

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 12В, 400А

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи Е-412

Спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

УЛЬЯНЧЕНКО А.І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВАСИЛЕВСЬКИЙ В.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ДОНОВСЬКА І.С.

(ПРИЗВИЩЕ 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)

УЛЬЯНЧЕНКО Андрій Іванович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Випрямляч для живлення гальванічних ванн 12В, 400А 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 $U = 12$ В; номінальний вихідний струм $I = 400$ А; коефіцієнт пульсацій струму – менше 1%; відхилення від встановлених значень – не більше 2%; діапазон регулювання – від 2% до макс.; спосіб охолодження ЛШМ – примусовий водяний; охолодження силового трансформатора – повітряне; мікропроцесорне керування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд існуючих конструкцій; 2. Розрахункова частина; 3. Технологічна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) 1. НУЗП 435515.017 СК Випрямляючий блок – 1 арк. А1; 2. НУЗП 432735.017 СК Тиристор – 1 арк. А3; НУЗП 300155.017 Ушко – 1 арк. А3; 4 НУЗП 758111.017 Шпилька – 1 арк. А3; 5. НУЗП 302634.017 Штуцер – 1 арк. А3; 6. НУЗП 614521.017 Шина – 1 арк. А3; НУЗП 68555.017 Ввод – 1 арк. А3; НУЗП 301612.017 Гвинт – 1 аркуш А3; НУЗП 682511.017 Шина – 1 арк. А3; НУЗП 745426.017 Ушко – 1 арк. А3; НУЗП 745521.017 Скоба – 1 арк. А3; НУЗП 716741.017 Куток – 1 арк. А3; НУЗП 741726.017 Пластина – 1 арк. А3.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, 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)

Андрій УЛЬЯНЧЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Володимир ВАСИЛЕВСЬКИЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 56 с., 11 рис., 5 табл., 7 джерел.

ВИПРЯМЛЯЧ, ТРАНСФОРМАТОР, ТИРИСТОР, КОНТРОЛЕР,
ГАЛЬВАНІКА, ЕЛЕКТРОЛІЗ.

Об'єкт проєктування – перетворювач для гальваніки з номінальною напругою 12В, номінальним струмом 400А.

Мета проєктування – розробка випрямляча для живлення гальваніки та електролізу з мікропроцесорним керуванням.

Методи дослідження – порівняльний аналіз існуючих схем трифазних випрямлячів; інженерний розрахунок і моделювання параметрів силового трансформатора, зрівняльного реактора, захисної апаратури; розрахунок і вибір тиристорних модулів; аналіз показників технологічності конструкції.

В роботі виконано розрахунок силового трифазного трансформатора типу ТСП потужністю 7,25 кВА та конструктивних параметрів зрівняльного реактора. Обґрунтовано вибір керованих вентилів (тиристорів) та швидкодіючого автоматичного вимикача для захисту від перевантажень і коротких замикань.

У технологічній частині проведено оцінку технологічності конструкції, розроблено технологічний маршрут виготовлення шафи випрямляча та субблоків, визначено методи контролю якості на етапах загального складання і налаштування.

Впровадження розробленого випрямляча забезпечує високу стабільність вихідного струму (коефіцієнт пульсацій $< 1\%$), що суттєво підвищує якість гальванічного покриття, знижує витрати матеріалів, збільшує продуктивність установок і покращує загальну енергоефективність перетворювального агрегату.

ЗМІСТ

С.

Вступ.....	6
1 Огляд існуючих конструкцій	8
1.1 Випрямлячі для гальваніки виробництва Dynapower Corporation та KraftPowercon Sweden	8
1.2 Випрямляч типу «ІОН»	10
1.3 Будова та принцип роботи випрямляча типу «ІОН».....	14
1.4 Постановка завдання на дипломний проєкт	17
2 Розрахункова частина	19
2.1 Розрахунок силового трансформатора	19
2.3 Зовнішня характеристика випрямляча	22
2.4 Розрахунок коефіцієнта потужності	30
2.5 Вибір швидкодіючого автоматичного вимикача	31
3 Технологічна частина	39
3.1 Опис конструкції та технологічного призначення виробу	39
3.2 Якісний аналіз технологічності конструкції.....	39
Аналіз технологічності корпусних деталей.	40
Аналіз технологічності монтажних з'єднань.	41
Аналіз технологічності складання.	41
3.3 Кількісна оцінка технологічності.....	42
3.4 Вибір матеріалів та комплектуючих	45
3.5 Технологічний маршрут виготовлення	46
3.6 Технологічний процес регулювання та налаштування.....	48
3.7 Контроль якості виробу.....	50
3.8 Упаковка та транспортування	52
3.9 Вимоги до умов зберігання.....	53
Висновки	54
Перелік джерел посилання	56

ВСТУП

Випрямлячі використовуються в блоках живлення радіоелектронних пристроїв для перетворення змінної напруги на постійну. Схема будь-якого випрямляча містить три основні елементи [1]:

1. Трансформатор призначений для перетворення значення напруги мережі до значення, необхідного для роботи випрямляча. Він також забезпечує електричну (гальванічну) розв'язку мережі і навантаження.

3. Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену – пульсуючу однополярну. Вона, як правило, виконується на напівпровідникових ключах. Згладжувальний фільтр перетворює випрямлену напругу у постійну.

3. Фільтри виконуються на реактивних елементах, що мають властивість накопичувати електричну або електромагнітну енергію: конденсаторах, дроселях.

Випрямлячі можуть бути класифіковані за низкою ознак [2]:

- за схемою випрямлення – однонапівперіодні, двонапівперіодні, мостові, з подвоєнням (множенням) напруги, багатофазні та ін;
- за типом випрямляючого елемента – лампові (кенотронні), напівпровідникові, газотронні та ін.;
- за величиною випрямленої напруги – низької напруги і високої ;
- за призначенням – для живлення анодних ланцюгів, ланцюгів екрануючих сіток, ланцюгів керуючих сіток, колекторних ланцюгів транзисторів, для зарядки акумуляторів та ін.

Основні характеристики випрямлячів [3]:

Номінальна напруга постійного струму – середнє значення випрямленої напруги, задане технічними вимогами. Зазвичай вказується напруга до фільтра і напруга після фільтра або окремих його ланок. Визначається значенням напруги, необхідним для пристроїв, що живляться.

Номінальний випрямлений струм – середнє значення випрямленого струму, тобто його стала складова, задана технічними вимогами. Визначається результуючим струмом всіх ланцюгів, що живляться випрямлячем.

Напруга мережі – напруга мережі змінного струму, що живить випрямляч.

Пульсація – змінна складова напруги або струму на виході випрямляча. Це якісний показник випрямляча.

Частота пульсацій – частота найбільш різко вираженої гармонійної складової напруги або струму на виході випрямляча. Для найпростішої-однополуперіодної схеми випрямляча частота пульсацій дорівнює частоті мережі живлення.

Коефіцієнт пульсацій – відношення амплітуди найбільш різко вираженої гармонійної складової напруги або струму на виході випрямляча до середнього значення напруги або струму. Розрізняють коефіцієнт пульсацій на вході фільтра та коефіцієнт пульсацій на виході фільтра. Значення коефіцієнта пульсацій на виході фільтра визначаються характером навантаження.

Коефіцієнт фільтрації (коефіцієнт згладжування) – відношення коефіцієнта пульсацій на вході фільтра до коефіцієнта пульсацій на виході фільтра. Для багатоланкових фільтрів коефіцієнт фільтрації дорівнює добутку коефіцієнтів фільтрації окремих ланок.

Таким чином, випрямлячі займають одне з центральних місць у сучасній електроніці та електротехніці, і питання їх проектування не втрачає своєї актуальності. Зростання вимог до якості електроживлення, мініатюризація електронної апаратури та широке впровадження відновлюваних джерел енергії суттєво підвищують вимоги до характеристик випрямних пристроїв. Паралельно розвиток силових електроніки відкриває нові можливості для підвищення ККД, зменшення масогабаритних показників та покращення динамічних характеристик випрямлячів. У зв'язку з цим дослідження, розрахунок та оптимізація схем випрямлення залишаються актуальним завданням як у науковому, так і в практичному відношенні, що й визначає тематику та мету даної дипломної роботи.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Випрямлячі для гальваніки виробництва Dynapower Corporation та KraftPowercon Sweden

Компанія Dynapower Corporation (штат Вермонт, США) є одним із провідних світових виробників силових перетворювачів для промислових застосувань з більш ніж шістдесятирічним досвідом роботи в галузі. Серія Custom SCR Rectifier (рис. 1.1) призначена для широкого спектра застосувань, включно з гальванічними покриттями, анодуванням, виробництвом водню та сталеливарною промисловістю.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд випрямляча виробництва Dynapower Corporation

Основні електричні параметри випрямляча: вхідна напруга – до 6000 В АС, трифазне живлення з частотою 50 або 60 Гц; вихідна напруга – до 1000 В

DC; вихідний струм – до 50 000 A DC; коефіцієнт пульсацій вихідної напруги – не більше 5% при повному навантаженні (передбачені опції додаткової фільтрації для зниження цього показника); діапазон регулювання – від 10 до 100% номінального значення; точність стабілізації напруги та струму – $\pm 1\%$, а з функцією стабілізації напруги – $\pm 0,5\%$. Пристрій розрахований на безперервну роботу при номінальному навантаженні за температури навколишнього середовища до 40°C.

Охолодження може бути примусовим повітряним, прямим водяним або за замкненим контуром. Ступінь захисту корпусу: NEMA 1 для повітряного охолодження та NEMA 2 для водяного.

Стандартний комплект захистів включає: захист від надструму, перенапруги, перегріву, короткого замикання, електронний детектор пікового струму, схему плавного пуску по ланцюгу змінного струму та сторожовий таймер тиристорів (SCR Watchdog).

Система керування реалізована на базі програмованого сенсорного контролера з можливістю керування одним або одночасно до десяти випрямлячів з єдиного інтерфейсу. Передбачені також варіанти з аналоговим керуванням та PC-інтерфейсом. Комунікаційні інтерфейси: Ethernet IP, Modbus TCP, аналоговий (4–20 mA та 0–10 V), Profibus, DeviceNet, що забезпечує повну інтеграцію в автоматизовані виробничі системи.

Пристрої оснащені програмованим таймером для відключення випрямляча або подачі сигналу після закінчення технологічного циклу, а також функцією плавного розгону вихідної напруги від нуля до заданого значення з вибором часу розгону через перемикач DIP у п'ятнадцяти діапазонах. Реалізована функція автоматичної густини струму, що дозволяє підтримувати постійну густину струму при змінних розмірах навантаження. Для великих установок застосовується модульна архітектура на базі IGBT-чопперів, де кілька модулів об'єднуються для досягнення необхідного струму. Охолодження може бути повітряним, водяним, масляним або комбінованим.

Компанія KraftPowercon Sweden AB є європейським лідером у виробництві силових перетворювачів для електрохімічних технологій. Випрямляч FlexKraft є модульним пристроєм, розробленим для живлення гальванічних ванн у процесах нанесення покриттів, анодування та металізації друкованих плат. Конструкція базується на технології первинного перетворення (SMPS) і розрахована на застосування там, де важливі малі габарити, висока надійність і висока якість струму. Ключовими характеристиками є: висока надійність, модульність, стійкість до умов гальванічного виробництва, сумісність з автоматизованими системами керування, низький рівень пульсацій вихідного струму, висока точність і компактність.

Діапазон вихідних параметрів серії становить від 0 до 60 В і від 0 до 48 000 А, що забезпечує можливість застосування на об'єктах різної потужності. Пристрій розрахований на безперервну роботу при номінальному навантаженні та підтримує аналоговий інтерфейс із чотирма входами та чотирма виходами з гальванічною розв'язкою; сигнали керування та стану – 0–10 В DC або 0/4–20 мА. При необхідності збільшення вихідного струму до одного керуючого блоку може підключатися до десяти силових модулів.

Стабілізація вихідного струму забезпечується з точністю в межах 1% від номінального значення незалежно від коливань напруги мережі та змін опору навантаження, що гарантує рівномірну товщину гальванічного покриття та дозволяє економити матеріали. Передбачені опції реверсу полярності, імпульсного режиму роботи та програмування профілю струму.

1.2 Випрямляч типу «ІОН»

Випрямлячі типу «ІОН» (рис. 1.2) призначені для перетворення трифазного змінного струму промислової частоти у постійний струм із регульованими параметрами. Вони належать до класу регульованих

стабілізованих реверсивних перетворювачів і можуть комплектуватися як водяним, так і природним охолодженням залежно від умов експлуатації.

Основною сферою застосування випрямлячів цього типу є живлення гальванічних ванн та установок електричної антинакипної обробки води. Крім того, завдяки можливості стабілізації як напруги, так і струму на виході, вони широко використовуються як універсальні джерела живлення для інших споживачів, що висувають підвищені вимоги до стабільності електроживлення.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд випрямляча серії «ІОН»

За необхідності випрямлячі можуть виготовлятися у нереверсивному виконанні, що позначається додаванням літери «Н» після цифри порядкового номера виконання в найменуванні виробу (табл. 1.1).

Випрямлячі розраховані на експлуатацію у закритих приміщеннях або під навісом за умови відсутності прямого впливу сонячної радіації та атмосферних опадів. Нормальна робота пристроїв забезпечується за таких кліматичних умов: температура навколишнього повітря – від 1 до 40°C; висота над рівнем

моря – не більше 1000 м; середньомісячна відносна вологість повітря – не більше 80% при температурі 25°C. Додатковою вимогою є відсутність пожежо- та вибухонебезпечного середовища в зоні встановлення обладнання.

Таблиця 1.1 – Основні параметри перетворювачів «ІОН»

Умовне позначення	Тип випрямляча	Номінальні вихідні параметри		Номінальний вхідний струм, А	Габаритні розміри, мм	Маса, кг
		струм, А	напруга, В			
ІОН-10-0	В-ТПВ-400/400-6	400	6	6.3	500×400×970	200
ІОН-10-1	В-ТПВ-400/400-12	400	12	14	500×400×970	200

У складі випрямляча застосовується тиристорний модуль типу МТОТО 8/3-160-4-2 У2 відповідно до ТУ У32.1-30077685-003-2003. Даний модуль є силовим напівпровідниковим елементом, що безпосередньо забезпечує процес керованого випрямлення, і його характеристики значною мірою визначають електричні параметри всього перетворювача.

Модуль має такі технічні характеристики:

- повторювана імпульсна напруга у закритому стані – 400 В, що визначає максимально допустимий рівень зворотної напруги в штатних режимах роботи;
- робоча напруга – 320 В, яка відповідає номінальному рівню напруги в силовому колі;
- граничний середній струм у відкритому стані – 160 А, що характеризує максимально допустиме теплове навантаження на елемент у тривалому режимі;
- ударний (несинусоїдальний) струм – 3,3 кА, який визначає стійкість модуля до короточасних струмових перевантажень;

- імпульсна напруга у відкритому стані – 1,6 В при номінальному струмі;
- порогова напруга – 1 В, що характеризує початок відкриття переходу;
- динамічний опір – 0,0011 Ом, який визначає втрати у відкритому стані при протіканні робочого струму;
- максимально допустима температура переходу – 100°C, що є граничною умовою для теплового режиму роботи модуля.

Випрямлячі забезпечують роботу в режимі стабілізації вихідного струму з точністю не менше 2% і в режимі стабілізації вихідної напруги з точністю не менше 1%. Випрямлячі допускають перевантаження по струму до $1,1 I_{\text{ном}}$ протягом часу, що не перевищує 2 год. Функціональна схема випрямляча серії «ІОН» представлена на рис. 1.3.

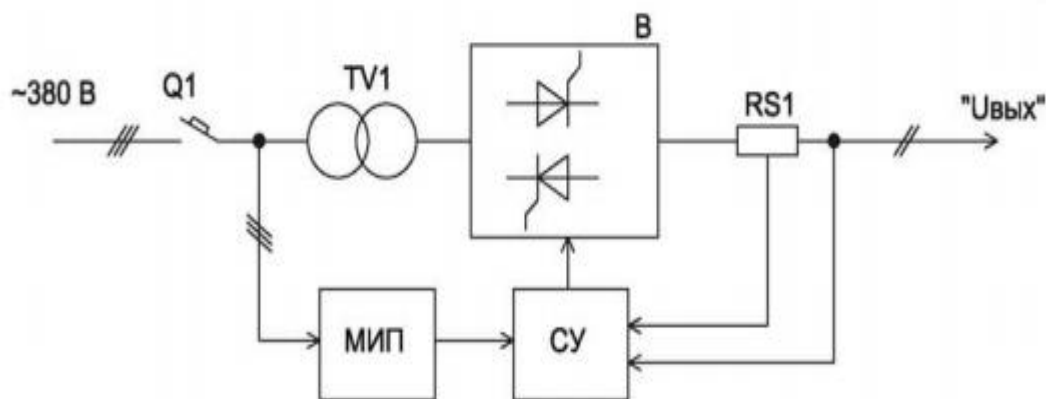


Рисунок 1.3 – Функціональна схема випрямляча

Випрямлячі оснащені комплексом захистів, що забезпечують автоматичне відключення пристрою у разі виникнення аварійних або недопустимих режимів роботи.

Захист від перевантаження спрацьовує при перевищенні вихідного струму до рівня $1,15 \cdot I_0$ і більше за умови, що такий режим триває понад 1,5 с. Це дозволяє відрізнити короточасні пускові струми від тривалого перевантаження, яке становить реальну загрозу для силових елементів.

Захист від зовнішнього короткого замикання реалізований за струмовим принципом із порогом спрацьовування в діапазоні $(1,6-2,0) \cdot I_0$, що забезпечує селективне відключення при виникненні аварії в зовнішньому колі навантаження.

Захист від внутрішнього короткого замикання передбачає виявлення пробою тиристора в силовому блоці та негайне відключення випрямляча з метою запобігання подальшому розвитку аварії та пошкодженню суміжних елементів.

Захист від перегріву спрацьовує при підвищенні температури в місці встановлення датчика на шині силового блоку до значення $(65 \pm 2)^\circ\text{C}$, що відповідає граничному тепловому режиму роботи силових тиристорів. Контроль температури здійснюється безперервно, що дозволяє своєчасно реагувати на погіршення умов охолодження або збільшення теплових втрат.

1.3 Будова та принцип роботи випрямляча типу «ІОН»

Випрямляч «ІОН» конструктивно виконаний у вигляді двох складових частин: шафи випрямляча та пульта дистанційного керування (ПДУ), що з'єднуються між собою спеціальним джгутом із комплекту постачання.

У шафі випрямляча розміщені всі основні силові та керуючі елементи: силовий трансформатор, блок силових тиристорів (БСТ), реактор, панель П1 з допоміжними вузлами та двома друкованими платами системи керування, автоматичний вимикач вхідної напруги, вимірювальний шунт для контролю вихідного струму, а також елементи сигналізації наявності напруги мережі живлення. З метою зменшення впливу агресивного середовища всі елементи, включно з електричними з'єднаннями, за винятком силового трансформатора, розміщені у пиловологозахищених відсіках. Для силового трансформатора застосоване спеціальне захисне покриття.

Усі прилади контролю та органи керування зосереджені на пульті дистанційного керування. Усередині ПДУ-5 розміщено друкований вузол К2.

ПДУ-6 додатково містить вузол гальванічної розв'язки, а на його задній кришці встановлено роз'єм для підключення зовнішніх ланцюгів керування. На лицьовій панелі обох пультів розміщені знакосинтезуючий індикатор, елементи світлової сигналізації та клавіатура з відповідними підписами.

Функціонально випрямляч «ІОН» складається з трьох частин: силової частини, системи фазового керування, регулювання та захисту, а також системи задання режимів роботи і контролю (пульт ПДУ).

До силової частини належать: автоматичний вимикач вхідної напруги Q1; силовий трансформатор TV1, що знижує напругу мережі до необхідного рівня та забезпечує гальванічну розв'язку навантаження від вхідної мережі; блок силових тиристорів БСТ, що складається з 12 тиристорів, зібраних у дві зустрічно ввімкнені трифазні мостові схеми випрямлення; вимірювальний шунт RS1 для контролю вихідного струму.

Після ввімкнення автоматичного вимикача Q1 на первинну обмотку трансформатора подається напруга 380 В частотою 50 Гц. Напруга з вторинної обмотки надходить на входи випрямних мостів. У виконанні з водяним охолодженням тиристири БСТ встановлюються на порожнистій шині, якою циркулює охолоджувальна вода. У виконанні з природним охолодженням тиристорні модулі монтуються на алюмінієвому профілі для повітряного охолодження. Контроль теплового режиму здійснюється датчиком температури – терморезистором спеціальної конструкції, встановленим на охолоджувачі.

На шинах вторинної обмотки трансформатора встановлені геркони S1, що забезпечують роботу електронного захисту при внутрішньому замиканні (пробої тиристора). В окремих виконаннях до вхідних кіл підключені конденсатори C1–C9 для зниження рівня радіоперешкод.

Пульт дистанційного керування може встановлюватися безпосередньо на кришці шафи або окремо на робочому місці оператора на відстані до 50 м від шафи. Випускається у двох модифікаціях: ПДУ-5 та ПДУ-6.

Пульт ПДУ-5 забезпечує: ввімкнення та вимкнення випрямляча зі світловою індикацією; вибір режиму стабілізації струму або напруги; ручне керування полярністю вихідної напруги; плавне регулювання вихідного струму та напруги від нуля до номінальних значень; контроль вихідної напруги стрілочним вольтметром і вихідного струму цифровим амперметром. Пульт підтримує два режими роботи – ручний та програмний. У ручному режимі перемикання полярності та тривалість роботи визначаються оператором. У програмному режимі зміна полярності здійснюється автоматично за попередньо заданою програмою з фіксованими витримками часу: у прямій полярності – від 15 до 700 с, у зворотній – від 1 до 50 с. Додатково пульт забезпечує контроль часу технологічного процесу за допомогою таймера зі звуковою та світловою сигналізацією після закінчення заданого часу, а також контроль товщини покриття лічильником ампер-годин із цифровою індикацією.

Пульт ПДУ-6 має розширені можливості інтеграції із зовнішніми системами керування через додатковий роз'єм із гальванічною розв'язкою. Зовнішня система може передавати команди ввімкнення/вимкнення, вибору режиму стабілізації, зміни полярності та задання рівня вихідного струму. У зворотному напрямку ПДУ-6 видає аналогові сигнали вихідного струму та напруги в діапазоні $(1-10) \pm 0,2$ В, а також дискретні сигнали готовності та аварії (+12 В, 0,1 А).

Для виконань з водяним охолодженням параметри охолоджувальної води повинні відповідати таким вимогам: питомий електричний опір – не менше 40 Ом·м; температура на вході – від 1 до 40°C; робочий тиск на вході – від 0,7 до 6 кгс/см²; витрата – не менше 1 м³/год.

Випрямлячі забезпечують стабілізацію вихідної напруги з точністю не менше 1% і допускають перевантаження струмом до $1,1 \cdot I_0$ тривалістю не більше 2 годин. Час перемикання полярності в режимі стабілізації струму не перевищує 0,25 с, безструмова пауза при реверсі – не більше 0,025 с.

Показники надійності: напрацювання на відмову – не менше 4000 год; середній термін служби – 12 років; середній термін зберігання – 1 рік.

1.4 Постановка завдання на дипломний проєкт

Метою дипломного проєкту є проектування випрямляча для гальванічних виробництв, електролізних установок у кольоровій металургії та установок електричної антинакипної обробки води, а також дослідження електричних параметрів і вибір удосконалених комплектуючих елементів.

У рамках проєкту передбачається вирішення таких завдань: аналіз існуючих схемних і конструктивних рішень та вибір аналога; визначення переваг і недоліків існуючої конструкції; оптимізація розрахунку перетворювача; вибір оптимальних габаритів котушки трансформатора за критерієм мінімального теплового запасу.

Як аналог для проектування обрано випрямляч типу «ІОН», керування яким здійснюється мікропроцесорним контролером. Застосування мікропроцесорного керування суттєво підвищує функціональність і покращує експлуатаційні параметри: у гальванічному виробництві забезпечується висока стабільність і рівна форма вихідного струму, що дозволяє отримувати рівномірне покриття деталей та економити матеріали; в електролізних установках продуктивність підвищується на 30–40%, покращується якість катодних залишків і виключається необхідність у додатковому обладнанні.

Разом з тим існуюча конструкція має низку недоліків: подорожчання матеріалів зумовлює зростання вартості трансформатора і тиристорів, а надмірний запас за тепловими параметрами силової частини призводить до невиправдано великих габаритів виробу. Усунення цих недоліків є необхідною умовою підвищення техніко-економічних показників і конкурентоспроможності проектного пристрою.

Проектований випрямляч повинен відповідати таким технічним вимогам:
номінальна вихідна напруга – 12 В;

номінальний вихідний струм – 400 А;
коефіцієнт пульсацій струму – менше 1%;
відхилення від встановлених значень – не більше 2%;
діапазон регулювання – від 2% до максимального значення;
охолодження силових тиристорів – примусове водяне;
охолодження силового трансформатора – повітряне;
система керування – мікропроцесорна.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок силового трансформатора

Розрахунок проводиться для трифазного трансформатора стрижневого типу з прямокутним магнітопроводом та круглою мідною обмоткою.

Таблиця 2.1 – Параметри обмоток

Обмотка	Кількість витків	Розміри дроту	Тип дроту
1	2	3	4
Первинна	236	Ø2,65 Ø2,94 з ізоляцією	ПСДКТ (мідь)
Вторинна	15	3,15x8 3,5x8,29 з ізоляцією	ПСДКТ (мідь) виток складається з двох гілок дроту
Вторинна	15	3,15x8 3,5x8,29 з ізоляцією	

Напруга холостого ходу випрямляча визначається за виразом

$$U_{d0} = U_{dn} \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{U_{k\%}}{100}\right),$$

де U_{d0} – номінальна напруга споживача;

U_{d0} – напруга короткого замикання трансформатора та живильної мережі, приведена до вторинної обмотці трансформатора

Тоді

$$U_{d0} = 12 \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{8}{100}\right) = 11.52 \text{ В}$$

Чинні значення вторинної напруги визначаються з співвідношення:

$$U_2 = 0.427 \cdot U_{d0},$$

$$U_2 = 0.427 \cdot 11.52 = 4.9 \text{ В}$$

Діюче значення струму через вторинну обмотку трансформатора визначається за виразом:

$$I_2 = 0.817 \cdot I_d$$

$$I_2 = 0.817 \cdot 400 = 326.8 \text{ А}$$

Діючі значення струму через первинну обмотку трансформатора знаходимо із співвідношення:

$$I_1 = \frac{0.817 \cdot I_d}{K_{tr}}$$

де K_{tr} – коефіцієнт трансформації, який визначається наступним чином:

$$K_{tr} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$K_{tr} = \frac{236}{15} = 15.7$$

тоді

$$I_1 = \frac{0.817 \cdot 400}{15.7} = 20.8 \text{ А}$$

Первинний струм трансформатора:

$$I_1 = \frac{S}{3 \cdot U_1}$$

$$I_1 = \frac{7250}{3 \cdot 220} = 11 \text{ A},$$

де U_1 – фазна напруга трансформатора.

Розрахункова потужність трансформатора

$$S_1 = 7250 \text{ ВА}$$

У силовій частині випрямляча застосовується трифазний силовий трансформатор з повітряним охолодженням типу ТСП. Трансформатор забезпечує зниження напруги мережі до рівня, необхідного для роботи випрямного блоку, та здійснює гальванічну розв'язку між мережею живлення і ланцюгами навантаження.

Основні технічні характеристики трансформатора: номінальна потужність – 7,25 кВА; напруга первинної обмотки – 380 В; струм первинної обмотки – 11 А; напруга вторинної обмотки – 12 В; кількість витків первинної обмотки – 236; кількість витків вторинних обмоток – 15; коефіцієнт корисної дії – 86%.

2.2 Розрахунок зрівняльного реактора

Магнітопровід виконаний із електротехнічної сталі 3405. Коефіцієнт заповнення сталі – 0,96.

Розрахємо площу перерізу магнітопроводу з виразу:

$$S = k_c \cdot a \cdot b$$

де a, b – довжина та ширина поперечного перетину магнітопроводу.

$$S = 0.96 \cdot 50 \cdot 92 = 442 \text{ мм}^2$$

До складу силової частини випрямляча також входить реактор, призначений для згладжування пульсацій вихідного струму. Магнітопровід реактора виготовлений з електротехнічної сталі; розрахункова індукція у сталі магнітопроводу становить 1,65 Тл.

Реактор має дві обмотки, намотані мідною стрічкою марки ДПРНМ перерізом 0,5×150 мм. Намотування виконане у 10 шарів у дві паралельні гілки, що забезпечує необхідне поєднання індуктивності та допустимого струму при мінімальних габаритах конструкції.

Максимальна напруга на обмотці реактора без його насичення:

$$U_{\max} = 2\pi \cdot B \cdot f \cdot S \cdot \omega_{\text{од}}$$

де f – частота зміни потоку в осерді реактора.

$$U_{\max} = 2 \cdot 3.14 \cdot 1.65 \cdot 150 \cdot 442 \cdot 10 = 6.87 \text{ В}$$

2.3 Зовнішня характеристика випрямляча

Важливою характеристикою випрямляча є його зовнішня характеристика – залежність середнього значення випрямленої напруги від струму навантаження. Вона відображає поведінку випрямляча у всіх режимах роботи: від холостого ходу до короткого замикання.

Для керованих випрямлячів зовнішня характеристика не є єдиною кривою — вона утворює сімейство залежностей, кожна з яких відповідає певному фіксованому куту керування тиристорами. Зі збільшенням кута керування характеристики зміщуються вниз, тобто вихідна напруга зменшується при тому самому струмі навантаження.

Рівняння зовнішньої характеристики трифазного мостового керованого випрямляча має вигляд:

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_x, \quad (2.1)$$

де ΔU_x — індуктивне падіння напруги, визначається як:

$$\Delta U_x = \frac{3 \cdot U_d \cdot X_s}{\pi}, \quad (2.2)$$

де X_s — індуктивний опір, наведений до вторинної обмотки трансформатора, визначається з виразу:

$$X_s = \varphi \cdot L_s = \left(\frac{U_k}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_2}{I_2} \right), \quad (2.3)$$

$$X_s = \left(\frac{8}{100} \right) \cdot \left(\frac{4.9}{326.8} \right) = 0.0012 \text{ Ом}$$

$$\Delta U_x = \frac{3 \cdot 400 \cdot 0.0012}{3.14} = 0.46 \text{ В}$$

$$U_d = 11.51 - 0.46 = 11.06 \text{ В}$$

Підставивши у формулу (2.1) значення ΔU_x з (2.2) і розділивши обидві частини рівняння на ΔU_{d0} , отримаємо рівняння зовнішньої характеристики:

$$U_d^* = 1 - \frac{I_d \cdot X_s}{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}, \quad (2.4)$$

З кривої фазного струму i_2 та потенційної діаграми на рис. 2.1 видно, що перший режим існуватиме до навантаження, при якому кут комутації досягає величини $\pi/3$ (60°).

При подальшому збільшенні навантаження кут комутації залишатиметься постійним (рівним $\pi/3$), а початок процесу комутації затримуватиметься на деякий відрізок часу, який можна представити як появу додаткового кута регулювання α' . В результаті при зростанні навантаження після досягнення куту комутації значення $\pi/3$ у схемі починається другий режим роботи, який суттєво відрізняється від першого.

Для трифазної мостової схеми справедливі, як було показано вище, наступні залежності:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 \cdot I_d \cdot X_s}{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}, \quad (2.5)$$

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2f}}{2 \cdot \pi} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)], \quad (2.6)$$

У зв'язку з тим, що у другому режимі роботи кут комутації γ дорівнює $\pi/3$, можна підставити в (2.4) і (2.5) це значення γ і α дорівнює α' . В результаті отримаємо:

$$\sin\left(\alpha' + \frac{\pi}{6}\right) = \frac{2 \cdot I_d \cdot X_s}{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}, \quad (2.7)$$

$$\cos\left(\alpha' + \frac{\pi}{6}\right) = \frac{2 \cdot \pi \cdot U_d}{9 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2f}} \quad (2.8)$$

Звівши в квадрат (2.7) і (2.8) і склавши почленно, отримаємо рівняння зовнішньої характеристики випрямляча у другому режимі роботи:

$$\frac{4 \cdot X_s^2}{6 \cdot U_{2f}^2} \cdot I_d^2 + \frac{2 \cdot \pi^2}{81 \cdot U_{2f}^2} \cdot U_d^2 = 1. \quad (2.9)$$

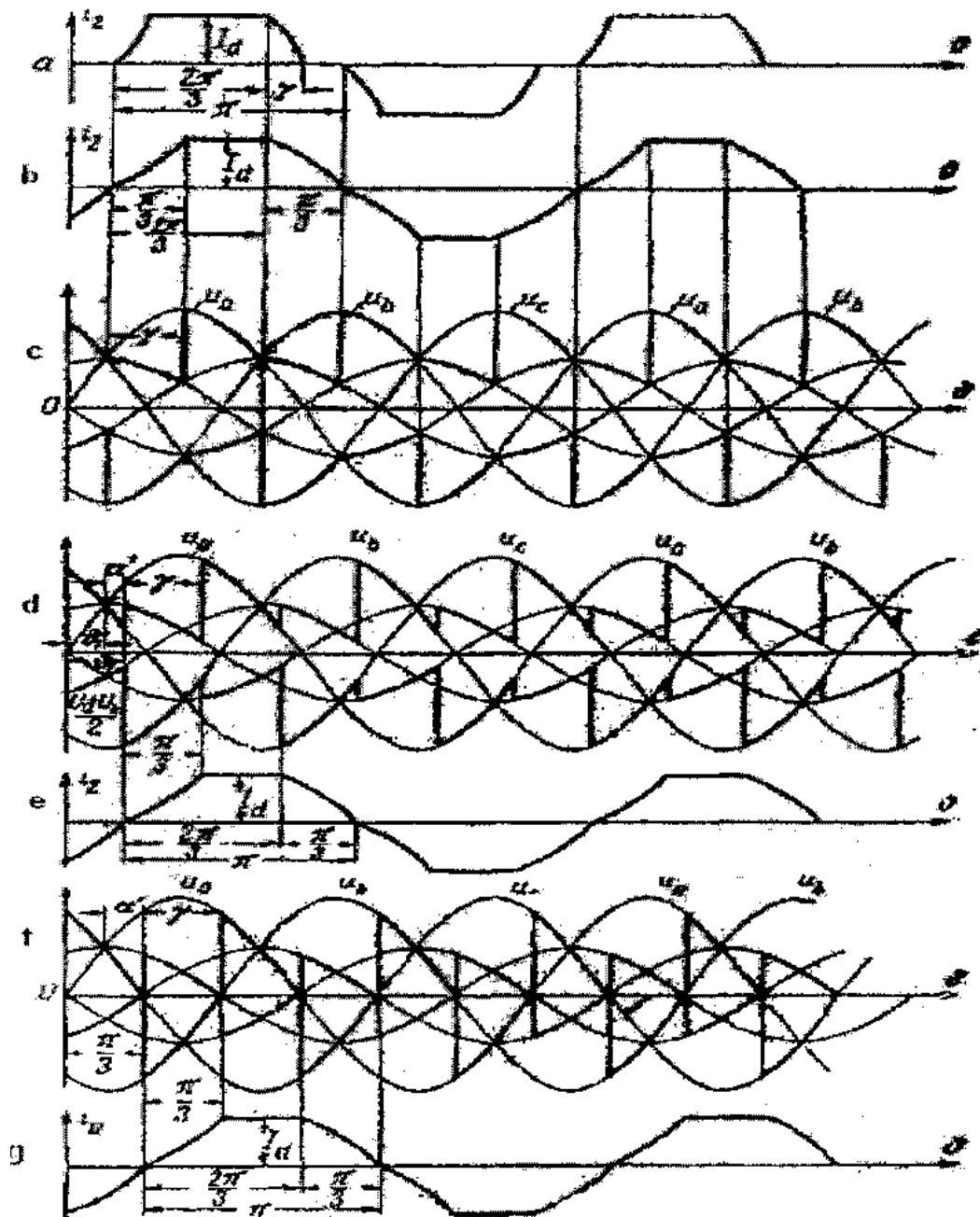


Рисунок 2.1 – Трифазна схема. Криві струмів та напруг на елементах схеми та перевантажувальних режимах

Як видно з (2.9) зовнішня характеристика у другому режимі є дугою еліпса, півосі якого за координатами I_d і U_d відповідно дорівнюють:

$$I_{de} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}{\sqrt{2} \cdot X_s},$$

$$I_{de} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}{\sqrt{2} \cdot \pi},$$

Очевидно, що кінець зовнішньої характеристики у першому режимі має стикуватися з початком зовнішньої характеристики у другому режимі.

Струм $I_{d(1-2)}^*$, при якому починається перехід зі схеми в другий режим, можна отримати з виразу:

$$I_{d(1-2)}^* = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{2\phi}}{4 \cdot X_s \cdot I_{dk}}, \quad (2.10)$$

де I_{dk} – струм короткого замикання.

$$I_{dk} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{X_s},$$

$$I_{dk} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4,9}{0,0012} = 5775 \text{ A}$$

$$I_{d(1-2)}^* = \frac{\sqrt{6} \cdot 4.9}{2 \cdot 0,0012 \cdot 5775},$$

Напруга $U_{d(1-2)}^*$ визначається з рівняння:

$$U_{d(1-2)}^* = \frac{9 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{2f}}{4 \cdot \pi \cdot U_{d0}},$$

$$U_{d(1-2)}^* = \frac{9 \cdot \sqrt{6} \cdot 4.9}{4 \cdot 3.14 \cdot 11.52} = 0.75.$$

Закінчення другого режиму настане при навантаженні $I_{d(1-2)}^*$, для якого сума фактичного кута регулювання α' та кута комутації дорівнюватиме $\alpha/2$. При цьому фактичний кут регулювання α' дорівнює 30° . Криві потенціалів загальних катодів та загальних анодів схеми, а також крива струму фази i_a для випадку:

$$\alpha' + \gamma = \pi/2,$$

наведено на рис. 2.1, f і g.

Величини струму та напруги, за яких починається третій режим, можуть бути знайдені якщо підставити в (2.11), (2.12) значення α' яке дорівнює $\pi/6$. При цьому отримаємо такі вирази:

$$I_{d(1-2)}^* = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{4 \cdot X_s \cdot I_{dk}}, \quad (2.11)$$

$$I_{d(1-2)}^* = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 4.9}{4 \cdot 0.0012 \cdot 5775} = 0.75$$

$$U_{d(1-2)}^* = \frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2f}}{4 \cdot \pi \cdot U_{d0}}, \quad (2.12)$$

$$U_{d(1-2)}^* = \frac{9 \cdot \sqrt{6} \cdot 4.9}{4 \cdot 3.14 \cdot 11.52} = 0.43.$$

Збільшення кута комутації в третьому режимі вище 60° призводить до появи «подвійного перекриття». Це явище зводиться до того що, що інтервали комутації анодної і катодної груп вентилів починають перекриватися у часі.

Відносна величина U_d^* відповідно дорівнює:

$$U_d^* = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [1 - \sin(\gamma - \frac{\pi}{6})]. \quad (2.13)$$

Для того щоб (3.13) отримати рівняння зовнішньої характеристики, потрібно знайти зв'язок між кутом комутації і струмом навантаження.

Після низки перетворень ця залежність може бути знайдений у такому вигляді:

$$1 + \sin(\gamma - \frac{\pi}{6}) = \frac{2 \cdot I_d \cdot X_s}{\sqrt{2} \cdot U_{2f}}.$$

Підставивши величину $\sin(\gamma - \frac{\pi}{6})$, отримаємо рівняння зовнішньої характеристики в третьому режимі роботи випрямляча

$$U_d = \frac{9 \cdot \sqrt{2} \cdot X_{2f}}{\pi} - \frac{9 \cdot I_d \cdot X_s}{\pi},$$

або у відносних одиницях

$$U_d^* = \frac{U_d}{U_{d0}} = \sqrt{3} - \frac{3 \cdot I_d \cdot X_s}{\sqrt{6} \cdot U_{2f}}.$$

Для більш наочної ілюстрації процесів, що відбуваються у схемі, на рис. 2.2 показані графіки зміни кута комутації γ та фактичного кута регулювання α' .

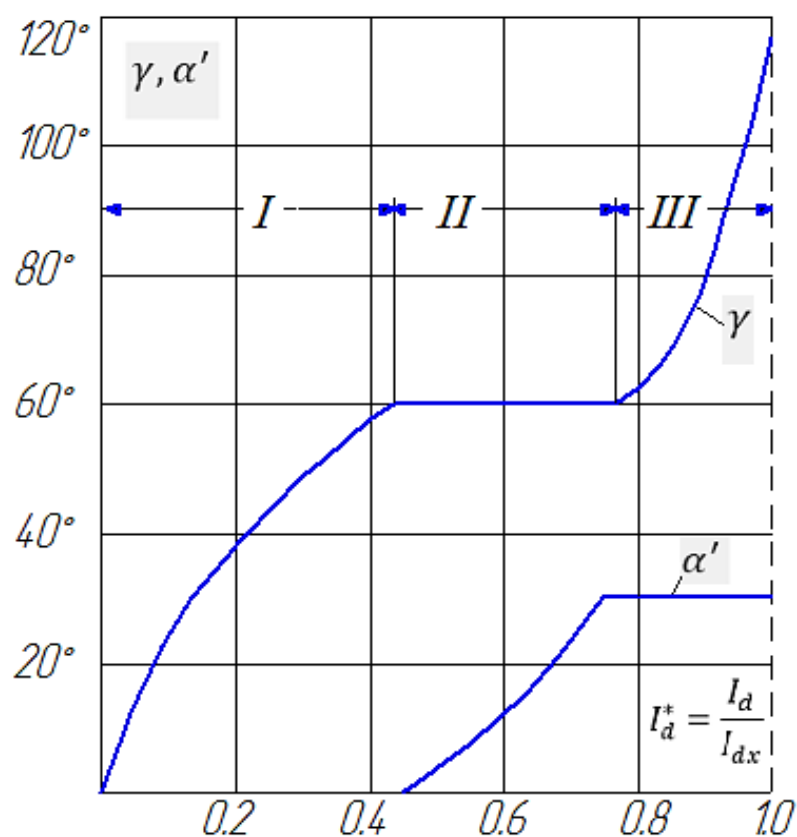


Рисунок 2.2 – Залежність кута комутації та фактичного кута регулювання від струму навантаження

Повна зовнішня характеристика трифазної схеми для $\alpha = 0$ показана на рис. 2.3. Характеристика побудована у відносних одиницях. В якості базисної величини для відносного струму прийнятий струм короткого замикання схеми. Області першого, другого та третього режимів показані цифрами I, II, III.

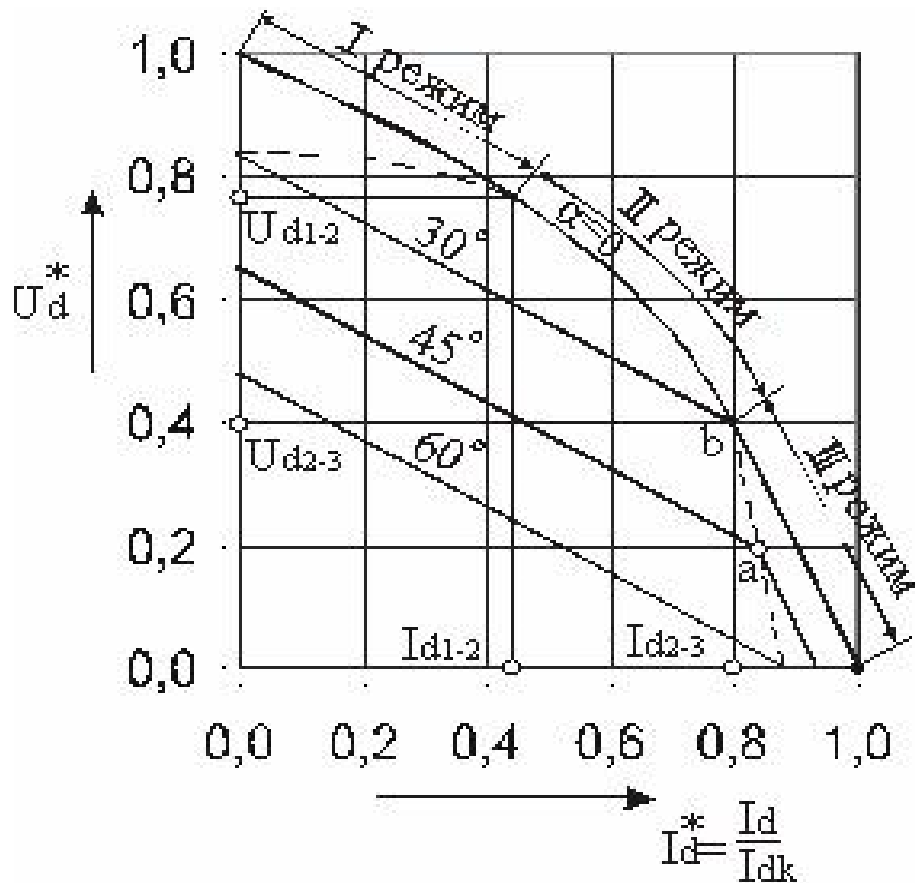


Рисунок 2.3 – Повні зовнішні характеристики трифазної схеми

2.4 Розрахунок коефіцієнта потужності

При роботі випрямляч споживає з мережі несинусоїдальний струм, перша гармоніка якого зрушена у бік відставання щодо кривої живильної напруги на кут φ_1 . Параметри силових трансформаторів та комутаційної апаратури визначаються повною потужністю, що споживається перетворювальним агрегатом. Якщо відома потужність на стороні випрямленого струму, то для визначення повної потужності перетворювача необхідно знати величини коефіцієнта потужності випрямляча.

Перша гармоніка споживаного випрямляча струму i_1 , за відсутності кута комутації в трифазному мостовому випрямлячі φ_1 дорівнює α . Величина коефіцієнта спотворення для кривої струму v дорівнює $3/\pi$. Остаточно для

величини коефіцієнта потужності ідеалізованого мостового випрямляча можна написати:

$$X = \frac{3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{3 \cdot U_1 \cdot I} = v \cdot \cos \varphi_1$$

З урахуванням процесу комутації величина $\cos \varphi_1$ визначається із виразу:

$$\cos \varphi_1 = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \varphi)}{2}.$$

Коефіцієнт спотворення кривої струму можна знайти за формулою:

$$v = \frac{3}{\pi} \cdot \left[1 + \frac{\gamma}{4 \cdot \pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right].$$

Остаточно для коефіцієнта потужності трифазного випрямляча маємо:

$$v = \frac{3}{\pi} \cdot \left[1 + \frac{\gamma}{4 \cdot \pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right] \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \varphi)}{2},$$

оді

$$v = \frac{3}{3,14} \cdot \left[1 + \frac{0,45}{4 \cdot 3,14} - \frac{0,45^2}{24} \right] \cdot \frac{\cos(0) + \cos(0 + 0,45)}{2} = 0,93 .$$

2.5 Вибір швидкодіючого автоматичного вимикача

У процесі експлуатації випрямляча типу «ІОН» можуть виникати аварійні режими роботи, що супроводжуються неприпустимими за величиною та тривалістю струмами через силові вентилі. До основних видів аварійних

режимів належать зовнішні та внутрішні короткі замикання, а також мимовільне відмикання тиристорів у непрацюючій групі реверсивного випрямляча з роздільним керуванням вентильними групами.

Зовнішнє коротке замикання виникає внаслідок пошкодження ізоляції або помилкового з'єднання у зовнішніх ланцюгах навантаження — шинопроводах, кабельних лініях або безпосередньо у гальванічній ванні. У цьому випадку опір навантаження різко зменшується до нуля або близьких до нього значень, що призводить до лавиноподібного наростання струму через тиристири силового блоку. Розрахунок струмів при зовнішньому короткому замиканні ведеться у припущенні, що кут керування тиристорами $\alpha = 0^\circ$, оскільки саме за цієї умови значення струмів короткого замикання є максимальними і визначають найбільш небезпечний режим для силових елементів.

Внутрішнє коротке замикання є наслідком пробою одного або кількох тиристорів силового блоку БСТ. При пробі тиристора він втрачає керованість і переходить у режим постійної провідності, що рівнозначне появі короткозамкненої гілки у схемі випрямного моста. Це призводить до виникнення зрівнювальних струмів між плечами моста, значного перегріву справних тиристорів та загрози їх каскадного пробою. Для виявлення цього режиму в конструкції випрямляча на шинах вторинної обмотки силового трансформатора встановлені геркони S1, які фіксують аномальне зростання струму та формують сигнал для негайного відключення вимикача Q1.

Особливу небезпеку в реверсивних випрямлячах з роздільним керуванням вентильними групами становить режим мимовільного відмикання тиристорів у непрацюючій групі. В нормальному режимі роботи одна з двох зустрічно ввімкнених мостових схем є активною, а інша заблокована. У разі порушення роботи системи керування тиристири заблокованої групи можуть відкритися, що призведе до одночасної провідності обох груп, виникнення між ними зрівнювального струму та аварійного перевантаження трансформатора і тиристорів. Час наростання такого струму визначається індуктивністю

розсіювання трансформатора та реактора, тому швидкодія захисту є критичним параметром для забезпечення цілісності силової частини.

З метою обмеження наслідків усіх зазначених аварійних режимів у випрямлячі «ІОН» реалізований комплексний захист: струмовий захист від зовнішнього короткого замикання з уставкою спрацьовування $(1,6-2,0) \cdot I_0$, електронний захист від внутрішнього замикання на основі герконів, а також захист від перевантаження з витримкою часу 1,5 с при перевищенні струму понад $1,15 \cdot I_0$. Сукупність цих засобів забезпечує надійний захист силових елементів у всіх передбачуваних аварійних ситуаціях.

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

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{cf}}{\sqrt{x_{2k}^2 + r_{2k}^2}},$$

де U_{cf} – фазна напруга мережі;

$x_{2k}; r_{2k}$ – наведені опори трансформатора.

$$I_{\text{кз}} = \frac{220}{\sqrt{1,37_{2k}^2 + 0,43_{2k}^2}},$$

Ударний струм глухого зовнішнього короткого замикання

$$I_{\text{уд}} = I_{\text{кз}} \cdot i_{\text{уд}}^*,$$

де $i_{\text{уд}}^* = 1$ знаходиться з рисунку 2.4, залежно від $\text{ctg} \varphi_k$.

$$\text{ctg} \varphi_k = \frac{r_{2k}^2}{x_{2k}^2},$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = \frac{0,43}{1,37} = 0,31.$$

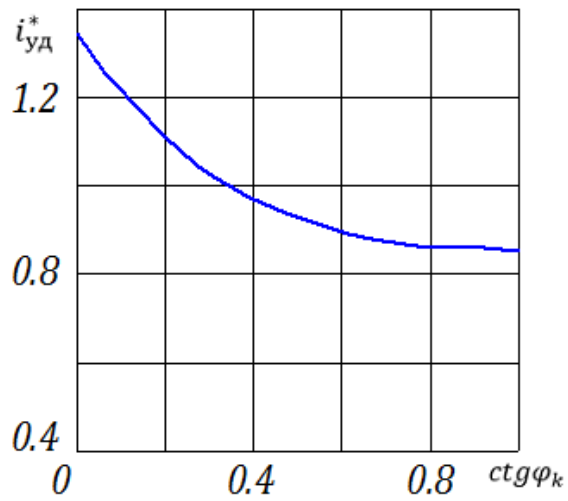


Рисунок 2.4 – Залежність $i_{уд}^*$ від $\operatorname{ctg} \varphi_k$ для глухого зовнішнього короткого замикання

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

$$I^2 t = I_{кз}^2 \cdot (I^{*2} t),$$

де $I^{*2} t$ визначається залежно від $\operatorname{ctg} \varphi_k$ кривої на рис. 2.5.

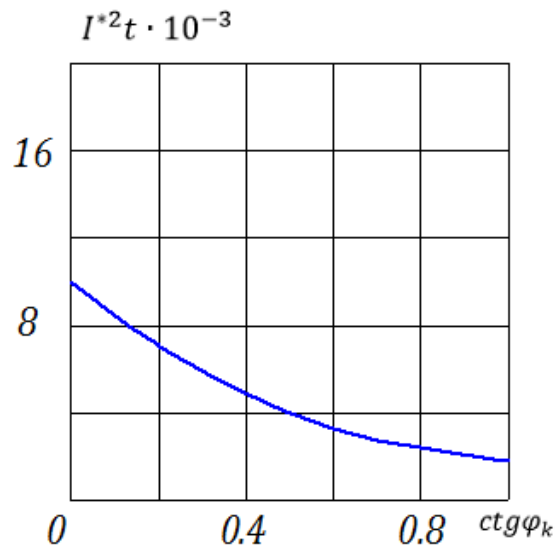


Рисунок 2.5 – Залежність I^2t від $\text{ctg}\varphi_k$ глухого зовнішнього к.з

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

Миттєве значення струму глухого зовнішнього короткого замикання i_k знаходиться за допомогою кривих на рис. 2.6.

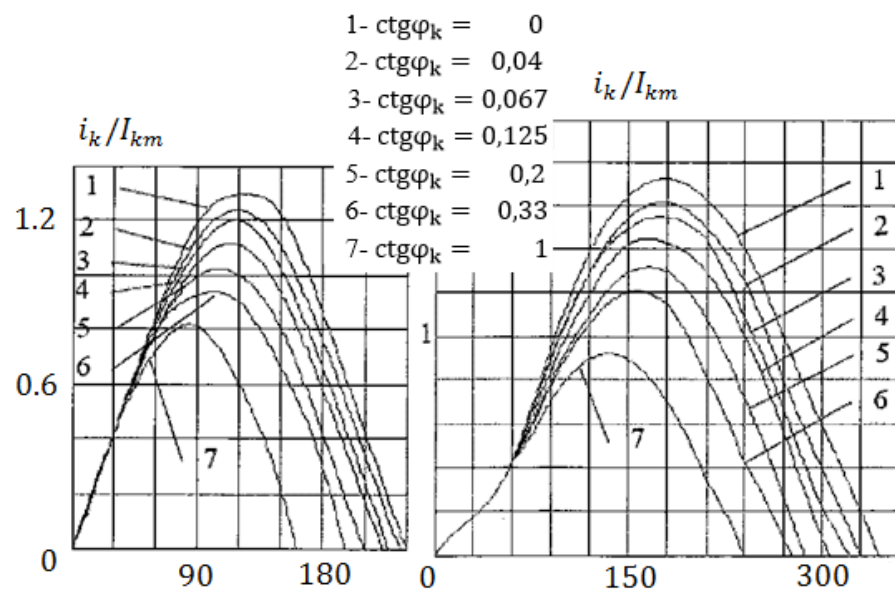


Рисунок 2.6 – Залежність $i_k/I_{k3}(\nu)$

$$i_k = 123 \text{ A}$$

Розрахунок струмів при внутрішньому короткому замиканні ведеться також у припущенні, що кут $\alpha = 0$. При цьому вважається, що момент початку внутрішнього к.з збігається з моментом включення чергового тиристора. У цьому випадку струм внутрішнього короткого замикання буде максимальним.

Ударний струм внутрішнього к.з.:

$$I_{уд} = 154 \cdot 1,25 = 192,5 \text{ A}$$

де $i_{уд}^*$ береться з рис. 2.7, залежно від $ctg\varphi_k$.

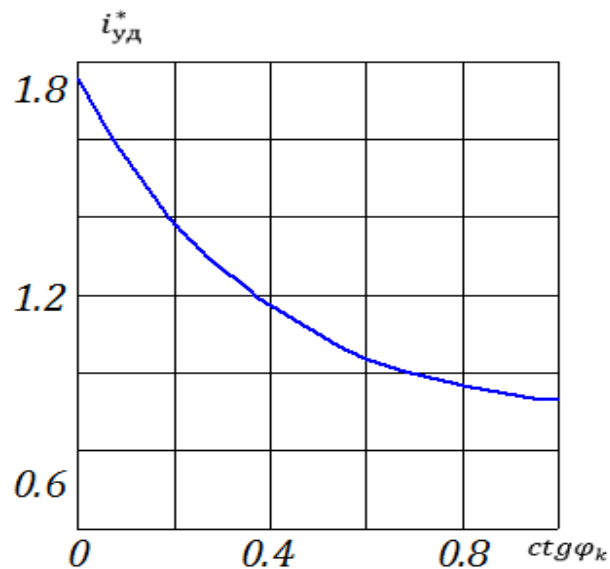


Рисунок 2.7 – Залежність $i_{уд}^*$ від $ctg\varphi_k$ внутрішнього короткого замикання

Інтеграл граничного навантаження знаходиться

$$I_t^2 = 23716 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 166 \text{ A}$$

де I_t^2 визначається залежно від $ctg\varphi_k$ за кривою на рис. 2.8.

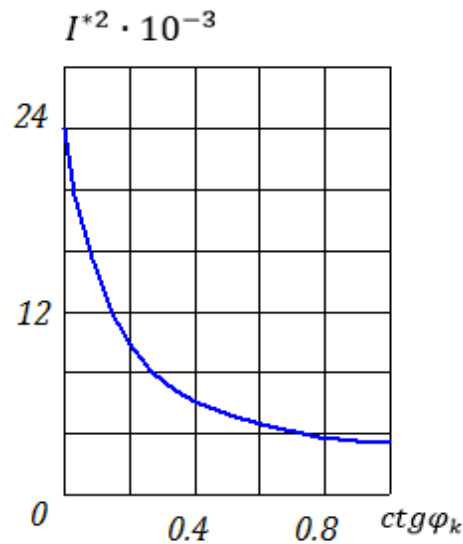


Рисунок 2.8 – Залежність I_t^2 від $\text{ctg} \varphi_k$ для внутрішнього короткого замикання

Миттєве значення струму внутрішнього к.з визначається за допомогою кривих на рис. 2.6:

$$i_k = 189,4 \text{ A}$$

Захист випрямляча від струмів короткого замикання здійснюється за допомогою швидкодіючих запобіжників, автоматичних вимикачів і т.д.

Вибір запобіжників здійснюється за співвідношенням:

$$W_{\text{пр}} = \frac{W_B}{K_3},$$

де $W_{\text{пр}}$ – інтеграл плавлення плавкою вставки, визначальний кількість енергії, необхідне розплавлення плавкою вставки;

W_B – максимально допустиме значення інтеграла квадрата аварійного струму, за тривалості імпульсу струму 1мс та заданої температури структури;

K_3 – Коефіцієнт запасу.

$$W_B = \int i_{ab}^2 \cdot dt ,$$

$$W_B = I_{ab}^2 \cdot t_{umr} ,$$

Автоматичний швидкодіючий вимикач вибирається на підставі кратності номінального пускового струму. Встановлюється між мережею та трансформатором.

Вибираємо автоматичний швидкодіючий вимикач АЕ 2036 ММ -20 Н - 00У3А, 380 В, 50-60 Гц, 20 А, $I_n=12$, ТУ16-522.148-80

$f = 50 \div 60$ Гц – номінальна частота;

$U_n=380$ В номінальну напругу автоматичного вимикача.

$I_n=20$ А номінальний струм автоматичного вимикача.

В результаті проведених розрахунків було визначено параметри основних елементів випрямляча. Вибраний силовий трифазний трансформатор ТСП-10/0,7-УХЛ4, автоматичний вимикач АЕ 2036 ММ -20 Н -00У3А, 380 В, 50-60 Гц, 20 А, $I_n=12$, ТУ16-522.148-80. Які відповідають заданим технічним умовам проектування випрямляча.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Опис конструкції та технологічного призначення виробу

Об'єктом проєктування є випрямляч для гальваніки з номінальною напругою 12 В та номінальним струмом 400 А з мікропроцесорним управлінням. Даний пристрій призначений для живлення гальванічних ванн, установок електролітичного осадження металів, а також може застосовуватися як стабілізоване джерело постійного струму.

Конструктивно виріб являє собою складний електротехнічний пристрій, основними складовими частинами якого є: силовий трансформатор, тиристорний блок силових вентилів, реактор, мікропроцесорна система управління, захисна та вимірювальна апаратура. Всі компоненти розміщені в металевому шафі з ступенем захисту IP21, забезпечуючи захист від попадання агресивних речовин у внутрішній простір.

Виріб відноситься до серійного виробництва малими партіями, що зумовлює вибір технологічних процесів, орієнтованих на універсальне обладнання та спеціалізованих монтажників. Технологічна частина проєкту охоплює аналіз технологічності конструкції, вибір матеріалів і способів з'єднання, розробку маршруту виготовлення, контроль якості та вимоги до випробувань.

3.2 Якісний аналіз технологічності конструкції

Під технологічністю конструкції виробу розуміється сукупність властивостей конструкції, що визначають її пристосованість до досягнення оптимальних витрат при виробництві, технічному обслуговуванні і ремонті [5-7].

Якісний аналіз технологічності є першим і основоположним етапом технологічної підготовки виробництва. Він дозволяє виявити конструктивні

особливості виробу, що ускладнюють або полегшують його виготовлення, а також намітити шляхи підвищення технологічності без погіршення функціональних характеристик.

При аналізі технологічності розглядається конструкція виробу з таких позицій: відповідність конструкції можливостям виробничої бази; правильність вибору матеріалів; доцільність обраних методів з'єднання деталей; наявність баз для обробки та складання; можливість застосування стандартних, уніфікованих та нормалізованих елементів.

Аналіз технологічності корпусних деталей.

Шаф виробу виготовляється з листової холоднокатаної сталі марки 08кп товщиною 2,0 мм (ДСТУ 2834-94). Використання листового металу дозволяє отримати необхідну жорсткість конструкції при мінімальній масі. Корпус підлягає операціям розкрою, гнуття, пробивання отворів і зварювання кутовими швами.

Технологічність корпусних деталей можна оцінити як задовільну. До позитивних ознак технологічності відносяться: проста геометрична форма деталей, відсутність ребер жорсткості складної конфігурації, уніфіковані кріпильні отвори, можливість штампування та механічного оброблення на універсальному обладнанні.

До недоліків слід віднести значну кількість операцій ручного зварювання, що збільшує тривалість виробничого циклу та вимагає кваліфікованих зварювальників. Для підвищення технологічності рекомендується ширше застосовувати з'єднання заклепками або спеціальним кріпленням типу РЕМ-гайки, що не потребує зварювання.

Зовнішні поверхні корпусу після зварювання, зачищення та знежирення покриваються порошковою фарбою методом електростатичного напилення з полімеризацією в печі при температурі 180°C. Товщина покриття – 60–80 мкм. Такий метод забезпечує рівномірну товщину, стійкість до агресивних рідин, характерних для гальванічних виробництв.

Аналіз технологічності монтажних з'єднань.

Монтажні з'єднання в конструкції можна розподілити на кілька груп:

1. Силові шинні з'єднання. Шини вторинних обмоток трансформатора, тиристорного блоку та вихідних клемних колодок виконуються з міді марки М1 (ДСТУ ГОСТ 859:2003) перетином, визначеним розрахунком густини струму не більше 3 А/мм². З'єднання шин між собою та з апаратами – болтовим кріпленням М8 з підпружиненими шайбами (ДСТУ ГОСТ 6402:2008). Контактні поверхні шин лудяться припоєм ПОС-40, що знижує перехідний опір та захищає від окиснення.

2. Монтажні провідники системи управління. Для монтажу ланцюгів управління, захисту та сигналізації використовуються монтажні дроти марки МГШ 0,35 мм² (ДСТУ EN 50525-3-41). Монтаж виконується джгутовим методом з фіксацією джгутів кабельними стяжками. Джгути прокладаються у спеціальних кабель-каналах, окремо від силового монтажу, що запобігає електромагнітним завадам.

3. З'єднання на друкованих платах. Плати системи мікропроцесорного управління є власною розробкою. Монтаж компонентів – змішаний: SMD-компоненти встановлюються автоматично (паяльна паста + оплавлення в печі), ТНТ-компоненти – ручна пайка або хвильова пайка. Застосована безсвинцева паяльна паста SAC305 відповідно до директиви RoHS.

Аналіз монтажних з'єднань показує їхню технологічність на рівні "вище середнього". Болтові з'єднання шин стандартизовані і легко контролюються. Джгутовий монтаж забезпечує хорошу ремонтпридатність. Проте значна частка ручних паяльних операцій та ручного джгутування збільшує трудомісткість.

Аналіз технологічності складання.

Складання виробу здійснюється методом повної взаємозамінності для стандартних компонентів (кріплення, вимикачі, шини) та методом регулювання для точно позиціонованих елементів (датчики температури,

шунти). Це є позитивною ознакою технологічності, оскільки не потребує індивідуального підбору деталей при серійному виробництві.

Силовий трансформатор встановлюється на виділеній підставці всередині шафи та кріпиться чотирма болтами М10. Завдяки достатньому просторовому зазору між трансформатором і рештою обладнання замінення трансформатора можливе без розбирання всього виробу – це ознака доброї ремонтпридатності.

Тиристорний блок БСТ виконаний у вигляді окремого знімного субблоку, що суттєво спрощує обслуговування: при виході з ладу тиристора заміна займає не більше 30 хвилин. Модульна конструкція є одним з найважливіших показників технологічності у частині обслуговування.

Мікропроцесорна плата управління також виконана у вигляді знімного функціонального блоку на направляючих, що дозволяє замінити її без пайки або розбирання монтажу. Це відповідає вимогам до блочно-модульної конструкції.

Негативним чинником з точки зору технологічності складання є насиченість внутрішнього простору шафи. При монтажі ряду джгутів і шин потрібний значний фізичний доступ, що ускладнює роботу і збільшує ризик пошкодження сусідніх елементів. Рекомендується на стадії проектування розглянути збільшення ширини шафи або розподіл монтажу на дві зони.

3.3 Кількісна оцінка технологічності

Кількісна оцінка технологічності виконується за системою базових показників. Нижче наведено розрахунок основних коефіцієнтів.

Коефіцієнт уніфікації (K_y) характеризує частку уніфікованих складових елементів у загальній кількості:

$$K_y = E_y / E,$$

де E_y – кількість уніфікованих елементів;

Е – загальна кількість елементів.

Таблиця 3.1 – Перелік складових елементів для розрахунку K_u

Найменування елемента	Тип/марка	Кількість	Уніфікований
Силовий трансформатор	ТСП-10/0,7- УХЛ4	1	Так
Тиристорний модуль	МТОТО 8/3-160- 4-2	12	Так
Автоматичний вимикач	АЕ2036ММ-20Н	1	Так
Реактор вирівнювальний	Власна розробка	1	Ні
Плата мікроконтролера	Власна розробка	1	Ні
Шунт вимірювальний	75ШСМЗ-400А	1	Так
Датчик температури	ДТ-С	2	Так
Конденсатор фільтра	К78-2, 0,1 мкФ	9	Так
Корпус (шафа)	Власна розробка	1	Ні
Пульт ПДУ-6	Власна розробка	1	Ні
Кріплення (болт М8, М10)	ДСТУ ГОСТ 7798:2008	48	Так
Шини мідні	М1 ДСТУ ГОСТ 859:2003	6	Так

Уніфікованих елементів: $E_u = 1+12+1+1+2+9+48+6 = 80$ шт.

Загальна кількість: $E = 80 + 4$ (неуніфікованих) = 84 шт.

$$K_u = 80 / 84 = 0,95$$

Отримане значення $K_u = 0,95$ перевищує нормативне значення $K_u \geq 0,6$, що свідчить про високий рівень уніфікації конструкції.

Коефіцієнт стандартизації (Кст) визначає частку стандартизованих складових:

$$K_{ст} = E_{ст} / E = 75 / 84 = 0,89.$$

Стандартизованими вважаються елементи, що виготовляються за державними, галузевими або міжнародними стандартами. Отримане значення $K_{ст} = 0,89$ перевищує норматив $K_{ст} \geq 0,5$.

Коефіцієнт повторюваності (Кп) враховує частку типорозмірів, що повторюються більше одного разу:

$$K_{п} = 1 - (E_{т} / E),$$

де $E_{т}$ – кількість типорозмірів (оригінальних найменувань) елементів.

$E_{т} = 13$ (тринадцять різних типів елементів),

$E = 84$.

$$K_{п} = 1 - (13 / 84) = 1 - 0,155 = 0,845$$

Значення перевищує норму $K_{п} \geq 0,6$, що є позитивним показником.

Таблиця 3.2 – Зведена таблиця показників технологічності

Показник	Позначення	Норматив	Розрахунок
Коефіцієнт уніфікації	K_u	$\geq 0,60$	0,95
Коефіцієнт стандартизації	$K_{ст}$	$\geq 0,50$	0,89
Коефіцієнт повторюваності	$K_{п}$	$\geq 0,60$	0,845

Всі показники перевищують нормативні значення, що дозволяє зробити висновок: конструкція випрямляча є технологічною за критеріями уніфікації, стандартизації та повторюваності елементів.

3.4 Вибір матеріалів та комплектуючих

Вибір матеріалів для силових ланцюгів визначається умовами роботи: постійний струм 400 А при напрузі 12 В, температура навколишнього середовища до 40°C, агресивне середовище гальванічного виробництва з парами кислот та лугів.

Провідникові матеріали. Для шин та провідників силових ланцюгів обрана мідь марки М1 з питомим опором 0,0175 Ом·мм²/м. Мідь є оптимальним вибором завдяки: мінімальним тепловими втратами при великих струмах, доброю паяємістю та здатністю до пресування контактів, механічною міцністю та корозійною стійкістю. Алюмінієві шини не рекомендуються через нижчу провідність та труднощі забезпечення надійних контактних з'єднань.

Ізоляційні матеріали. Між шинами та корпусом застосовуються ізоляційні прокладки з листового текстоліту марки ПТ товщиною 3 мм. Текстоліт забезпечує електричну міцність не менше 20 кВ/мм і стійкий до вологи та технічних олій. Для ізоляції дроту використовується провід ПВ-1 з полівінілхлоридною ізоляцією.

Тиристорні модулі. Використовуються модулі серії МТОТО 8/3-160. Модулі типу «таблетка» встановлюються в мідних затисках з зусиллям пресування 2 кН/см². Теплопровідна паста КПТ-8 наноситься на контактні поверхні для мінімізації теплового опору переходу "кристал – охолоджувач".

Корпус шафи виготовляється зі сталі 08кп. Вибір обумовлений: хорошою штампованістю та зварюваністю, достатньою механічною міцністю ($\sigma_t \geq 196$ МПа), низькою вартістю та широкою доступністю.

Товщина листа 2,0 мм забезпечує жорсткість конструкції без надмірної маси. Розрахункова маса корпусу (без наповнення) складає близько 35 кг.

Зовнішнє покриття – порошкова полімерна фарба системи RAL 7035 (світло-сірий). Покриття стійке до кислотних парів концентрацією до 0,5 мг/м³, задовольняє вимоги ДСТУ ISO 12944-5:2020 щодо якості покриття класу IV.

Для внутрішніх поверхонь корпусу, що контактують з елементами, використовується ізоляційна фарба ГФ-021. Внутрішнє покриття запобігає конденсату та захищає від корозії.

3.5 Технологічний маршрут виготовлення

Технологічний маршрут виготовлення випрямляча включає три основних етапи: виготовлення корпусних деталей, виготовлення та комплектація субблоків, загальне складання та регулювання.

Маршрут виготовлення корпусних деталей включає наступні технологічні операції:

Операція 005 – Заготівельна. Розкрій листового металу (сталь 08кп, $t=2,0$ мм) на гільйотинних ножицях НД 3316Б або лазерним розкромом. Допуски на розміри заготовок $\pm 0,5$ мм. При лазерному розкрої кромки не потребують зачищення, що підвищує технологічність.

Операція 010 – Пробивна. Пробивання отворів для вентиляції, кабельних вводів, монтажних болтів на координатно-пробивному пресі TRUMPF TC 200 або аналогічному. Точність розташування отворів $\pm 0,3$ мм.

Операція 015 – Гнуття. Гнуття листових заготовок на листозгинальному пресі з ЧПК у відповідності до конструкторської документації. Радіус гнуття $R=2$ мм. Допуск на кут гнуття $\pm 0,5^\circ$.

Операція 020 – Зварювання. З'єднання елементів корпусу контактним або напіваавтоматичним зварюванням у середовищі CO₂. Зварні шви зовнішні – кутові, катет 3–4 мм. Після зварювання – зачищення шліфувальним кругом та рихтування деформованих поверхонь.

Операція 025 – Свердлильна. Свердління різьбових отворів для монтажних гайок РЕМ та кріплення обладнання. Нарізання різьби М4, М6, М8.

Операція 030 – Фарбування. Дробоструминна обробка SA 2,5 (ДСТУ ISO 8501-1:2015), знежирення, нанесення ґрунту, нанесення порошкової фарби, полімеризація 20 хв при 180°C. Контроль товщини покриття магнітним товщиноміром – 60–80 мкм.

Маршрут виготовлення тиристорного блоку БСТ:

Операція 005 – Підготовка охолоджувача. Фрезерування посадочних поверхонь алюмінієвого радіатора, забезпечення шорсткості $Ra \leq 1,6$ мкм.

Операція 010 – Монтаж тиристорних модулів. Нанесення пасти КПТ-8, встановлення модулів, затяжка гвинтів з моментом 5 Н·м. Контроль моменту затяжки динамометричним ключем.

Операція 015 – Монтаж печатних плат формувачів імпульсів. Паяння провідників, перевірка ізоляції між силовими шинами і ланцюгами управління (Упроб ≥ 2500 В, 1 хв).

Маршрут виготовлення блоку мікропроцесорного управління:

Операція 005 – Виготовлення друкованої плати. ДП виготовляється за технологією фотохімічного травлення або замовляється на спеціалізованому виробництві. Клас точності 4 за ДСТУ EN IEC 61188-1-2, мінімальна ширина провідника 0,25 мм.

Операція 010 – Монтаж SMD-компонентів. Нанесення паяльної пасти через трафарет, встановлення компонентів на автоматі, оплавлення в конвекційній печі за профілем SAC305.

Операція 015 – Монтаж ТНТ-компонентів. Паяння виводних компонентів паяльником або на установці хвильової пайки.

Операція 020 – Контроль і тестування плати. Візуальний контроль, автоматичний оптичний контроль (АОК), внутрісхемне тестування (ВСТ), функціональне тестування на стенді.

Маршрут загального складання:

Операція 005 – Встановлення трансформатора. Монтаж силового трансформатора ТСП-10 на підставку, затяжка болтів М10 з моментом 25 Н·м.

Операція 010 – Встановлення блоку БСТ. Монтаж тиристорного блоку на бічній панелі шафи, підключення силових шин з лудженими контактними поверхнями. Момент затяжки болтів М8 – 15 Н·м.

Операція 015 – Встановлення реактора. Монтаж вирівнювального реактора, підключення до середньої точки трансформатора.

Операція 020 – Встановлення автоматичного вимикача. Монтаж QF1 (AE2036MM-20H) на DIN-рейці, підключення вхідних силових проводів.

Операція 025 – Монтаж панелі управління. Встановлення плат системи управління, підключення джгутів управлінських ланцюгів. Перевірка правильності підключення за схемою.

Операція 030 – Монтаж вимірювального шунта. Встановлення шунта 75ШСМЗ-400А у вихідний ланцюг, підключення вимірювальних провідників до АЦП контролера.

Операція 035 – Монтаж ПДУ. Підключення пульта дистанційного управління ПДУ-6 до блоку управління спеціальним жгутом.

Операція 040 – Перевірка монтажу. Візуальний огляд всіх з'єднань, перевірка відсутності перемикань, контроль ізоляції мегаомметром М4100 (1 кВ): опір ізоляції ≥ 20 МОм.

3.6 Технологічний процес регулювання та налаштування

Регулювання і налаштування є завершальним технологічним етапом, від якого залежить правильність функціонування виробу. Даний процес виконується кваліфікованим налагоджувальником відповідно до програми та методики налаштування.

Перед початком регулювання перевіряються:

- правильність встановлення всіх джемперів і перемикачів на платах управління відповідно до таблиці перемикачів;
- відсутність механічних пошкоджень компонентів;
- надійність всіх роз'ємних з'єднань;
- наявність запобіжників відповідного номіналу.

Стенд для регулювання обладнується: трифазним джерелом живлення 380 В/50 Гц з потужністю не менше 15 кВА; навантажувальним резистором на 400 А / 12 В або еквівалентним навантаженням; вольтметром класу точності 0,5; амперметром на 500 А класу 0,5; осцилографом з пропускнуою здатністю не менше 20 МГц.

Підключення до мережі виконується через ЛАТР з плавним підвищенням напруги від 0 до 380 В. Контролюються сигнали синхронізації на вході мікроконтролера – повинні відповідати частоті мережі 50 Гц з амплітудою 5 В. Перевіряється правильність послідовності фаз підключення трансформатора.

За допомогою осцилографа перевіряється форма і порядок слідування імпульсів управління тиристорами. Тривалість імпульсу – (100 ± 10) мкс, амплітуда – не менше 2 В на вході тиристора. Кутове розбіжність між імпульсами різних плечей – не більше $\pm 1^\circ$.

Налаштування захисту від перевантаження: на навантажувальному резисторі встановлюється струм $1,15 I_{ном} = 460$ А. Захист повинен спрацювати через $1,5 \pm 0,5$ с і відключити вимикач. Порогове значення струму уставки корегується резистором R на платі захисту.

Налаштування захисту від перегріву: за допомогою термовентилятора нагрівається датчик температури ДТ до температури $67 \pm 2^\circ\text{C}$. Реле захисту повинне спрацювати і сформувати сигнал аварії.

Налаштування захисту від внутрішнього КЗ: імітується сигнал від герконів S1 (замикання геркона). Виріб повинен відключитися не пізніше ніж за 5 мс.

Перевірка точності стабілізації струму: задається струм уставки 200 А. Зміна струму навантаження від 10% до 100% від номіналу не повинна призводити до відхилення вихідного струму більше ніж на $\pm 2\%$ від уставки.

Перевірка точності стабілізації напруги: задається напруга уставки 12,0 В. При зміні навантаження від 10% до 100% відхилення напруги – не більше $\pm 1\%$.

Перевірка показань цифрового амперметра ПДУ: відхилення між показанням ПДУ і еталонним амперметром – не більше $\pm 1\%$ від кінця шкали.

3.7 Контроль якості виробу

Контроль якості виробу здійснюється на всіх етапах виробничого процесу.

Всі комплектуючі вироби та матеріали проходять вхідний контроль відповідно до плану вибіркового контролю (ДСТУ ISO 2859-1:2015). Обсяг вибірки – 5% від партії, але не менше 5 одиниць.

При вхідному контролі перевіряються: відповідність документації (паспорти, сертифікати якості); зовнішній вигляд (відсутність механічних пошкоджень, корозії, дефектів маркування); основні електричні параметри для тиристорних модулів та конденсаторів.

Тиристорні модулі МТОТО проходять 100% перевірку: вимірювання напруги у відкритому стані, зворотного струму витоку, перевірка керованості. Прилади, що не відповідають специфікації, повертаються постачальнику.

Операційний контроль виконується після кожного критичного технологічного переходу. Контрольні точки та методи:

- після зварювання корпусу: розмірний контроль основних габаритів (1 раз на 10 шт.), перевірка якості зварних швів зовнішнім оглядом 100%;

- після нанесення покриття: вимірювання товщини покриття на 5 точках кожної деталі, адгезійний тест методом решітчастих надрізів (ДСТУ ISO 2409:2019);

– після монтажу плат: АОК 100% плат, вибіркове вимірювання опору ізоляції між шарами;

– після складання блоку БСТ: перевірка опору ізоляції між керуючими і силовими ланцюгами $U_{проб} = 2500 \text{ В/1 хв}$.

Кожен виготовлений виріб проходить приймальні випробування у обсязі перевірочних і кваліфікаційних відповідно до ТУ. Програма приймальних випробувань включає:

- 1) Перевірку зовнішнього вигляду і маркування.
- 2) Перевірку комплектності.
- 3) Вимірювання опору ізоляції ($\geq 20 \text{ МОм}$ при 1000 В постійного струму).
- 4) Випробування електричної міцності ізоляції (2500 В , 1 хв , без пробою).
- 5) Перевірку функціонування у режимі стабілізації струму.
- 6) Перевірку функціонування у режимі стабілізації напруги.
- 7) Перевірку всіх захистів (від перевантаження, перегріву, КЗ).
- 8) Перевірку вихідних характеристик при номінальному навантаженні протягом 2 годин (термічне підтвердження).
- 9) Перевірку точності показань вимірювальних приладів.
- 10) Перевірку режиму програмного управління ПДУ-6.

Результати випробувань заносяться у протокол. При відповідності всіх параметрів ТУ виріб вважається прийнятим. При виявленні дефектів – виріб повертається на доопрацювання з повторним проходженням повної програми випробувань.

Таблиця 3.3 – Зведена програма приймальних випробувань

№	Перевірка	Метод	Норма
1	Зовнішній вигляд і маркування	Огляд	Без дефектів
2	Опір ізоляції	Мегаомметр 1000 В	≥ 20 МОм
3	Електрична міцність ізоляції	2500 В, 1 хв	Без пробою
4	Стабілізація струму	Амперметр кл. 0,5	$\pm 2\%$
5	Стабілізація напруги	Вольтметр кл. 0,5	$\pm 1\%$
6	Захист від перевантаження	Навантаж. 1,15 Іном	Спрацьов. ≤ 2 с
7	Захист від перегріву	Термостат	Спрацьов. при 67°C
8	Термічне підтвердження	100% Іном, 2 год	Без перегріву
9	Точність амперметра ПДУ	Порівняння з еталоном	$\pm 1\%$ КШ

3.8 Упаковка та транспортування

Упаковка виробу виконується відповідно до ДСТУ EN 60068. Виріб встановлюється на дерев'яному піддоні, обгортається поліетиленовою плівкою та поміщається в картонну коробку з амортизуючими прокладками з пінополістиролу товщиною 50 мм. На упаковці наноситься маркування: «ВЕРХ», «ОБЕРЕЖНО – КРИХКЕ», «НЕ КИДАТИ».

Транспортування дозволяється всіма видами критого транспорту при температурі від -40 до $+50^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості до 95% при температурі 35°C . При транспортуванні забороняється укладати ящики більш ніж у 2 яруси. Після тривалого транспортування при низьких температурах перед

вмиканням виріб витримується в упаковці при кімнатній температурі не менше 24 годин.

ПДУ транспортується окремо від шафи у власній картонній упаковці. З'єднувальний джгут ПДУ–шафа укладається у поліетиленовий пакет і розміщується разом із ПДУ. У комплект поставки входять: виріб – 1 шт., ПДУ – 1 шт., з'єднувальний джгут – 1 шт., паспорт – 1 шт., керівництво по експлуатації – 1 шт.

3.9 Вимоги до умов зберігання

Зберігання виробу здійснюється у закритих складських приміщеннях з відносною вологістю повітря не більше 75% при температурі від +5 до +35°C. Атмосфера приміщення – без агресивних хімічних речовин, пари кислот і лугів, що є особливо важливим з огляду на призначення виробу для гальванічного виробництва.

Термін зберігання без расконсервації – не більше 12 місяців. При зберіганні більше 6 місяців перед вводом в експлуатацію проводиться перевірка опору ізоляції та функціональне тестування за скороченою програмою.

ВИСНОВКИ

Провівши аналіз існуючих на сьогоднішній день схем і конструкцій, було визначено та обґрунтовано аналог, а саме випрямляч типу «ІОН», силова частина якого є трифазною схемою.

В результаті виконання дипломного проекту було отримано такі результати.

1. Спроектований випрямляч для гальваніки та електролізу з мікропроцесорним управлінням:

- номінальна вихідна напруга $U_d - 12 \text{ В}$;
- номінальний вихідний струм $I_d - 400 \text{ А}$;
- номінальний вхідний струм $I_v - 11 \text{ А}$.

2. В рамках даного дослідження представлений порівняльний розрахунок-вентилів, який дав можливість зорієнтуватися в особливостях їх видів і вибрати найбільш оптимальний для проектного випрямляча.

3. У технологічній частині дипломного проекту проведено комплексний аналіз технологічності конструкції випрямляча для гальваніки з номінальними параметрами 12 В, 400 А.

Якісний аналіз технологічності показав, що конструкція в цілому є технологічною: корпусні деталі мають просту геометричну форму і виготовляються на типовому листоштампувальному обладнанні; блоки БСТ і мікропроцесорного управління виконані знімними, що суттєво підвищує ремонтпридатність; з'єднання стандартизовані та піддаються контролю.

Кількісна оцінка підтвердила задовільний рівень технологічності: коефіцієнт уніфікації $K_u = 0,95$, коефіцієнт стандартизації $K_{ст} = 0,89$, коефіцієнт повторюваності $K_{п} = 0,845$ – всі показники перевищують нормативні значення.

Розроблено технологічний маршрут виготовлення, що охоплює: виготовлення корпусу, виготовлення субблоків, загальне складання,

регулювання та налаштування. Визначено методи контролю якості на кожному етапі виробництва.

Визначено програму приймальних випробувань з 10 видами перевірок, що гарантує відповідність виробу технічним умовам перед відправкою замовнику.

Прийняті технологічні рішення забезпечують можливість серійного виробництва виробу в умовах підприємства з середнім рівнем технологічного оснащення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка : підручник / за ред. А. Г. Соскова. Київ : Каравела, 2015. 536 с.
2. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. Харків : Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
3. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
4. Випрямляч для живлення гальванічних ванн В-ТПВ-1,6к/1,6к-24-УХЛ4 «ІОН-3-2» / ПАТ «Завод «Перетворювач». URL: <https://zprua.com/product/v-trpv16k/> (дата звернення: 21.05.2026)
5. Технологія машинобудування : конспект лекцій / укладач О. У. Захаркін. Суми : Вид-во СумДУ, 2010. 260 с.
6. Мельничук П. П., Боровик А. І., Лінчевський П. А., Петраков Ю. В. Технологія машинобудування : підручник. Житомир : ЖДТУ, 2005. 835 с.
7. Технологія машинобудівних підприємств : підручник / В. Л. Дикань та ін. ; за заг. ред. В. Л. Диканя. Харків : УкрДУЗТ, 2020. 386 с.