МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка трифазного джерела живлення електроприводу постійного струму

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1711-3
спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Електроніка
(код і назва освітньої програми)

О.О. Волков
(ініціали та прізвище)

Керівник проф. дон. д.т.н. Алексієвський Д. Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент зост. дир. ПП. НВКФ „ЕКОТЕХ" Шермов С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)
Освітня програма Електроніка
(код і назва)
Спеціалізація —

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Критська Т.В.
"____" _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Волков Олексій Олексійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка трифазного джерела живлення електроприводу постійного струму

керівник роботи Алексієвський Дмитро Геннадійович, д.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_____» _____ 202__ року №_____

2 Строк подання студентом роботи 23.05.2025р.

3 Вихідні дані до роботи напруга мережі живлення - 220/380 В, частота мережі живлення - 50 Гц, номінальне значення вихідної напруги - 440 В, діапазони регулювання - 44...440 В, струм навантаження - 350 А

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз джерел живлення електроприводу постійного струму; 2. Розробка джерела живлення; 3. Розрахункова частина; 4. Конструкторсько-технологічна частина; 5. Техніко-економічне обґрунтування

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

1. Електроприводи постійного струму, 2. Джерело живлення, схема електрична структурна, 3. Джерело живлення, схема електрична принципова, 4. Результати моделювання, 5. Заземлювальний пристрій, 6. Економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Алексієвський Д.Г., професор	03.02.25	21.02.25
2.	Алексієвський Д.Г., професор	21.02.25	21.03.25
3.	Алексієвський Д.Г., професор	21.03.25	18.04.25
4.	Алексієвський Д.Г., професор	18.04.25	25.04.25
5.	Алексієвський Д.Г., професор	25.04.25	05.05.25

7 Дата видачі завдання 03.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз джерела живлення	21.02.2025	
2.	Розробка джерела живлення	21.03.2025	
3.	Розрахунково-частина	18.04.2025	
4.	Конструкторсько-технологічна частина	25.04.2025	
5.	Техніко-економічне обґрунтування	05.05.2025	
6.	Оформлення пояснювальної записки	16.05.2025	
7.	Оформлення графічної частини	23.05.2025	

Студент _____ Волков О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Алексієвський Д.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гуцалюк К.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 99 стор., 25 рис., 17 табл., 33 джерел літератури.

ТРИФАЗНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, ТРАНСФОРМАТОР, ВИПРЯМЛЯЧ, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, ТЕХНОЛОГІЯ, ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.

У дипломному проекті наведено огляд ринку джерел живлення електроприводів постійного струму, розглянуто основні схеми випрямлення і основні характеристики трифазного мостового керованого випрямляча (схема Ларіонова А.М.), а також принципи роботи та основні технічні характеристики компонентів силової частини випрямлячів.

Описано структурну та принципову електричні схеми джерела живлення електропривода постійного струму, який живиться від промислової мережі напругою 220 / 380 В, частотою 50 Гц і забезпечує живлення колекторного двигуна постійним струмом до 350А при робочій напрузі 440В, виконано розрахунок основних елементів силової частини трифазного джерела живлення, наведено результати моделювання процесів у схемі трифазного мостового керованого випрямляча, виконано опис шкідливих факторів та заходів щодо організації охорони праці при виготовленні виробу, виконано розрахунок заземлювального пристрою.

В економічній частині виконано розрахунок собівартості виробу

ЗМІСТ

Стор.

Вступ

1 АНАЛІЗ РИНКУ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 7

1.1 Огляд ринку джерел живлення 7

1.2 Опис принципу роботи і основних технічних характеристик компонентів проектованого випрямляча 22

1.2.1 Трифазні випрямлячі 22

1.2.2 Тиристори 30

1.2.3 Сітьовий трансформатор 33

1.2.4 Комутаційне обладнання 33

1.2.5 Захисне обладнання 34

1.2.6 Датчики струму і напруги 35

1.2.7 Формувачі імпульсів управління силових ключів 36

1.3. Системи управління 37

1.4 Постановка завдання 39

2 ТРИФАЗНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 40

2.1 Опис електричної структурної схеми джерела живлення 40

2.2 Опис електричної принципової схеми джерела живлення 45

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТРИФАЗНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 49

3.1 Розрахунок і вибір напруг вторинної обмотки трансформатора 49

3.2 Визначення напруги холостого ходу керованого випрямляча 50

3.3 Розрахунок основних параметрів силової частини випрямляча 54

3.4 Вибір вентилів і розрахунок їх теплового режиму 55

3.5 Розрахунок аварійних режимів 59
3.6 Обмеження комутаційних перенапруг 62
3.7 Розрахунок фільтру 64
3.8 Моделювання трифазної мостової схеми випрямляча Ларіонова 65
4 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА 69
4.1 Технологія виготовлення друкованої плати 69
4.2 Технологічний процес монтажу і збірки 71
4.3 Охорона праці та техногенна безпека 72
4.3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів 72
4.3.2 Заходи по усуненню небезпечних та шкідливих чинників 75
4.3.3 Виробнича санітарія 76
4.3.4 Електробезпека 77
4.3.5 Пожежна та техногенна безпека 82
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ 84
5.1 Суми витрат по статтям кошторису 84
5.2 Розрахунок терміну окупності розробки 89
Висновки 92
Перелік джерел посилання 93
Додаток А 96
Додаток Б 98

ВСТУП

Джерело живлення для електроприводів постійного та змінного струму є перетворювач. Перетворювачі призначені для застосування в системах електроприводів основних механізмів промислового застосування (в тому числі механізми підприємств металургійного циклу, машинобудування, шахтах та ін.).

Застосування перетворювачів в електроприводах дозволяє забезпечити:

Плавний розгін за заданий час.

Формування з високою точністю потрібної багатоперіодної діаграми швидкості машини незалежно від зміни навантаження.

Стабілізацію швидкості в періоди рівномірного руху.

Вибір зазорів в механічних передачах.

Вирівнювання навантаження електродвигунів (в дводвигунових приводах) на всіх інтервалах руху.

Рекуперативне гальмування і уповільнення рухомих мас з поверненням енергії в мережу.

Високу точність зупинки без застосування механічних гальм.

Роботу приводу на знижених швидкостях без непродуктивних втрат електроенергії.

Гальмівний режим приводу з рекуперацією енергії в мережу електроживлення.

Успішну заміну систем генератор-двигун, все ще використовуються на деяких підприємствах.

Мінімальний період освоєння в експлуатації через простого і доступного для персоналу людино-машинного інтерфейсу.

Мінімальні простої через розвинену та просту вбудовану систему діагностики роботи систем.

Регулювання всіх відомих координат електроприводу (швидкість, натяг, положення).

1 АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електропривод – це електромеханічна система для надання руху із заданими параметрами виконавчим механізмам робочих машин в цілях здійснення їх функцій.

1.1 Огляд ринку джерел живлення

На ринку України представлені джерела живлення електропривода постійного струму декількох виробників:

- ГРУПА КОМПАНІЙ «ПЛУТОН»;
- КОМПАНІЯ **CONTROL TECHNIQUES**;
- ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-КОМПЛЕКС»;
- ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «ЗАПОРІЗЬКИЙ ЕЛЕКТРОАПАРАТНИЙ ЗАВОД»
- та інші.

Запорізьке підприємство **ПрАТ «Плутон»** [1] випускає комплектний привод постійного струму КППТ призначений:

- для живлення силових та допоміжних ланцюгів систем електроприводу з колекторними електродвигунами;
- для комплексного управління електроприводом;
- для захисту, діагностики, сигналізації та виконання інших сервісних функцій.

Переваги:

- обмеження пускового струму (не перевищує значення 1,5 від номінального);
- забезпечення рекуперативного гальмування; керований розгін (зупин);
- час розгону (зупину) регулюється в межах 0,600 с;

- забезпечення захисту від струмів короткого замикання;

- забезпечення захисту від перевантаження;

- забезпечення захисту від перенапруження та зниження напруги в живлячій мережі;

- забезпечення захисту від перенапруження в ланцюгу навантаження;

- обмежений вплив на живлячу мережу;

- управління головним приводом.

Комплектний електропривод привід постійного струму серії КППТ наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Комплектний привід постійного струму КППТ

Як приклад виконання розглядається комплектний привід постійного струму КППТ-630-3Т пристрою для насуву вагонів (вагоноштовхача), який забезпечує управління двигунами через тролейний струмопідвід.

КППТ-630-3Т має у своєму складі шафу управління ШУ та пульт управління ПУ.

У залежності від конкретного об'єкта, в комплект можуть входити: автоматизована система управління на базі ПЛК та промислового комп'ютера, розташована у шафі системи управління (ШСУ) або в пульті управління, ящики управління зчіплювача, колійні вимикачі та інші елементи.

ШУ та ШСУ встановлюються в електроприміщенні, ПУ встановлюється на посту оператора. ШУ, ШСУ та ПУ є стійкими до зовнішніх впливів кліматичних факторів у виконанні УХЛ, категорія розміщення 4 відповідно до ГОСТ 15150. Ящики управління зчіплювача, колійні вимикачі встановлюються безпосередньо впродовж шляху руху штовхача та є стійкими до зовнішніх впливів кліматичних факторів у виконанні УХЛ, категорія розміщення 1 відповідно до ГОСТ 15150.

Шафа управління ШУ складається з наступних функціональних систем:

- силової частини;
- вузлів системи оперативного управління, індикації та сигналізації;
- системи контролю температури та вентиляції всередині шафи.

Силова частина забезпечує:

- живлення та захист шафи управління;
- перетворення змінної напруги мережі у постійну регульовану;
- захист від струмів короткого замикання та перевантаження у ланцюгах навантаження.

Силова частина виконана у вигляді окремих вузлів, розташованих всередині шафи управління, та має у своєму складі:

- пристрій вводу;
- мережевий дросель;
- реверсивний тиристорний перетворювач постійного струму;
- перетворювач постійного струму ланцюгів збудження та допоміжних ланцюгів штовхача;
- вузли захисту від перевантажень.

Розміщення функціональних блоків та вузлів схеми, що входять до складу виробу, при відкритих дверях шафи управління ШУ, наведено на

рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Розміщення функціональних блоків та вузлів схеми шафи управління

Пульт управління, за допомогою якого здійснюється дистанційне управління штовхачем, конструктивно виконаний у вигляді металевої тумби з передніми дверцятами, що відкриваються, та робочим столом, що підіймається.

На пульт, у залежності від виконання, встановлюється монітор та клавіатура робочої станції. Органи управління та контролю розташовуються на робочому столі. Підвід кабелів виконується через кабельні вводи у дні тумби. Джерело живлення, клемники, реле, комутаційна та захисна апаратура встановлені на монтажній панелі всередині тумби.

За наявності окремої шафи системи управління, його конструкція аналогічна ШУ.

Зовнішній вигляд пульта управління (ПУ) наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд пульта управління

Технічні параметри комплектного приводу постійного струму наведено у таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Технічні параметри КППТ

Найменування параметру	Од. вим.	Значення
1	2	3
Вхідна живляча напруга (Uвх) трифазна	V	380 +10/-15 %
Частота вхідної напруги	Hz	50 ± 2 %
Номінальна вихідна напруга (Uном) DC	V	440
Діапазон регулювання вихідної напруги	V	0…440
Номінальний вихідний струм (Іном)	A	250…1000
Номінальна напруга допоміжного джерела постійного струму	V	220 (110) ± 20 %

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Номінальний вихідний струм допоміжного джерела	А	20…100
Коефіцієнт корисної дії, не менше (при номінальних параметрах)	-	0,96
Ступінь захисту відповідно до IEC 60529	-	IP 20; IP 22; IP 43; IP 54
Термін служби, не менше	років	15
Середній час відновлення, не більше	min.	20
Габарити для номінального струму 630 А (ШхВхГ)	mm	1200 x 2000 x 600

Компанія Control Techniques пропонує новий електропривод шафового виконання серії DFS [2], який являє собою попередньо зібраний, готовий до установки шафа, призначений для використання в додатках з високою потужністю, де ключовими вимогами є енергозбереження і високий ступінь захисту від проникнення.

Офіціальним представником компанії **Control Techniques**, в Україні, є **ТОВ «ЕЛЕКТРОЮНІТ». ТОВ «ЕЛЕКТРОЮНІТ»** - це інжинірингова компанія, що спеціалізується на поставках приводної техніки, електротехнічної та кабельно-провідникової продукції, а також на проектуванні систем комплектного електроприводу і АСУТП.

Основні характеристики електроприводу DFS:

- готовність до введення в експлуатацію;
- короткі терміни окупності;
- просте налаштування;
- висока надійність та експлуатаційні характеристики для найважчих умов експлуатації.

Електроприводи відрізняються, від аналогів, максимальною універсальністю при широкому виборі виконань електроприводів для будь-

якої програми:

,- системи промислової автоматизації на основі колекторних, асинхронних або серводвигунів, де ключовою є динаміка керування.

- системи вентиляції, опалення, кондиціювання та промисловий холод (HVAC/R), де спеціальні функції електроприводу забезпечують загальне керування системою.

- перетворювачі DFS підтримують найновіші високоефективні двигуни, щоб максимізувати повернення інвестицій та мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Зовнішній вигляд електроприводу шафового виконання серії DFS потужністю 185 кВт наведено на рисунку 1.4



Рисунок 1.4 – Електропривод шафового виконання серії DFS

Підприємство - виробник стверджує, що DFS є ідеальним рішенням для всіх галузей промисловості.

Сфери використання перетворювачів серії DFS:

1. Потужні автономні приводи для вентиляторів та насосів:

- макроси для керування вентиляторами та насосами, а також вбудовані логічні функції;

- усунення гідравлічних ударів та підхоплення моторів на ходу;

- вбудована функція "Режим роботи під час пожежі".

- підвищена енергоефективність при низькому споживанні (функція "сон-пробудження");

2. Високопродуктивні шафові приводи для компресорів:

- вбудовані ПЛК та функції ПІД для розширеного керування без витрат на зовнішній контролер;

- енергоефективність та оптимальне керування для підвищення коефіцієнта корисної дії (CoP);

3. Потужні автономні електроприводи для загальної автоматизації:

- максимально ефективне керування для конвеєрів з профільуванням прискорення/уповільнення S-рампи та автоматичним контролем навантаження (режим RFC-A);

- ефективне управління змішувачами та перевантажувальна здатність до 200%;

- управління в замкнутому контурі для особливо точного керування кранами та підйомниками;

- надійне керування дробарками;

- забезпечення точності та стабільності роботи екструдерів;

- висока енергоефективність та контроль крутного моменту для тунельних та бурових робіт та до 200% перевантаження.

ТОВ «НВП «Перетворювач-комплекс» спеціалізується на розробці і виготовленні виробів силової електроніки для всіх галузей промисловості [3].

Вироби ТОВ «НВП «Перетворювач-комплекс» оснащені сучасними мікропроцесорними системами управління з розвиненими засобами індикації та діагностики.

Комплектні тиристорні перетворювачі 5-го покоління серії KTE5 виробляються потужністю від 1 кВт до 16 МВт, для номінальних випрямлених струмів від 10А до 16 кА та випрямлених напруг до 1200 В. 6-ти та 12-пульсні схеми випрямлення без паралельного включення тиристорів у всьому діапазоні струмів. Схема випрямлення 24-пульсна для паралельних робіт перетворювачів.

Зовнішній вигляд комплектного тиристорного перетворювача серії KTE5, що розрахований на струм навантаження 10000А при вихідної напрузі 930В наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Комплектний тиристорний перетворювач серії KTE5

Комплектно з перетворювачами може постачатись допоміжне обладнання для розширення їх функціональних можливостей. Продукція призначена для використання у всіх галузях промисловості та сільському

господарстві, відповідає вимогам ДСТУ 18142.1, ГОСТ 24682, ГОСТ 15963 та випускаються за технічними умовами ТУ У 31.1-13626132-001:2008.

Загальна характеристика перетворювачі серії КТЕ5

Перетворювачі для електроприладів постійного струму, в залежності від режиму роботи, дозволяють перевантаження по ланцюгу живлення якоря. Дані про величину струму навантаження наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Режими навантаження КТЕ5

Режим	Навантаження в залежності від величини номінального струму, %	Тривалість навантаження, с
1	100	Не обмежено
2	150	120
3	175	60
4	200	15
5	225	10

Перенавантаження у перетворювачів для живлення електромагнітних навантажень та збуджувачів дозволяється не більше 130%.

Крім загальнопромислових виконань серія КТЕ5 включає:

- спеціальні виконання для важких умов роботи – природне повітряне охолодження на струми до 10 кА, перевантаження по струму до 2,5 Іном протягом 10 с (узгоджені з аналогічними характеристиками двигунів та трансформаторів);

- контейнерні виконання для електроприводів бурових насосів;

- блокові (вбудовувані) виконання з використанням реакторно-трансформаторного та захисно-комутаційного обладнання Замовника;

- шафи резервування електроприводів та розподільні шафи для багаторухових електроприводів;

- шафи резервування електроприводів та розподільні шафи для багаторухових електроприводів;

- вбудований технологічний контролер ComplexPro з відкритою

архітектурою та проблемно-орієнтованою мовою програмування для оперативної зміни функцій системи при налагодженні та в процесі експлуатації;

- вбудований реєстратор електричних сигналів SR-91A зі швидкістю запису до 250 мкс/точка, що забезпечує безперервний моніторинг аналогових та дискретних сигналів з виведенням вимірюваних параметрів та стану у графічному вигляді.

Преобразователи, шкафы и пульты являются объектно-ориентированными, проектно-компонуемыми изделиями, что позволяет:

- підвищити монтажну готовність виробів;

- виключити їх надмірність;

- виключити додаткові контролери засобів автоматизації для об’єкта в цілому.

Система управління перетворювачів серії КТЕ5

- для всієї номенклатури КТЕ5 системи управління (СУ) уніфіковані між собою, а також з СУ інших виробів підприємства – інтелектуальних пультів управління, систем діагностики, пристроїв віддаленого введення-виводу, збудників синхронних двигунів, систем збудження турбо та гідрогенераторів, пускачами;

- системи управління дозволяють приймати та обробляти сигнали будь-яких датчиків – імпульсних, кодових, сельсинів, датчиків температури та ін., у тому числі датчиків із послідовними каналами зв’язку;

комплектація СУ, у тому числі низьковольтні пристрої (реле, клемні приєднувачі та ін.) виконана з елементів провідних світових виробників;

- системи управління мають швидкодіючі промислові інтерфейси для зв’язку з обладнанням верхнього рівня – ProfiBus DP, CAN, Modbus RTU, Modbus TCP/IP;

- можливі поставки перетворювачів з блоками управління SINAMICS DCM, фірми Siemens.

Комплектний тиристорний перетворювач КТЕ5-ВС-2х63/230-ЕТ1100-

С01-УХЛ4 наведено на рисунку 1.6



Рисунок 1.6 – Комплектний тиристорний перетворювач
КТЕ5-ВС-2х63/230-ЕТ1100-С01-УХЛ4

Система захисту перетворювачів серії КТЕ5 забезпечує наступні види захисту та блокування:

- від зовнішніх та внутрішніх коротких замикань;
- від неприпустимих за величиною та тривалістю струмів перевантаження елементів силової схеми та живлюваних електродвигунів (час-струмовий захист);
- від порушення системи охолодження;
- від підвищеної та зниженої напруги живлення;
- від обриву фази напруги живлення;
- від перевищення ЕРС двигуна;
- від перевищення швидкості двигуна;

- від режиму “стоянка під струмом”;

- від неприпустимого зниження напруги власних потреб;

- від включення КТЕ5 за наявності завдання швидкості;

- від включення КТЕ5 на двигун, що обертається;

- від несправності джерел живлення;

- блокування включення за наявності аварійних та попереджувальних сигналів.

Параметри системи регулювання наведено у таблиці 1.3:

Таблиця 1.3 – Параметри системи регулювання

Параметри	зі зворотнім зв’язком по ЕДС	з тахогене-ратором	з прецизіоним тахогене-ратором	з імпульсним датчиком
Діапазон регулирювання швидкості	1:25	1:100	1:100	1:100
Похибка регулювання швидкості, %	≤ 5	1,0	0,1	0,01
Похибка регулювання струму якоря в статичному режимі, %	1			
Похибка регулювання струму якоря в динамічному режимі, %	5			
Похибка регулювання струму збудження, %	1			

Система регулювання реалізує всі відомі координати регулювання струм, напруга, швидкість, ЕРС, натяг, положення.

Сервісні можливості системи управління перетворювачів серії КТЕ5:

- оперативна зміна структури автоматичного регулювання – виконується за допомогою пультового терміналу, вбудованого в систему керування спеціальною програмою сервісу;

- оперативний доступ до всіх регульованих параметрів перетворювача та електроприводу за допомогою пультового терміналу – параметри виводяться у кількісному десятковому вигляді на однорядковий дисплей пультового терміналу;

- самоналаштування окремих налагоджувальних параметрів електроприводу.

- уточнена індикація видів захистів, що спрацювали – здійснюється при спрацьовуванні захисту на пультовий термінал в алфавітному вигляді виводиться перший із спрацьованих захистів і всі за ним наступні;

- автоматичний запис аварійного «сліду» – виконується вбудованою програмою «Слід».

ПРАТ «Запорізкий електроапаратний завод» [4] виробляє електроприводи постійного струму типу ТЕП, що охоплюють шкалу потужностей від 1,1 кВт до 2500 кВт, також побудовані на основі силових приладів 5-го покоління і мікропроцесорної техніки останньої генерації.

Тиристорні електроприводи постійного струму серії ТЕП призначені для регулювання швидкості, напруги (ЕРС) двигуна та інших координат руху, що визначаються вимогами процесу, що автоматизується, або технологічного процесу.

Силова частина електроприводів побудована на основі трифазної мостової схеми випрямлення. Вентильна частина реверсивних електроприводів виконана на основі зустрічно-паралельній схеми включення і забезпечена системою роздільного управління реверсивними групами.

До складу електроприводів входить: випрямляч (випрямляючий пристрій із системою імпульсно-фазового управління); силовий трансформатор чи мережевий реактор; лінійний контактор; система захисту та сигналізації, включаючи індикацію несправностей; будову живлення обмотки збудження двигуна; система автоматичного регулювання та система діагностики.

Конструктивно електроприводи виконані як шафи каркасного типу підлогового виконання з одностороннім обслуговуванням. Допускається встановлення шаф тильними сторонами один до одного та до стіни.

На вході живлення змінного струму встановлений захист від мережевих перенапруг та перенапруг при відключенні ненавантаженого трансформатора.

Шафи електроприводів, залежно від потужності, мають примусове повітряне чи природне повітряне охолодження. Зовнішній вигляд тиристорного електроприводу постійного струму серії ТЕП, з відкритими дверима, наведено на рисунку 1.7



Рисунок 1.7 – Тиристорні електроприводи постійного струму серії ТЕП

1.2 Опис принципу роботи і основних технічних характеристик компонентів проектованого випрямляча

1.2.1 Трифазні випрямлячі

Трифазні випрямлячі - це пристрої, які використовують для отримання постійного струму з трифазного змінного струму. Трифазні випрямлячі застосовують для живлення споживачів середньої і великої потужності на промисловості та транспорті [5].

Трифазні випрямлячі, вентильні схеми яких виконані на діодах, називають некерованими (відсутнє регулювання параметрів випрямленої напруги). У керованих трифазних випрямлячів вентильні схеми побудовані з використання тиристорів. Вентильні схеми у некерованих і керованих випрямлячів однотипні.

За винятком випадків, коли єдино можливим джерелом живлення є мережа однофазного змінного струму, живлення постійним струмом споживачів середньої і великої потужності робиться від трифазних випрямлячів. При випрямленні трифазного змінного струму досягається краща якість випрямленої напруги за рахунок зниження амплітуди пульсацій. Напруга трифазних випрямлячів легше піддайся згладжуванню, оскільки частота пульсацій тут істотно вище, ніж в однофазних випрямлячах. Полегшуючим чинником в побудові випрямних установок даного діапазону потужностей служить і менше завантаження вентилів трифазних схем по струму і напрузі.

Найбільш поширеними в промисловості є:

- трифазний однонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом (схема В.Ф. Міткевича)
- шестифазний випрямляч трифазного струму з нульовим виводом
- шестифазний випрямляч трифазного струму із зрівняльним реактором
- трифазний мостовий випрямляч (схема А.М. Ларіонова)

Електричні схеми трифазних випрямлячів наведено на рисунках 1.8…1.11, відповідно.

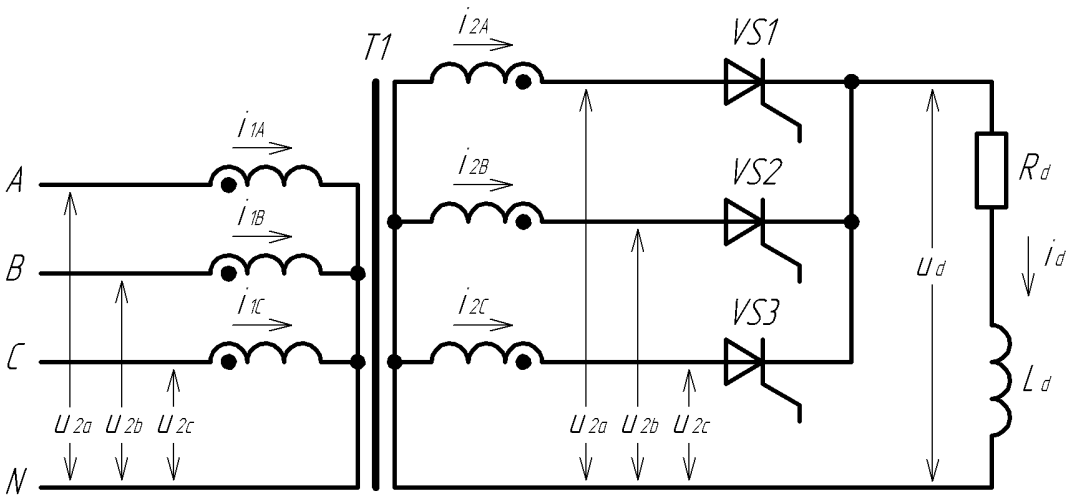


Рисунок 1.8 – Трифазний однонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом

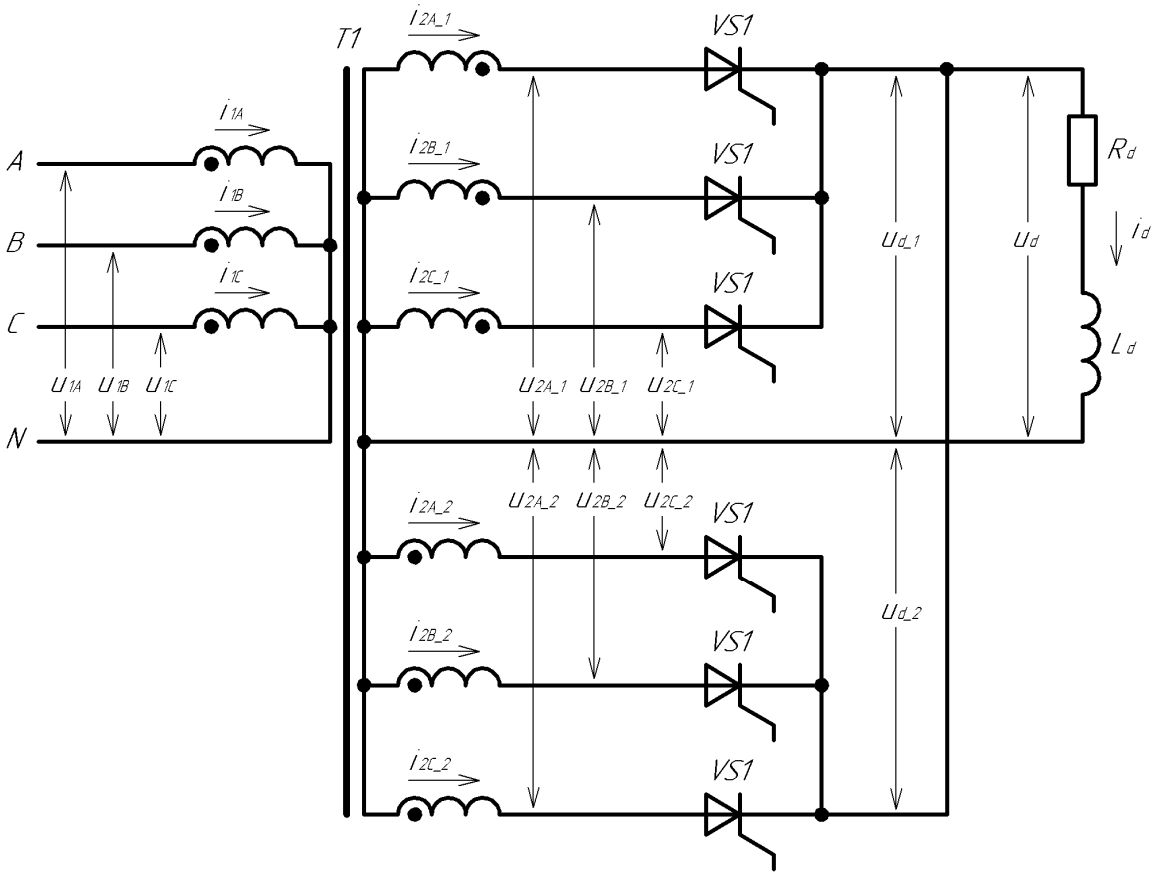


Рисунок 1.9 – Шестифазний випрямляч трифазного струму з нульовим виводом

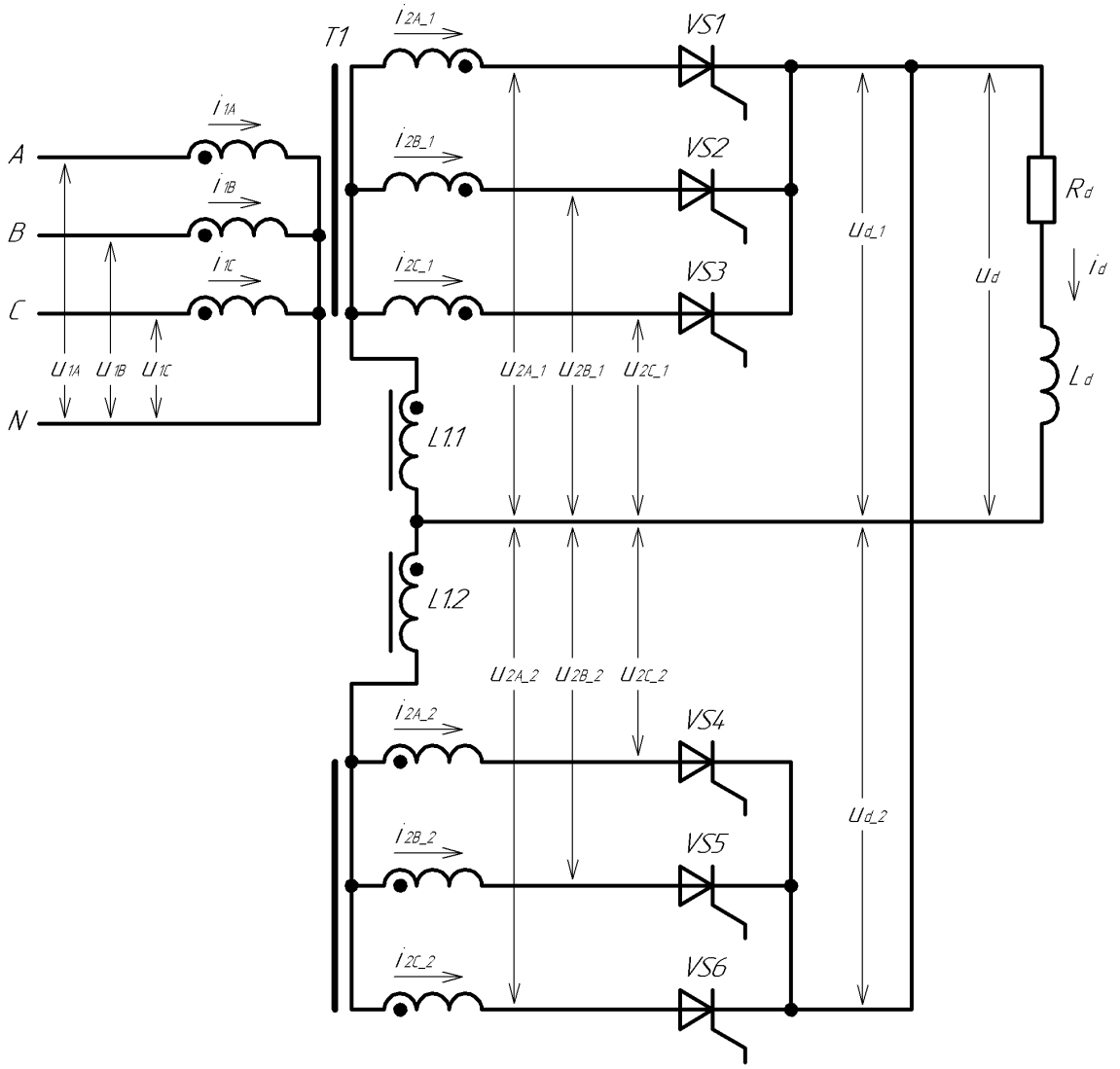


Рисунок 1.10 – Шестифазний випрямляч трифазного струму із зрівняльним реактором

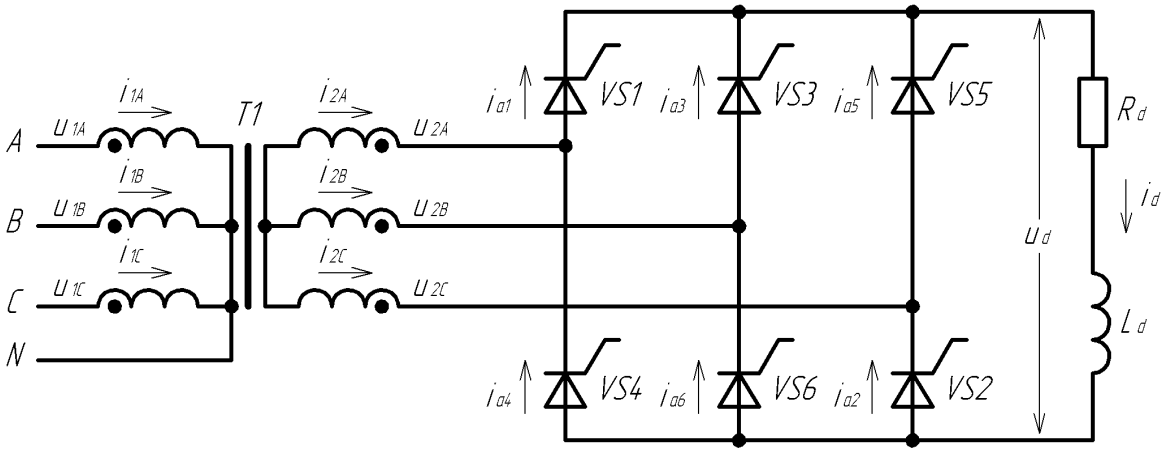


Рисунок 1.11 – Трифазний мостовий випрямляч

З випрямлячів трифазного струму переважне використання на практиці отримала трифазна мостова схема (схема Ларіонова) [6].

Схема трифазного мостового випрямляча (рис. 1.11) містить випрямний міст з шести вентилів.

У нижній групі вентилі сполучені катодами (катодна група), а у верхній – анодами (анодна група). Навантаження підключається між точками з'єднання катодів і анодів вентилів. Схема допускає з'єднання як первинних так і вторинних обмоток трансформатора зіркою або трикутником. Вона може бути застосована і без трансформатора.

Аналіз схеми проводиться при активно-індуктивному навантаженні найбільш поширеному на практиці. Індуктивності розсіяння обмоток трансформатора і індуктивності живлячої мережі приймаються спочатку рівними нулю, а індуктивність $L_н \rightarrow \infty$. Розгляд ведеться з використанням часових діаграм, приведених на рисунку 1.12.

У мостовій схемі струм навантаження створюється під дією лінійної напруги. Струм навантаження тут протікає через два вентилі, один з яких розташований в катодній групі, а другий – в анодній. Контур струму навантаження при відкритих вентилях 1 і 6 показаний на схемі рисунку 1.11.

З катодної групи у відкритому стані знаходитиметься той з вентилів, напруга анода якого має позитивну полярність відносно нульового виводу (фазна напруга) і більшу величину в порівнянні з іншими вентилями. З анодної групи відкритий стан приймає той з вентилів, напруга катода якого в даний момент є найбільшою і має негативну полярність. Іншими словами, в провідному стані знаходитимуться ті два навхрест лежачих вентиля випрямного моста, між якими діє в напрямі, що зводиться, найбільша лінійна напруга.

Інтервал провідності кожного вентиля складає $\varphi = 2\pi/3$, а інтервал спільної роботи двох вентилів дорівнює $\pi/3$. За період напруги живлення відбувається шість перемикань вентилів. Схема працює в шість тактів, у зв'язку з чим її часто називають шестипульсною.

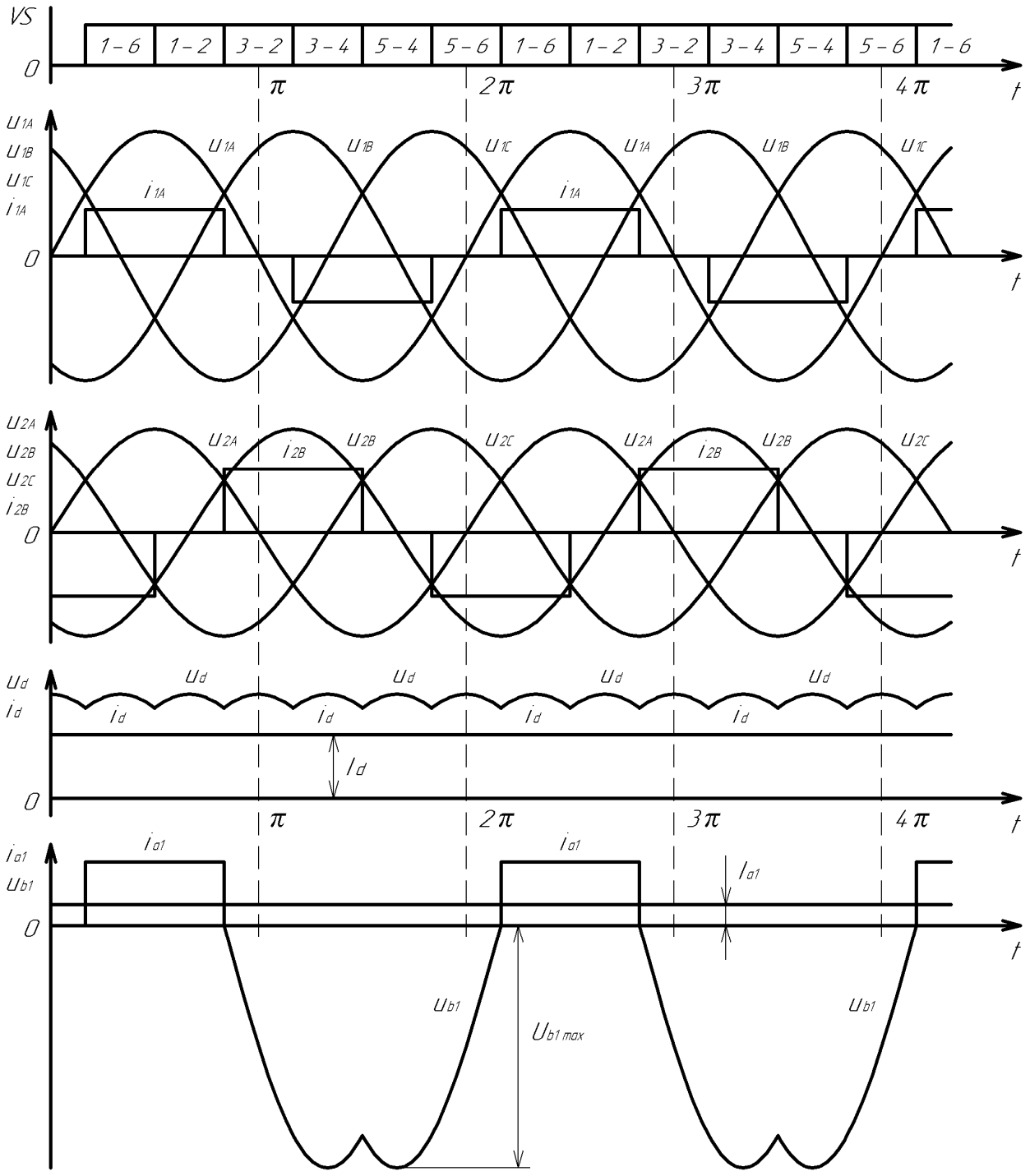


Рисунок 1.12 – Часові діаграми трифазного мостового випрямляча при $L_н \rightarrow \infty$

Крива U_d, показана на рисунку 1.12, складається з ділянок лінійної напруги вторинних обмоток трансформатора.

Середнє значення випрямленої напруги знаходить по середньому значенню напруга U_d за період повторюваності π/3

$$U_d = \frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/6}^{+\pi/6}\sqrt{2}U_{2\pi}\cos\vartheta d\vartheta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_{2\pi} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_2 = 2{,}34U_2 \qquad (1.1)$$

Напруга на навантаженні в порівнянні з трифазною схемою з нульовим виводом виходить удвічі більшою. Це пояснюється тим, що трифазна мостова схема випрямляча є як би двома трифазними схемами з нульовим виводом, виходи яких включені послідовно. При заданій напрузі U_d тут потрібна удвічі менша напруга U_2:

$$U_2 = \frac{\pi}{3\sqrt{6}}U_d = 0{,}425U_d, \qquad (1.2)$$

що скорочує число витків вторинних обмоток трансформатора і знижує вимоги до ізоляції.

Оскільки період повторюваності кривої U_d дорівнює $2\pi/6$, трифазна мостова схема еквівалентна шестифазної відносно коефіцієнта пульсації і частоти її першої гармоніки. Коефіцієнт пульсації по першій гармоніці знаходять підстановкою у вираз для визначення коефіцієнта пульсації першої гармоніки:

$$q_1 = \frac{U_{d1}m}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1},$$

де m = 6, звідки витікає, що амплітуда першої гармоніки пульсації складає 5,7% від напруги U_d проти 25% для трифазної схеми з нульовим виводом.

Частота першої гармоніки пульсації шестикратна частоті живлячої мережі і дорівнює 300 Гц, друга гармоніка має частоту 600 Гц і так далі.

Струм навантаження через наявність в схемі індуктивності згладжений, на рисунку 1.12 він представлений прямою лінією із значенням $I_d = U_d/R_н$. Оскільки кожен вентиль проводить струм протягом третини періоду, середнє значення анодного струму $I_a = I_d/3$.

При відкритому стані двох вентилів випрямного мосту інші чотири вентилі закриті прикладеною до них зворотною напругою. Так, наприклад, потенціал анода закритого вентиля 1 слідує за фазною напругою U_a (рис. 1.12), а потенціал катода – за напругою U_b при провідності вентиля 3, або за напругою U_c при провідності вентиля 5 (оскільки потенціал катода дорівнює потенціалу шини $\varphi_{d(+)}$ навантаження). Різниця напруги між анодом і катодом визначає криву U_{b1} вентиля 1. Як і в трифазній схемі з нульовим виводом крива зворотної напруги складається з ділянок лінійної напруги вторинних обмоток трансформатора і її максимальна величина дорівнює амплітуді лінійної напруги $U_{b\,max} = \sqrt{6}U_d$. Проте, зважаючи на удвічі більше середнє значення напруги на навантаженні, співвідношення між $U_{b\,max}$ і U_d тут виходить більш переважним, ніж в трифазній схемі з нульовим виводом:

$$U_{b\,max} = (\pi/3)U_d = 1{,}045U_d \qquad (1.3)$$

Таким чином, вентилі в трифазній мостовій схемі слід вибирати на напругу, близьку до U_d.

Крива струму вторинної обмотки трансформатора визначається струмами двох вентилів, підключених до даної фази. Один з вентилів входить до анодної групи, а інший – до катодної. Так, наприклад, струм I_{2a} складається із струмів вентилів 1 і 4. Вторинний струм є змінним, має форму прямокутних імпульсів з амплітудою I_d і паузою між імпульсами тривалістю $\pi/3$, коли обоє вентилі даної фази закриті. Постійна складова у вторинному струмі відсутня, у зв'язку з чим потік вимушеного підмагнічування магнітопроводу трансформатора в мостовій схемі не створюється.

Для розрахунку перетину дроту вторинних обмоток трансформатора визначають діюче значення вторинного струму:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_2^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_d^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \qquad (1.4)$$

Струм первинної обмотки трансформатора (рисунок 1.12) пов'язаний із струмом його вторинної обмотки коефіцієнтом трансформації ($i_1 = i_2/n$, де $n = \omega_1/\omega_2$):

$$I_1 = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{2}{3}} I_d \qquad (1.5)$$

Перша гармоніка споживаного струму, як і у всіх некерованих випрямлячах (без врахування комутації вентилів), збігається по фазі з напругою живлення.

Коефіцієнт трансформації n знаходять з відношення напруги обмоток:

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{0{,}45 U_d}. \qquad (1.6)$$

Розрахункові потужності первинних і вторинних обмоток рівні, у зв'язку з чим їм дорівнює і розрахункова (типова) потужність всього трансформатора:

$$S_т = S_1 = S_2 = 3\sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d = \frac{\pi}{3} P_d = 1{,}045 P_d. \qquad (1.7)$$

Відповідно до формули (1.7) трансформатор трифазної мостової схеми випрямляча вибирають на потужність, близьку до потужності навантаження, що також є перевагою цієї схеми.

Як силовий випрямляч зазвичай використовується керований трифазний випрямляч, виконаний за схемою Ларіонова.

У мостовому випрямлячі від однієї вторинної обмотки трансформатора живиться дві трифазні групи вентилів. Такий випрямляч можна розглядати як з'єднання двох трифазних випрямлячів з нульовим виводом, один з яких

анодного, а інший катодного типу; трансформатори цих двох випрямлячів поєднані в один.

На відміну від трифазного випрямляча з нульовим виводом струм вторинної обмотки в мостовому випрямлячі не має постійної складової, оскільки протікає по обмотці двічі за період, причому в протилежних напрямах. Вимушене намагнічування магнітопроводу трансформатора відсутнє. Режими роботи мостового випрямляча на активне і активно-індуктивне навантаження відрізняються мало, тому при аналізі випрямляча його струм вважають ідеально згладженим.

Трифазна мостова схема випрямлення широко використовується в багатьох галузях техніки. Це пояснюється її хорошими техніко-економічними показниками: ефективним використанням трансформатора, малою величиною зворотної напруги на вентилі, порівняно малим коефіцієнтом пульсацій, високим ККД і ін.

1.2.2 Тиристори

Тиристор – напівпровідниковий прилад, виконаний на основі монокристала напівпровідника з трьома або більше p-n-переходами і має два стійких стани:

«Закритий» стан - стан низької провідності, та «Відкритий» стан - стан високої провідності.

Основне застосування тиристорів (з трьома електричними виводами - анодом, катодом і управляючим електродом) - управління потужним навантаженням за допомогою слабкого сигналу, що подається на управляючий електрод. Також тиристори застосовуються в ключових пристроях, наприклад, силового електроприводу [5].

Існують різні види тиристорів, які поділяються, головним чином:

- за способом управління;

- по провідності: в одному напрямку (наприклад, триністор) та в двох напрямках (наприклад, симістори, симетричні диністори).

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) тиристора (рис. 1.13) нелінійна і показує, що опір тиристора негативний диференціальний.

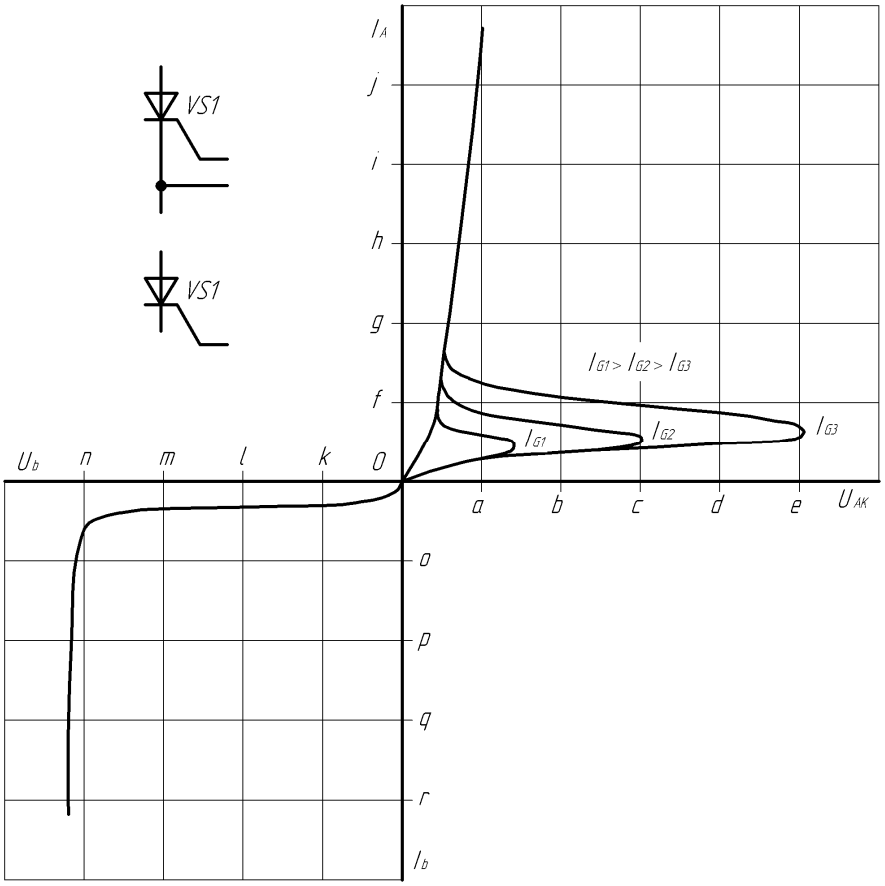


Рисунок 1.13 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Управління тиристором має деякі особливості. Перехід тиристора з одного стану в інший в електричному колі відбувається стрибком (лавиноподібно) і здійснюється зовнішнім впливом на прилад: напругою (струмом), або світлом (для фототиристора).

Після переходу тиристора у відкритий стан він залишається в цьому стані до тих пір, поки струм, що протікає через нього, перевищує струм утримання.

Тиристорний ключ може проводити струм лише в одному напрямку - відкритому, а в закритому стані здатний витримати як пряму, так і зворотну напругу. [7]

Силові тиристори характеризуються тими ж параметрами що і силові діоди. Але, крім того, в технічних умовах наводяться параметри кола управління тиристора, а також додаткові параметри, що характеризують силове коло тиристора:

- напруга перемикання: постійна, імпульсна (на порядок вище постійної, максимум в період 10 мікросекунд);

- напруга в відкритому стані – падіння напруги на тиристорі в відкритому стані (1...3 В);

- зворотна напруга – напруга, при якій тиристор може працювати тривалий час без порушення його працездатності (одиниці - тисячі вольт);

- постійна пряма напруга в закритому стані – максимальне значення прямої напруги, при якій не відбувається включення тиристора (одиниці - сотні вольт);

- невключаюча напруга на управляючому електроді – найбільша напруга, що не викликає відмикання тиристора (частки вольт);

- включаюча напруга на управляючому електроді – напруга, що забезпечує необхідне значення включаючого струму управляючого електроду (одиниці - десятки вольт);

- струм у відкритому стані – максимальне значення струму відкритого тиристора (сотні міліампер – сотні ампер);

- зворотний струм (частки міліампер);

- струм відмикання – найменший струм управляючого електрода, необхідний для включення тиристора (десятки міліампер);

- струм витоку – це струм, що протікає через тиристор з розімкненим кола управління при прямій напрузі між анодом і катодом;

- струм утримання – мінімальний прямий струм, що проходить через тиристор при розімкнутому колі управління, при якому тиристор ще знаходиться у відкритому стані;

- час включення – час від моменту подачі управляючого імпульсу до моменту зниження напруги тиристора до 10% від початкового значення при роботі на активне навантаження (одиниці - десятки мікросекунд);

- час виключення, званий також часом відновлення управляючої здатності тиристора. Це час від моменту, коли прямий струм тиристора стає рівним нулю, до моменту, коли прилад знову буде здатний витримувати пряму напругу між анодом і катодом. В основному визначається часом розсмоктування неосновних носіїв в зонах напівпровідника (десятки - сотні мікросекунд). [8].

1.2.3 Сітьовий трансформатор

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, що містить від двох до декількох обмоток, розташованих на загальному магнітопроводі, і індуктивно пов'язаних між собою. Він перетворює електричну енергію напруги змінного струму з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами (напруга, фазність та інше) без зміни частоти струму.

Використовують трансформатори для перетворення змінної напруги і гальванічної розв'язки [9].

Принцип дії трансформатора заснований на законі електромагнітної індукції – передачі енергії через індукування вторинної обмотки первинною. На рисунку 1.14 наведено конструкція та спрощений принцип дії однофазного трансформатора.

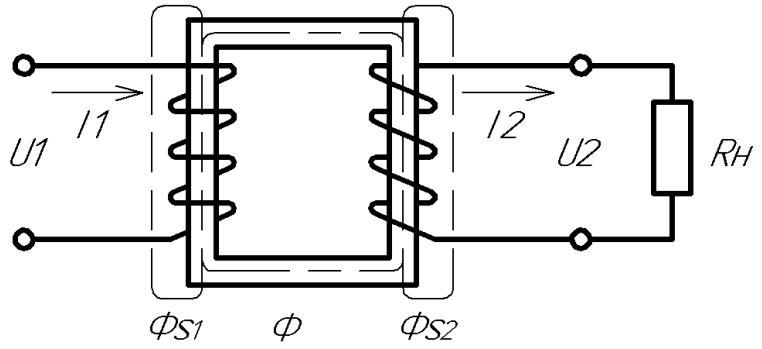


Рисунок 1.14 – Конструкція однофазного трансформатора

1.2.4 Комутаційне обладнання [9, 10].

Комутаційні апарати класифікують за такими ознаками:

- умовний тепловий струм в амперах;

- кількість полюсів;

- за напрямками, в які можна направити струм:

- розривний перемикає на 1 напрямок (має 2 положення);

- реверсивний включає живлення від резервного джерела при зникненні напруги від основного (має 3 положення).

- за наявністю дугогасної системи: якщо вона в складі вимикача, то є можливість гасити електричну дугу, тобто відключати навантажені мережі, інакше можливість знеструмлення мережі є тільки після зняття навантаження;

- по можливості гарантувати роз'єднання;

- по розташуванню рукоятки і можливості її зняття;

- за наявністю допоміжних контактів для ланцюгів сигналізації і автоматизованого управління;

- за ступенем захисту (переважає відсутність захисту або відкрите виконання IP00);

- по кліматичному виконанню і категорії розміщення (переважає виконання УХЛ3 - робота в помірному і холодному макрокліматичних районах при установці в неопалюваних приміщеннях);

- за наявністю вбудованого запобіжника (роз'єднувач-запобіжник).

1.2.5 Захисне обладнання

Як захисне обладнання зазвичай використовують автоматичний вимикач, який дозволяє комутувати, переводячи важіль управління вгору - автомат підключається до електричного кола; переводячи важіль вниз - автомат відключає лінію живлення від навантаження.

Автоматичний вимикач має:

- вбудований тепловий розчіплювач, який захищає лінію навантаження від струмів перевантаження, він інерційний і спрацьовує через деякий час;

- вбудований електромагнітний розчіплювач, що захищає лінію навантаження від великих струмів короткого замикання і спрацьовує майже миттєво;

- дугогасну камеру, яка захищає силові контакти від руйнівної дії електромагнітної дуги.

Автомат не рекомендується використовувати в якості звичайного вимикача, особливо якщо його відключати при підключеному потужному навантаженні (тобто при великих токах в електричному колі), оскільки це прискорить руйнування і ерозію контактів.

Струмообмеження автоматичного вимикача полягає у відключенні живлення ланцюга захисту раніше, ніж струм короткого замикання досягне свого максимального значення. Це дає можливість не піддавати ізоляцію електропроводки підвищеному нагріванню при коротких замиканнях, тим самим знижуючи ризик виникнення спалаху [9, 10].

1.2.6 Датчики струму і напруги

Датчики струму поділяються на: шунтові, трансформатори струму та датчики струму на ефекті Холла. Найчастіше використовують датчики на ефекті Холла, оскільки це спрощує монтаж та сприяє завадостійкості і гальванічній розв'язці з найменшими проблемами і одночасно дозволяє використати його в якості датчика напруги.

Ефект Холла викликається силою Лоренца, яка діє на рухомі носії електричних зарядів в провіднику, коли на них діє магнітне поле перпендикулярно напрямку струму.

Датчики з 100% зворотним зв'язком (також звані компенсаційними або датчиками з нульовим потоком) мають вбудований компенсаційний ланцюг, за допомогою якого характеристики датчиків струму, що використовують ефект Холла, можуть бути істотно поліпшені.

У компенсаційних датчиках посилена напруга з генератора Холла використовується для створення компенсаційного струму IS у вторинній обмотці. Створюваний при цьому магнітний потік компенсує магнітний потік, створюваний первинним струмом IP [11].

Таким чином, датчик працює практично при нульовому магнітному потоці. Це виключає температурний дрейф коефіцієнта перетворення датчика. Іншою перевагою датчиків компенсаційного типу є те, що вторинна обмотка працює як трансформатор струму на високих частотах, що значно розширює частотний діапазон датчика. Коли магнітний потік дорівнює нулю (повністю компенсований), магнітний потенціал двох обмоток ідентичний.

1.2.7 Формувачі імпульсів управління силових ключів

Посилювач імпульсів управління, який формує вихідні сигнали заданої потужності та форми, виготовлений у вигляді окремої інтегральної схеми, називається драйвером. Драйвери управління призначені для формування імпульсів струму управління силовими тиристорами з необхідними для їх надійної роботи значеннями амплітуди, швидкості наростання і тривалості при заданій частоті повторення. Типова схема драйвера управління тиристора наведена на рисунку 1.15

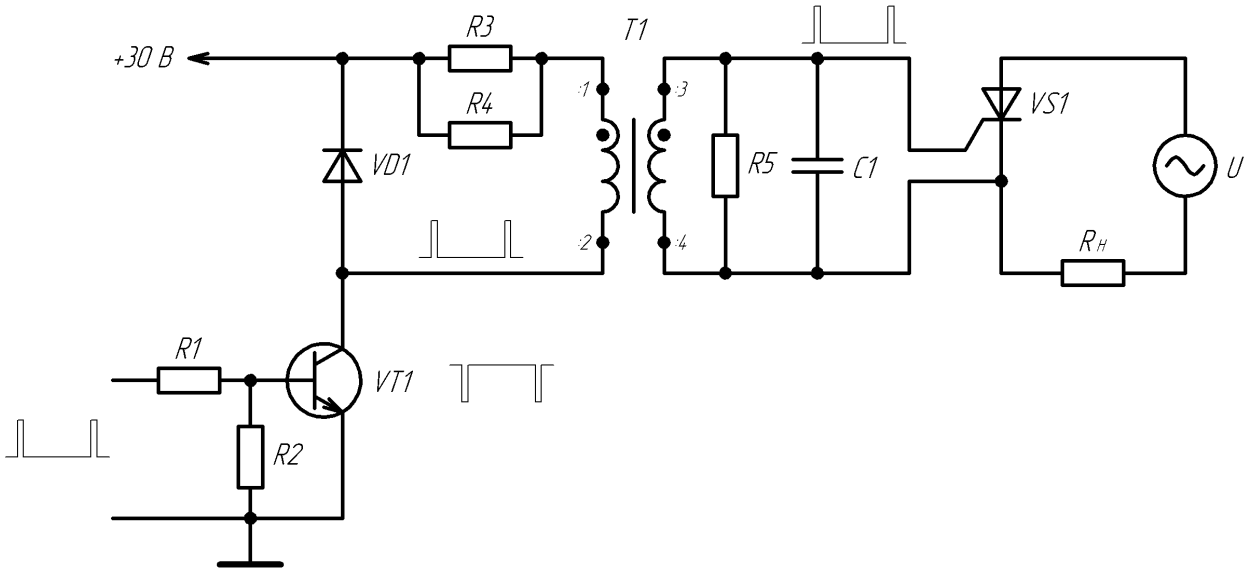


Рисунок 1.15 – Схема драйвера управління тиристора

Основні технічні характеристики драйверів

- амплітуда струму управління I_{Gon}, А;

- швидкість наростання струму управління diG/dt, А/мкс;

- тривалість струму управління t_i, мкс;

- тривалість сплеску струму управління t_p (I_{GM}), мкс;

- відношення I_{GM}/I_{Gon};

- частота проходження імпульсів струму управління f;

- робочий вхідний струм $I_{вх}$, мА;

- гранична напруга ізоляції між обмотками трансформатора U, кВ;

- габаритні розміри, мм.

Характеристики джерела живлення драйвера:

- напруга джерела живлення $U_ж$, В;

- струм споживання $I_{спож}$, мА [12].

1.3. Система управління

Система управління випрямлячем призначена для генерування управляючих тиристорами імпульсів, формування їх за тривалістю, амплітудою і формою, розподіл їх по тиристорам і зміни фази імпульсів щодо фази напруги мережі живлення.

Оскільки всі схеми управління силовими ключами побудовані на принципі фазового управління, то головним функціональним вузлом системи управління є фазо зсувний пристрій (ФЗП), а інші вузли системи є підлеглими, допоміжними. У багатоканальній системі управління зрушення імпульсів в кожному з каналів здійснюється окремим фазозсувним пристроєм. Перевага багатоканальної системи - її простота.

При «горизонтальному» принципі зрушення вхідного синхронізуючого сигналу, зазвичай синусоїди напруги вхідної (для випрямлячів) або вихідної мережі (для інверторів), здійснюється в часі (по горизонталі), а потім з нього формуються прямокутні імпульси [13].

Зміною напруги управління можна регулювати положення вихідних імпульсів для включення силових ключів.

При всьому різноманітті систем і способів управління напівпровідниковими перетворювальними пристроями будуються вони на базі обмеженого числа функціональних елементів.

За призначенням елементи систем управління можна розділити на наступні групи: логічні; функціональні (синхронізуючі і порівняльні пристрої, джерела завдання або опорного впливу, датчики параметрів); підсилювальні (проміжні підсилювачі і формувачі, вихідний пристрій); часові (фазо зсувні пристрої, задаючи генератори, розподільники імпульсів); спеціальні схеми (схеми пуску).

Основні вимоги до системи управління:

- достатня для надійного відмикання тиристорів амплітуда напруги і струму управляючого імпульсу (10…20 В, 20…2000 мА).

- висока крутизна фронту управляючих імпульсів (до 10 В/мкс).

- широкий діапазон регулювання кута управління (від 15…20 ел. град. до 160…165 ел. град)

- симетрія управляючих імпульсів по фазах.

В результаті несиметрії управляючих імпульсів тиристори багатофазного випрямляча проводять струм різний час, що обумовлює викривлення форми кривих анодних струмів і нерівність середніх значень струмів тиристорів. В кривих випрямленої напруги з'являється змінна складова низької частоти, що негативно впливає на роботу споживача. Крім того, нерівність середніх значень струмів тиристорів призводить до того, що в магнітній системі силового трансформатора з'являються нескомпенсовані магніторушійні сили. З цих причин несиметрія управляючих імпульсів не повинна перевищувати 1,5…2,5 ел. град.

Вимога до тривалості управляючих тиристорами імпульсів залежить від схеми випрямляча і характеру навантаження. З метою зменшення потужності, що виділяється в управляючому p-n переході тиристора, а також потужності системи управління доцільно мати більш вузький управляючий імпульс. Тривалість цього імпульсу повинна бути такою, щоб за час його дії анодний

струм тиристора досяг значення струму утримання. Очевидно, що швидкість наростання анодного струму буде залежати від постійної часу кола навантаження і від миттєвої напруги на тиристорах що включаються. Якщо відомі параметри випрямляча, навантаження і струм утримання даного типу тиристора, то тривалість керуючого імпульсу може бути розрахована як час наростання струму до струму утримання [13].

1.4 Постановка завдання

Розробити джерело регульованої та стабілізованої постійної напруги на базі керованого тиристорного мостового випрямляча.

Вихідні дані:

- напруга мережі живлення, U1, В	220 / 380
- відхилення напруги мережі живлення від номінального значення, ΔU1, %	+ 10...–15
- частота мережі живлення, fc, Гц	50
- номінальне значення вихідної напруги, Ud, В	440
- діапазони регулювання вихідної напруги, В	44...440
- відхилення вихідної напруги від номінального значення, ΔUd, %	1
- коефіцієнт пульсацій вихідної напруги, kp	0,01
- номінальне значення струму навантаження, Id, А	350
- значення уставки спрацьовування захисту від перевантаження по струму, Ipol, А	1,1 × Id

2 ТРИФАЗНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Трифазне джерело живлення електропривода постійного струму (далі - перетворювач або ДЖ ППС) призначено для живлення двигунів постійного струму з незалежною обмоткою збудження потужністю до 150 кВА. Діапазон регулювання вихідної напруги - від 44 В до 440 В, при максимальному струмі навантаження - 350 А. Електроживлення ДЖ ППС здійснюється від промислової мережі електропостачання напругою 220 / 380 В частотою 50 Гц.

2.1 Опис електричної структурної схеми джерела живлення

Електрична структурна схема перетворювача наведена на рисунку 2.1.

Трифазне джерело живлення електропривода постійного струму включає в себе:

АВ - автоматичний вимикач;

КЕ - контактор електромагнітний;

СТ - силовий трансформатор;

КВ - керований випрямляч;

ВФ – вихідної фільтр;

ДС - датчик струму;

ТЗ - трансформатор ланцюга живлення обмотки збудження;

ОВ - однофазний випрямляч;

ПП - перемикач полярності;

ДН - датчик напруги;

БЖ - блок живлення власних потреб;

СО - систему охолодження;

БС - блок синхронізації з мережею;

ФІУ - формувач імпульсів управління;

СУ - систему управління.

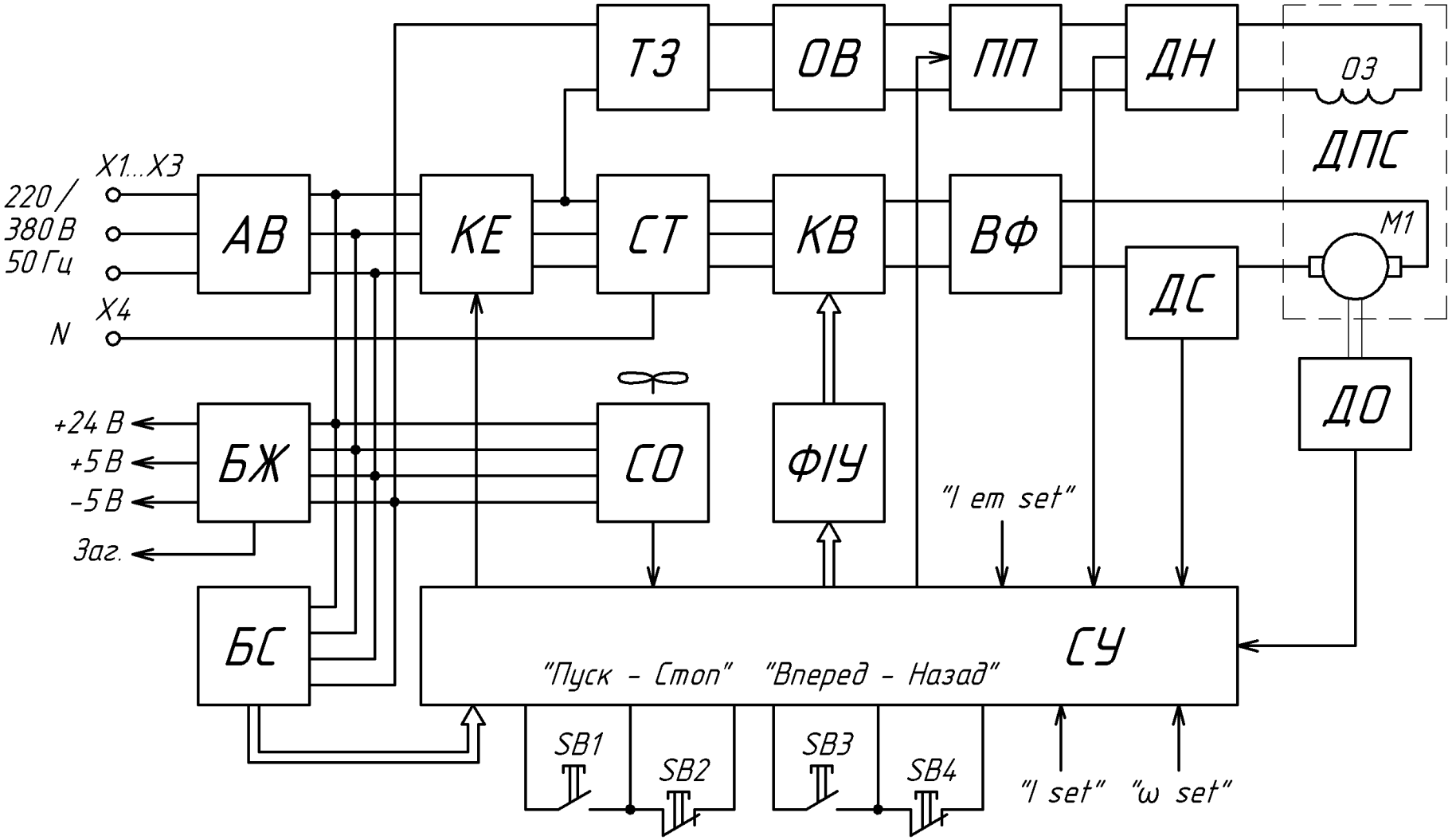


Рисунок 2.1 – Електрична структурна схема джерела живлення електропривода постійного струму

На електричній структурній схемі, додатково, зображені: двигун постійного струму (ДПС) з незалежною обмоткою збудження (ОЗ) і датчик обертів двигуна (ДО).

Рисунок 2.1 відповідає кресленню ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Е1.

Живлення ДЖ ППС здійснюється від промислової трифазної мережі напругою 220 / 380 В частотою 50 Гц. Допустиме відхилення напруги живлення від номінального значення становить + 10 ... - 15%. Навантаженням ДЖ ППС є колекторний двигун (ДПС) з незалежною обмоткою збудження (ОЗ). Обмотка збудження живиться від джерела нестабілізованої постійної напруги. Реверс двигуна здійснюється шляхом зміни полярності напруги живлення ОЗ зі збереженням полярності живлення силової обмотки ДПС. Для вимірювання частоти обертів двигуна використовується ДО. Регулювання і стабілізація частоти обертів ДПС проводиться шляхом зміни величини середнього значення напруги живлення силової обмотки ДПС.

На вході джерела живлення встановлений автоматичний вимикач (АВ), призначений для захисту мережі живлення і силових компонентів схеми від аварійних режимів (пробою тиристора, короткого замикання в обмотці трансформатора, глухе коротке замикання в навантаженні і т.д.). Напруга живильної мережі, при включеному АВ, надходить на вхідні клеми електромагнітного контактора (КЕ), відповідні входи блоку живлення (БЖ), блоку синхронізації з мережею (БС) і системи охолодження (СО). Комутація нейтрального (нульового) проводу мережі живлення не здійснюється. До нейтрального проводу підключені: один з виводів ТЗ і відповідні входи БЖ, БС та СО. Крім того, до нейтрального проводу підключена точка з'єднання первинних обмоток, включених по схемі «Зірка» (загальна точка) трифазного силового трансформатора (СТ).

Електромагнітний контактор (КЕ) призначений для оперативного підключення / відключення силової частини ДЖ ППС до мережі живлення. Управління КЕ здійснюється з пульта оператора за допомогою двох кнопок - SB1 «Пуск» і SB2 «Стоп» або автоматично, відповідно до алгоритму роботи

системи управління (СУ).

При включенні КЕ напруга мережі живлення надходить на первинні обмотки трифазного силового трансформатора (СТ) і однофазного трансформатора кола живлення обмотки збудження (ТЗ). Трансформатори СТ і ТЗ призначені для гальванічної розв'язки вихідних кіл ДЖ ППС і навантаження від промислової мережі живлення та узгодження величини напруги мережі електроживлення з необхідними значеннями вихідних напруг ДЖ ДПС.

Канал живлення обмотки збудження (ОЗ) ДПС складається з: трансформатора (ТЗ), однофазного некерованого випрямляча (ОВ), вузла перемикання полярності (ПП) і датчика вихідної напруги (ДН).

Канал живлення силовий обмотки ДПС включає в себе: силовий трансформатор (СТ), трифазний керований випрямляч (КВ), вихідної згладжуючий фільтр (ВФ) і датчик струму навантаження (ДС).

Керований випрямляч (КВ) призначений для перетворення вхідної змінної трифазної напруги в постійну регульовану напругу, що змінюється в діапазоні від 44 В до 440 В.

Згладжуючий вихідної фільтр (ВФ) призначений для згладжування пульсацій вихідної напруги керованого випрямляча.

Управління тиристорами КВ проводиться системою управління (СУ) через формувач імпульсів управління (ФІУ).

Пристрій для формування імпульсів управління (ФІУ) являє собою обмежувач потужності вихідних імпульсів СУ. Блок призначений для гальванічної розв'язки кіл управління тиристорами і кіл системи управління (кола зворотного зв'язку по струму, напрузі, частоті обертів двигуна, коло управління КЕ та інше).

Система управління призначена для регулювання і стабілізації частоти обертів ДПС, захисту функціональних вузлів і блоків ДЖ ППС від аварійних процесів, управління електромагнітним контактором (КЕ) і перемикачем полярності (ПП).

Регулювання частоти обертів двигуна здійснюється шляхом регулювання величини напруги живлення силовий обмотки ДПС.

Система управління являє собою систему імпульсно-фазового управління вертикального типу. Синхронізація СУ з моментами переходу трифазної напруги мережі живлення через нуль забезпечується сигналами, які надходять на відповідні входи СУ з виходів блоку синхронізації з мережею (БС). Зміна величини напруги живлення силової обмотки ДПС здійснюється шляхом зміни зсуву фази імпульсів управління тиристорами КВ по відношенню до моментів переходу через нуль вхідних напруг КВ (зміна затримки включення).

Завдання частоти обертів ДПС проводиться сигналом «ω set». Сигналом зворотного зв'язку по частоті є вихідний сигнал ДО.

Завдання величини номінального струму навантаження ДЖ ППС проводиться сигналом «I set». Сигналом зворотного зв'язку по струму є вихідний сигнал ДС.

Завдання величини уставки спрацьовування захисту від перевантаження по струму ДЖ ДПС проводиться сигналом «I em set». Сигналом зворотного зв'язку по струму є вихідний сигнал ДС.

Реверс ДПС проводиться шляхом зміни полярності напруги живлення обмотки збудження за допомогою ПП відповідним вихідним сигналом СУ. Управління напрямком обертання здійснюється з пульта оператора за допомогою двох кнопок - SB3 «Наперед» і SB4 «Назад». Реверс, при натисканні однієї з кнопок (SB3, SB4), виконується за наступним алгоритмом:

1. Напруга живлення силової обмотки ДПС знижується до нуля.

2. Проводиться контроль зупинки двигуна (сигнал ДО).

3. Проводиться контроль наявності та полярності напруги живлення ОЗ (сигнал ДН).

4. Проводиться зміна полярності напруги живлення ОЗ.

5. Напруга живлення силової обмотки ДПС плавно збільшується до досягнення двигуном заданого значення частоти обертів (сигнал «ω set»).

Початок роботи ДЖ ППС, після включення АВ і натискання кнопки SB1 «Пуск», передбачає вибір оператором напрямку обертання ДПС (натискання однієї з кнопок (SB3 або SB4)) і проводиться за вищенаведеним алгоритмом (за винятком пункту 1).

Система охолодження (СО) призначена для примусового повітряного охолодження силових вузлів і блоків ДЖ ППС. До складу СО входить датчик вітрового потоку. Сигнал про працездатність СО надходить на відповідний вхід СУ. У разі його відсутності, включення КЕ (подача напруги на первинну обмотку трансформатора ТС) неможливо.

Блок синхронізації з мережею живлення (БС) призначений для формування сигналів синхронізації імпульсів управління тиристорами КВ з моментами переходу через нуль трифазної напруги мережі живлення і гальванічної розв'язки кіл управління ДЖ ППС від мережі живлення.

Блок живлення являє собою трьохканальне джерело постійної стабілізованої напруги. Він призначений для перетворення змінної напруги трифазної мережі живлення в постійні стабілізовані напруги живлення +24 В, +5 В і –5 В (щодо «спільного» проводу) функціональних вузлів і блоків ДЖ ППС. Так само БЖ забезпечує гальванічну розв'язку вторинних кіл ДЖ ППС від мережі живлення.

2.2 Опис електричної принципової схеми джерела живлення

Підключення трифазного джерела живлення електропривода постійного струму до живильної трифазної промислової мережі і глухо заземленого нейтрального проводу здійснюється за допомогою силових клем (X1...X4). Для захисту силових елементів схеми і проводів живлення ДЖ ППС, на його вході встановлено трифазний автоматичний вимикач QF1 (АВ). Оперативне підключення/відключення силової частини перетворювача до мережі живлення здійснюється за допомогою електромагнітного контактора К1 (КЕ). Індикація наявності фазної напруги на вхідних клемах контактора К1

здійснюється за допомогою трьох індикаторних ламп - HL1 «А», HL2 «В» і HL3 «С». Для пригнічення комутаційних перенапруг між фазними проводами і нейтральним проводом підключені конденсатори С1...С3.

Електрична принципова схема ДЖ ДПС наведена на рисунку 2.2 і відповідає ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Е3. Тип і кількість компонентів схеми ДЖ ДПС вказані в переліку елементів ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.ПЕ3.

Система охолодження (СО) складається з трифазного асинхронного двигуна (М1), реле вітрового потоку (А1) і трьох плавких запобіжників (FU1...FU3). Запобіжники FU1...FU3 призначені для захисту ланцюгів живлення М1.

Канал живлення обмотки збудження (ОЗ) включає в себе: плавкий запобіжник FU4, однофазний трансформатор Т2 (ТЗ), однофазний мостовий випрямляч DA1 (ОВ) і реле К2 (ПП). Датчик вихідної напруги (ДН), на схемі не приведений. Управління реле К2 здійснюється сигналами системи управління.

Силовий трансформатор Т1 (СТ) є трифазний трансформатор, зі схемою включення обмоток - «зірка з нейтраллю - зірка».

Трифазний випрямляч (КВ) виконаний за мостовою трифазною схемою випрямлення (схема Ларіонова). В якості силових ключів випрямляча використані тиристори VS1...VS6.

Паралельно кожному тиристору підключений вузол формування траєкторії перемикання (≠ 1...≠ 6). Кожен вузол формування траєкторії перемикання (≠ 1...≠ 6) складається з конденсатора С1 і резистора R1, включених послідовно.

Гальванічна розв'язка ланцюгів управління тиристорів VS1...VS6 і системи управління (СУ) забезпечується шестиканальним (А2...А7) формувачем імпульсів управління (ФІУ).

Кожен канал (модуль) формувача імпульсів управління (А2...А7) включає в себе: конденсатор С1, резистор R1, зворотній діод VD1, імпульсний трансформатор Т1 і роз'єм Х1.

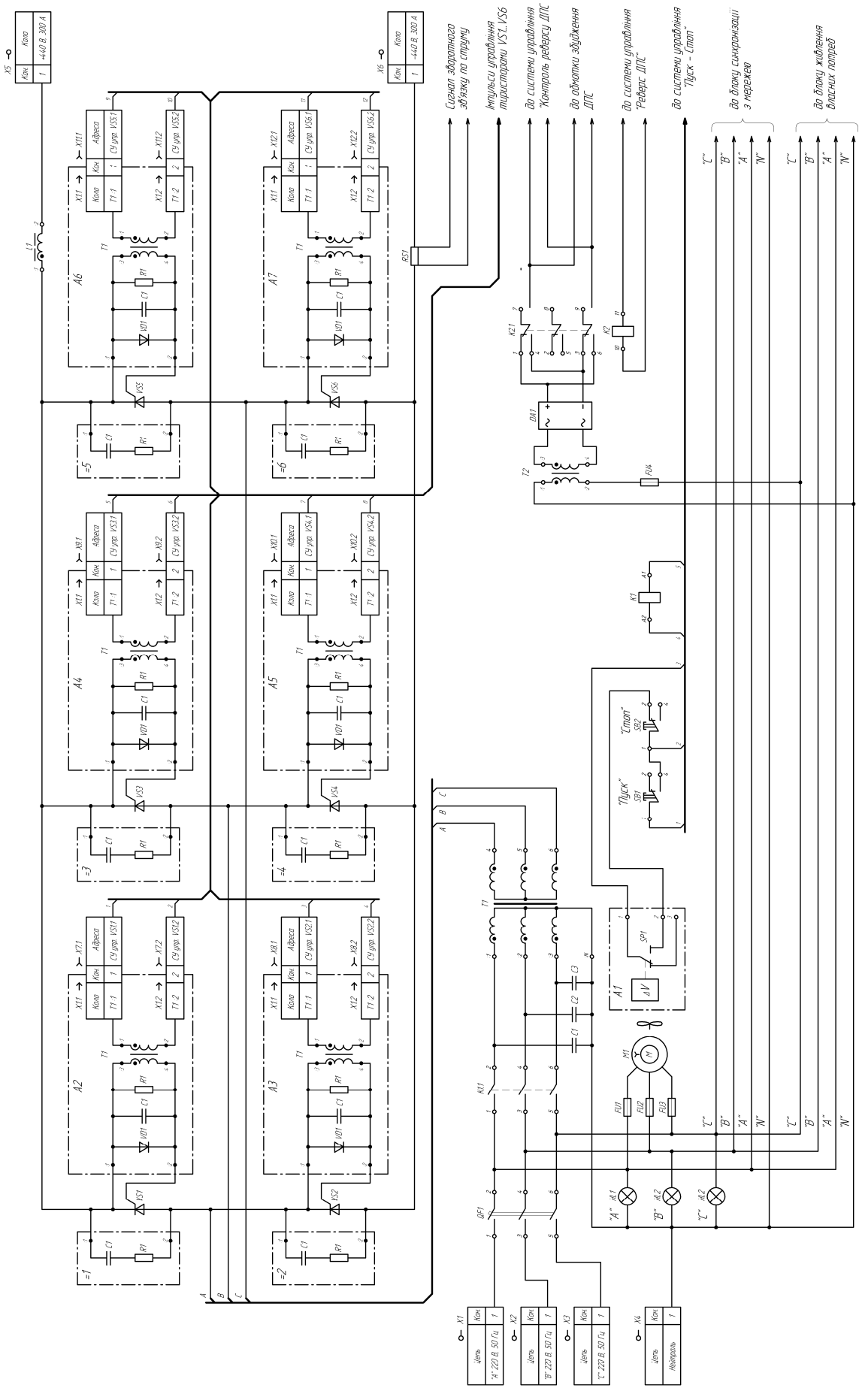


Рисунок 2.2 – Електрична принципова схема джерела живлення електропривода постійного струму

Резистор R1 і конденсатор C1 призначені для пригнічення електромагнітних наведень в ланцюзі управління тиристора. Захист управляючого переходу тиристора від імпульсів зворотної полярності здійснюється високочастотним діодом VD1.

В якості вхідного фільтра (Ф) застосований згладжуючий дросель L1.

Підключення силової обмотки ДПС до ДЖ ППС проводиться за допомогою силових клем X5 і X6.

Оперативне включення ДЖ ППС (підключення первинних обмоток T1 і T2 до мережі живлення) здійснюється з пульта оператора за допомогою кнопки SB1 «Пуск», за умови наявності сигналу дозволу, що надходить в СУ з інформаційних виходів реле вітрового потоку (A1).

Оперативне виключення ДЖ ДПС (відключення первинних обмоток T1 і T2 від мережі живлення) здійснюється з пульта оператора за допомогою кнопки SB2 «Стоп» або автоматично в разі несправності системи охолодження або виникненні аварійних режимів в перетворювачі або навантаженні.

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТРИФАЗНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вихідні дані для розрахунку:

- напруга мережі живлення, U1, В	220 / 380
- відхилення напруги мережі живлення від номінального значення, ΔU1, %	+ 10...–15
- частота мережі живлення, fc, Гц	50
- номінальне значення вихідної напруги, Ud, В	440
- діапазони регулювання вихідної напруги, В	44...440
- відхилення вихідної напруги від номінального значення, ΔUd, %	1
- коефіцієнт пульсацій вихідної напруги, kp	0,01
- номінальне значення струму навантаження, Id, А	350
- значення уставки спрацьовування захисту від перевантаження по струму, Ipol, А	1,1 × Id

3.1 Розрахунок і вибір напруг вторинної обмотки трансформатора

Мінімальне, номінальне і максимальне значення напруги мережі живлення, відповідно дорівнюють

$$U1_{min} = 0{,}85 \cdot U1 = 0{,}85 \cdot 220 = 187\ B \qquad (3.1)$$

$$U1_{nom} = 220\ B$$

$$U1_{max} = 1{,}1 \cdot U1 = 1{,}1 \cdot 220 = 242\ B \qquad (3.2)$$

Мінімальне, номінальне і максимальне значення напруги вторинної обмотки трансформатора, відповідно мінімальної, номінальної і максимальної напруги живильної мережі, будуть відповідно рівні:

$$U2_{min} = Ud/2{,}34 = 440/2{,}34 = 188{,}03\ B \quad (3.3)$$

$$U2_{nom} = U2_{min}/0{,}85 = 188{,}3/0{,}85 = 221{,}22\ B \quad (3.4)$$

$$U2_{max} = 1{,}1 \cdot 221{,}22 = 243{,}34\ B \quad (3.5)$$

На підставі результату розрахунку (3.4) приймаємо номінальне значення напруги вторинної обмотки $U2_{p_nom}$ = 222 В.

Мінімальне і максимальне значення напруги вторинної обмотки, відповідно до (3.3) і (3.5), будуть дорівнювати:

$$U2_{p_min} = 0{,}85 \cdot U2_{p_{nom}} = 0{,}85 \cdot 222 = 188{,}7\ B$$

$$U2_{p_min} = 1{,}1 \cdot U2_{p_{nom}} = 1{,}1 \cdot 222 = 244{,}2\ B$$

3.2 Визначення напруги холостого ходу керованого випрямляча

Рівняння зовнішньої характеристики керованого випрямляча [14, 15]

$$Ud = Ed_{0_min} \cdot cos\alpha - \Delta U_X - \Delta U_a - \Delta U_R - \Delta U_F\ , \quad (3.6)$$

де Ed_{0_min} – ЕРС холостого ходу випрямляча, що відповідає мінімальному значенню напруги мережі живлення, В;

Ud – номінальна вихідна напруга випрямляча, В, Ud = 440 В;

ΔU_X – комутаційне падіння напруги, В;

ΔU_a – падіння напруги на вентилях, В;

ΔU_R – падіння напруги на активному опорі обмоток трансформатора або струмообмежувальному реакторі, В;

ΔU_F – падіння напруги на активному опорі дроселя згладжуючого фільтра, В;

α – кут регулювання, електричних градусів (ел. град.).

На початковій стадії розрахунків параметри елементів схеми невідомі, тому падіннями напруг в схемі доводиться задаватися, використовуючи метод експертних оцінок (досвід розробок подібного обладнання). Після вибору всіх елементів схеми необхідно виконати уточнюючий розрахунок і провести відповідне коригування параметрів.

Комутаційне падіння напруги може бути визначено за формулою:

$$\Delta U_X = A \cdot \frac{U_K\%}{100} \cdot Ud = \frac{0{,}5 \cdot 440 \cdot 10}{100} = 22\ B\ , \qquad (3.7)$$

де A – коефіцієнт нахилу зовнішньої характеристики (для трифазного мостового випрямляча A = 0,5);

$\Delta U_K\%$ – напруга короткого замикання силового трансформатора, %, $\Delta U_K\% = 5 \ldots 10\%$.

Для подальших розрахунків, на підставі експертної оцінки, приймаємо ΔUK% = 10%;

Інші складові падіння напруги на виході випрямляча, для режиму номінального струму навантаження, можуть бути визначені з співвідношень:

$$\Delta U_R = (0{,}015 \ldots 0{,}025) \cdot Ud = 0{,}02 \cdot 440 = 8{,}8\ B\ , \qquad (3.8)$$

$$\Delta U_a = n \cdot (1{,}1 \ldots 1{,}2) = 0{,}02 \cdot 1{,}2 = 2{,}4\ B\ , \qquad (3.9)$$

$$\Delta U_F = (0{,}005 \ldots 0{,}015) \cdot Ud = 0{,}005 \cdot 440 = 2{,}2\ B\ , \qquad (3.10)$$

де n – кількість вентилів в контурі струму, включених послідовно, n = 2.

ЕРС холостого ходу випрямляча, при Ud = 440 В і α = 0 ел. град.:

$$Ed_0 = \frac{Ud + \Delta U_X + \Delta U_a + \Delta U_R + \Delta U_F}{cos\alpha} =$$
$$= \frac{440 + 22 + 8{,}8 + 2{,}4 + 2{,}2}{1} = 475{,}4 \text{ В}. \quad (3.11)$$

Виходячи з рівняння зовнішньої характеристики:

$$Ud = Ed_{0_min} \cdot cos\alpha - \Delta U_X - \Delta U_a - \Delta U_R - \Delta U_F = 2{,}34 \cdot U2, \quad (3.12)$$

$$Ed_{0_min} \cdot cos\alpha = 2{,}34 \cdot U2 + \Delta U_X + \Delta U_a + \Delta U_R + \Delta U_F =$$
$$= 2{,}34 \cdot U2 + \Delta U_\Sigma, \quad (31.13)$$

де ΔU_Σ – сумарне падіння напруги на виході випрямляча

$$\Delta U_\Sigma = \Delta U_X + \Delta U_a + \Delta U_R + \Delta U_F = 22 + 8{,}8 + 2{,}4 + 2{,}2 = 35{,}4\ B \quad (31.14)$$

ЕРС холостого ходу випрямляча, при $U2_{p_min}$ = 188,7 В, $U2_{p_ном}$ = 222 В і $U2_{p_max}$ = 244,2 В і α = 0 ел. град., будуть відповідно рівні

$$Ed_{0_min} \cdot cos\alpha = 2.34 \cdot U2_{p_min} + \Delta U_\Sigma =$$
$$= 2{,}34 \cdot 188{,}7 + 35{,}4 = 476{,}95\ B \quad (3.15)$$

$$Ed_{0_{nom}} \cdot cos\alpha = 2.34 \cdot U2_{p_{nom}} + \Delta U_\Sigma =$$
$$= 2{,}34 \cdot 222{,}0 + 35{,}4 = 554{,}88\ B \quad (3.16)$$

$$Ed_{0_{max}} \cdot cos\alpha = 2.34 \cdot U2_{p_{max}} + \Delta U_\Sigma =$$
$$= 2{,}34 \cdot 244{,}2 + 35{,}4 = 606{,}83\ B \quad (3.17)$$

Виходячи з лінійності зовнішніх характеристик, визначимо значення

кутів регулювання α, що забезпечують стабілізацію вихідної напруги Ud = 440 В на рівні завдання при зміні вхідної напруги мережі живлення в діапазоні U_1 = 187...242 В:

$$\alpha_{min} = arccos\left(\frac{Ed_0}{Ed_{0_min}}\right) = arccos\left(\frac{475{,}4}{476{,}95}\right) = 4{,}62 \text{ ел. град} \quad (3.18)$$

$$\alpha_{nom} = arccos\left(\frac{Ed_0}{Ed_{0_nom}}\right) = arccos\left(\frac{475{,}4}{544{,}88}\right) = 29{,}25 \text{ ел. град} \quad (3.19)$$

$$\alpha_{max} = arccos\left(\frac{Ed_0}{Ed_{0_max}}\right) = arccos\left(\frac{475{,}4}{606{,}83}\right) = 38{,}425 \text{ ел. град} \quad (3.20)$$

Виходячи з лінійності зовнішніх характеристик, визначимо значення кутів регулювання α, що забезпечують стабілізацію вихідної напруги на рівні завдання Ud_{min} = 44 В при зміні вхідної напруги мережі живлення в діапазоні U_1 = 187...242 В у режимі близькому до режиму холостого ходу:

$$\alpha_{min} = arccos\left(\frac{Ud_{min} + \Delta U_\Sigma}{Ed_{0_min}}\right) = arccos\left(\frac{44 + 35{,}4}{476{,}95}\right) = 80{,}417 \text{ ел. град} \quad (3.21)$$

$$\alpha_{nom} = arccos\left(\frac{Ud_{min} + \Delta U_\Sigma}{Ed_{0_{nom}}}\right) = arccos\left(\frac{44 + 35{,}4}{544{,}88}\right) = 81{,}62 \text{ ел. град} \quad (3.22)$$

$$\alpha_{max} = arccos\left(\frac{Ud_{min} + \Delta U_\Sigma}{Ed_{0_max}}\right) = arccos\left(\frac{44 + 35{,}4}{606{,}83}\right) = 82{,}48 \text{ ел. град} \quad (3.23)$$

3.3 Розрахунок основних параметрів силової частини випрямляча

Чинне значення струму вторинних обмоток трансформатора [14, 15]

$$I2 = 0{,}817 \cdot Id = 0{,}817 \cdot 350 = 285{,}95\ A \quad (3.24)$$

Середнє значення струму вентилів

$$I_{a_cp} = 0{,}333 \cdot Id = 0{,}333 \cdot 350 = 116{,}67\ A \quad (3.25)$$

Чинне значення струму вентилів

$$I_a = 0{,}577 \cdot Id = 0{,}577 \cdot 350 = 201{,}95\ A \quad (3.26)$$

Значення чинної напруги вторинних обмоток трансформатора визначено раніше (3.4), округлене в більшу сторону, до найближчого цілого значення, і становить $U2_{p_nom}$ = 222 В.

Коефіцієнт трансформації силового трансформатора:

$$K_T = \frac{U1_{nom}}{U2_{nom}} = \frac{220}{222} = 0{,}991 \quad (3.27)$$

Чинне значення струму первинної обмотки трансформатора:

$$I1 = \frac{Id}{K_T} = 0{,}817 \cdot \frac{350}{0{,}991} = 288{,}55\ A \quad (3.28)$$

Амплітудне значення зворотної напруги, що прикладається до вентилів:

$$U_{b_max} = 1{,}045 \cdot Ud = 1{,}045 \cdot 440 = 459{,}8\ B \quad (3.29)$$

Номінальна вихідна потужність проектованого джерела живлення:

$$Pd = Ud \cdot Id = 440 \cdot 350 = 154000\ Bт \quad (3.30)$$

Еквівалентний опір навантаження:

$$Rd = \frac{Ud}{Id} = \frac{440}{350} = 1{,}257\ Ом \quad (3.31)$$

Встановлена потужність вторинних обмоток трансформатора:

$$S2 = 1{,}05 \cdot 154000 = 161700\ BA \quad (3.32)$$

Встановлена потужність первинної обмотки трансформатора:

$$S1 = 1{,}05 \cdot 154000 = 161700\ BA \quad (3.33)$$

Встановлена (типова) потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S1 + S2}{2} = 161700\ BA \quad (3.34)$$

3.4 Вибір вентилів і розрахунок їх теплового режиму

При виборі параметрів вентилів береться до уваги, що робочий струм вентиля (середнє значення – I_a) повинен складати 50...70% гранично допустимого струму, а робоча зворотна напруга вибирається по формулі [15]:

$$U_{b_роб} \geq \frac{U_{b_max} \cdot K_{кп} \cdot K_з}{K_p} \geq \frac{459{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot 1{,}1}{0{,}8} = 885{,}12\ B \quad (3.35)$$

де U_{b_max} – розрахункова зворотна напруга, рівна амплітуді ЕРС трансформатора при максимальній напрузі живлячої мережі, В

$К_{кп}$ – коефіцієнт, що враховує наявність комутаційних перенапружень: $К_{кп}$ = 1,4;

$К_з$ – коефіцієнт запасу: $К_з$ = 1,1;

$К_р$ – коефіцієнт співвідношення, що рекомендується, між робочою і допустимою напругою, що повторюється, на вентилі: $К_р$ = 0,8.

В якості тиристорів VS1...VS6 (рис. 2.2), на підставі результатів розрахунку $U_{b_роб}$ = 885,115 В (3.35) і $I_{a_ср}$ = 116,67 А (3.25) вибираємо таблеткові тиристори виробництва ТОВ "Елемент-Перетворювач" для панельного монтажу типу Т123-200-10 (10 клас), параметри яких наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - основні параметри тиристора Т123-200-10 [16]

Позначення	Параметр	Значення	Розмірність
1	2	3	4
U_b	Повторювана імпульсна зворотна напруга	1000	В
$I_{a_ср}$	Максимально допустимий середній струм тиристора у відкритому стані, при Т = 85 ºС	200	А
I_a	Діючий прямий струм тиристора	315	А
$I_{уд}$	Ударний струм у відкритому стані	5,0	кА
i^2t	Захисний показник	80	$кА^2 \cdot с$
$(di/dt)_{кр}$	Критична швидкість наростання струму у відкритому стані	160	А/мкс
$(du/dt)_{кр_min}$	Критична швидкість наростання напруги в закритому стані, мінімальна	500	В/мкс

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
$(du/dt)_{кр_max}$	Критична швидкість наростання напруги в закритому стані, максимальна	1600	В/мкс
t_q	Час виключення	250	мкс
$Q_{гг}$	Заряд зворотного відновлення	450	мкКл
$T_П$	Температура переходу	-60…+125	°С
U_0	Порогова напруга	1,1	В
r_q	Динамічний опір	1,08	мОм
$r_{ПК}$	Тепловий опір перехід - корпус (постійний струм): - двостороннє охолодження - охолодження з боку анода - охолодження з боку катода	 0,08 0,16 0,16	°С/Вт
$r_{КО}$	Тепловий опір корпус - охолоджувач: - двостороннє охолодження - одностороннє охолодження	 0,02 0,04	°С/Вт

Середня температура напівпровідникової структури тиристора не повинна перевищувати максимально допустиму температуру переходу [15]:

$$Q_{СТ} = Q_{ОС} + r_Т \cdot P_в \leq Q_{СТ_ДОП}\ , \qquad (3.36)$$

де $\Theta_{СТ}$ – температура напівпровідникової структури в стаціонарному режимі, °С;

$\Theta_{ОС}$ – температура довкілля, $\Theta_{ОС}$ = 40°С;

$r_т$ – сумарний тепловий опір тиристора і охолоджувача для обраних умов охолодження, °С/Вт;

$P_в$ – потужність втрат у вентилі, Вт;

$\Theta_{СТ_ДОП}$ – максимально допустима температура напівпровідникової структури обраних тиристорів, $\Theta_{СТ_ДОП}$ = 125 °С.

Втрати у вентилі визначаються по формулі:

$$P_B = U_0 \cdot I_{\text{a_ср}} \cdot \left(1 + K_{\text{ф}}^2 \cdot \frac{I_{\text{a_ср}} \cdot r_q}{U_0}\right) =$$

$$1{,}1 \cdot 116{,}67 \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{116{,}67 \cdot 1{,}08 \cdot 10^{-3}}{1{,}1}\right) = 172{,}44 \text{ Вт} \qquad (3.37)$$

$$\text{К}_\Phi = \sqrt{m_2} = \sqrt{3}\,, \qquad (3.38)$$

де U_o – порогова напруга, U_o = 1,1 В;

$I_{a_ср}$ – середнє значення анодного струму, $I_{a_ср}$ = 116,67 А;

$К_ф$ – коефіцієнт форми анодного струму вентиля;

m_2 – число вторинних фаз силового трансформатора, m_2 = 3;

r_q – динамічний опір вентиля, r_q =1,08 10^{-3} Ом.

У зв'язку з тим, що підприємство-виробник тиристорів не надає дані про величину теплового опору охолоджувача, в формулу (3.36) вводимо доданок, який відповідає температурі перегріву охолоджувача по відношенню до температури навколишнього середовища. На підставі експертних оцінок, при повному навантаженні перетворювача, температура охолоджувача може перевищувати температуру навколишнього середовища на 30...40 градусів. Приймаються - $\Delta\Theta_{OX}$ = 40 ºС. З урахуванням вищесказаного, температура структури силового тиристора:

$$Q_{CT} = Q_{OC} + \Delta Q_{OX} + r_{VS} \cdot P_{\text{в}} \le Q_{CT_\text{ДОП}}\,, \qquad (3.39)$$

де Θ_{CT} – температура структури силового тиристора, ºС;

Θ_{OC} – температура навколишнього середовища, Θ_{OC} = 40 ºС;

$\Delta\Theta_{OX}$ – температура перегріву охолоджувача, $\Delta\Theta_{OX}$ = 40 ºС;

r_{VS} – тепловий опір тиристора, ºС/Вт;

$P_В$– потужність втрат в тиристорі, Вт.

Тепловий опір тиристора, встановленого між двома охолоджувачами, дорівнює сумі теплового опору перехід - корпус (при двосторонньому охолодженні) $r_{ПК}$ = 0,08 °С/Вт і теплового опору корпус - охолоджувач (при двосторонньому охолодженні) $r_{КО}$ = 0,02 °С/Вт.

$$r_{VS} = r_{ПК} + r_{КО} = 0{,}08 + 0{,}02 = 0{,}1\ °C/Вт \tag{3.40}$$

$$Q_{CT} = 40 + 40 + 0{,}1 \cdot 172{,}44 = 97{,}25 \leq 125\ °C$$

3.5 Розрахунок аварійних режимів

Перевіримо вентилі по захисному показнику i^2t [16] для найбільш важкого режиму – внутрішнього короткого замкнення (КЗ), що виникає при пробої вентиля у момент початку комутації за умови блокування імпульсів керування тиристорами до наступної комутації при α = 0 ел. град.. При цьому не повинно відбуватися вигорання вентилів, що підпитують контур КЗ.

Параметри контуру короткого замикання згідно з розрахунковими даними силового трансформатора:

$$Z_T = \frac{U2_{p_nom}}{I2} \cdot \frac{U_K\%}{100} = \frac{222}{285{,}95} \cdot \frac{10}{100} = 0{,}078\ Ом \tag{3.41}$$

де $Z_Т$ – приведений до вторинної обмотки опір КЗ трансформатора, Ом;

$U2_{p_nom}$ – прийняте номінальне діюче значення вторинних обмоток трансформатора (фазне), В;

I2 – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора, А;

$U_К$% – напруга короткого замикання силового трансформатора, $U_К$% = 10%.

Відповідно до обраного значенням падіння напруги на активному опорі обмоток трансформатора (3.8) ΔU_R = 8,8 В

Активний опір обмоток трансформатора

$$R_T = \frac{\Delta U_R}{I2} = \frac{8{,}8}{285{,}95} = 0{,}031 \text{ Ом} \quad (3.42)$$

Індуктивна складова опору контуру короткого замыкания

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0.078^2 - 0{,}031^2} = 0{,}072 \text{ Ом} \quad (3.43)$$

Базисний струм визначається по формулі:

$$I_б = \frac{\sqrt{2} \cdot U2_{p_max}}{Z_T} = \frac{\sqrt{2} \cdot 244{,}2}{0{,}078} = 4427{,}54\ A \quad (3.44)$$

Співвідношення між базисним струмом і ударним струмом КЗ, а також тепловим еквівалентом струму короткого замикання залежить від реактивності контуру

$$\frac{R_T}{X_T} = \frac{0{,}031}{0{,}072} = 0{,}43 \quad (3.45)$$

Індуктивність розсіювання силового трансформатора

$$L_T = \frac{X_T}{\omega} = \frac{0{,}072}{314} = 229 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}, \quad (3.46)$$

де ω – кругова частота, рад/с.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_C = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \quad (3.47)$$

Амплітуда ударного струму короткого замикання:

$$I_{K_max} = K_{\text{уд}} \cdot I_{\text{б}} = 1{,}1 \cdot 4427{,}54 = 4870{,}3\ A\ , \qquad (3.48)$$

де I_{Kmax} – амплітуда ударного струму, А

$K_{уд}$ – коефіцієнт, залежний від співвідношення Ra/Xa, $K_{уд}$ = 1,1 [17].

Відповідно до технических параметрів, допустима величина ударного струму тиристора Т123-200-10, складає

$$I_{уд} = 5000\ A > I_{Kmax}. \qquad (3.49)$$

Тепловий еквівалент струму короткого замикання, $А^2 \cdot с$:

$$i^2 t_{\text{расч}} = I_{\text{б}}^2 \cdot \frac{(i^2 t)^*}{\omega} = \frac{4427{,}54^2 \cdot 2{,}5}{314} = 156{,}075\ \text{к}A^2 \cdot \text{с}\ , \qquad (3.50)$$

де $(i^2t)^* = 2{,}5$ [17] – коефіцієнт, залежний від співвідношення Ra/Xa.

За умови блокування імпульсів керування тиристорами протягом першої комутації тепловий вплив аварійного струму становитиме

$$i^2 t_{0{,}02} = i^2 t_{\text{расч}} \cdot T = 156{,}075 \cdot 0{,}02 = 3{,}122\ \text{к}A^2 \cdot \text{с}\ , \qquad (3.51)$$

де T = – період напруги мережі живлення, $T = 20 \cdot 10^{-3}$ с = 20 мс.

Згідно з розрахунками теплової еквівалент тиристорів істотно більше розрахункового:

$$i^2t > i^2t_{0,02} = 80000 > 3{,}122\ \text{к}A^2 \cdot \text{с} \qquad (3.52)$$

Вибрані тиристори витримують аварійні режими за умови блокування імпульсів керування.

3.6 Обмеження комутаційних перенапруг

При виключенні силових тиристорів із-за обриву зворотного струму на індуктивності комутаційного контуру виникає ЕРС, яка підсумовується з тією, що комутує ЕРС. Ця ЕРС зазвичай називається комутаційною перенапругою.

Для обмеження перенапруги застосовуються захисні RC- ланцюжки, що включаються паралельно напівпровідниковим приладам. Для розрахунку захисного ланцюжка необхідно знати амплітуду зворотного струму вентиля, що захищається, та індуктивність контуру комутації, яка в основному визначається реактивною складовою опору КЗ силового трансформатора

Реактивна складова опору короткого замикання трансформатора відповідає його індуктивності розсіювання ($L_T = 229 \cdot 10^{-6}$ Гн), значення якої визначено раніше (3.46).

Амплітуда зворотного струму вентиля залежить від величини накопиченого заряду і швидкості зменшення анодного струму [15].

Швидкість зменшення анодного струму:

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = \frac{\sqrt{6} \cdot U2_{p_max}}{L_T} = \frac{\sqrt{6} \cdot 244{,}2}{229 \cdot 10^{-6}} = 2\ 612\ 076\ A/c \qquad (3.53)$$

Що відповідає 2,6 А/мкс.

Для значення (di/dt) за даними виробника визначається накопичений заряд Q_{rr}=450 мкКл та час зворотного відновлення t_q=250 мкс (таблиця 3.1).

Амплітуда зворотного струму:

$$I_{b_max} = \frac{2 \cdot Q_{rr}}{t_q} = \frac{2 \cdot 450 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 10^{-6}} = 3{,}6\ A \tag{3.54}$$

Опір резистора захисного ланцюга вибираємо рівний хвилевому опору контуру, що складається з комутаційної індуктивності і ємності захисного ланцюга.

Визначимо параметри захисного ланцюжка.

Задаємося значенням коефіцієнта перенапруги $U^*_{max} = 1{,}25$.

Хвильовий опір контуру:

$$R = \frac{U^*_{max} \cdot \sqrt{6} \cdot U2_{p_max}}{I_{b_max}} = \frac{1{,}25 \cdot \sqrt{6} \cdot 244{,}2}{3{,}6} = 207{,}69\ \text{Ом} \tag{3.55}$$

По ряду Е24 вибирається резистор 200 Ом

Ємність захисного ланцюжка:

$$C = \frac{L_T}{R^2} = \frac{229 \cdot 10^{-6}}{200^2} = 5{,}7 \cdot 10^{-9}\ \Phi \tag{3.56}$$

Вибирається конденсатор К78-2-6,2 нФ ± 10% 1000В.

Потужність, що розсіюється в резисторі захисного ланцюга, визначається енергією, що запасається в елементах коливального контуру при включенні вентиля. Ця потужність:

$$P_R = \left(3 \cdot \frac{C \cdot E_K^2}{2} + \frac{L_T \cdot I_{b_max}^2}{2}\right) \cdot f_C =$$

$$= \left(1{,}5 \cdot 6{,}2 \cdot 10^{-9} \cdot 598{,}2^2 + \frac{229 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}6^2}{2}\right) \cdot 50 = 0{,}24\ \text{Вт} \tag{3.57}$$

де P_R – потужність, що розсіюється в резисторі, Вт;

C – ємність ланцюга, Ф

L_K – індуктивність комутаційного контуру, Гн;

E_K – амплітуда комутуючої напруги, В.

$$E_K = \sqrt{6} \cdot U2_{p_max} = \sqrt{6} \cdot 244{,}2 = 598{,}2\ B \qquad (3.58)$$

Оскільки робоча напруга тиристорів становить E_K = 598,2 В, обираємо резистор SQP-2 200 Ом ±5%.

3.7 Розрахунок фільтру

Індуктивність дроселя, що згладжує, визначається з умови заданого струму пульсацій струму навантаження [14, 15]. Величина максимального кута управління визначена раніше (3.23) і становить α_{max} = 85,84 ел. град.

Амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги:

$$U_{m(1)} = \frac{2 \cdot Ed_{0_max} \cdot cos\alpha_{max}}{(qm)^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (qm)^2 \cdot tg^2\alpha_{max}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 606{,}83 \cdot \cos 82{,}48}{6^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (6)^2 \cdot tg^2\ 82{,}48} = 209{,}11\ B \qquad (3.59)$$

де qm – пульсність схеми, qm = 6.

Індуктивність дроселя, що згладжує:

$$L_d = \frac{U_{m(1)}}{qm \cdot \omega \cdot kp \cdot Id} = \frac{209{,}11}{6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}01 \cdot 350} = 0{,}032\ \text{Гн} \qquad (3.60)$$

де ω – кругова частота, рад/с.

kp – коефіцієнт пульсацій вихідної напруги (струму), kp = 0,01;

Id – номінальне значення струму навантаження, Id = 350 А.

3.8 Моделювання трифазного мостового випрямляча

Пакет Simulink є додатком до пакету MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, згідно з яким, користувач на екрані з бібліотек стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки. [18].

Ефективність MATLAB обумовлена перш за все її орієнтацією на матричні обчислення з програмної емуляції паралельних обчислень та спрощеними засобами завдання циклів. Останні версії системи підтримують 64-розрядні мікропроцесори і багатоядерні процесори, наприклад IntelCore 2 Duo і Quad, що забезпечує високі показники по швидкості обчислень і швидкості математичного імітаційного моделювання. В MATLAB вдало реалізовані засоби роботи з багатовимірними масивами, великими і розрідженими матрицями і багатьма типами даних. Система пройшла багаторічний шлях розвитку від вузько спеціалізованого матричного програмного модуля, використовуваного тільки на великих ЕОМ, до універсальної інтегрованої системи комп’ютерної математики (СКМ), орієнтованої на масові персональні комп'ютери класу IBM PC, AT і Macintosh, робочі станції UNIX і навіть суперкомп'ютери. MATLAB має потужні засоби діалогу, графіки та комплексної візуалізації обчислень. Нові версії системи мають вбудований компілятор і дозволяють створювати виконувані файли. [19].

Як керований випрямляч трифазного джерела живлення електроприводу постійного струму, використаний тиристорний трифазний мостовий випрямляч, виконаний за схемою А.М. Ларіонова. Модель випрямляча представлена на рисунку 3.1. Модель складається с декілька блоків, а саме: трансформатор представлено за допомогою 3-х джерел живлення для 3 фазної системи, тиристорів, струм та напруги знімаються за допомогою спеціальних датчиків у програмі моделювання. Всі осцилограми знято за допомогою спеціального блока Scope.

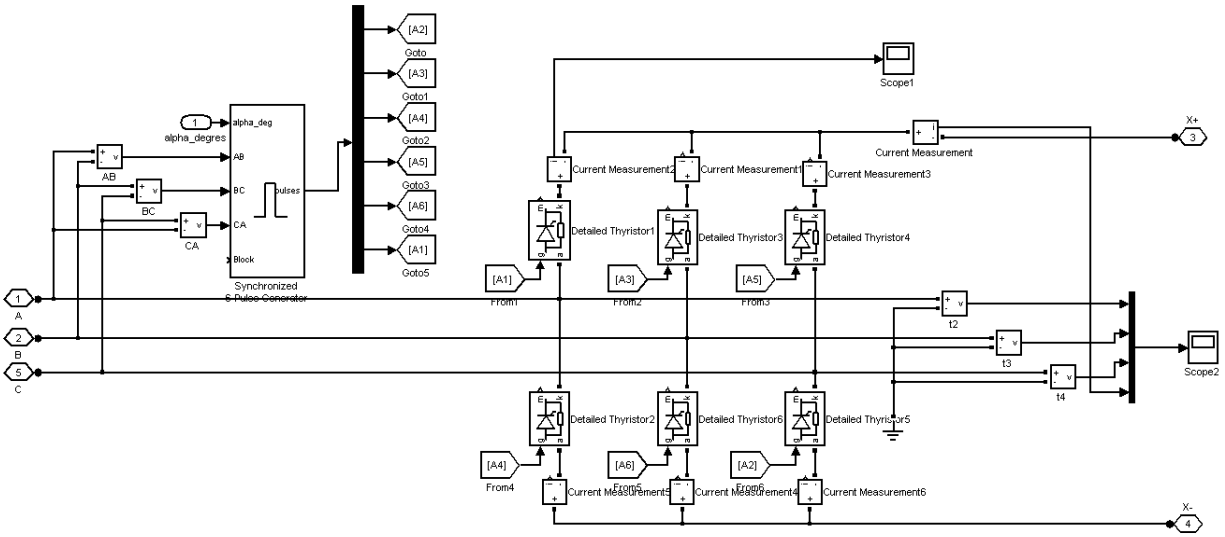


Рисунок 3.1 – Трифазний мостовий випрямляч

Результати моделювання, які показали коректність розрахунків трифазної мостової схеми випрямляча Ларіонова А.М., представлені на рисунках 3.2 – 3.6.

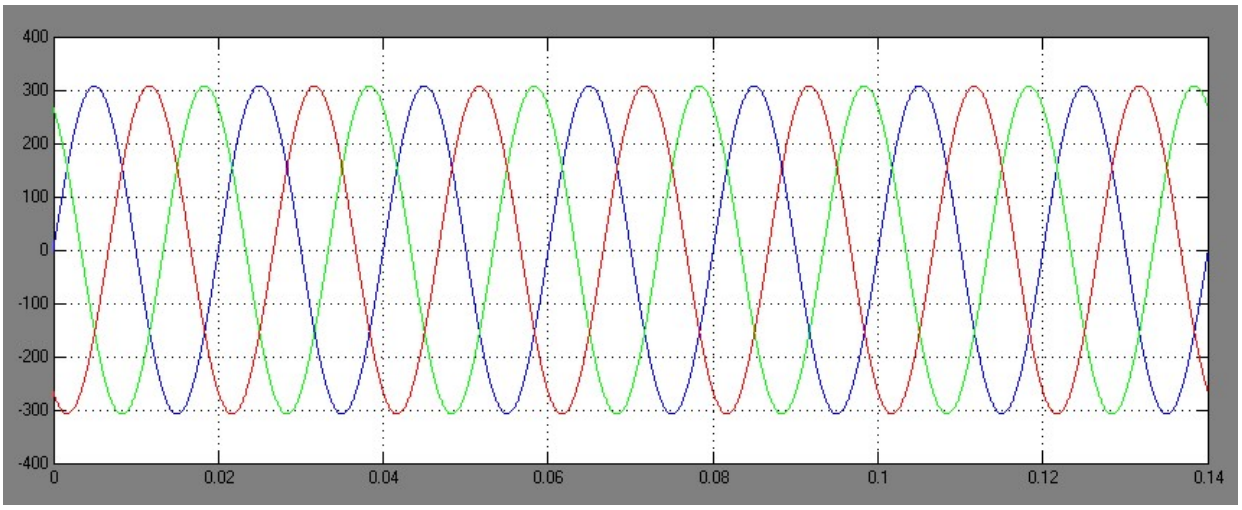


Рисунок 3.2 – Діаграми трифазної сітьової напруги живлення

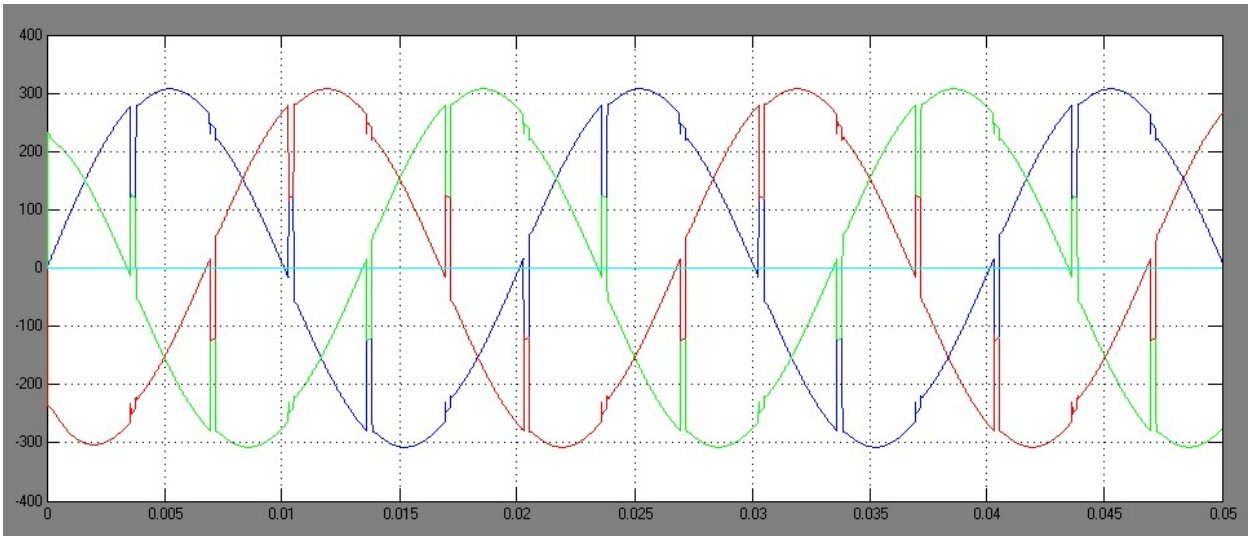


Рисунок 3.3 – Діаграми трифазної напруги на вході тиристорного мостового випрямляча при α = 45 ел. град

Провали в напрузі трифазної мережі живлення обумовлені процесами комутації тиристорів керованого випрямляча.

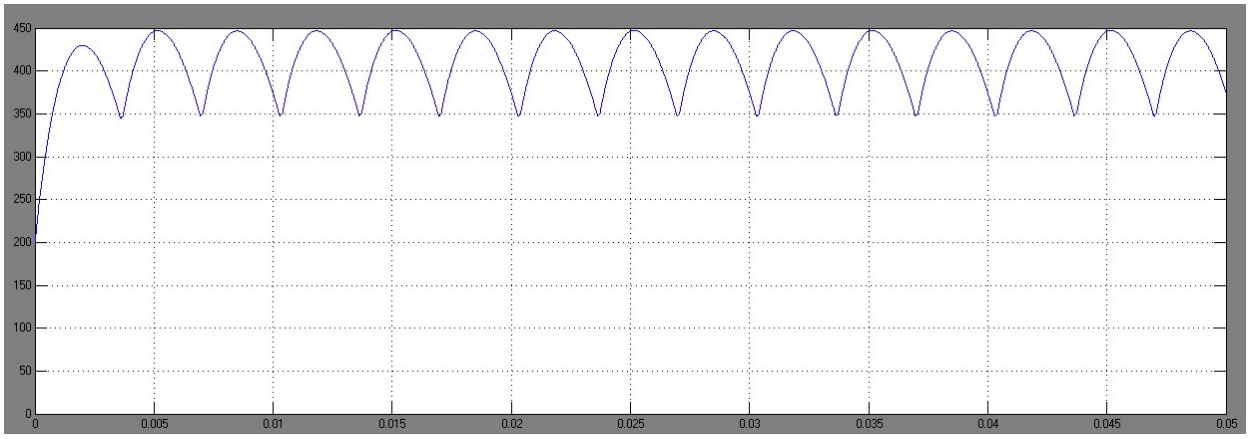


Рисунок 3.4 – Діаграма вихідної напруги трифазного тиристорного мостового випрямляча при α = 0 ел. град.

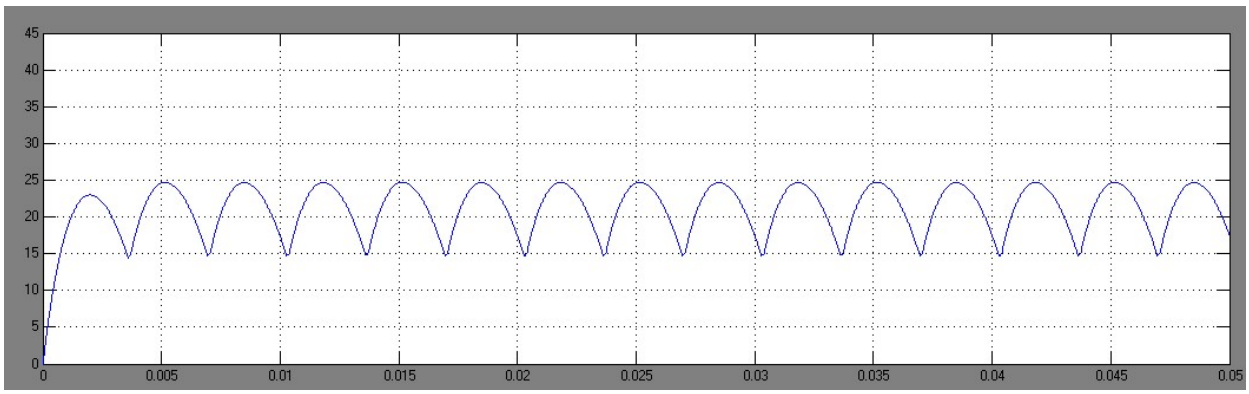


Рисунок 3.5 – Діаграма струму навантаження трифазного тиристорного мостового випрямляча при α = 0 ел. град



Рисунок 3.6 – Діаграма струму тиристора трифазного мостового випрямляча при α = 0 ел. град.

4 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Технологія виготовлення друкованої плати

Відповідно до ГОСТ 23751-79 розрізняють три методи виконання друкованих плат: ручний, напівавтоматизований і автоматизований. В даному випадку використовувався ручний метод, коли розміщення елементів (компоновка) і розробка провідного рисунка (трасування) здійснювалася вручну.

Методи виготовлення одно- і двосторонніх друкованих плат класифікують за принципом отримання провідного рисунка і способу формування зображення рисунка друкованої плати.

У виробництві друкованих плат широко застосовують фотографічний спосіб формування рисунка. При цьому способі використовуються різні види активного випромінювання для експонування світлочутливих матеріалів, нанесених на основу друкованої плати – мідну фольгу.

В даний час добре освоєний хімічний метод виробництва друкованих плат з фольгованих діелектриків. Цей метод поєднується з фотографічним способом отримання зображення друкованого рисунка і забезпечує високу роздільну здатність друкованих провідників.

Достоїнствами хімічного методу є: доступність механізації і автоматизації, можливість отримання високої якості друкованих плат, які володіють високою адгезією друкованих провідників до діелектричної підкладинки. Недоліками хімічного методу є: наявність активної дії хімічних речовин на діелектричну підставу друкованої плати, підвищену витрату травильників і підбурюваної міді, яка в більшості випадків не регенерується.

У промисловості в даний час широко упроваджуються хімічні методи отримання провідного рисунка друкованих плат з фольгованих матеріалів з витонченою фольгою (5...10 мкм). У таких друкованих платах вдається

отримати вузькі друковані провідники і підвищити щільність друкованого монтажу.

Виготовлення друкованої плати відбувається на виробничій ділянці, де встановлено необхідне устаткування. Послідовність виготовлення друкованої плати при використанні негативного фоторезиста для отримання провідного рисунка хімічним методом наступна:

1. Відріз заготівки.
2. Підготовка поверхні фольгованого склотекстоліту.
3. Протирання заготівки тканою серветкою від слідів забруднень.
4. Промивка заготівки холодною водою.
5. Зачистка поверхні заготівки полірувальною сумішшю.
6. Промивка заготівки гарячою водою.
7. Промивка заготівки холодною водою.
8. Декорування.
9. Промивка холодною водою.
10. Контроль заготівки на вигляд.
11. Нанесення фоторезиста на заготівку.
12. Експонування.
13. Труєння зображення.
14. Дублення хімічне.
15. Дублення термічне.
16. Зняття окалини з поверхні заготівки.
17. Ретушування.
18. Труєння міді.
19. Видалення емульсії.
20. Лакування.
21. Передача заготівки на свердлування отворів.
22. Передача плати на поліровку.
23. Гальванічне покриття контактної частини плати.
24. Нанесення сплаву «Розе».

25. Обрізання плати по контуру.

26. Маркірування.

27. Контроль виконання.

28. Нанесення технологічного захисного покриття [20].

4.2 Технологічний процес монтажу і збірки

Крім виготовлення друкованих плат, технологічний процес виготовлення виробів електронної техніки включає технологічні процеси монтажу і збірки.

Елементи на друкованій платі розміщуються з урахуванням електричних зв'язків і теплового режиму із забезпеченням мінімальних значень довжин електричних зв'язків, паразитних зв'язків між елементами. Необхідно прагнути до можливо рівномірного розподілу мас елементів по поверхні кріплення плати з установкою елементів з великою масою поблизу місць механічного кріплення плати.

Для монтажу плати необхідна наявність на ділянці радіомонтажу і збірки певного устаткування, приладів, приладдя.

Як матеріали для радіомонтажу можна використовувати флюси ФКСП, ФГСА, спирто-бензинову суміш, і як припій ПОС-61.

Послідовність проведення технологічного процесу монтажу визначається по кресленню. На початку роботи встановлюють технологічні прокладки, згідно специфікації креслення розміщуються і припаюються корпусні елементи (кнопки, мікросхеми, конденсатори та інші елементи).

Лудіння корпусних конденсаторів і резисторів здійснюється в тиглі по 5 елементів за прийом. Перед тим, як ставити елементи, їхні виводи треба відформатовати згідно кресленню. Ставити елементи необхідно з підгином ніжок, після чого їх обрізають до 1,5 мм ножицями. При цьому у мікросхем підгинають лише чотири ніжки, контролюючи положення ключа. Установку елементів проводять при надітому на руку антистатичному браслеті.

Після установки елементів на плату, проводиться паяння хвилею припою на установці АП-4. Плати, що пропаяли, миють на установці МПУ-70 і сушать в сушильній шафі СНОЛ.

Елементи можна паяти і за допомогою паяльної станції або малопотужним електропаяльником, потужність якого не повинна перевищувати 25 Вт і він повинен бути заземлений.

Після монтажу плат, видаляють технологічні прокладки, миють і сушать плату на відповідних устаткуваннях. Готові плати поступають на ділянку збірки, де виріб остаточно збирають.

При збірці виробу відбувається установка плати управління і блоку живлення, а також необхідних деталей в шафу конструкції їх закріплення деталями кріплення.

Після проведення складальних робіт виріб поступає на ділянку програмування, пуску і наладки готового пристрою [20].

4.3 Охорона праці та техногенна безпека

4.3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

У лабораторії де збирають і випробують розроблене джерело живлення знаходяться: джерело живлення, робочі столи з вимірювальними пристроями та інструментом, шафи.

Основний шкідливий та небезпечний чинник є електричний струм (електромережа, електроустаткування, електроінструменти, освітлення, кондиціонер, установка під напругою).

Електроустаткування живиться від трифазної електричної мережі напругою 380 / 220 В, частотою 50 Гц.

Електрострум характеризується чотирма особливостями ураження організму:

- відсутність зовнішніх ознак небезпеки та раптовість ураження;

- важкість наслідків електричної травми;

- промисловий струм силою понад 15 мА викликає судоми м'язів, тобто приковує ураженого до струмопровідних частин електроустановки;

- існує ймовірність наступного механічного травмування (при падінні з висоти можливі травми внутрішніх органів як вторинне ураження).

Термічна дія струму спричиняє опіки тіла, нагрівання і ушкодження кровоносних судин, нервів, мозку та інших органів і систем, що викликає їх серйозний функціональний розлад.

Електролітична дія струму супроводжується розкладом крові, плазми та інших рідин в організмі людини, змінами в тканинах організму.

Біологічна дія струму виражається порушенням біоелектричних процесів, властивих живій матерії, тобто подразненням і збудженням живих тканин організму, що викликають судоми м'язів, тканин серця і легенів.

Розрізняють два види ураження організму електричним струмом: електричні травми та електричні удари.

Електричні травми – це місцеві ураження тканин та органів, характерними видами є електроопіки. електричні знаки, металізація шкіри, механічні ушкодження, електроофтальмія. Електроопіки складають 65% електротравматизму. В залежності від умов виникнення зустрічається три види електроопіків: контактний, дуговий, змішаний.

Контактний вид опіку виникає при безпосередньому контакті людини з джерелом струму, тобто струм проходить через тіло людини. Контактний вид опіку буває 4 ступенів:

- I ступінь — почервоніння шкіри;

- 2 ступінь — утворення пухирів;

- 3 ступінь — змертвіння шкіри;

- 4 ступінь — обвуглювання тканин.

Перший і другий ступені – контактні види опіків від електроустановок напругою до 1000 В, які використовуються в даній лабораторії.

В таблиці 4.1 надані порогові значення електричного струму [21].

Таблиця 4.1 – Порогові значення струму, що проходять через людину

Рід струму	Відчутний струм не більше 10 хв., мА	Струм, що не відпускає не більше 3 сек., мА	Смертельний (фібриляційний)
Змінний (50Гц)	0,6...15	4...10	80...100

При протиранні плат в повітря виділяються пари спирту етилового. Вони надають наркотичну дію і впливають на постачання мозку кров'ю.

У таблиці 4.2 приведені чинники виробничого середовища і дана оцінка трудового процесу в лабораторії, де збирають і випробують трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму.

Таблиця 4.2 – Карта умов праці на робочому місці інженера

№	Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	Характер праці			Тривалість дії чинника за зміну, %
				1	2	3	
1	Шкідливі хімічні речовини – пари спирту етилового, мг/м^3	0,1...1	0,2	х			10
2	Мікроклімат в приміщенні: - швидкість руху повітря, м/с; - температура повітря, ^{o}C; – в холодний період року – в теплий період року - відносна вологість, %	 0,1-0,3 21-24 22-25 40-60	 0,1-0,3 21-24 22-25 40-60	 х х х х			100
3	Атмосферний тиск, мм.рт.ст	760	760	х			100
4	Шум, дБА	60	50	х			50
5	Клас умов праці, напружена праця	1 ступ.					
6	Напруженість функцій аналізаторів (зір)	IVв	середньої точності				50

З карти умов праці видно, що категорія робіт по ступені тяжкості 1 –

легкі, роботи виконуються сидячи і супроводжуються незначною фізичною напругою [22, 23].

4.3.2 Заходи по усуненню небезпечних та шкідливих чинників

Електроустаткування в лабораторії, де збирають і випробують розроблене трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму, відносяться до електроустановок напругою до 1000 В. Від поразки електричним струмом забороняється включати устаткування без підключення його до захисного заземлення (заземленої нейтралі). Значення допустимого опору захисного заземлювача наведено у таблиці 4.3 [21].

Таблиця 4.3 – Опір захисних заземлювачів в електричних установках

Характеристика установок	Допустимий опір заземлювачів $R_З$, Ом
Електроустановки напругою 380/220 В	$R_З \leq 4$

Для штучного освітлення пропонується застосовування мережі з напругою 220 В, частотою 50 Гц. Освітлювальні прилади і устаткування повинні включатися між фазним і нульовим дротом мережі трифазного струму.

Пропонується розміщення устаткування, а також органів управління так, щоб забезпечити вільний, зручний і безпечний доступ до них. Крім того, розміщення органів управління повинне забезпечувати можливість швидкого відключення устаткування.

Для підтримки необхідних мікрокліматичних умов (таблиця 4.2) лабораторія обладнана настінним кондиціонером Gree Knight GWHN24FA-NK1A1A потужністю 7 кВт, який дозволяє охолоджувати від 15 до 70 м^2. Внутрішній блок настінного кондиціонеру встановлений у верхній частині стіни, недалеко від вікна, а зовнішній – під вікном. Для живлення кондиціонеру використовується змінна напруга живленої мережі – 220В. Кондиціонер застосовується для охолоджування, вентиляції і нагріву

повітря [24].

Пропонується застосовувати центральне водяне опалювання з радіаторами. Такий вид опалювання забезпечує рівномірність нагріву приміщення; можливість централізованого регулювання температури теплоносія (води); відсутність запаху гару; підтримка відносної вологості повітря [25].

Від напруженості праці в лабораторії, окрім перерви на обід, пропонується ввести короткі – п’ятнадцяти хвилинні – перерви після кожної години роботи.

4.3.3 Виробнича санітарія

Об'єм робочого приміщення на кожного, хто працює, згідно [25] повинен складати не менше 15 м^3, а площа приміщень 4,5 м^2. Ширина основних проходів не менше 1,5 м. Висота приміщення не менше 3,2 м.

В лабораторії, де збирають і випробують трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму, довжина приміщення 7 м; ширина 6 м; висота 3,5 м. На кожного, хто працює в цьому приміщенні приходиться площі:

$$7\times6=42/5=8{,}4\text{м}^2\text{; об’єму } 42\times3{,}5=147/5=29{,}4\text{ м}^3.$$

Вимоги виробничої санітарії [25] в лабораторії виконуються.

В лабораторії передбачене природне та штучне освітлення. Природне освітлення здійснюється через вікна. Штучне освітлення здійснено системою загального рівномірного освітлення. Роботи відносяться до робіт високої точності (найменший розмір об'єкту 0,5 мм), розряд робіт IV, підрозряд - В.

Для освітлення приміщення площею 42 м^2, в якому розміщуються робочі місця пропонується використовувати чотири світильники ЛПС, з двома лампами ЛЛ-40 потужністю 40 Вт з номінальним світловим потоком $Ф_л = 2140$ лм.

У таблиці 4.4 приведені значення освітленості для різних варіантів

освітлення лабораторії.

Таблиця 4.4 – Значення освітленості [26]

Найменування ділянки	Розряд зорової роботи	Освітленість, (лк) і коефіцієнт запасу			Аварійне освітлення, лк	
		при використанні люмінесцентних ламп				
		Система комбінаційного освітлення	Система загального освітлення	Коефіцієнт запасу	для продовження робіт	для евакуації
Лабораторія	IV,в	1000	300	1,2	10	1лк на виходах

4.3.4 Електробезпека

Правила пристрої електроустановок (ПУЕ) встановлюють найбільші допустимі значення опору заземлювача розтіканню струму не більше 4 Ом [21].

Мінімальні розміри арматури, що застосовується для монтажу заземлюючих пристроїв наведені на рисунку 4.1.

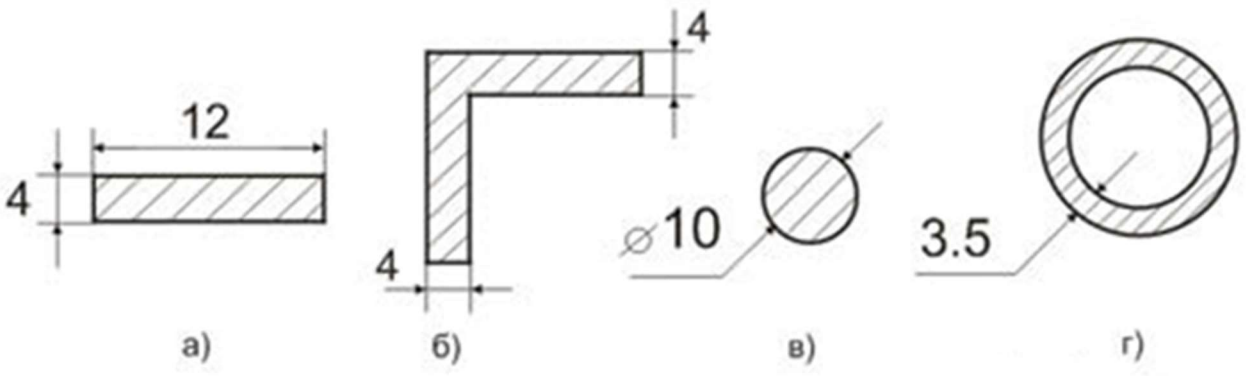


Рисунок 4.1 – Мінімальні розміри арматури

Захисне заземлення будівлі, де розташована лабораторія, знаходиться в

одношаровому ґрунті, Опір природного заземлювача складає $R_е$ = 10 Ом [27], допустимий опір заземлювача $R_д$ = 4 Ом, питомий опір ґрунту ρ = 87Ом·м. Коефіцієнт сезонності ψ = 1,3 [27]. Глибина залягання електроду h = 0,5 м.

Контур заземлення виконаний із сталевих стержнів. У траншеї завглибшки до 0,7 м вертикально забиті стержні, а виступаючі з землі верхні кінці з'єднані зваркою внакладку сталевим прутком.

Як вертикальні електроди використані прутки діаметром d = 0,02 м і завдовжки *l* = 3,5 м.

Знаходимо допустимий опір штучного заземлювача:

$$R_и = \frac{R_е \cdot R_д}{R_е - R_д} = \frac{10 \cdot 4}{10 - 4} = 6{,}67 \text{ Ом} \qquad (4.1)$$

Відстань від поверхні землі до середини вертикального електроду:

$$t = h + \frac{l_в}{2} = 0{,}5 + 1{,}75 = 2{,}25 \text{ м.} \qquad (4.2)$$

Приймаємо відстань між вертикальними електродами а = 3,5 м. Опір одиночного вертикального заземлювача [27]:

$$R_в = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_в}\left(\ln\frac{2 \cdot l_в}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln\frac{4 \cdot t + l_в}{4 \cdot t - l_в}\right); \qquad (4.3)$$

$$R_в = \frac{87 \cdot 1{,}3}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3{,}5}\left(\ln\frac{2 \cdot 3{,}5}{0{,}02} + \frac{1}{2} \cdot \ln\frac{4 \cdot 2{,}25 + 3{,}5}{4 \cdot 2{,}25 - 3{,}5}\right) = 31 \text{ Ом.}$$

Знаходимо орієнтовне число вертикальних заземлювачів:

$$n^{орієнт} = \frac{R_в}{R_и} = \frac{31}{6,67} = 4,6 \text{ шт.}$$

Знаходимо по [27] орієнтовний коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta^{орієнт} = 0,7.$$

Знаходимо число вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_в}{R_и \cdot \eta_в} = \frac{31}{6,67 \cdot 0,7} = 6,63. \quad (4.4)$$

Округлюємо число електродів до 7 шт. і знаходимо коефіцієнт використання вертикальних електродів:

$$\eta_в = 0,73.$$

Знаходимо довжину горизонтального електроду. При розташуванні електродів в ряд довжина горизонтального електроду:

$$l_г = a \cdot (n-1) = (7-1) = 21 \text{ м.} \quad (4.5)$$

Приймаємо товщину горизонтального електроду b = 0,005 м.

Знаходимо опір горизонтального електроду:

$$R_г = \frac{\rho \cdot \psi}{2 \cdot \pi \cdot l_г} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_г^2}{b \cdot h}; \quad (4.6)$$

$$R_г = \frac{87 \cdot 1,3}{2 \cdot 3,14 \cdot 21} \cdot \ln \frac{2 \cdot 21^2}{0,005 \cdot 0,5} = 11,0 \text{ Ом}$$

Знаходимо по [27] коефіцієнт використання горизонтального електроду:

$$\eta_г = 0{,}65.$$

Знаходимо опір штучного заземлювача:

$$R_и = \frac{R_в \cdot R_г}{R_в \cdot \eta_г + n_в \cdot R_г \cdot \eta_г} = \frac{31 \cdot 11}{31 \cdot 0{,}73 + 7 \cdot 11 \cdot 0{,}65} = 4{,}69 \text{ Ом}.$$

Знаходимо загальний опір заземлювача:

$$R_и = \frac{R_е \cdot R_и}{R_е + R_и} = \frac{10 \cdot 4{,}69}{10 + 4{,}69} = 3{,}19 \text{ Ом}.$$

Оскільки опір заземлювача менш $R_д$ = 4 Ом, захисне заземлення виконано вірно. На рисунку 4.2 показана схема розташування заземлюючого пристрою.

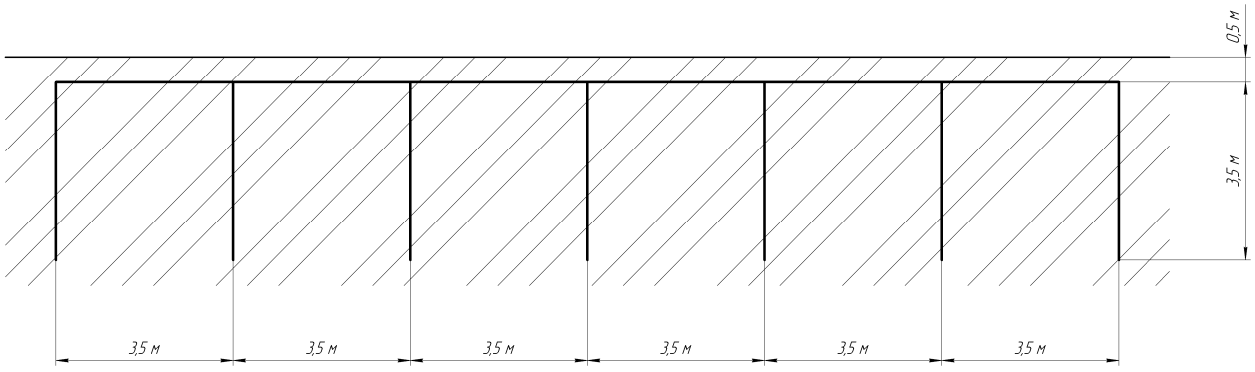


Рисунок 4.2 – Розташування електродів заземлюючого пристрою

Заземленою нейтраллю називається нейтраль електроустаткування, приєднана до заземлюючого пристрою безпосередньо або через малий опір.

Опір заземлення нейтралі джерела струму r_o такий, щоб у разі замикання

якої-небудь фази на землю через опір $r_{зм}$ напруга, під якою опиниться людина, що доторкнулася до зануленого корпусу або до нульового захисного дроту безпосередньо, не перевищувала деякої допустимої напруги дотику $U_{пр.доп.}$, В.

$$r_0 \le r_{зм} \frac{U_{пр.доп.}}{U_ф - U_{пр.доп.}} \quad (4.7)$$

$$r_0 = 4 \frac{42}{220 - 42} = 0{,}94 \text{ Ом.}$$

За умовами безпеки дотику до занулених корпусів в період існування замикання фази на землю $r_{зм}$, $U_{пр.доп}$ повинні бути можливо меншого значення. Тому приймається $r_{зм}$ = 4 Ом. Для виключення випадків замикання фази на металеві конструкції з малим опором розтіканню, ці конструкції сполучені з нульовим захисним провідником, тобто занулені.

Приміщення лабораторії відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки. Основні ізолюючі захисні засоби для електроустановок і засоби захисту персоналу: діелектричні рукавички, слюсарний-монтажний інструмент з ізолюючими рукоятками, покажчики напруги, захисні окуляри, щитки та інші.

Рекомендації по монтажу заземлюючого пристрою

1. Опір заземлюючого пристрою, згідно з вимогами ПУЕ-2017, у будь-який час року має бути не більше 4 Ом.

2. По закінченню монтажу зробити вимір дійсного опору розтіканню струму заземлюючого пристрою. При необхідності збільшити кількість вертикальних і довжину горизонтального електродів.

3. Роботи по установці елементів заземлюючого пристрою виконати у відповідності з рисунком 4.2.

6. Перед забиванням в землю один кінець вертикального електрода зрізати під клин (кут 60 градусів).

7. Відстань між вертикальними електродами – 3,5 м.

8. Глибина залягання горизонтального заземлювача - 0,5 м нижче рівня землі.

9. Всі з'єднання елементів заземлюючого пристрою виконати зварюванням внахлест.

10. Всі місця зварювальних з'єднань покрити бітумною мастикою в два шари.

4.3.5 Пожежна та техногенна безпека

По пожежній небезпеці будівля, в якій знаходиться лабораторії де збирають і випробують трифазні джерела живлення електроприводу постійного струму відноситься до категорії Д – матеріали в холодному стані [28].

Можливі причини виникнення пожежі:

- несправність електричної проводки;
- несправність приладів і устаткування, що живляться від мережі;
- несправність захисного заземлення;
- необережне поводження з вогнем.

У зв'язку з цим необхідно передбачити наступні заходи по пожежній безпеці:

- забезпечити облаштуваннями протипожежних перешкод у будівлі, системі вентиляції, опалювальних і кабельних комунікаціях;
- проводити ретельну ізоляцію усіх струмоведучих провідників до робочих місць; періодичний огляд і перевірку ізоляції;
- проводити інструктаж співробітників, на випадок виникнення пожежі.

Для гасіння пожеж в приміщенні лабораторії площею 42 м^2 передбачений вуглекислотний вогнегасник ВВ-5 – 1 шт. (клас пожежі Е – горіння електроустановок під напругою) [29, 30].

Вогнегасник розташований таким чином, щоб він був захищений від впливу прямих сонячних променів, механічних впливів та інших несприятливих чинників, таких як вібрація, підвищена вологість та інших.

Вогнегасник розміщений у легкодоступному і помітному місці. Кожен співробітник в обов'язковому порядку ознайомлений з правилами експлуатації вогнегасників [30].

У лабораторії застосований димовий оповісник ІП 212, який спрацьовує при скупченні диму в приміщенні.

З метою попередження прямого удару і другорядних проявів блискавок, будівля обладнана системою блискавкозахисту.

У разі виникнення пожежі, яку не можливо локалізувати власними силами, треба:

1. Подзвонити по телефону 101, викликати пожежну службу.
2. Знеструмити все устаткування.
3. Зачинити всі вікна.
4. Покинути приміщення.
5. Прикрити за собою двері.

Для запобігання дії на людей небезпечних чинників пожежі, передбачена можливість швидкої евакуації людей з будівлі. Число евакуаційних виходів два – в протилежних кінцях і ведуть через сходову клітку назовні [31]. Максимальна відстань від найбільш віддаленого робочого місця до евакуаційного виходу і необхідний час евакуації людей з приміщень виробничих будівель при категорії виробництва по пожежній небезпеці Д не обмежується.

З планом дій при аварійній ситуації повинен бути ознайомлений кожен робітник.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Одним з основних показників, за допомогою якого оцінюється економічна ефективність нової техніки, є величина капітальних вкладень [32].

До таких капітальних вкладень відносяться витрати на науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи, включаючи випробування і доопрацювання дослідних зразків.

Для визначення вартості конструкторської підготовки виробництва складається кошторис витрат з моменту отримання завдання до виготовлення і заводських випробувань дослідного зразка включно і коректування документації за наслідками цих подій.

5.1 Суми витрат по статтям кошторису

5.1.1 Зарплата розробників по етапам розраховується, виходячи з кількості технічної документації (схем, креслень, текстової документації), що розробляється, з використанням нормативів базового підприємства на розробку різних видів документації. Зарплата виконавців по кожному етапу є сумою добутків тривалості етапів в днях на денну ставку виконавця (по всім виконавцям).

Тривалість етапу визначаємося як добуток кількості листів розробленої документації на відповідну норму часу в нормо-годинах на розробку, поділене на число прийнятих розробників і середню тривалість робочого дня (8,0 годин) [33].

Денна ставка виконавця визначається відношенням місячного окладу до середнього числа робочих днів в місяці (22 дні).

В таблиці 5.1 приведений розрахунок заробітної плати розробників технічної документації трифазного джерела живлення електроприводу постійного струму.

Таблиця 5.1 – Розрахунок зарплати розробників технічної документації

№	Найменування етапу розробки	Одиниця	К-ть креслень	Норматив часу на одиницю нормо-годин	Трудомісткість етапу люд-годин	Число виконавців	Тривалість етапу, днів	Денна ставка виконавців	Зарплата за етап, грн.
1	Схема електрична принципова	схема ф.А1	1	24	24	1	3	500,00	1500,00
2	Схема електрична структурна	схема ф.А1	1	8	8	1	1	500,00	500,00
3	Складальне креслення	ф.А1	1	16	16	1	2	500,00	1000,00
4	Креслення друкованої плати	ф.А1	1	24	24	1	3	500,00	1500,00
5	Специфіка - ція	ф.А4	4	2	8	1	1	500,00	500,00
6	Розрахунки	ф.А4	10	8	80	1	10	500,00	5000,00
7	Записка пояснення	ф.А4	80	1	80	1	10	500,00	5000,00
	Разом:						30		15000,00

5.1.2 Зарплата на виготовлення і випробування дослідного зразка по всім етапам визначається таким чином: дослідний зразок виготовляється і випробовується в лабораторії; тривалість цих робіт узяті з досвіду базового підприємства, а потім розраховані аналогічно розрахунку заробітної плати на розробку технічної документації див. табл. 5.1.

При визначенні зарплати на виготовлення дослідного зразка трудомісткість по видам робіт збільшена на 100% проти трудомісткості серійного виробу і підвищені розряди роботи на один з урахуванням ручних

робіт в дослідному виробництві.

Таблиця 5.2 – Зарплата на виготовлення дослідного зразка

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудомісткість, год.	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Складальні	5	10	70,00	700,00
2	Монтажні	6	10	70,00	700,00
3	Регулювальні	6	20	70,00	1400,00
Разом:					2800,00

Зарплата виконавців на коректування документації визначається з трудомісткості розробки відповідних документів: коректування складає 15% цій трудомісткості.

5.1.3 Накладні витрати беруться у розмірі 40…120% сумарної зарплати розробників з урахуванням виготовлення і випробування дослідного зразка і коректування документації за наслідками випробувань.

5.1.4 Матеріальні витрати на зразок складаються з вартості матеріалів (табл. 5.3) і комплектуючих виробів (табл. 5.4) на проектовану апаратуру. При цьому, виходячи з обліку втрат, вартість матеріалів та комплектуючих збільшена на 30%

Таблиця 5.3 – Вартість матеріалів

№	Найменування	Одиниця виміру	К-ть на виріб	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Стеклотекстоліт FR4	$м^2$	0,030	2020,00	60,60
2	Лак	л	0,015	500,00	7,50
3	ПОС-61	кг	0,035	240,00	8,40
4	Флюс	л	0,020	150,00	3,00
Разом:					79,50

Таблиця 5.4 – Витрати на куповані комплектуючи вироби

№	Найменування	Кількість, шт.	Ціна одиниці	Сума, грн
1	Дріт 1.5mm^2	10 м	25,00	250,00
2	Дріт 0.5mm^2	5 м	5,00	25,00
3	Тиристор	6	150,00	900,00
4	Конденсатор формувача	3	8,00	24,00
5	Конденсатор фільтра	3	15,00	45,00
6	Резистор формувача	12	0,40	4,80
7	Резистор фільтра	8	0,25	2,00
8	Автоматичний вимикач 3ф 400А	1	350,00	350,00
9	Вимикач 3ф 400А	1	300,00	300,00
10	Дросель	1	350,00	350,00
11	Силовий трансформатор	1	5000,00	5000,00
Разом:				7250,80

5.1.5 Собівартість дослідного зразка визначається за формою табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Калькуляція собівартості дослідного зразка

№	Стаття витрат	Витрати на проектований виріб, грн.
1	Матеріали	79,50
2	Куповані комплектуючи вироби	7250,80
3	Транспортні витрати (5% (п.1+п.2))	366,52
4	Заробітна платня виробничих робочих	2800,00
5	Додаткова заробітна плата (10%п.4)	280,00
6	Нарахування на зарплату (37%(п.4+п.5))	1139,60
7	Накладні витрати (120% п.4)	3360,00
Всього собівартість:		15276,42

5.1.6 В таблиці 5.6 приведено розрахунок кошторису витрат на конструкторську підготовку виробництва.

Таблиця 5.6 – Кошторис витрат на конструкторську підготовку виробництва

№	Стаття витрат	Сума, грн.
1	Зарплата розробників по всім етапам розробки	15000,00
2	Зарплата на коректування технічної документації за наслідками випробувань дослідного зразка (15% п.1)	2250,00
3	Разом:	17250,00
4	Нарахування на зарплату (37% п.3)	6382,50
5	Накладні витрати (120% п.3)	20700,00
6	Собівартість дослідного зразка	15276,42
7	Інші витрати (5% п.6)	763,82
Всього вартість розробки:		60372,74

5.1.7 В таблиці 5.7 приведено розрахунок заробітної плати робочих в разі серійного виготовлення виробу.

Таблиця 5.7 – Зарплата робочих за виготовлення серійного виробу

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудомісткість нормо - год	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Складальні	4	5	70,00	350,00
2	Монтажні	5	5	70,00	350,00
3	Регулювальні	5	10	70,00	700,00
	Разом:				1400,00

5.1.8 Розрахунок планованої собівартості одиниці продукції проводиться на основі калькуляційних статей, враховуючи що комплектуючі та матеріали знижені на 30% по відношенню до таблиць 5.3 та 5.4, зведених в таблицю 5.8:

Таблиця 5.8 – Калькуляція собівартості і ціни одиниці виробу

№	Стаття витрат	Витрати на виріб, грн
1	Матеріали	79,50
2	Куповані комплектуючи вироби	7250,80
3	Транспортні витрати (5% п.1+п.2)	366,52
4	Основна заробітна плата виробничих робочих (табл. 5.7)	1400,00
5	Додаткова заробітна плата (10% п.4)	140,00
6	Нарахування на зарплату (37%(п.4+п.5))	569,80
7	Загальновиробничі витрати (100% п.4)	1400,00
8	Разом собівартість	11207,00
9	Прибуток (30% п.8)	3362,00
Ціна виробника:		14569,00

5.2 Розрахунок терміну окупності розробки

Річний економічний ефект від впровадження нових виробів розраховується по формулі [22]:

$$Э_Г = (П - E_Н \cdot K_У) \cdot A_Г, \qquad (5.1)$$

де $П$ - прибуток на одиницю продукції (з табл. 5.8 $П$=3362,00);

$E_Н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ($E_Н$=*0,15*);

K_V – питомі капіталовкладення на одиницю річного об'єму продукції;

A_R – річний об'єм випуску продукції при серійному виробництві.

Визначаємо питомі капіталовкладення на одиницю річного об'єму продукції:

$$K_V = \frac{K}{A_R}\ , \tag{5.2}$$

де K - капіталовкладення в розробку виробу (з табл. 5.6 К=60372,74).

Враховуючи, що річний об’єм випуску продукції при серійному виробництві складає 100 шт. / рік:

$$K_V = \frac{60372{,}74}{50} = 1207{,}46$$

Тоді передбачуваний річний економічний ефект:

$$Э_Г = (3362{,}00 - 0{,}15 \cdot 1207{,}46) \cdot 50 = 159044{,}05$$

Ефективність розробки визначається згідно:

$$E = \frac{Э_Г}{K}, \tag{5.3}$$

$$E = \frac{159044{,}05}{60372{,}74} = 2{,}63$$

Термін окупності продукції рівний зворотній величині ефективності:

$$T = \frac{1}{E}, \tag{5.4}$$

$$T = \frac{1}{2{,}63} = 0{,}38 \text{ року}$$

В таблиці 5.9 приводяться загальні економічні показники розробленої системи передачі інформації по оптичним каналам.

Таблиця 5.9 – Економічні показники

№	Показники	Один. виміру	По проектованому виробу
1	Витрати на КПП	грн.	60372,74
2	Собівартість розробки	грн.	17250,00
3	Ціна підприємства	грн.	14569,00
4	Річний обсяг випуску	шт.	50
5	Річний економічний ефект	грн.	159044,05
6	Ефективність розробки		2,63
7	Термін окупності додаткових капітальних вкладень	років	0,38

Економічні розрахунки підтвердили доцільність розробки трифазного джерела живлення електроприводу постійного струму.

Висновки

Під час розробки дипломного проекту було проведено аналіз ринку джерел живлення електроприводів постійного струму. Аналіз показав, що є велика кількість перетворювачів, які у системах електроприводів основних механізмів промислового застосування (в тому числі механізмів підприємств металургійного циклу, машинобудування, гірничодобувної промисловості та інших.).

Розглянуто теоретичний матеріал із трифазних джерел живлення електроприводів постійного струму. Ґрунтуючись на отриманих даних, як джерело живлення електроприводу постійного струму, був обраний трифазний керований випрямляч, виконаний за схемою А.М. Ларіонова.

Розроблено електрична структурна схема джерела живлення електроприводу постійного струму і електрична принципова схема силової частини керованого джерела стабілізованої постійної напруги на базі мостового тиристорного випрямляча, що живиться від промислової мережі напругою 220 / 380 В, частотою 50 Гц і забезпечує живлення колекторного двигуна постійним струмом до 350 А, в діапазоні регулювання вихідної напруги від 44 В до 440 В. Частота оборотів двигуна регулюється та стабілізується, на рівні завдання, мікропроцесорною системою управління.

Виконано моделювання електромагнітних процесів у силовій частині перетворювача. Розглянуто технологію виготовлення друкованої плати та технологічний процес її монтажу і збірки.

Надано економічний розрахунок вартості виготовлення силової частини джерела живлення, описано заходи щодо охорони праці та техногенної безпеки в лабораторії, де планується проводити випробування розробленого джерела живлення. Виконано розрахунок захисного заземлення обладнання лабораторії.

Перелік джерел посилання

1. Група компаній «Плутон» : веб-сайт. URL: https://pluton.ua/products/power-electronics/dc-electric-drive-kppt/ (дата звернення 07.05.2025р.)

2. Электропривод шкафного исполнения серии DFS : веб-сайт. URL: https://e-unit.com.ua/elektroprivod-shkafnogo-ispolneniya-serii-dfs/ (дата звернення 07.05.2025р.)

3. Науково-виробниче підприємство Преобразователь-комплекс : веб-сайт. URL: https://pcomplex.ua/products_pt/inshi-kte/ (дата звернення 07.05.2025р.)

4. ПРАТ «Запорізкий електроапаратний завод» : веб-сайт. URL: https://zeaz.com.ua/product.html (дата звернення 07.05.2025р.)

5. Шавьолкін О.О. Енергетична електроніка: навчальний посібник / О.О. Шавьолкін. – К. : КНУТД, 2017. – 396 с.

6. Енергетична електроніка: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак – Електронні текстові дані

7. Тиристори принцип роботи : веб-сайт. URL: http://electro-tex.ho.ua/le/m4/4-3/ (дата звернення 07.05.2025р.)

8. Основні параметри тиристорів : веб-сайт. URL: http://vozom.org.ua/index.php/tyrystory?showall=&start=1/ (дата звернення 07.05.2025р.)

9. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання: у 2 ч. - Ч.2: Основи електроніки. - К.: Університет «Україна», 2006. - 307 с.

10. Посібник із влаштування електроустановок Технічні рішення Schneider Electric, 2006. 623 с.

11. Датчики струму та напруги на основі ефекту Холла : веб-сайт. URL: https://www.coretech.com.ua/current-sensor-hall-20/ (дата звернення 08.05.2025р.)

12. Управління тиристорами : веб-сайт. URL: https://stud.com.ua/171554/tehnika/upravlinnya_tiristorami/ (дата звернення 08.05.2025р.)

13. Призначення та основні вимоги до систем управління випрямлячами : веб-сайт. URL: https://studfiles.net/preview/4289654/page:3/ (дата звернення 08.05.2025р.)

14. Руденко В.С., Сенько В.І., Чиженко І.М. Перетворювальна техніка: 2-ге видання. Київ, 1983. 431 с.

15. Чиженко І.М., Руденко В.С., Сенько В.І. Основи перетворювальної техніки: навч. посібник для спеціальності "Промислова електроніка". М., 1974. 430 с.

16. ТОВ «Елемент-перетворювач» : веб-сайт. URL: https://element-preobrazovatel.com.ua/element/tyrystor-t123/ (дата звернення 08.05.2025р.)

17. Глух Е.М., Зеленов В.Е. Захист напівпровідникових перетворювачів, - М. : Енергія, 1970. - 150 с.

18. Герман-Галкін С.Г. Комп'ютерне моделювання напівпровідникових систем у Matlab 6.0: Навчальний посібник. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

19. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + SIMULINK 5/6. Основи застосування. Серія «Бібліотека професіонала» /В.П. Дьяконов. - М.: СОЛОН - Пресс, 2005 - 800 с.

20. Технології виготовлення друкованих плат : веб-сайт. URL: https://http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/tehnologiya-i-oborudovanie-proizvodstva-elektricheskoy-apparatury-78.html/ (дата звернення 09.05.2025р.)

21. ПУЕ-2017 - Правила улаштування електроустановок

22. І.М.Івах, Я.І.Бедрій, Б.О.Білінський, , М.М.Козяр Основи охорони праці. Навчальний посібник 4-те видан. Перераб. і доповн. - К.: Кондор, -2010, -464с.

23. Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості

трудового процесу, - К : Міністерство охорони здоров’я України, наказ № 248, від 08.04.2014.

24. ДСТУ EN 482:2016 Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2012+A1:2015, IDT)

25. Пістун І.П., Хобзей М.К., Сілін Т.В. Працездатність та здоров'я людини: Навчальний посібник/ За ред. к.т.н., доцента І.П. Пістуна. - Львів: Афіша, 2003.

26. ДБН В.25-28-2006. Природне і штучне освітлення.

27. Розрахунок захисного заземлення : веб-сайт. URL: https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/rozrah_rozd_OP_DP_bak_spec_mag/90.html/ (дата звернення 09.05.2025р.)

28. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою

29. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні

30. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників

31. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об`єктів будівництва. Загальні вимоги

32. Пляскін И.И. Методичні вказівки до виконання курсової роботи "Організація та планування конструкторської підготовки виробництва нових виробів ".-Запоріжжя: ЗІІ, -1989.

33. Підсумкова атестація здобувачів вищої освіти першого рівня «бакалавр». Методичні рекомендації до виконання дипломних проектів з напрямку підготовки 171 «Електроніка»/ Укл.: С.Л. Шмалій, О.Г. Алєксєєв – Запоріжжя: 2017. –25с.

продовження Додатку А

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Д4	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Економічні показники		

Інв. № подл. | Підп. і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підп. і дата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00	Арк. 2

Копіював Формат А4

Додаток А

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Д1	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Електроприводи постійного струму		
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Е1	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Схема електрична структурна		
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Е3	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Схема електрична принципова		
А4			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.ПЕ3	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Перелік елементів		
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Д2	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Результати моделювання		
А1			ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.Д3	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму		
				Заземлювальний пристрій		

Перед. застосув. | Довід. № | Підп. і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підп. і дата | Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00		
Розроб.		Волков		19.05	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 2
Перевір.		Алексієвський		20.05			
Н.контр.		Туришев		21.05		ІНКІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1711-3	
Затверд.		Критська		21.05			

Копіював | Формат А4

Додаток Б

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
	A1	Реле потоку повітря WFS S+S Regeltechnik GmbH	1	
	A2..A7	Формувач імпульсів управління ЕІСПЗ ДП.22551.00.01.00.00	6	
	C1	Конденсатор 2220 X7R 104 ± 10% 50 В murata	1	
	R1	Резистор MF-1 510 Ом ± 5% murata	1	
	R2, R3	Резистор MF-2 24 Ом ± 5% murata	2	
	T1	Трансформатор ЕІСПЗ ДП.22551.00.01.01.00	1	
	X1	Вилка на плату кутова MPW-2P-R Degson	1	
	≠1..≠6	Вузол формування траєкторії перемикання ЕІСПЗ ДП.22551.00.02.00.00	6	
	C1	Конденсатор К78-2-0,18 мкФ ±10% 1000В ОЖО.461.112 ТУ	1	
	R1	Резистор SQP-15 130 Ом ±5% murata	1	
	C1..C3	Конденсатор К73-54В – 450 В~ – 16 мкФ ±10% РАЯЦ.673633.006 ТУ	3	
	DA1	Діодний міст KBU602 DC Components	1	

Перед. застосув. | Довід. № | Підп. і дата | Інв. № дубл. | Взам. інв. № | Підп. і дата | Інв. № подл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.ПЕ3		
Розроб.		Волков		20.05	Трифазне джерело живлення електроприводу постійного струму Перелік елементів	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 2
Перевір.		Алексієвський		20.05			
Н.контр.		Туришев		20.05		ІНМІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1711-3	
Затверд.		Критська		20.05			

Копіював Формат А4

продовження Додатку Б

Зона	Поз. позна-чення	Найменування	Кіл.	Примітка
	FU1..FU3	Вставка плавка H-520-5A-250B muRata	3	
	FU4	Вставка плавка H-520-3A-250B muRata	1	
	HL1..HL3	Світлодіодна комутаторна лампа СКЛ-1-П-220-Б-К-ЕТ		
		ПП "НВКФ "Екотех"	3	
	K1	Контактор КТИ-5330 330А 230В/АС3 1НО IEK		
		ГОСТ Р 50030.4.1-2002	1	
	K2	Контактор малогабаритний КМИ-10910 9А 24В/АС3 1НО		
		IEK ГОСТ Р 50030.4.1-2002	1	
	L1	Дросель 32 мГн ЕІСПЗ ДП.22551.00.03.00.00	1	
	M1	Вентилятор JA-1751B22H Jamicon	1	
	QF1	Автоматичний вимикач ВА88-37-3Р-400А 35 кА IEK		
		ГОСТ Р 50030.2-99	1	
	RS1	Шунт електричний 75ШСМ 500А IEK	1	
	SB1, SB2	Кнопка управління SB7 IEK	2	
	T1	Трансформатор ЕІСПЗ ДП.22551.00.04.00.00	1	
	T2	Трансформатор ЕІСПЗ ДП.22551.00.05.00.00	1	
	VS1..VS6	Тиристор Т123-200-10 ТОВ "Елемент-Перетворювач"		
		ТУ16-729.221-79	6	
	X1..X4	Клема силова ЕІСПЗ ДП.22551.00.06.00.00	3	
	X5, X6	Клема силова ЕІСПЗ ДП.22551.00.07.00.00	2	
	X7, X12	Розетка на кабель пряма MHJ-2P Degson	6	

Інв. № подл. | Підп. і дата | Взам. інв. № | Інв. № дубл. | Підп. і дата

Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата

ЕІСПЗ ДП.22551.00.00.00.00.ПЕЗ

Арк. 2

Копіював

Формат А4