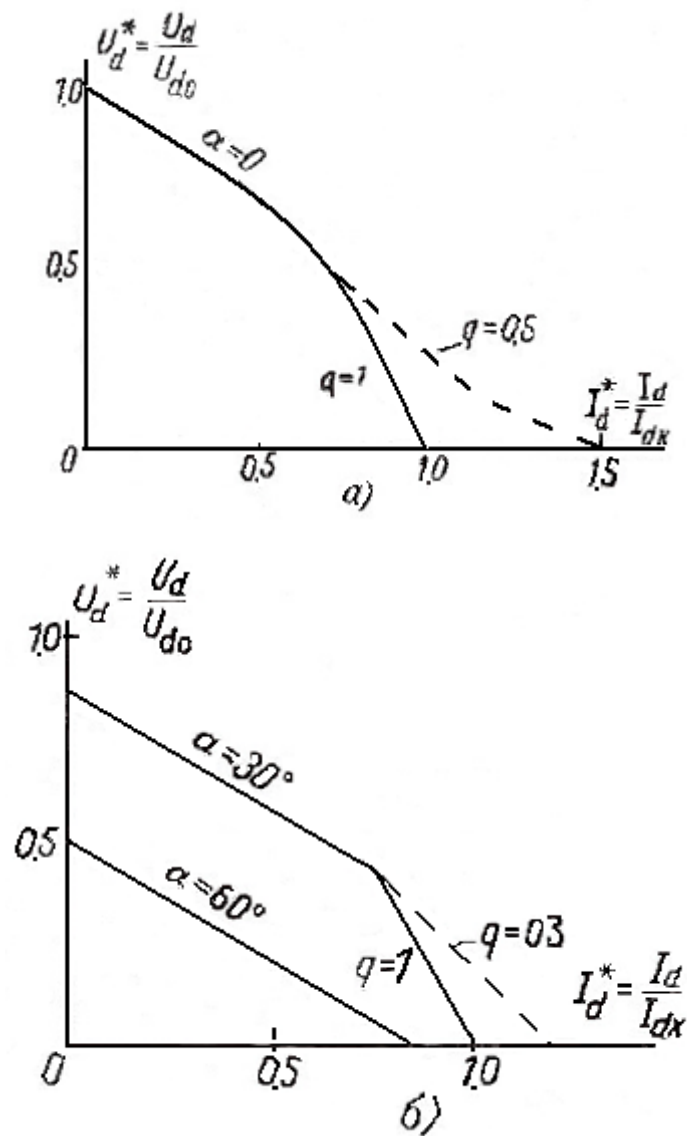


Рисунок 2.7 – Повні зовнішні характеристики шестифазної схеми із зрівняльним реактором

В результаті проведених розрахунків був обраний силовий трифазний трансформатор з двома вторинними обмотками типу ТСП-380/24-Г у захищеному виконанні, первинна обмотка з'єднана в пряму зірку, а дві вторинні в пряму та зворотну, оптотиристорний модуль – МТ0Т08/3-120-4 АЕ2036ММ-20Н-00У3.

З ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВИПРЯМЛЯЧЕМ

3.1 Критерії порівняння мікроконтролерів різних фірм

Мікроконтролери (МК) є наймасовішими мікропроцесорними пристроями сучасності – їх застосовують у задачах вимірювання, обробки інформації та управління в діапазоні від побутової техніки до систем промислової автоматизації [3]. Вбудовані мікроконтролери відрізняються від універсальних мікропроцесорів тим, що містять на одному кристалі процесорне ядро, пам'ять програм і даних та розвинену периферію, що дозволяє будувати повноцінні системи управління з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів [4].

Виробництвом мікроконтролерів займаються більшість провідних напівпровідникових компаній: Microchip Technology (сімейства PIC, AVR), STMicroelectronics (STM32), Texas Instruments (MSP430), NXP Semiconductors (LPC, Kinetis). На відміну від стандартних аналогових компонентів, мікроконтролери різних виробників рідко є взаємозамінними через принципово відмінні архітектурні рішення та склад периферії [5]. Вибір конкретного МК для системи управління є відповідальним інженерним рішенням, що суттєво впливає на функціональні можливості, надійність та вартість кінцевого пристрою.

До найважливіших критеріїв порівняння та вибору мікроконтролерів відносять такі.

1. Розрядність. Розрядність МК збігається з розрядністю його арифметично-логічного пристрою (АЛП). Якщо АЛП є 8-розрядним, то будь-яка операція над числами такої довжини виконується однією командою – зазвичай за один машинний цикл. Операції над 16-розрядними числами в такому МК потребують ланцюжка команд із пересиланням та збереженням проміжних результатів. Таким чином, продуктивність 32-розрядного МК за інших рівних умов значно перевищує продуктивність 8-розрядного. На ринку спостеріга-

ється стійка тенденція переходу від 8- та 16-розрядних рішень до 32-розрядних: зокрема, серія STM32F0 від STMicroelectronics охоплює ціновий діапазон 8- та 16-розрядних МК, забезпечуючи при цьому вищу продуктивність [6].

2. Споживана потужність. З переходом МК на КМОП-технологію зменшення споживаної потужності досягається насамперед зниженням тактової частоти та напруги живлення, однак зниження частоти зменшує продуктивність. Компромісним рішенням є випуск кількох версій одного МК: у серії AVR фірми Atmel – стандартні (90S) та малоспоживаючі (90LS) версії; у Microchip – серії 16C та 16LC. Практично всі сучасні МК підтримують програмно керовані режими зниженого споживання: Idle, Power-down, Power-save, Standby та інші, що дозволяє зменшити споживаний струм у десятки разів у паузах між активними операціями. Для застосувань із батарейним живленням і надмалим споживанням спеціально орієнтованою є серія MSP430 компанії Texas Instruments.

3. Обсяги та типи вбудованої пам'яті. МК має постійну пам'ять для зберігання програми та оперативну – для проміжних результатів обчислень. Розрізняють типи пам'яті програм: одноразово програмована (OTP), ультрафіолетово стирає (EPROM) та електрично стирає Flash-пам'ять. Flash-пам'ять є найуніверсальнішою, оскільки підтримує внутрішньосхемне програмування (ISP) без демонтажу МК, що дозволяє оновлювати прошивку у готовому виробі. Статична оперативна пам'ять (SRAM) сучасних 32-розрядних МК досягає сотень кілобайт. Додатково на кристалі розміщують EEPROM – енергонезалежну пам'ять для зберігання налаштувань, вміст якої не змінюється після відключення живлення.

4. Тактова частота та продуктивність. Тактова частота пропорційно впливає на швидкодію МК, але є не єдиним показником продуктивності. Об'єктивнішим критерієм є MIPS – кількість мільйонів інструкцій, що виконуються за секунду, – оскільки в різних архітектурах одна інструкція може виконуватися за один, два або більше тактів. Наприклад, ATmega128 на AVR RISC-архітек-

турі досягає 1 MIPS/МГц завдяки виконанню більшості інструкцій за один машинний цикл [5]. Мікроконтролери STM32 серії F4 з ядром ARM Cortex-M4F при частоті 168 МГц забезпечують понад 200 MIPS і додатково підтримують блок DSP-інструкцій та апаратний модуль обчислень із плаваючою комою (FPU).

5. Склад периферійних пристроїв. Набір інтегрованих периферійних пристроїв є одним із ключових чинників вибору МК для конкретного застосування. Розрізняють два класи периферії: пристрої, що забезпечують надійну роботу самого МК, та пристрої вводу/виводу для взаємодії із зовнішнім середовищем.

До першого класу відносять: сторожовий таймер (Watchdog) – апаратну схему, яка здійснює скидання МК при зависанні програми (оскільки коректна програма є циклічною, вихід поза цикл однозначно свідчить про збій [3]); схему виявлення провалів напруги живлення (Brown-Out Detector); систему обробки внутрішніх і зовнішніх переривань.

До другого класу відносять: паралельні порти вводу/виводу з індивідуальним програмуванням кожної лінії; послідовні інтерфейси USART, SPI, I²C, USB, CAN; таймери-лічильники (8- або 16-розрядні) в кількості від одного до шести і більше; аналого-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі різної розрядності; модулі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ/PWM) для керування потужними навантаженнями. Сучасні МК серії STM32F3 містять також вбудовані операційні підсилювачі та компаратори, що суттєво скорочує кількість зовнішніх компонентів.

6. Архітектурні особливості. Найважливішою архітектурною ознакою є приналежність МК до CISC або RISC класу. CISC (Прінстонська архітектура) передбачає розширений набір команд різної довжини, переданих спільною шиною даних; виконання однієї команди розтягується на кілька тактів. RISC-архітектура (Гарвардська схема з окремою шиною пам'яті програм) базується на зменшеному наборі простих команд, кожна з яких виконується за мінімальну кількість тактів. Завдяки конвеєрній обробці команд і розділним шинам

RISC-МК досягають значно вищої питомої продуктивності. Розрядність шини команд може бути довільною (12, 14, 16 або більше біт) незалежно від розрядності шини даних.

Практично всі сучасні МК належать до RISC-класу. Виняток становить лише сімейство MCS-51, яке попри CISC-природу продовжує випускатися у десятках модифікацій різними виробниками завдяки величезній накопиченій програмній базі та широкому застосуванню у промисловості. Мікроконтролери AVR (Atmel/Microchip) мають базовий набір із 192 команд; мікроконтролери STM32 реалізують набір інструкцій Thumb-2, що поєднує компактність 16-розрядних команд із продуктивністю 32-розрядних.

7. Надійність та промислове виконання. Для систем управління промисловим обладнанням суттєвими є температурний діапазон роботи та стійкість до електромагнітних завад. Промислові МК випускаються у виконаннях із розширеним температурним діапазоном ($-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) і мають підвищені вимоги до захисту вводів від електростатичних розрядів та кондуктивних завад. Наявність апаратних засобів самодіагностики та захисту – сторожового таймера, детектора провалів живлення, блокування некоректних адрес пам'яті – є обов'язковою вимогою для МК, що застосовуються в системах управління силовими перетворювачами [8].

8. Доступність інструментальних засобів та підтримка. Важливим практичним критерієм є наявність безкоштовного середовища розробки, компілятора, бібліотек та документації. Для МК STM32 компанія STMicroelectronics надає безкоштовне середовище STM32CubeIDE з інструментом графічного конфігурування периферії STM32CubeMX. Для AVR-мікроконтролерів застосовується Microchip Studio або компілятор GCC з відкритим кодом [7]. Наявність розвиненої екосистеми суттєво скорочує час розробки та налагодження, що є вагомим економічним чинником при проектуванні систем управління.

Таким чином, при виборі мікроконтролера для системи управління випрямлячем необхідно комплексно враховувати всі зазначені критерії. Для задач

регулювання вихідних параметрів (струму та напруги), реалізації захисних функцій, формування імпульсів керування силовими елементами та організації інтерфейсу оператора визначальними є: продуктивність (тактова частота, розрядність, MIPS), склад вбудованих АЦП, таймерів і модулів ШІМ, надійність у промисловому електромагнітному середовищі, а також наявність зручних інструментальних засобів розробки.

3.2 Порівняння мікроконтролерів

Для розробки коду різних найпростіших операцій та виконання його в режимі симулятора було використано платформу розробника Embedded Workbench™ IAR Systems. Для всіх розглянутих застосувань було пораховано сумарний розмір коду програми та кількість командних циклів, необхідних для виконання

У таблиці 3.1 наведено коефіцієнти поділу частоти задавального генератора, що використовуються для формування сигналів синхронізації обчислювального ядра досліджених мікроконтролерів. Даний параметр є одним із ключових при оцінці швидкодії мікроконтролера, оскільки він безпосередньо визначає тривалість одного командного циклу: чим менший коефіцієнт поділу, тим вища реальна продуктивність пристрою при однаковій тактовій частоті задавального генератора. Повний час виконання довільної програмної послідовності визначається як добуток загальної кількості командних циклів, необхідних для її виконання, на тривалість одного командного циклу, яка, у свою чергу, залежить від коефіцієнта поділу та робочої частоти генератора. Таким чином, порівняння коефіцієнтів поділу дозволяє об'єктивно оцінити відносну швидкодію різних мікроконтролерів в однакових умовах тактування. Отримані значення зведено у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти поділу частоти задаючого генератора для формування сигналів синхронізації обчислювального ядра

Мікроконтролер	Коефіцієнт розподілу
MSP430F135	1
ATmega8	1
PIC18F242	4
8051	12
H8/300L	2
MC68HC11	4

У таблиці 3.2 показані сумарні розміри коду та кількість командних циклів, наведені до відповідних сумарних розмірів коду та циклів.

Таблиця 3.2 – Наведені результати

Мікроконтролер	Наведений сумарний розмір коду	Наведена сумарна кількість командних циклів
1	2	3
MSP430F135	1.00	1.00
ATmega8	1.82	1.26
PIC18F242	3.31	1.98
8051	2.45	1.58
H8/300L	2.45	1.78
MC68HC11	2.36	3.76

Таблиця 3.3 містить розміри кодів програм (в байтах) та кількості командних циклів досліджених прикладних програм для кожного мікроконтролера.

Таблиця 3.3 – Розмір кодів та кількість командних циклів

Застосування	MSP43 0F135	ATmega 8	PIC18F24 2	8051	H8/300 L	MC68HC 11
	байт циклів					
1	2	3	4	5	6	7
8-бітна математика	172	116	386	141	354	285
	299	157	318	112	680	387
8-бітний комутатор	180	342	404	209	362	387
	50	131	109	84	388	214
16-бітна математика	172	174	598	361	564	315
	343	319	625	426	802	508
16-бітна матриця	156	570	846	825	450	490
	5784	24426	27021	29468	15280	23164
16-бітний комутатор	178	388	572	326	404	405
	49	144	163	120	398	230
32-бітна математика	250	316	960	723	876	962
	792	782	1818	2937	1756	1446
Операції з плаваючою точкою	662	1042	1778	1420	1450	1429
	1207	1601	1599	2487	2458	4664
Фільтр з КІХ	668	1292	2146	1915	1588	1470
	152193	164793	248655	206806	245588	567139
Перемноження матриць	252	510	936	345	462	499
	6633	16027	36190	9454	26750	26874
Разом	2808	5114	9302	6880	6866	6622
	170249	213680	336543	269638	303198	640038

Для того, щоб показати вплив апаратного помножувача та повної оптимізації компілятора PIC18F, було зроблено порівняння кодів застосувань для PIC18F242 та PIC18F252. PIC18F452 містить апаратний помножувач, а PIC18F242 – ні. Для створення та виконання досліджуваних додатків був використаний компілятор версії 3.10A компанії IAR для мікроконтролерів сімейства PIC18F. У таблиці 3.4 наведено результати тестів.

Таблиця 3.4 – Вплив апаратного помножувача та повної оптимізації компілятора

Застосування	PIC18F242 Оптимізація: ні- Апаратний пом- ножувач: ні	PIC18F252 Оптимізація: ні- Апаратний пом- ножувач: так	PIC18F452 Оптимізація: повнаАпарат- ний помножу- вач: так
	байт циклів		
1	2	3	4
8-бітна математика	386 318	35 6 292	31 6 2 39
8-бітна 2 Dim мат- риця	312 5433	312 5433	342 4171
8-бітний вибірко- комутатор	404 109	404 109	401 98
16-бітна математика	598 625	571 545	534 513
16-бітна 2 Dim мат- риця	846 27021	846 27021	807 5368
16-бітний вибірко- вий комутатор	572 163	572 163	572 16 1
32-бітна математика	960 1818	945 1652	923 1610

кінець таблиці 3.4

1	2	3	4
Операції з плаваючою точкою	1778	1823	1786
	1599	1 384	1375
Фільтр з КІХ	2146	2269	2276
	248655	239769	227518
Перемноження матриць	936	879	907
	36190	632 9 7	38957
Разом	9302	9258	89 58
	336543	32 0030	3098 62

Для формування тестових прикладних задач застосовувався компілятор мови «С», інтегрований у середовище розробки (IDE) Embedded Workbench виробництва компанії IAR Systems. Демонстраційні версії даного середовища для всіх досліджуваних мікроконтролерів було отримано з офіційного сайту компанії IAR Systems. Конкретні версії програмного забезпечення, використані при розробці прикладних задач для кожного з розглянутих мікроконтролерів, наведено у таблиці 3.5. Для кожного з розроблених прикладних рішень визначено обсяг програмного коду, що дозволяє об'єктивно оцінити ефективність використання програмної пам'яті відповідного мікроконтролера.

Таблиця 3.5 – Версія «С» компілятора

Мікроконтролер	Версія «С» компілятора компанії IAR
MSP430F135	2.21B
Atmel ATmega8	3.10C
Microchip PIC18F242	6.10A
Generic 8051	2.12A
Renesas H8/300L	4.20A
Motorola MC68HC11	4.45A

Усі прикладні задачі тестувалися за умови відключеного оптимізатора компілятора (значення параметра «none»). Таке рішення було прийнято свідомо — з метою виключення будь-якого впливу оптимізації на результати вимірювань. Зокрема, практика показала, що при увімкненому оптимізаторі компілятор для мікроконтролерів сімейства 8051 міг обчислювати результати окремих математичних функцій ще на етапі компіляції, що спотворювало реальну картину продуктивності.

За підсумками проведеного порівняльного дослідження для вдосконалення системи управління випрямлячем було обрано мікроконтролер сімейства PIC18F. Даний мікроконтролер повністю відповідає сукупності висунутих технічних вимог і функціональних завдань, забезпечуючи необхідну обчислювальну потужність, достатній набір вбудованої периферії та прийнятні економічні характеристики.

Нове сімейство FLASH-мікроконтролерів від Microchip PIC18FXX2 є комбінацією широкого набору периферійних модулів і потужного обчислювального ядра. Забезпечуючи продуктивність 10 MIPS при тактовій частоті 10 МГц, працюючи в широкому діапазоні живлячої напруги 2.0...5.5 В мікроконтролери PIC18F242, PIC18F252, PIC18F442, PIC18F452 є надзвичайно цікавим рішенням.

Нові осередки пам'яті, виконані за технологією (PEEC), втричі менше, ніж попереднє покоління осередків EPROM, що дозволяє знизити вартість, зменшити час програмування, підвищити надійність та час зберігання інформації для областей пам'яті програм та даних.

Основні характеристики мікроконтролерів PIC18F XX 2 зведені у таблиці 3.6

Мікроконтролер PIC18 F 242 (Рис. 3.1) за всіма параметрами та вимогами підходить для управління проектованим випрямлячем.

Мікроконтролери сімейства PIC18F оснащені до 32 Кбайт самопрограмованої FLASH-пам'яті програм, що є достатнім обсягом для розміщення повно-

цінного програмного забезпечення системи управління випрямлячем, включно з алгоритмами фазового керування тиристорами, обробки вимірювальних сигналів та реалізації захисних функцій. Обсяг оперативної пам'яті даних користувача складає 1,5 Кбайт ОЗП, а для зберігання налаштувань і калібрувальних коефіцієнтів, що мають зберігатися при відключенні живлення, передбачено 256 байт енергонезалежної пам'яті EEPROM.

Таблиця 3.6 – Характеристики мікроконтролерів PIC18F XX 2

Пристрій	Пам'ять програм		пам'ять даних (Байт)	EEPROM пам'ять
	Flash (байт)	Команд		
1	2	3	4	5
PIC18F242	16к	8192	768	256
PIC18F252	32к	16384	1536	256
PIC18F442	16к	8192	768	256
PIC18F452	32к	16384	1536	256

Вбудований 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач з кількістю каналів до восьми дозволяє одночасно вимірювати декілька аналогових сигналів — зокрема, вихідний струм через шунт, вихідну напругу випрямляча та температуру силових елементів — без застосування зовнішніх АЦП. Це суттєво спрощує схемотехніку та підвищує надійність пристрою в цілому.

Периферійна підсистема мікроконтролера є розвиненою і охоплює як цифрові, так і аналогові модулі. Конфігурований модуль MSSP, що підтримує роботу в режимах SPI та I2C, забезпечує зручну організацію обміну даними із зовнішніми пристроями — наприклад, із цифровими індикаторами або мікросхемами пам'яті. Два 10-бітових ШІМ-модулі дозволяють формувати високоточні імпульси керування тиристорами з необхідною фазовою затримкою. Наявність 9-бітного адресованого USART забезпечує можливість організації зв'язку з пультом дистанційного керування та зовнішніми системами моніторингу.

Три 16-розрядних та один 8-розрядний таймери з підтримкою перезавантаження надають гнучкі засоби для формування інтервалів часу та синхронізації з частотою мережі. Апаратний WDT-таймер підвищує відмовостійкість системи, автоматично перезапускаючи мікроконтролер у разі збою програми. Вбудований модуль апаратного множення восьмирозрядних чисел за один машинний такт прискорює виконання математичних операцій у регуляторі. Програмовані схеми контролю напруги живлення BOD та LVD забезпечують коректну роботу мікроконтролера при відхиленнях напруги живлення, що особливо важливо в умовах промислового виробництва.

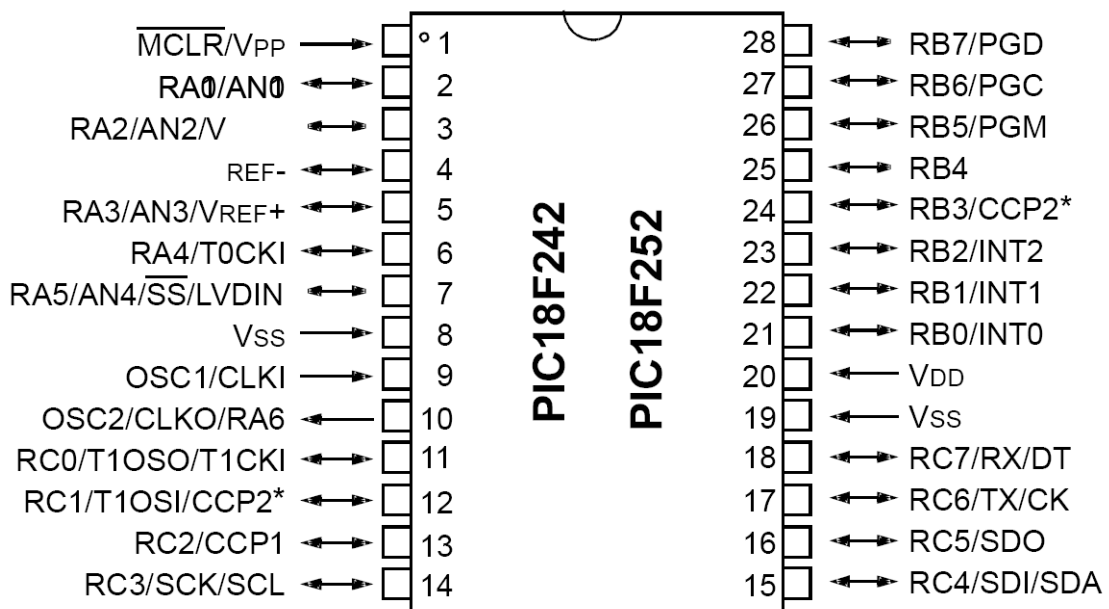


Рисунок 3.1 – Розміщення виводів мікроконтролера PIC18F242.

Окремої уваги заслуговує режим самопрограмування мікроконтролера. Програмне забезпечення може оновлюватися безпосередньо під час роботи пристрою в штатному режимі без його відключення від мережі: нова версія прошивки завантажується через будь-який доступний комунікаційний інтерфейс — IrDA, TCP/IP, RS-232 або CAN. Принципово важливо, що даний режим підтримується у всьому діапазоні робочих напруг мікроконтролера. Для його практичної реалізації необхідно передбачити у складі програмного забезпечення спеціальний завантажувальний модуль (bootloader), який забезпечує

приймання, верифікацію та запис нового коду до FLASH-пам'яті. Така можливість є вагомою перевагою при подальшому супроводі виробу в експлуатації, оскільки дозволяє вносити зміни до алгоритмів керування або додавати нові функції захисту без демонтажу обладнання. Структурна схема мікроконтролерів зображена на рис. 3.5

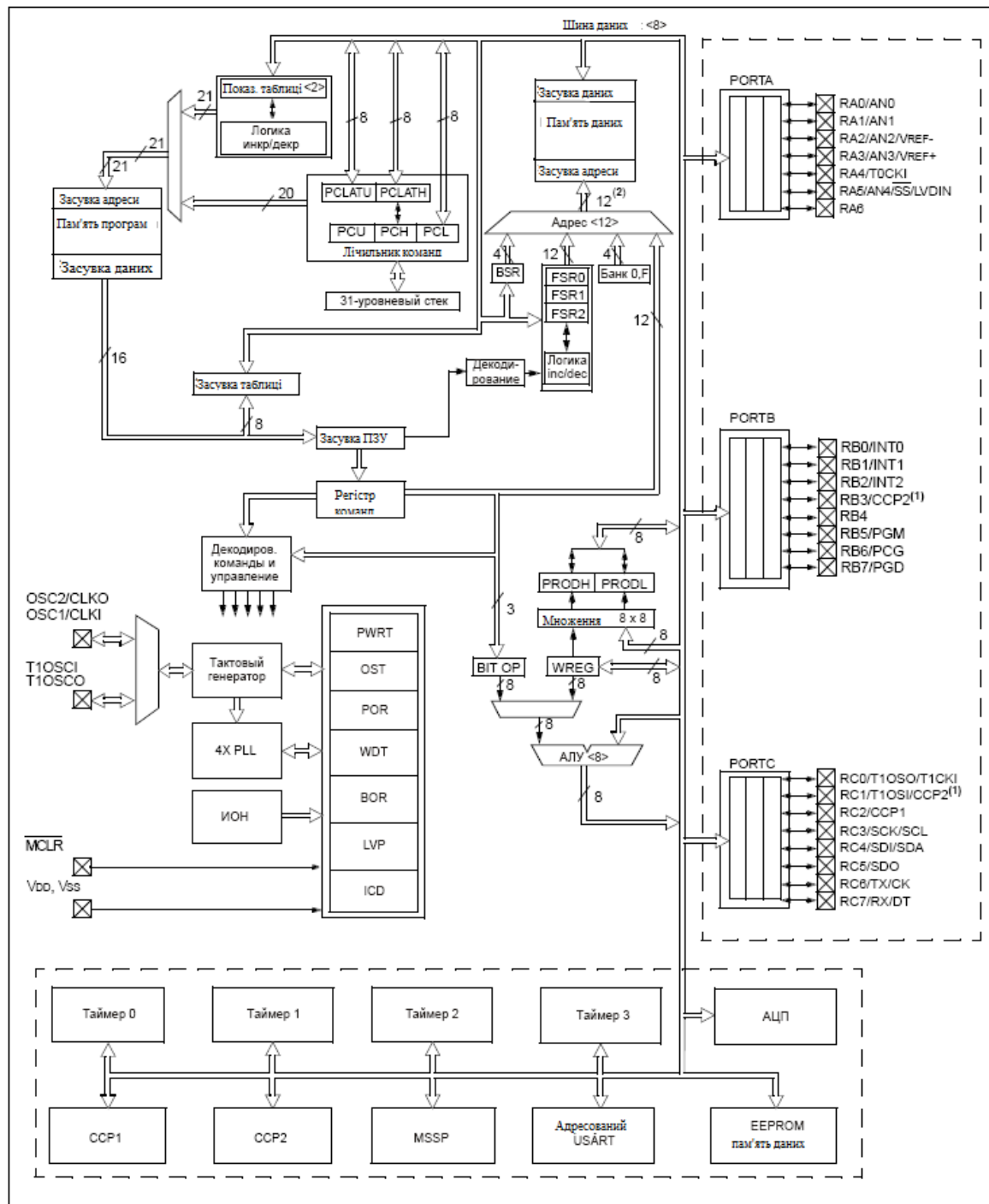


Рисунок 3.2 – Структура мікроконтролера PIC18F242

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту розроблено керований випрямляч з мікропроцесорною системою управління, призначений для живлення гальванічних ванн у промислових умовах.

На першому етапі роботи проведено порівняльний аналіз існуючих силових схем та конструкторських рішень випрямлячів для гальванічного виробництва. За результатами аналізу обґрунтовано вибір аналога – випрямляча типу «ІОН», силова частина якого побудована за подвійною трифазною схемою із зрівняльним реактором. Така схема забезпечує знижений рівень пульсацій випрямленої напруги, ефективне використання трансформатора та можливість плавного регулювання вихідних параметрів у широкому діапазоні.

За результатами виконання проєкту отримано такі основні результати:

Спроектовано випрямляч для живлення гальванічних ванн з мікропроцесорним керуванням, який має такі номінальні характеристики:

- номінальна вихідна напруга U_d – 24 В;
- номінальний вихідний струм I_d – 200 А.

Проведено розрахунок і вибір основних елементів силової частини: силового трансформатора, зрівняльного реактора, тиристорів та елементів захисту від аварійних режимів роботи.

У рамках дослідження мікроконтролерних засобів управління виконано порівняльний аналіз характеристик різних сімейств 16-розрядних мікроконтролерів за технічними та економічними критеріями. Аналіз дозволив визначити особливості кожного з розглянутих сімейств і обґрунтувати вибір оптимального мікроконтролера для реалізації системи управління випрямлячем, що забезпечує необхідну точність формування керуючих імпульсів, надійний захист силової частини та зручність подальшого обслуговування пристрою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
2. Победаш К. К., Святненко В. А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с.
3. Цирульник С. М., Азаров О. Д., Крупельницький Л. В., Трояновська Т. І. Програмування мікроконтролерів AVR : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2018. 111 с.
4. Мікропроцесорна техніка : навч. посіб. / В. В. Ткачов та ін. Дніпропетровськ : НГУ, 2012. 492 с.
5. Замаруєв В. В., Єресько О. В. Спеціалізовані мікроконтролерні системи. Теорія і практика : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2007. 268 с.
6. Реут Д. Т. Програмування мікроконтролерів STM32 у STM32CubeIDE : навч. посіб. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2023. URL: <https://lib.nuwm.edu.ua/> (дата звернення: 10.05.2026).
7. Грищук Ю. С. Мікроконтролери: архітектура, програмування та застосування в електромеханіці : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2019.
8. Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Програмування для мікропроцесорних систем : навч. посіб. до виконання лаб. робіт. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.

ДОДАТОК А

Габаритні приєднувальні розміри та електрична схема.

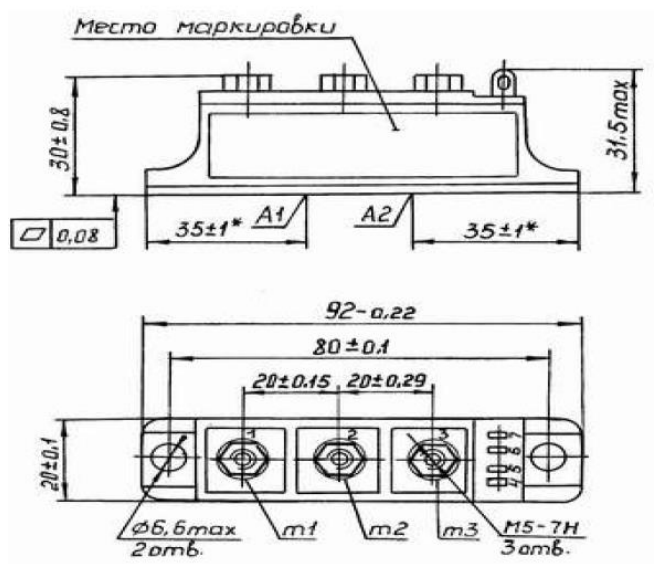


Рисунок А.1-Габаритні розміри

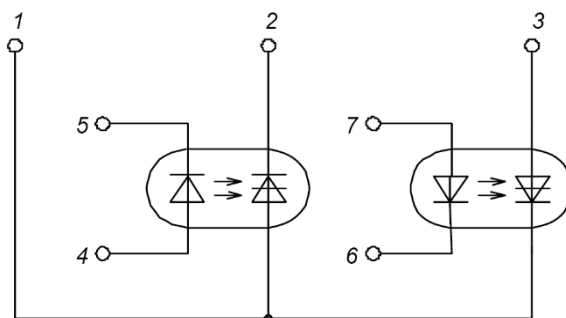


Рисунок А.2 – Електрична схема МТОТО

- А1, А2-області контролю температури основного модуля;
- m1, m2, m3-контрольні точки вимірювання імпульсної напруги у відкритому стані;
- 1, 2, 3 – основні виводи;
- 4, 5, 6, 7 – виводи керуючих електродів.