

Український державний університет науки і технологій
Навчально-науковий інститут
"Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту"

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Афанасов А.М.
(підпис) (ПІБ)

2021 р. грудень « _____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань _____ 14 Електрична інженерія
(шифр) (назва)

Спеціальність _____ 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код) (повна назва)

Освітня програма _____ Електричний транспорт
(повна назва)

Тема _____ Проект тягового перетворювача для приміського
електропоїзда змінного струму з асинхронним
тяговим приводом

Theme _____ Traction converter project for suburban
alternating current electric train with asynchronous
traction drive

Керівник дипломної роботи _____ доцент, к. т. н. _____ Білухін Д. С.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ доцент, к. т. н. _____ Білухін Д. С.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи _____ ЕТ2021 _____ Олійник Я. Р.
(група) (підпис) (ПІБ)

Student _____ Oliinyk Yan
(Family name)

Дніпро

2021

Завдання

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «Магістр» на тему “Проект тягового перетворювача для приміського електропоїзда змінного струму з асинхронним тяговим приводом” виконана на 83 листах машинописного тексту із застосуванням засобів ЕОМ. Пояснювальна записка включає 28 рисунків, 4 таблиці, 27 джерел використаної літератури, 1 додаток.

В першому розділі проведено аналіз схем тягових перетворювачів електропоїздів змінного струму.

В другому розділі обрано структурну схему тягового перетворювача.

В третьому розділі розраховано та обрано необхідні IGBT модулі для автономного інвертора напруги та 4QS перетворювача, розраховано втрати потужності в перетворювачі.

В четвертому розділі розраховано та обрано необхідний IGBT модуль автономного інвертора напруги для живлення компресора.

Ключові слова: електропоїзд змінного струму, автономний інвертор напруги, 4QS перетворювач, втрати потужності, компресор.

						Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

стор.

Вступ.....	6
1 Аналіз статичних перетворювачів електропоїздів змінного струму.....	8
1.1 Аналіз схем тягових перетворювачів електропоїздів змінного струму з колекторними тяговими двигунами	8
1.1.1 Силова схема електропоїзда ЭР9М.....	8
1.1.2 Схема випрямної установки показана ЭР9.....	12
1.2 Електропоїзди з асинхронними тяговими двигунами.....	14
1.1.2 Аналіз силової схеми електропоїзда ЭС1 та ЭС2Г «Ласточка»	14
1.2.2 Аналіз силової схеми електропоїзда «СОКІЛ».....	15
1.2.3 Схема силових кіл електропоїзда ETR 500	18
1.2.4 Схема силових кіл електропоїзда серії ЭД6 постійного струму	19
1.2.5 Електропоїзд змінного струму ЭНЗ	22
2 Вибір структурної схеми тягового перетворювача	25
2.1 Аналіз структурних схем електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами	25
2.2 Структурна схема тягового перетворювача	27
2.3 Структурна схема перетворювача власних потреб	33
3 Розробка силової схеми тягового перетворювача електропоїзда змінного струму.....	43
3.1 Розрахунок елементів автономного інвертора напруги	43

					Проект тягового перетворювача для приміського електропоїзда змінного струму з асинхронним тяговим приводом								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Олійник Я. Р.			Розрахунково-пояснювальна записка				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Білухін Д.С.									4	83	
Реценз.									ДНУЗТ ст. гр. ЕТ2021				
Н. Контр.		Білухін Д.С.											
Затверд.		Афанасов А. М.											

3.1.1 Вибір силових елементів автономного інвертора з амплітудною модуляцією	45
3.1.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з ШІМ модуляцією	48
3.2 ЧотириквADRантний випрямляч (4QS)	51
3.3 Втрати потужності	57
3.3.1 Визначення втрат потужності в ключових елементах АІН.....	58
3.3.2 Визначення втрат потужності в ключових елементах 4QS.....	61
4 Розробка схеми перетворювача приводу компресора ЭКВО-0,8/9.....	63
4.1 Технічні дані компресора ЕКВО – 0,8/9	63
4.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги живлення компресора	64
Висновки	69
Список використаних джерел	71
Перелік графічних робіт	74
Додатки	75
Додаток А. Демонстраційні матеріали до захисту проекту «Проект тягового перетворювача для приміського електропоїзда змінного струму з асинхронним тяговим приводом»	76

ВСТУП

Для перевезення пасажирів на лініях приміських сполучень призначені електропоїзди постійного і змінного струму.

Впровадження електричної тяги на залізницях СРСР почалося в 1926 році. З 1929 року вітчизняна промисловість поставляла секції електропоїздів постійного струму.

Надалі, в зв'язку з електрифікацією залізниць на змінному струмі і необхідністю підвищення швидкостей приміського руху, почалася розробка нових типів електропоїздів.

У 1959 - 1961 роках були побудовані досвідчені електропоїзди змінного струму ЕР7 з ртутними випрямлячами. Досвід експлуатації цих поїздів показав складність їх конструкції і низьку надійність роботи цих випрямних установок.

У 1962 році Ризький вагонобудівний завод (РВЗ) і Ризький електромашинобудівний завод (РЕЗ) освоїли виробництво електропоїздів змінного струму ЕР9 з кремнієвими випрямлячами. В даний час освоєно випуск нових серій електропоїздів ЕР9М і ЕР9Е.

Головна особливість електропоїздів змінного струму, в порівнянні з поїздами постійного струму полягає в застосуванні на кожному моторному вагоні напівпровідникової випрямної установки, перетворюючої однофазний змінний струм промислової частоти в постійний (пульсуючий). Це дозволяє на електропоїздах змінного струму ЕР9М і ЕР9Е застосовувати звичайні колекторні тягові двигуни постійного струму з послідовним збудженням, які мають оптимальні для мотор-вагонної тяги характеристики. Напруга 25 кВ подається на первинну обмотку тягових понижуючих трансформаторів, розташованих на кожному моторному вагоні.

Трансформатори зменшують напругу контактної мережі до величини, найбільш вигідної для роботи тягових електродвигунів. Це дозволяє регулювати напругу, що підводиться до двигунів.

Керовані кремнієві вентиля (тиристори) відкрили перспективу подальшого вдосконалення електропоїздів змінного струму: створення електросекцій з безколекторними тяговими

електродвигунами, реостатним і рекуперативним гальмуванням, з більш досконалішими системами управління.

Основним напрямком у розвитку залізничного транспорту є підвищення комфорту перевезень пасажирів, а також зниження витрат електроенергії. Цього можна домогтися шляхом розробки і впровадження системи плавного регулювання напруги на тягових електродвигунах. Існуюча система регулювання напруги на електрорухомому складі однофазного постійного струму дозволяє регулювати напругу ступенями, що в свою чергу негативно позначається на реалізації сил тяги та комфорту перевезень.

Метою даного дипломного проекту є перехід до систем з плавним регулюванням напруги, які забезпечують найбільший коефіцієнт потужності; більш досконале і просте управління швидкістю рухомого складу; відсутність жорсткого зв'язку між напругою на електродвигунах та контактною мережею; спрощення автоматизації процесів пуску і руху поїзда; поліпшення умов рекуперативного гальмування; збільшення сили тяги і провізної здатності; підвищення комфорту перевезень пасажирів; зниження експлуатаційних витрат.

Внаслідок застосування безконтактних перетворювачів замість контактних комутаційних апаратів; підвищення експлуатаційної надійності і зручності управління електропоїздом.

1 АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Аналіз схем тягових перетворювачів електропоїздів змінного струму з колекторними тяговими двигунами

Тягові двигуни постійного струму які застосовуються на даний час являються досить напруженими машинами по відношенню до теплових і особливо комутаційних умов на колекторі. Вони схильні до аварійних явищ у вигляді перекидання дуги і кругового вогню, потребують найбільшої уваги в експлуатації і витрат на обслуговування і ремонт, а також мають інші недоліки.

Для використання на моторних вагонах електропоїзда на цей час вважається, що найкращим чином підходять трифазні асинхронні двигуни (АТД) з короткозамкненим ротором.

Тривалий час в нашій країні і за кордоном вважали, що багатосистемні електропоїзди потрібно використовувати тільки на тих напрямках, де відсутні станції стикування ділянок постійного і змінного струму. Однак змінилася в останні десятиліття експлуатаційна ситуація на дорогах різних країн та скоригувала традиційний підхід. Утворення Європейського Союзу і різке збільшення пасажирських перевезень при існуючій жорсткій конкуренції з боку інших видів транспорту вимагали від залізничної адміністрації скорочення часу перебування електропоїзда у шляху. Одним із заходів для досягнення цієї мети стало застосування багатосистемного моторвагонного рухомого складу дозволяє безупинно перетинати кордони стикування ділянок.

Необхідна кількість багатосистемних електропоїздів в сумі менше, в порівнянні з одно системними. Для приміських та міських перевезень, де виконується обслуговування пасажирів в межах однієї системи електрифікації, створювати двосистемний моторвагонний рухомий склад не доцільно.

Аналіз стану парку електропоїздів змінного струму залізниць України подано у таблиці 1.1.

Основна робота по перевезенню пасажирів на залізницях, які електрифіковано змінним струмом, виконується електропоїздами ще радянських часів серії ЕР9 (більшість ЕР9М). у незначній кількості експлуатуються електропоїзди вже вітчизняного виробництва – ЕПЛ9Т.

Виходячи з того, що більша частина електропоїздів змінного струму вже достатньо застарілі, то питання, пов'язані з розробкою та побудовою нових

						Арк.
						8
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		

електропоїздів є актуальними, а частиною розробки нового електропоїзда є проектування і перетворювача для нього.

Таблиця 1.1 – Парк електропоїздів змінного струму залізниць України

Серія	Залізниця	Депо	Кількість
ЭР9Е	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9 зм.струму	11
	Півд.-Західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	17
ЭР9М	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9 зм.струму	1
	Львівська	Здолбунів РПЧ-3	3
	Півд.-Західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	60
		Чернігів РПЧ-9	1
	Південна	Полтава РПЧ-2	5
		Люботин оборотне депо Купянск	1
ЭР9П	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9 зм.струму	9
	Львівська	Здолбунів РПЧ-3	11
	Південна	Полтава РПЧ-2	5
		Люботин оборотне депо Купянск	13
ЭР9Т	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9 зм.струму	5
	Львівська	Здолбунів РПЧ-3	1
	Півд.-Західна	Чернігів РПЧ-9	12
ЭД9М	Півд.-Західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	9
ЭР9ЕТ	Півд.-Західна	Чернігів РПЧ-9	1
ЕПЛ9Т	Півд.-Західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	8
	Південна	Полтава РПЧ-2	7

1.1.1 Силова схема електропоїзда ЭР9М

ЭР9 – серія електропоїздів змінного струму, які випускалися з 1962 р. Ризьким вагонобудівним заводом. З другої половини 1960-х виконує основний обсяг приміських пасажирських перевезень на залізницях [1].

Серія електропоїзда ЭР9 пройшла декілька модернізацій.

Модифікація ЭР9П випускалася з 1964 року. Випрямні установки (ВУ) розташовані під кузовом вагонів, унаслідок чого була модернізована схема моторного вагона – прибрана частина апаратів охолодження ВУ. Охолодження вироблялося примусово вентилятором, насадженим на вал фазорозчеплювача. На моторні вагони були додані авторегулятори, для автоматичного регулювання штоків гальмівних циліндрів. Також була змінена внутрішня обробка салонів і тамбурів.

Найбільшою в кількості випущених електропоїздів була модифікація ЭР9М [1–3]. Дана модифікація випускалася з 1976 року. На відміну від ЭР9 і ЭР9П у електропоїздів ЭР9М високовольтний кабельне введення в моторних вагонах замінений шинним введенням, розміщаються в високовольтної шахті (шафа в середині моторного вагона), застосована нова випрямна установка, в салонах встановлені напівм'які дивани, замість дерев'яних сидінь як в ЭР9П і ЭР9

(за аналогією з ЭР2 з номера 1112). Згодом шинний високовольтний ввід встановлений також на більшості ЭР9П. У випрямної установці застосовані лавинні діоди, в результаті зменшилися число діодів (з 144 до 84 шт.) І розміри ящика випрямної установки. Його розміщення та охолодження (від вентилятора, встановленого на валу фазорозщеплювача) не змінилися. Серія ЭР9М використовується Російськими залізницями, Білоруської залізницею, Литовськими залізницями, Українськими залізницями і Узбекистанською залізницею.

Електропоїзд ЭР9М призначено для приміського сполучення на електрифікованих ділянках залізниць з шириною колії 1520 (1524) мм при напрузі контактної мережі 25000 В частотою 50 Гц. Вагони мають комбінований вихід, який припускає їх експлуатацію на ділянках з високою та низькою платформами. Управління поїздом здійснюється з кабіни машиніста в головному вагоні. Кожний моторний вагон має електричний привід з чотирьох електричних двигунів, які отримують живлення від контактної мережі через трансформатор та напівпровідниковий випрямний пристрій, який перетворює змінний струм у постійний.

ЭР9Е (з 1981 по 1987) – відрізняються від ЭР9М природним охолодженням силового обладнання: радіатор випрямної установки охолоджується потоком, що набігає повітря, що згладжує реактор, на відміну від ЭР9М, занурений в масло трансформатора і охолоджується разом з трансформатором; масляний радіатор, в свою чергу, теж обдувається тільки потоком, що набігає. Лавинні діоди штиркової конструкції замінені на таблеткові, кількість знижена до 60 шт. у перетворювачі.

ЭР9Т (з 1988 по 1996) – модифікація мала модернізовані візки, тягові двигуни і реостатне гальмо.

В Україні було засвоєно виробництво електропоїздів ЕПЛ9Т. Електропоїзд ЕПЛ9Т (електропоїзд Луганський, 9 тип) – український електропоїзд змінного струму. Електропоїзд будувався на Луганському тепловозобудівному заводі. Моторні вагони електропоїзда потужністю 4×220 кВт призначені для перевезення пасажирів на електрифікованих ділянках залізниць з номінальною напругою в контактній мережі 25 кВ змінного струму в районах з помірним кліматом. Основна складова електропоїзда – вісім вагонів: 2 головних, 4 моторних і 2 причіпних (Г-М-П-М-М-П-М-Г). Випущено у період 2001-2008 р. р. 15 поїздів, які знаходяться в експлуатації на Південній, Південно-західній залізницях [4].

В якості базової схеми регулювання напруги на затисках тягових двигунів використовується схема випрямлення з несиметричним навантаженням

						Арк.
						10
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		

трансформатора [5]. Використовуються випрямні установки типів УВП-3 та УВП-5 [6, 7].

Випрямна установка типу УВП-3 (У – установка, В – вентиляна, П – напівпровідникова (від російської – полупроводниковая), 3 – типовий розмір), яка укомплектована 84 вентилями ВЛ-200 та розташована у пилонепроникній камері під рамою моторного вагону. Камера має дві з'ємні (з внутрішньої та зовнішньої сторін) кришки. В камері розташовано шість блоків, які складаються з 12 вентилів, та два блоки, які складаються з 6 вентилів (для розщеплених частин плечей), що розташовано в горизонтальних рядах [2, 3].

На електропоїзді ЭР9М використовується система повітряного примусового охолодження трансформаторне-випрямного блоку та реактора, що згладжує. Для охолодження всієї системи на валу розчеплювача фаз встановлено вентилятор продуктивністю 5480 м³/год. Повітря для охолодження, що всмоктується вентилятором, надходить через залози в нижній частині бокової поверхні кузова, камеру забору, камеру з фільтрами, потім нагнітається до вентиляційного каналу, звідки подається по двох трактах: розчеплювач фаз, атмосфера; випрямна установка, реактор згладження, радіатори системи охолодження трансформаторного масла і далі викидається через залози до атмосфери. Середня швидкість повітря між ребрами охолоджувачів випрямної установки складає близько 11 м/с.

1.1.2 Схема випрямної установки показана ЭР9

Схема випрямної установки показана на рис. 1.1. Електрична схема представляє собою однофазний випрямний міст з розщепленими кінцями двох плечей з метою забезпечення без струмової комутації на перехідних ступенях. В кожному плечі ВК – по три паралельних вітки, в кожній вітці – по шість послідовно з'єднаних вентилів.

Технічні дані випрямної установки УВП-3.

Номінальна випрямлена напруга, В	1650
Номінальний випрямлений струм, А	600
Пусковий струм протягом 1 хв., А	1000
Пікове значення пускового струму протягом 30 с, А	1200
Номінальна потужність, кВт	990
Максимальне зворотне амплітудне значення напруги, В	3600
Схема випрямлення.....	однофазна, мостова
Охолодження	повітряне,

						Арк.
						11
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		

примусове

Витрати повітря, м³/год 5480

Маса, кг 370

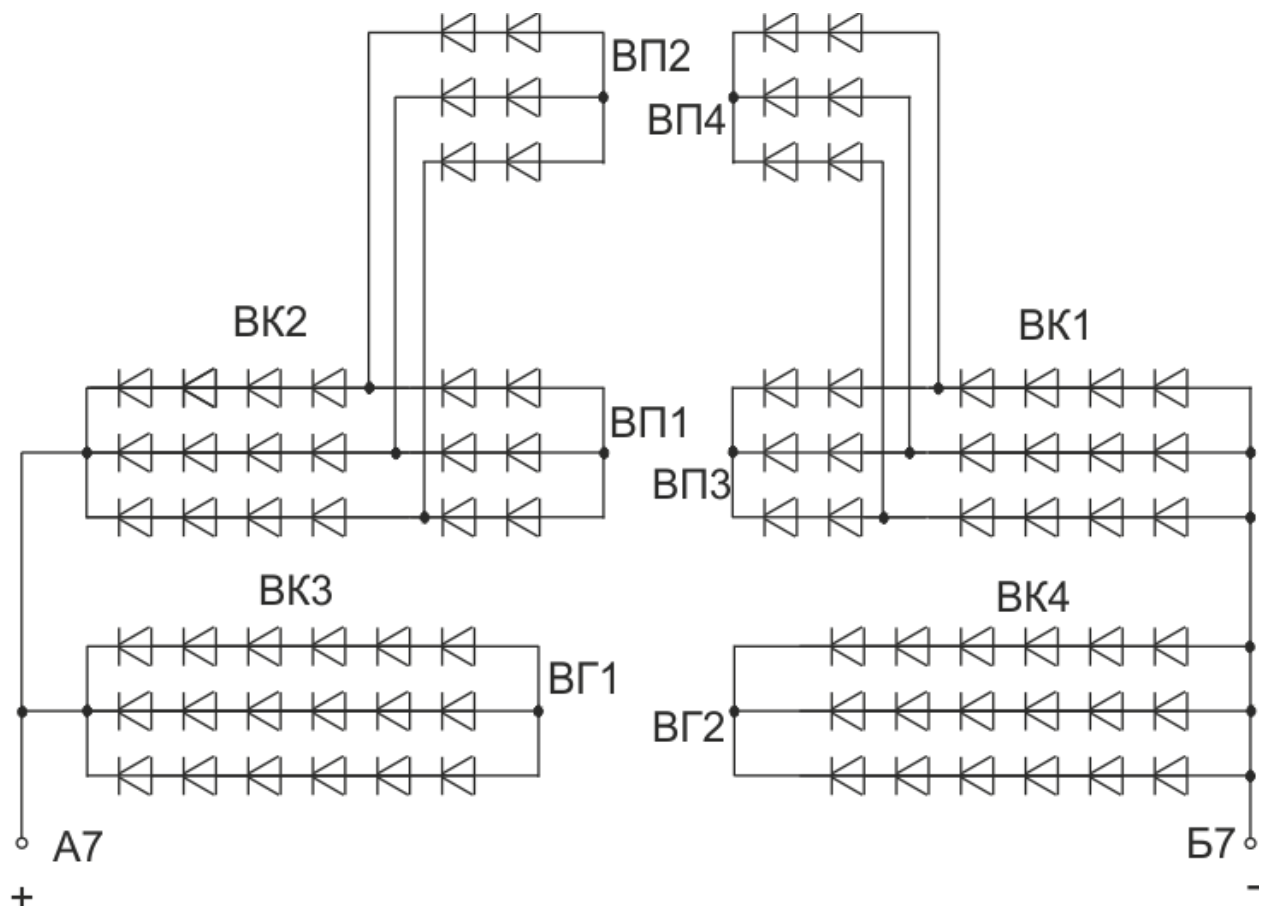


Рисунок 1.1 – Схема випрямного пристрою УВП-3

На електропоїзді ЕР9Е використовується випрямна установка УВП-5А. За конструкцією установка представляє собою камеру, що непроникна до пилу та знаходиться під вагоном з обслуговуванням з однієї сторони. Всередині камери на чотирьох групових охолоджувачах розташовані лавинні діоди таблеткової конструкції. Для гарного доступу до елементів схеми передбачено шарнірне кріплення, що відкидається, групових охолоджувачів з кутом повороту 90°.

Загальна кількість діодів в установці – 60 штук. Електрична схема установки представляє собою однофазний випрямний міст з розщепленими двома плечами з метою забезпечення плавного переходу без струму (вентильний перехід) з однієї позиції на іншу. В випрямному пристрої використовуються циклостійки діоди ВЛ7-320 10–13 класів.

Використання випрямного пристрою УВП-5 з циклостійкими вентилями таблеткової конструкції дозволяє зменшити витрати на обслуговування та системи фільтрів примусового охолодження.

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	12

Охолодження обладнання здійснюється потоком повітря, що набігає, під час руху електропоїзда. Середня швидкість повітря охолодження між ребрами групового охолоджувача при швидкості руху 40–100 км/год змінюється відповідно від 3 до 10 м/с.

Захисні кожухи випрямного пристрою з метою підвищення ефекту від охолодження мають направляючі трубки для захвату зустрічного потоку повітря та направлення його на ребра групових охолоджувачів.

На електропоїздах ЭР9Т та ЕПЛ9Т використовується випрямна установка типу В-ОПЕД-400-1,65К-У1 (В – випрямляч; О – однофазний; П – род струму на виході постійний; Е – спосіб охолодження – природній; Д – на основі діодів; 400 – номінальний струм, А; 1,65К – вихідна напруга в кВ; У1 – кліматичне виконання та категорія розміщення за ГОСТ 15150-69). Схема випрямного пристрою В-ОПЕД-400-1,65К-У1 представлена на рис. 1.2.

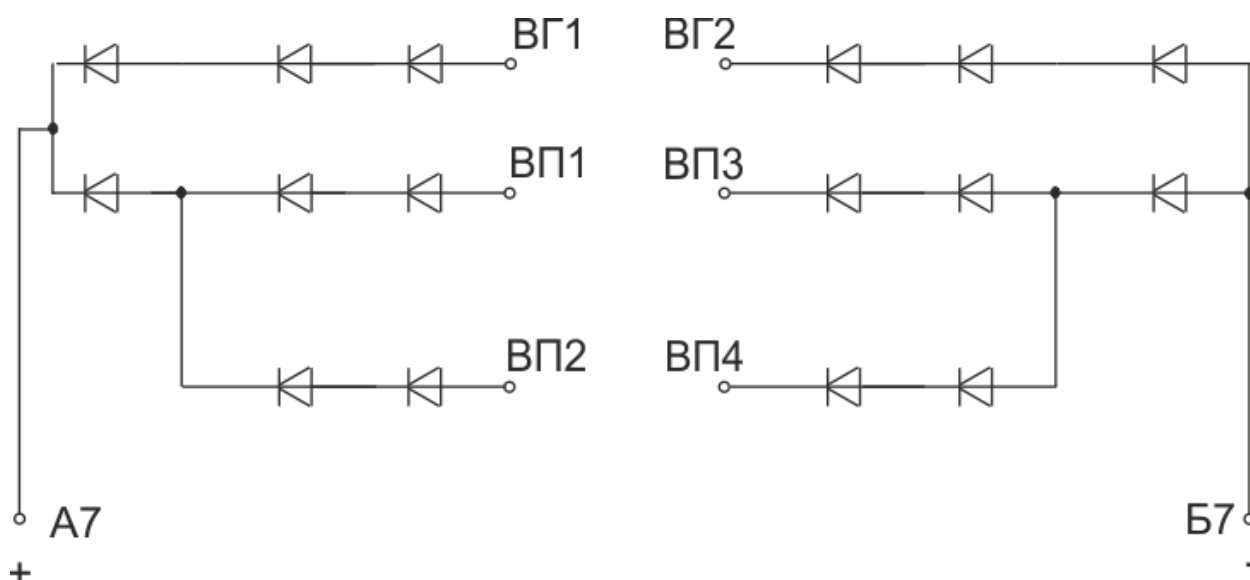


Рисунок 1.2 – Схема випрямного пристрою В-ОПЕД-400-1,65К-У1

Пристрій В-ОПЕД-400-1,65К-У1 розташовано у камері, яка непроникна до пилу та вологи, з обслуговуванням з однієї сторони, підвішена під кузовом моторного вагону. На двох групових охолоджувачах розміщено 16 діодів таблеткової конструкції типу ДЛ153-1250-2У.УХЛ2.

Цілком вказані випрямні пристрої достатньо розвинені, але не можуть бути використаними на моторвагонному рухомому складі з асинхронним тяговим приводом.

						Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		13

1.2 Електропоїзди з асинхронними тяговими двигунами

1.2.1 Аналіз силової схеми електропоїзда ЕС1 та ЕС2Г «Ласточка»

Електропоїзд ЕС1 [8] є двосистемним з можливістю живлення від двох родів струму – 3 кВ постійного струму і 25 кВ 50 Гц змінного струму, а ЕС2Г – тільки 3 кВ постійного струму. Високовольтне обладнання п'ятивагонного електропоїзда складається з двох з'єднаних струмоприймачів, пристроїв захисту, тягових і допоміжних перетворювачів, гальмівних резисторів і тягових двигунів. Компоненти систем тяги і загального електропостачання поїзда розподілені по всіх вагонах рухомого складу. Велика частина електроустаткування розміщена в підвагонному просторі, деяка частина - на даху.

На дахах другого і четвертого проміжних вагонів розташовані струмоприймачі напівпантографного типу, перемикачі систем струму (на двосистемних поїздах), а також головні вимикачі і високовольтні вводи для кожної з систем струму. Струмоприймачі мають асиметричну форму і розташовані з боку торця напроти головного моторного вагона. Напруга у електропоїздах ЕС1 і ЕС2Г надходить від струмоприймача через перемикач систем струму (відсутній у ЕС2Г) на головний вимикач задіяної системи струму, після чого проходить через шинну введення системи струму до підвагонного обладнання. Через дах проміжних вагонів і над місцями їх зчеплення проходить струмоведуча шина паралельного з'єднання струмоприймачів, що дозволяє отримувати живлення обох вагонів поїзда з силовим обладнанням від одного піднятого струмоприймача.

Силові компоненти мають наскрізне з'єднання по всьому поїзду через міжвагонні електричні кабелі, розташовані в нижній частині торців вагонів по боках від міжвагонних переходів, завдяки чому енергопостачання обох тягових приводів в моторних вагонах і енергосистеми поїзда забезпечується при виході з ладу одного з силових компонентів.

Перетворювачі електричної енергії розташовані в підвагонному просторі вагонів, за винятком центрального проміжного вагона. На крайніх проміжних вагонах з струмоприймачами, через які здійснюється введення напруги, встановлені тягові трансформатори для перетворення напруги змінного струму (тільки у ЕС1) і дроселі мережевого фільтра, а на головних моторних вагонах – чотирьох квадратні регулятори, тягові та допоміжні інвертори.

На електропоїздах ЕС1 в режимі змінного струму напруга 25 кВ частоти 50 Гц, пройшовши від струмоприймача через перемикач систем струму, головний вимикач змінного струму і введення, подається на первинну обмотку тягового

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	14

трансформатора, розташованого в підвагонному просторі. Від вторинних обмоток трансформатора знижена напруга передається в головні вагони на два чотирьох квадратних регулятора, кожен з яких з'єднаний зі своєю проміжним колом постійної напруги. Імпульсні інвертори, які отримують живлення від проміжних кіл з блоком конденсаторів, формують на виході трифазний струм, регульований по напрузі і частоті. Ця напруга від кожного інвертора подається на два тягових електродвигуна, включених паралельно. На електропоїздах ЕС2Г і ЕС1 в режимі постійного струму напруга 3 кВ, пройшовши через перемикач систем струму, головний вимикач постійного струму і введення, подається на дросель мережевого фільтра в підвагонному просторі, а потім на пристрій заряду проміжного кола, з'єднане з двома чотирьох квадратними регуляторами.

Тягове обладнання головного моторного вагона складається з ідентичних тягових блоків, кожен з яких живить по два тягових двигуна. Кожен тяговий електродвигун являється шестиполусною асинхронною машиною з короткозамкненим ротором і приводить в рух одну колісну пару. Потужність електродвигуна у електропоїзди ЕС1 становить 320 кВт, у ЕС2Г – 366,5 кВт. Управління потужністю і моментом двигуна проводиться за рахунок частоти і амплітуди трифазного напруги, що видається на двигун інвертором з IGBT-ключами.

Кожен контейнер тягового обладнання з'єднаний з гальмівними резисторами, встановленими на дахах головних вагонів. Електродвигуни підтримують можливість рекуперативного електричного гальмування, перетворюючи енергію руху поїзда в електричну, яка повертається в контактну мережу. При службовому гальмуванні за замовчуванням задіється рекуперативне гальмування в моторних вагонах, а при неможливості або неефективності застосування рекуперації автоматично підключаються гальмівні резистори.

1.2.2 Аналіз силової схеми електропоїзда «СОКІЛ»

Основними рисами цього експериментального електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами є [7, 9]:

1. Модульний принцип (формування з трьох вагонів).
2. Секція складається: головного вагона, трансформаторного вагона, моторного вагона.
3. У трансформаторному вагоні розташовані два силових однофазних, тягових трансформатора, з вбудованою системою охолодження і автоматики, два блоки захисту від перенапруги, два блоки дроселів комутації з системою

						Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		15

охолодження і автоматики, блок БВ постійного і змінного струму, перемикач роду струму.

4. У моторному вагоні розміщені: два блоки АІН, в яких є два інвертора з системами управління тяговим двигуном візка, два блоки контакторів для виключення будь-якого з чотирьох інверторів в аварійній ситуації, вхідний силовий перетворювач, блок вхідного фільтра.

5. Тяговий двигун отримує живлення від інвертора з регулюванням величини і частоти напруги методом ШІМ.

6. Система управління тяговим приводом забезпечує:

- $M_{вр} = \text{const}$;
- плавне регулювання $M_{вр}$;
- рекуперативного гальмування;
- автоматичний перехід від рекуперативного гальмування до реостатному;
- захист від юза і буксування;
- контроль і діагностику працездатності елементів електроприводу;

7. Силовий перетворювач (на 25кВ, 50Гц, і 3кВ постійного струму).

8. Вихідні перетворювачі АІН (перетворити постійна напруга в $3^{\text{фаз}}$ - фазна напруга вимірюваної величини і частоти), виконані на IGBT.

9. Спрощена схема живлення показана на рисунку 2.1.

$L_{\text{ф}}$, C_1 і C_2 – вхідний фільтр, ПІ - підтримує напругу 1600В, комутаційні перенапруги на C_1 і C_2 , викликані перехідними процесами (сплеск напруги, відрив струмоприймача ін.), гасяться на R_1 і R_2 через відповідні тиристорні ключі (вони працюють і при реостатному гальмуванні у випадках неможливості застосування рекуперації). Потужність R_1 і R_2 780 кВт, потужність R_3 і R_4 - 600 кВт.

10. Для згладжування пульсацій в колі постійного струму служить фільтр, що складається з C_3 і C_4 по 6,2 мФ кожен, а також двох послідовно з'єднаних індуктивностей по 1,24мГ, вторинних обмоток трансформаторів TP_1 і TP_2 .

11. Як в режимі тяги, як і в режимі рекуперативного гальмування напруга в колі постійного струму підтримується регулюванням відмиканням чотирьох ключів імпульсного переривника.

12. Для перетворювача передбачена рідинна система охолодження.

13. АТД з к.з. ротором і рідинним охолодженням, не має аналогів у вітчизняній та зарубіжній практиці.

$P=675\text{кВт}$, $p=3$ (шість полюсів), $\mu=2,043$.

14. САР виконує функції:

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	16

- автоматизоване і ручне управління рухом електропоїзди в режимах тяги і рекуперації;
- автоматичне перемикання високовольтного обладнання при зміні роду струму в контактній мережі;
- дистанційне-автоматизоване управління вагонними системами та окремими апаратами, включаючи пневматичну систему, пристрої охолодження силового устаткування, електропостачання, пожежогасіння, освітлення, кондиціонування повітря, водопостачання;
- надання інформації на пульт машиніста і провідника, а також на інформаційне табло для пасажирів;
- контроль технічного стану обладнання електропоїзда, теплотехнічних і енергетичних параметрів;
- самоконтроль і діагностика.

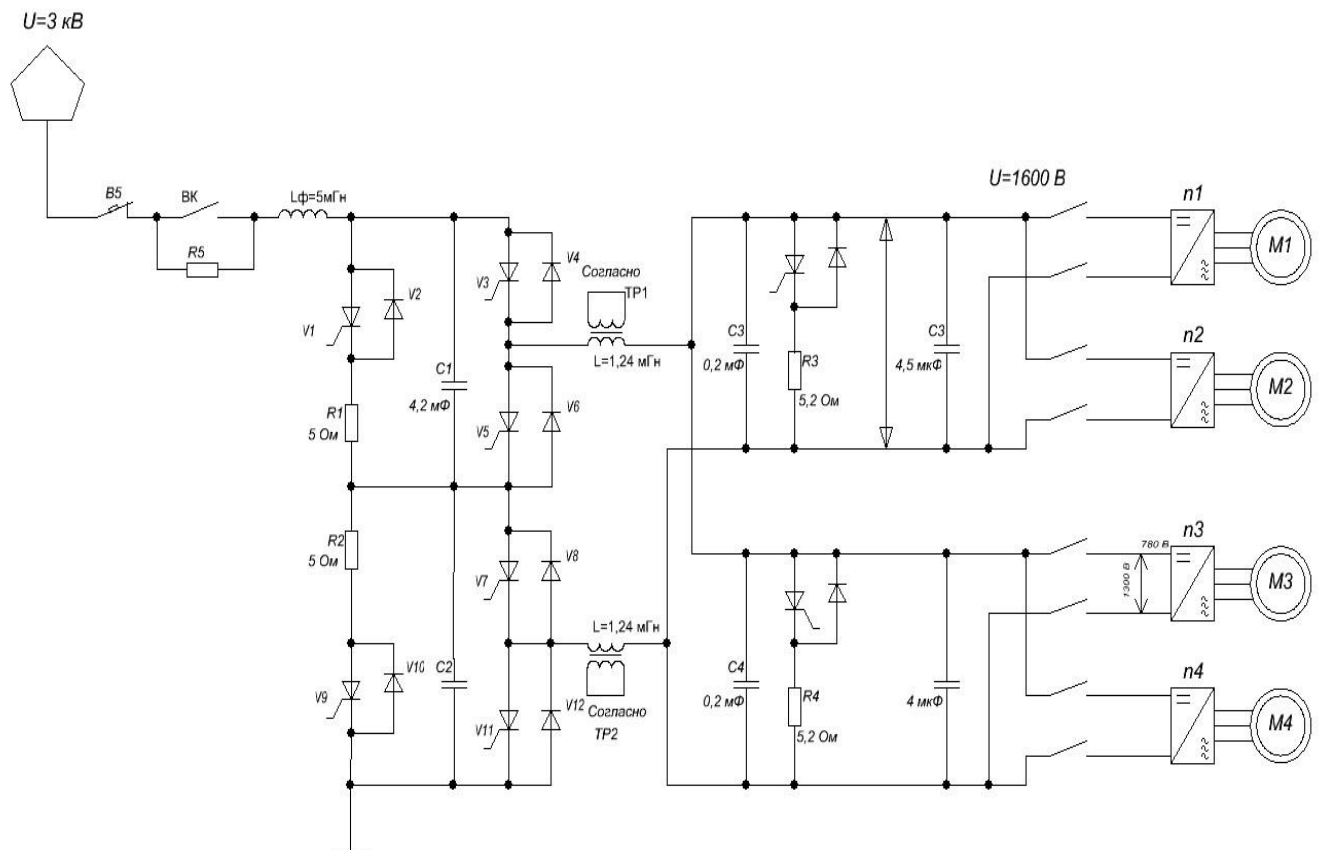


Рисунок 1.3 – Спрощена схема живлення електропоїзда «СОКІЛ»

15. Обладнаний фрикційним гальмом, дисковим гальмом, магнітно-рейковим гальмом пневматичним і електропневматичним гальмами.

- ЕДТ, на базі АД, які працюють в генераторному режимі;

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	17

- дискові гальма (ДГ) з прямо-діючим електропневматичним і автоматичним управлінням;
- магнітно-рейкове гальмо (МРГ), дія якого не залежить від зчеплення коліс з рейками;
- гальмо стоянки, забезпечує утримання окремого повністю завантаженого вагона на ухилі 30‰.

16. При випробуванні електропоїзд «СОКІЛ» досяг швидкості = 236 км/год, при цьому тягові двигуни реалізували потужність не менше 550 кВт.

1.2.3 Схема силових кіл електропоїзда ETR 500

Електропоїзд ETR 500 [9] з АТД для залізниць Італії, електрифікованих на постійному струмі 3кВ, призначений для перевезення пасажирів на трьох головних напрямках італійської високошвидкісної системи: північ-південь, схід-південь і схід-захід. Цей поїзд може розвивати швидкість до 300 км / год на нових ділянках і працювати з підвищеною продуктивністю як звичайний поїзд на старих ділянках. Два чотирирівні вагона електропоїзда розвивають потужність 8800кВт. Імпульсні переривники (рисунок 1.4) формують в проміжну ланку постійна напруга 2800В. Два АІН кожного візка включені послідовно і мають вхідна напруга 1400В. АТД потужністю 1100кВт кожен, виконані з двома трифазними обмотками на статорі. Передбачено реостатне гальмування з максимальною потужністю 2800 кВт на візок.

						Арк.
						18
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		

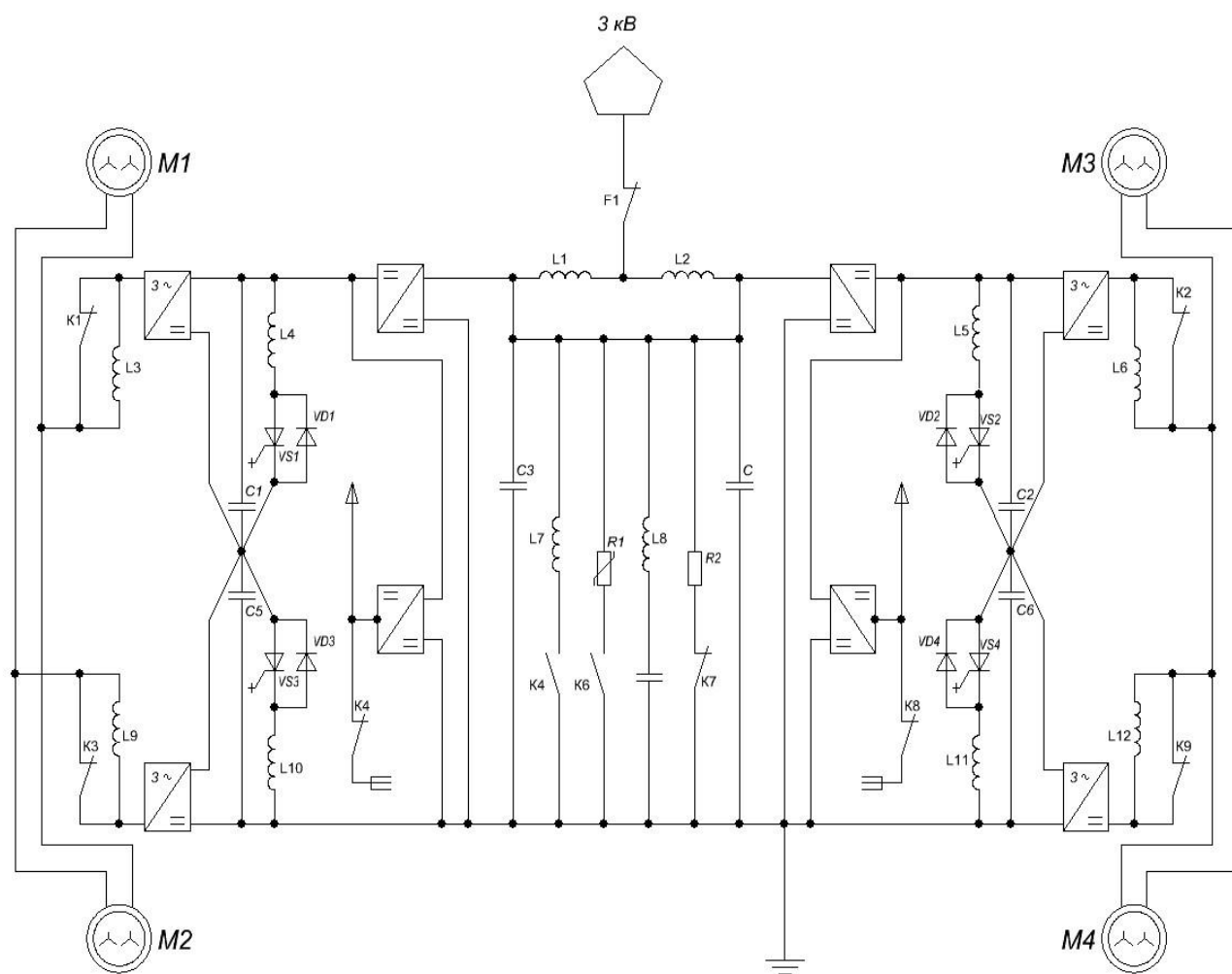


Рисунок 1.4 – Силовая схема электропоезда серии ETR 500

1.2.4 Схема силових кіл електропоезда серії ЭД6 постійного струму

Електропоезд ЭД6 [10] розроблений для Російських залізниць. На ньому встановлені асинхронні тягові двигуни, для управління якими використовується напівпровідниковий перетворювач частоти. Він виконаний на біполярних транзисторах з ізолюваним затвором – IGBT. При цьому передбачено пряме підключення перетворювача до контактної мережі постійного струму напругою 3000В.

Укрупнена схема тягового приводу з асинхронним тяговим двигуном приведена на рисунку 1.5.

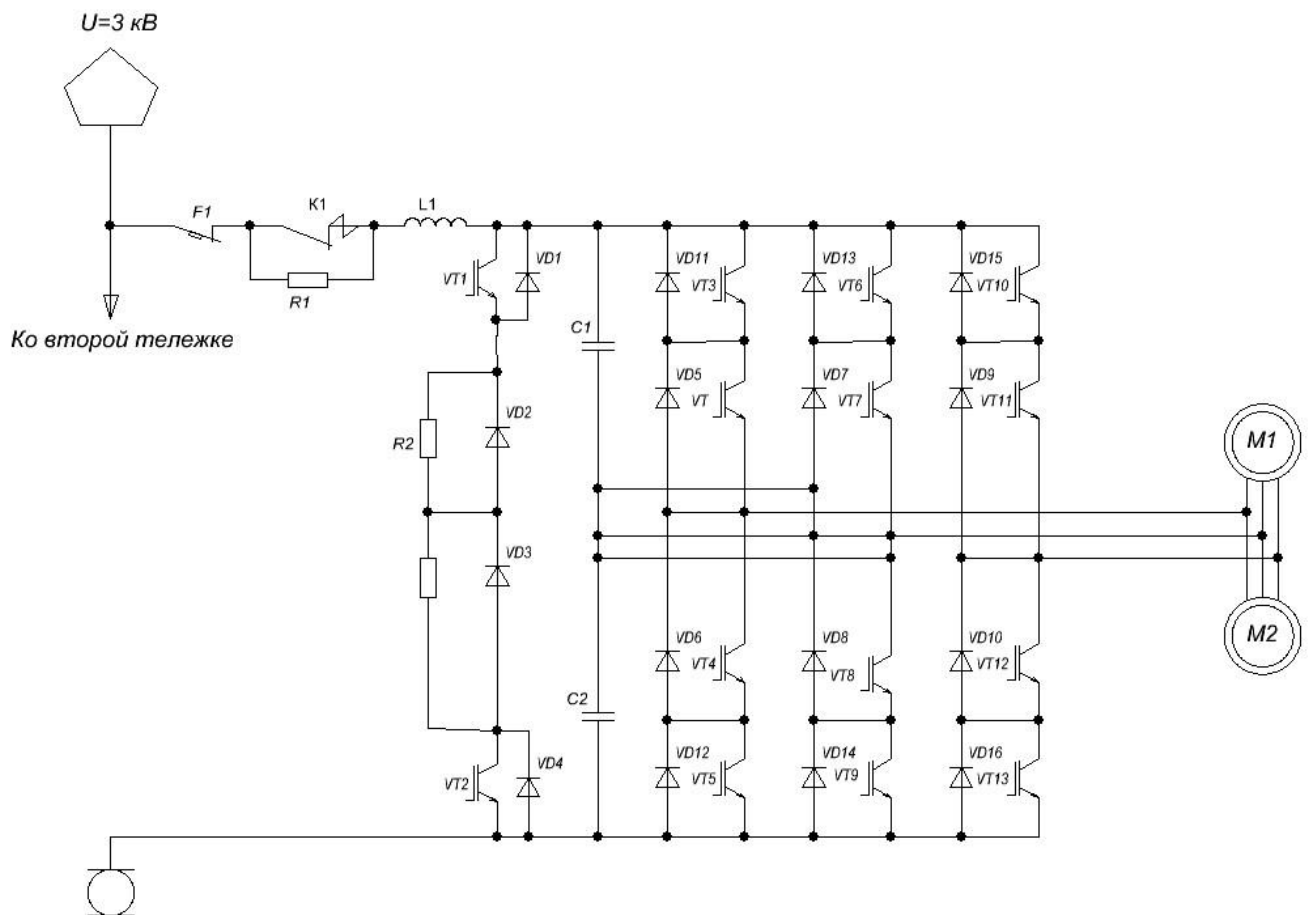


Рисунок 1.5 – Силовая схема электропоезда серии ЭД6

Постійна напруга контактної мережі перетвориться в перемінну, регульоване по амплітуді і частоті. В якості тягових двигунів використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. При регулюванні амплітуди і частоти напруги сила тяги (гальмування) змінюється плавно без стрибків, характерних для систем з тяговими двигунами постійного струму і контактнореостатним регулюванням.

Напрямок руху змінюють за рахунок зміни порядку чергування фаз на виході перетворювача без перемикання в силовій схемі. Перехід в режимі гальмування також здійснюється без перемикачів в схемі.

На вагоні передбачені два перетворювача - кожен для управління парою двигунів. Окремий перетворювач виконаний у вигляді єдиного конструктивного блоку і містить:

- трифазний автономний інвертор напруги. Кожна фаза виконана на тиристорних модулях IGBT 3,3кВ, 1200А (фази А, В, С);
- конденсатори фільтра C_1 і C_2 ;

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	20

- гальмівний переривник VTB і VD;

Перетворювачі підключені до контактної мережі через реактор фільтра LF, лінійний контактор QS і швидкодіючий вакуумний вимикач QF. Гальмівні резистори RT служать для поглинання енергії електричного гальмування, якщо інші споживачі, під'єднані до контактної мережі, не споживають енергію або тягові підстанції не забезпечують повернення електроенергії в систему первинного.

Тягові двигуни підключаються по два паралельно з різних візків. До першого перетворювача під'єднані перший і третій двигуни, до другого - другий і четвертий. Так вирівнюються навантаження на кожен перетворювач, оскільки розвантажена перша по ходу і довантажена друга по ходу візка в режимі тяги (або навпаки в режимі гальмування).

Особливістю схеми силових кіл електропоїзда є пряме підключення перетворювача до контактної мережі напругою 3000В. Останнє стало можливим завдяки досягненням в області силової електроніки, зокрема, створення і освоєння силових напівпровідникових транзисторних модулів з робочою напругою 3300В і робочими струмами до 1200А.

На електропоїзді ЕД6 встановлені АТД типу ДТА-400-6 якісний вид статичних характеристик режимів роботи асинхронних двигунів зображений на рисунку 1.6.

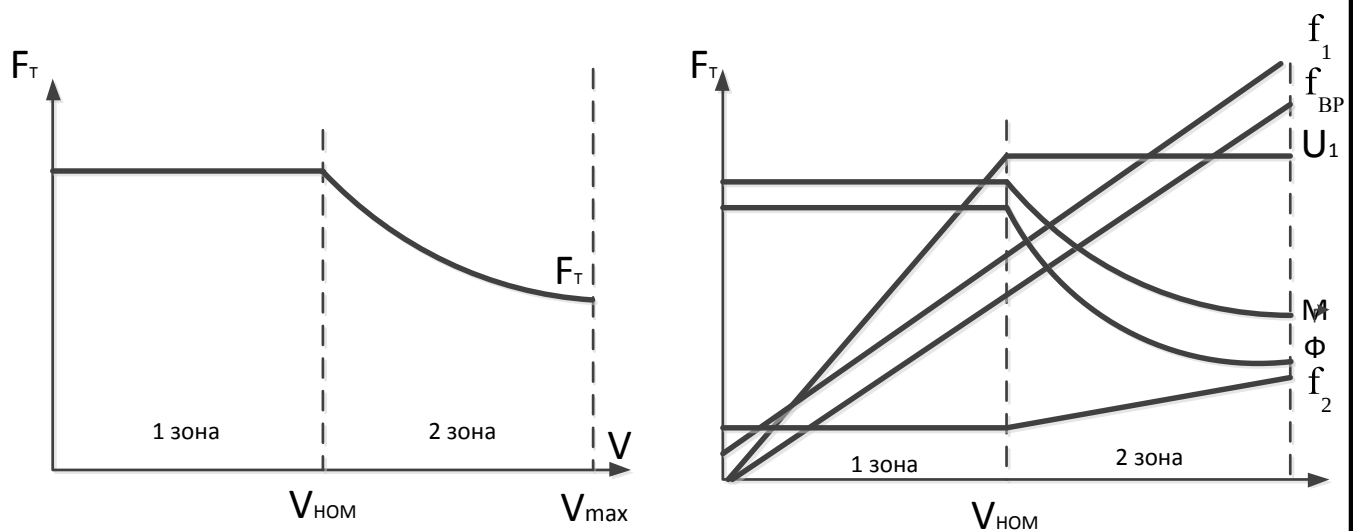


Рисунок 1.6 – Статичні характеристики режимів роботи АТД

У першій зоні регулювання для підтримки постійного моменту M тягового двигуна при сталості частоти абсолютного ковзання ротора f_2 (наприклад $f_{2\text{НОМ}}$) з ростом частоти обертання ротора $f_{\text{об}}$, а значить і частоти f_1 напруги живлення,

необхідно враховувати напруження статора U_1 . При цьому зберігається незмінною величина магнітного потоку Φ .

У другій зоні регулювання напруги статора U_1 повністю відрегульовано перетворювальної установкою і залишається незмінним. Момент, що обертає M при підтримці сталості потужності на валу тягового двигуна змінюється по гіперболічній залежності, для чого потрібне збільшення частоти абсолютного ковзання ротора f_2 зі збільшенням швидкості руху електропоїзда.

Таким чином, для реалізації статичних характеристик режимів роботи АТД необхідно мати джерело електричної енергії з можливістю плавної зміни напруги і його частоти. На електропоїзді ЕД6 таке завдання вирішили за допомогою перетворювальної установки «автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією». Характеристики асинхронного тягового двигуна типу ДТА-400-6 електропоїзди ЕД6 в номінальному режимі наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 1.2 – Характеристики тягового двигуна ДТА-400-6 в номінальному режимі

Параметр режиму роботи	Позначення	Значення
Потужність на валу, кВт	P_2	400
Фазна напруга статора, В	U_1	1350
Частота струму статора, Гц	f_1	91
Частота абсолютного ковзання ротора, Гц	f_2	1,6
Струм статора, А	I_1	121,4
Момент, що обертає, Н * м	M	2120
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	0,858
Коефіцієнт корисної дії	к.к.д.	0,926

1.2.5 Електропоїзд змінного струму ЭНЗ

Електропоїзд є одним з перших поїздів змінного струму з асинхронними тяговими двигунами, який майже міг потрапити до серійного випуску та експлуатації [11, 12].

Тяговий привід візка моторного вагону електропоїзда ЭНЗ виконано на основі тиристорних двох зонного випрямне-інверторного перетворювача, автономного інвертора струму та двох тягових асинхронних двигунів НТА-350, які ввімкнені паралельно. Електропривод обладнано давальниками струму типу LEM та імпульсними давальниками частоти обертання. Рекуперативне гальмування дозволяло забезпечити повернення до 30% енергії, що споживається на тягу.

Дослідний електропоїзд з 5 вагонів був виготовлений у 1999 р. [13]. Для нового поїзда обрана незвичайна композиція. Поїзд складається з двох зчепів по 5 вагонів, кожен з яких є автономним і включає в себе два головних вагона, два моторних і причіпний (Г + М + П + М + Г). Конструкція вагонів передбачала можливість компонування з різного співвідношення моторних і причіпних

вагонів. Перехід на основною складовою $M + 1,5P$ став можливий завдяки більш високій потужності асинхронних тягових двигунів.

Переваги системи:

- номінальна потужність АТД може бути використана в усьому діапазоні швидкостей руху до конструктивної включно;
- при однаковій потужності та інших рівних параметрах АТД має меншу масу, ніж колекторний;
- істотно зменшується витрата активних матеріалів (міді, сталі); знижується трудомісткість виготовлення тягових двигунів і їх обслуговування в експлуатації
- з'являється можливість повної уніфікації вузлів тягових перетворювачів для електропоїздів постійного і змінного струму.

Недоліки системи:

- застосовується, як правило, подвійне перетворення енергії, що викликає зменшення загального к.к.д. і ускладнення перетворювача;
- необхідна наявність спеціальних активних пристроїв зниження рівня електромагнітних завад в тяговому струмі;
- при використанні групового приводу необхідна підтримка в експлуатації різниці діаметрів бандажів колісних пар на рівні не більше 5 мм (замість 10 мм при колекторних тягових двигунах), або застосування схем індивідуального регулювання асинхронного тягового двигуна, що значно ускладнює тяговий перетворювач.

Корисним наслідком виявлено необхідність застосування мікропроцесорних систем управління, які піднімають рухомий склад на новий технологічний рівень, що дозволяє також автоматизувати процес ведення поїзда, забезпечити діагностику електрообладнання та систем, впровадити інформаційні системи на приміських електропоїздах і т. п. Всі ці заходи в цілому дозволяють знизити витрати на технічне обслуговування і ремонт нових електропоїздів.

Лобова частина головного вагона була розроблена на основі сучасних тенденцій формотворення вітчизняних і зарубіжних типів рухомого складу, мала обтічну форму без виступаючих елементів. У лобовому склінні застосована конструкція з силікатного триплекса з електричним обігрівом і автоматичним регулюванням температури в заданих межах. Прожектор встановлений нижче лобових вікон, що забезпечує оптимальні умови видимості в нічний час.

Салони вагонів мали традиційну систему шумової та теплоізоляції із застосуванням важко горючих піно поліуретанів з низьким коефіцієнтом теплопередачі. Для облицювання бічних стін використані панелі з композиційних матеріалів зі стільниковим наповненням, що застосовуються у авіабудуванні для пасажирських салонів сучасних літаків. Передбачені місця для інвалідів з колясками. Система опалення – електрокалорифера, здійснює рівномірний нагрів повітря і подачу його за спеціальними повітропроводам до ніг пасажирів. У кожному салоні встановлено електронні табло для відображення інформації про маршрут проходження, черговий станції, точний час і т. п.

					Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата	23

На початку 2000 р. на заводі пройшла офіційна презентація електропоїзда, на якій гості та представники преси мали можливість оглянути вагони і прокотитися по заводському випробувальному кільцю. Однак, незважаючи на успішний початок робіт, для налагодження та випробувань нових систем не було виділено необхідне фінансування, тому всі роботи над проектом були зупинені. Електропоїзд тривалий час перебував на території НЕВЗ [13].

Таким чином, на даний момент на залізницях з шириною колії 1520 мм, які електрифіковано напругою однофазною змінного струму 25 кВ (50 Гц) у випробуваннях або експлуатації відсутні електропоїзди змінного струму для приміських перевезень з асинхронними тяговими двигунами. Знаходяться в експлуатації двох системні або застарілого типу з колекторними машинами.

						Арк.
Изм.	Лит.	№ докум.	Подпись	Дата		24

2 ВИБІР СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Аналіз структурних схем електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами

Застосовувані в даний час тягові двигуни постійного струму є досить напруженими машинами в відношення теплових і особливо комутаційних умов на колекторі. Вони схильні до аварійних явищ у вигляді перекидань дуги і кругового вогню, потребують найбільшої уваги в експлуатації та затрат на обслуговування і ремонт, а також мають інші недоліки. Для використання на моторних вагонах електропоїзда найкращим чином підходять трифазні асинхронні двигуни (АТД) з короткозамкненим ротором.

При сучасному рівні розвитку силової напівпровідникової техніки статичний перетворювач тягового приводу електровозу став його головною частиною, оскільки саме його параметри та показники визначають властивості тягового приводу в цілому, такі як діапазон регулювання, плавність, якісні показники у перехідному процесі та ін.

Аналіз сучасного стану тягового електрорухомого складу (ЕРС) та системи енергопостачання електрифікованих залізниць України показав, що необхідна заміна тягового ЕРС на нові електропоїзди, побудовані з використанням сучасної елементної бази та керуючих систем. В Україні електрифікація залізниць представляє собою дві системи: 3кВ постійної напруги та 25 кВ 50 Гц змінної напруги. Тому доцільним є введення в експлуатацію нових електропоїздів, що дозволить підвищити пропускну спроможність залізниць [14,15].

Аналіз варіантів побудови тягових перетворювачів багатосистемних електропоїздів, що експлуатуються на залізницях Європи, та електропоїздів подвійного живлення, що експлуатуються на залізницях колишнього СРСР, дозволяє представити узагальнену структурну схему тягового перетворювача (для асинхронного тягового електропривода) (рис. 2.1).

Тяговий перетворювач, структурна схема якого представлена на рис. 2.1, має у своєму складі 4QS перетворювач, що дозволяє не тільки підтримувати рівень напруги на проміжній ланці постійного струму (на рис.2.1 - фільтр накопичувач), а ще покращити його енергетичні показники, зокрема коефіцієнт потужності. Специфіка роботи 4QS перетворювача приводить до появи в тяговому струмі вищих гармонійних складових. Це характерна риса всіх перетворювальних пристроїв силової електроніки, які виконані на

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

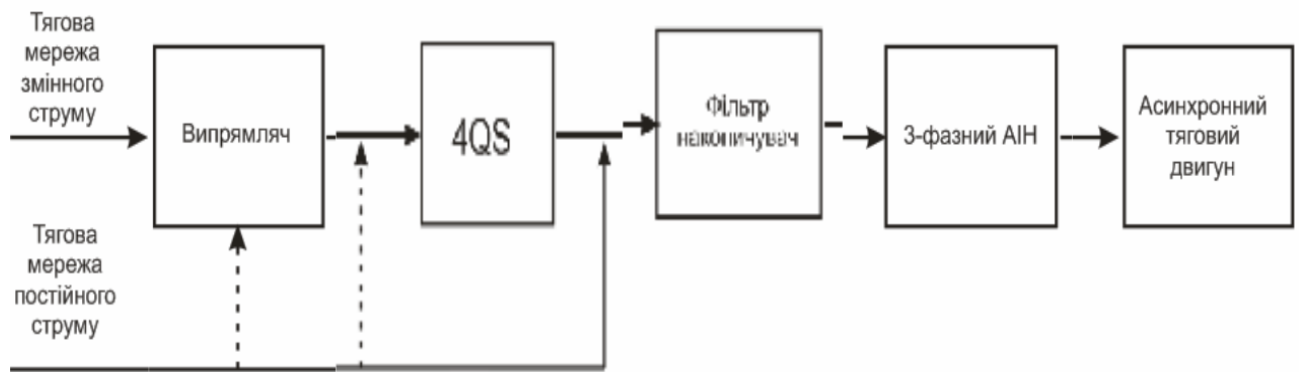


Рисунок 2.1 – Схема тягового перетворювача електропоїзда

напівпровідникових керованих вентилях, пов'язана із ключовим (дискретним) характером роботи вентилів, що визначає дискретизацію як процес споживання енергії перетворювачем від її первинного джерела, так і процес передачі її споживачеві (навантаженню) [15].

Дискретне споживання енергії перетворювачем від джерела електроенергії призводить до помітного зворотного впливу вентиляного перетворювача на якість електроенергії, наслідки чого відчуває як сам перетворювач, так і інші споживачі, що одержують живлення від того ж джерела.

Тяговий вентиляний перетворювач електрорухомого складу, споживаючи з тягової мережі активну потужність, «викидає» у неї потужність по вищих гармоніках, що псує форму напруги в мережі й тим самим ускладнює роботу інших споживачів електроенергії в мережі. Для обмеження цього негативного впливу вентиляних перетворювачів на контактну мережу можуть бути застосовані такі міри, крім обмеження співвідношення потужності перетворювача й живлючої мережі (постійного й змінного струмів): збільшення числа еквівалентних фаз перетворювача; використання схем перетворювачів з поліпшеною формою вхідного струму; фільтрацію вхідних струмів перетворювача, як правило, за допомогою паралельного підключення до мережі послідовних LC-фільтрів, настроєних на домінуючі гармоніки вхідного струму; використання схем активної фільтрації вхідного струму, що компенсують відхилення вхідного струму перетворювача від синусоїдальної форми [14].

З іншого боку, дискретна передача енергії з виходу перетворювача в навантаження, як правило, знижує ефективність її використання в навантаженні, де здійснюється перетворення електричної енергії в механічну.

Такий вплив, у першу чергу на електрорухомому складі змінного струму, позначається в зниженні енергетичних показників, що в деякій мірі стримує широке впровадження напівпровідникових тягових перетворювачів.

Великі швидкості зміни напруги і струмів вентилів у процесі комутації призводять до помітного електромагнітного випромінювання в навколишнє середовище, створюючи перешкоди в колах пристроїв слабкострумової електроніки, у тому числі в пристроях керування цими вентиляними перетворювачами, що породжують зазначені перешкоди.

На електрорухомому складі такі випромінювання в першу чергу впливають на канали радіозв'язку й локомотивної сигналізації. Чітка робота цих систем визначає безпеку руху поїздів, що є головною вимогою, висунутою до будь-яких транспортних засобів залізниць.

Крім, того аналіз схемних рішень для перетворювачів діючого багатосистемного електропоїзда, показав, що при використанні підвищеної напруги у контактній мережі постійного струму потрібно ускладнювати схеми стабілізації напруги на ланці постійного струму, тобто використовувати більш складні перетворювачі.

В роботі запропонована структурна схема статичного перетворювача для електропоїзда подвійного живлення, ця схема не враховує можливість підвищення напруги у контактній мережі постійного струму.

Враховуючі це та аналізуючи схемні рішення статичних перетворювачів, які використовуються в інших галузях промисловості, пропонується узагальнена структурна схема тягового статичного перетворювача для багатосистемного електропоїзду з асинхронними тяговими двигунами (рис. 2.1) [15].

Такий перетворювач дозволяє реалізувати два основних напрямки покращення якості споживаної електричної енергії: використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом за фазою відносно один одного; використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масо-габаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, у подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

2.2 Структурна схема тягового перетворювача

Перший контур призначено для перетворення електричної енергії з контактної мережі в напругу змінного струму підвищеної частоти, яку знімаємо із вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти.

Структурна схема тягового перетворювача зображена на рисунку 2.2 складається з двох контурів: мережевого та тягового змінного струму.

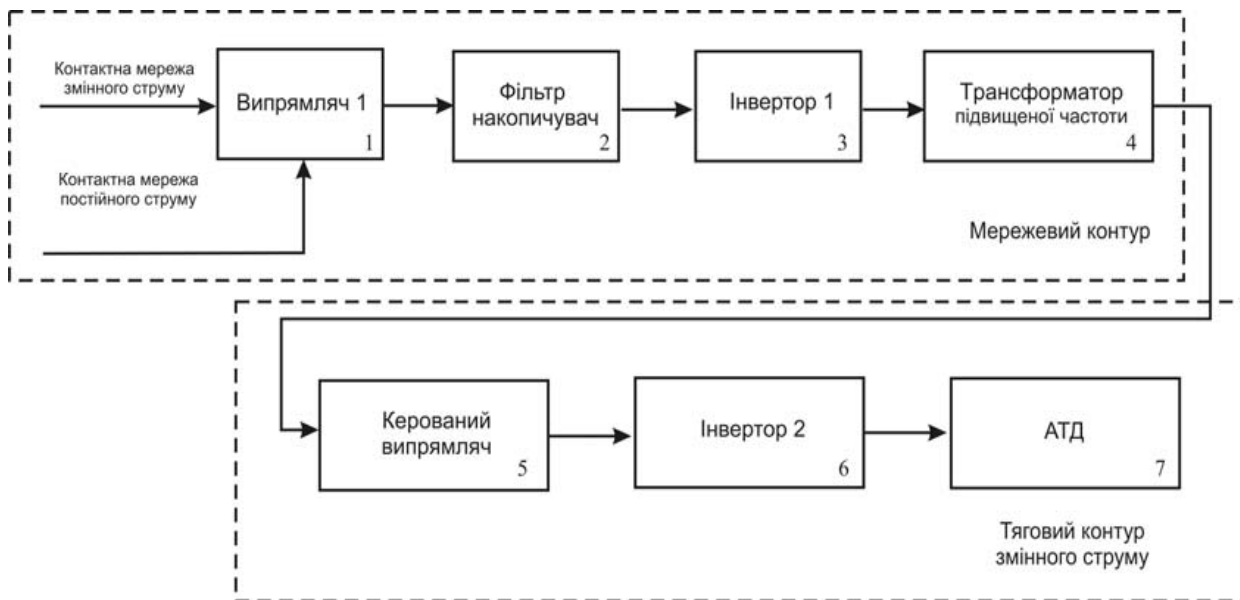


Рисунок 2.2 - Узагальнена структурна схема статичного перетворювача тягового приводу з асинхронними тяговими двигунами та ланкою підвищеної частоти [15]

Первина обмотка підключена до виходу високовольтного інвертора 1, вхід якого підключено до виходу випрямляча 1 (керованого або некерованого) при змінному струмі у контактній мережі. При постійному струмі у контактній мережі випрямляч 1 може використовуватися як дільник напруги. Тяговий контур забезпечує перетворення електричної енергії в механічну на валу тягового двигуна[9].

В залежності від рівня напруги у контактній мережі, кількості тягових двигунів та якого типу силовий модуль тягового перетворювача реалізується, структурна схема наведена на рис. 2.2 може видозмінюватися.

Вихідними даними для порівняльного аналізу перетворювальних структур тягового приводу багатосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами у даній роботі є:

1. Напруга у контактній мережі постійного струму 3 кВ
2. Напруга у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц.
3. Кількість асинхронних тягових електродвигунів – чотири.

Враховуючи вихідні дані, проведемо порівняльний аналіз наступних варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з 4 АТД. В якості реалізації першого варіанту можливо використовувати наступну розгорнуту структурну схему (рисунк 2.2), при цьому реалізується силовий модуль перетворювача типу М1 (на кожен тяговий двигун окремий перетворювач).

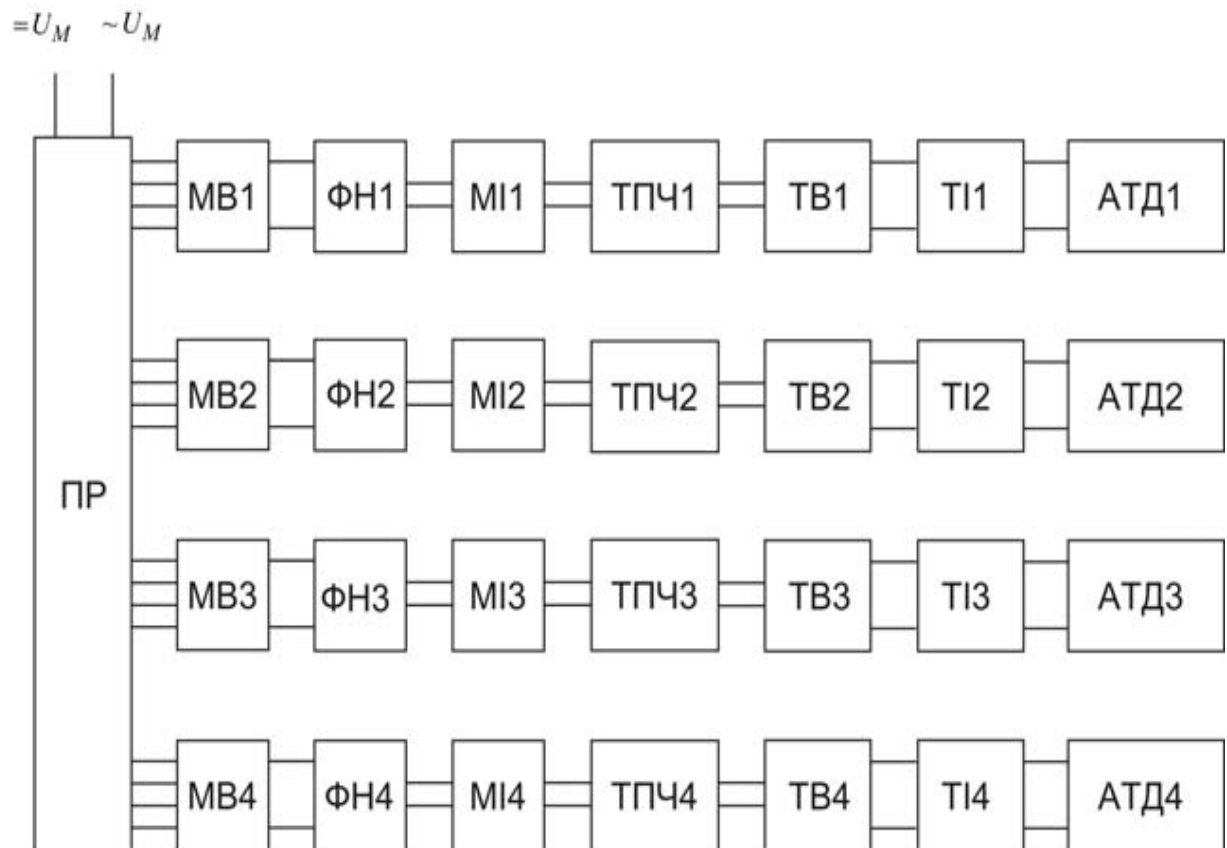


Рисунок. 2.2 - Розгорнута структура тягового перетворювача: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 АТД у разі реалізації модулями М1

На рисунку 2.22 прийняті наступні скорочення: ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 кВ постійного струму); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТПЧ – трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; ТІ – тяговий інвертор; АТД – асинхронний тяговий двигун змінного струму.

В режимі «3 кВ» ПР підключає МВ1...МВ4 паралельно до контактної мережі, а в режимі «25 кВ 50 Гц» – послідовно, тобто підключені у режимі дільника напруги контактної мережі. При цьому на вході кожного МВ діє

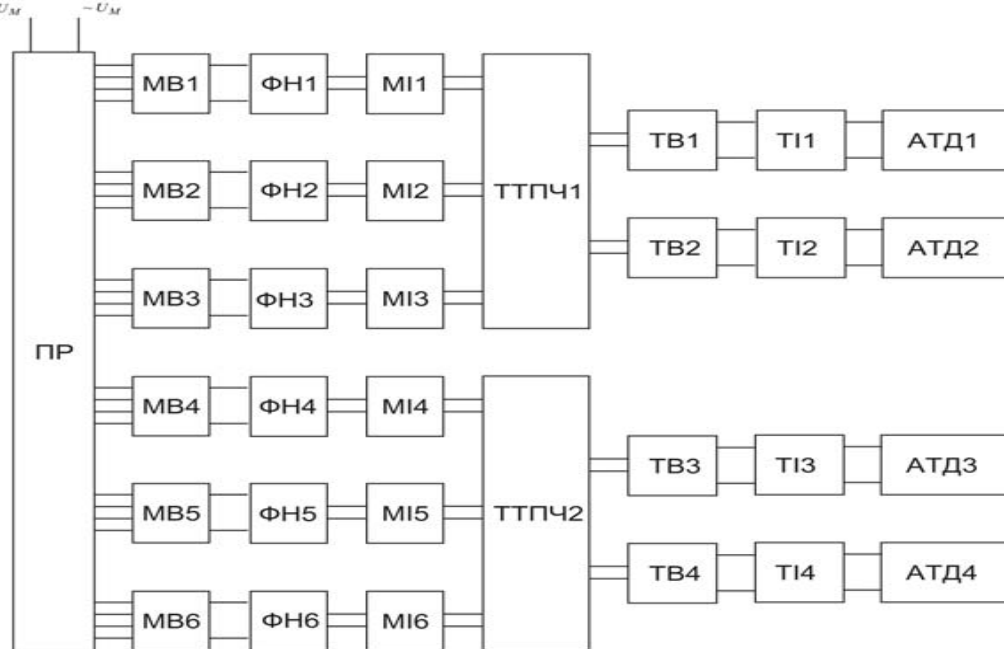


Рисунок 2.3 - Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 АТД у разі реалізації напруга, яка дорівнює: $U_{км}/4 = 25/4 = 6,25$ кВ змінного струму, а у режимі «3 кВ» діє 3 кВ постійного струму.

В наведеній схемі на рис.2.2 використовується однофазний тяговий трансформатор та тяговий випрямляч. Загальновідомо, що для однофазних мостових випрямлячів встановлена потужність трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) дорівнює $St_{1фм} = 1,23Pd$, а для трифазного мостового випрямляча $St_{3фм} = 1,05Pd$, де Pd – потужність навантаження.

Тобто доцільне використання трифазних систем. Реалізувати збільшення числа фаз перетворювача можливо за рахунок з'єднання в трифазну систему вторинних обмоток ТПЧ, при одночасній реалізації зсуву напруг первинних обмоток на 120 ел. градусів, тоді схема, наведена на рис. 2.2, перетвориться до вигляду, наведеному на рис. 2.3. [15]

Порівняно зі структурною схемою, наведеною на рис. 2.2, структура рис. 2.3 має збільшену кількість елементів мережевого контуру (додано 5-та та 6-та ланки МВ-ФН-МІ).

У схемі, наведеній на рис. 2.3, інвертори МІ1...МІ6 працюють зі зсувом по фазі один до одного, тобто реалізується принцип багатofазного перетворювача, що, дозволяє покращити енергетичні показники перетворювача в цілому. Крім того, така будова також дозволяє реалізувати модулі М3 та М6 при шести тягових двигунах, тобто така структурна схема є уніфікованою.

Порівнявши структурні схеми на рис. 2.2 та рис. 2.3, неважко зробити висновок, що основними функціональними вузлами, які «відповідають» за роботу з контактною мережею, є ПР та МВ. Саме поєднання цих елементів, в залежності від напруги у контактній мережі, визначає структуру

перетворювача в цілому. Різні варіанти ввімкнення МВ дозволяють забезпечувати роботу перетворювача при різній напрузі у контактній мережі. [15]

Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Частоту обертання можна регулювати шляхом: зміни ковзання; зміни числа пар полюсів обмотки статора p ; зміною частоти напруги живлення f [16, 17].

Регулювання частоти обертання двигуна шляхом зміни ковзання

Найбільш просто реалізувати даний метод можна введенням додаткового резистора в коло ротора. В результаті змінюється ковзання двигуна, а значить, і його частота обертання. Величина максимального моменту M_k залишається постійною, а величина відповідного йому ковзання і нахил характеристики змінюються. Частоту обертання можна регулювати тільки вниз від номінальної частоти обертання з діапазоном (2 ... 3). Плавність регулювання частоти залежить від числа ступенів резистора.

Регулюючи частоту обертання таким чином, слід мати на увазі, що потужність двигуна, зменшується пропорційно частоті обертання, він працює на відрізках часу не більше 0,5 години, з інтервалами холостого ходу, що перевищують тривалість робочого періоду в 3 ... 4 рази. Тривала робота двигуна на зниженій частоті допустима лише при відповідному зниженні моменту обертання.

До недоліків такого методу регулювання частоти обертання можна віднести підвищені втрати енергії і зниження жорсткості механічної характеристики [16, 17].

Регулювання частоти обертання двигуна зміною числа пар полюсів

Перемикаючи обмотки статора на різні схеми з'єднання, що дають різну кількість пар полюсів, можна поступово змінювати частоту обертання двигуна. Таке регулювання частоти обертання економне і дає механічні характеристики, що володіють більшою жорсткістю. Внаслідок цього двигуни зі зміною числа пар полюсів знаходять широке застосування в приводах, що не вимагають плавного регулювання частоти обертання [16, 17].

Регулювання частоти обертання зміною частоти напруги живлення

Цей метод дозволяє плавно регулювати частоту обертання в широкому діапазоні. Механічні характеристики двигуна при цьому досить жорсткі і забезпечують стабільну роботу приводу. У разі підтримки магнітного потоку двигуна незмінним регулювання його частоти обертання проводиться при постійному моменті. Для цього необхідно при зміні частоти в тому ж

напрямку і в тій же кратності змінювати і величину напруги або використовувати інші відомі способи регулювання.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання може бути застосований для одного або декількох асинхронних двигунів, що працюють в одному і тому ж режимі.

Струм різної частоти отримується за допомогою незалежного джерела енергії, частота якого регулюється. До таких джерел відносяться напівпровідникові перетворювачі частоти.

Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів шляхом зміни напруги

Регулювання швидкості обертання АД шляхом зміни напруги реалізується застосуванням відносно простих технічних засобів. З цієї метою між мережею змінного струму і АД встановлюється регулятор напруги, в нашому випадку на тиристорах або транзисторах, що працюють в ключовому режимі. Ці напівпровідникові регулятори напруги набули широкого поширення через низькі масогабаритні показники і високого ККД. Схема найпростішого електроприводу з регулятором напруги представлена на рисунку 2.4 [16, 17].

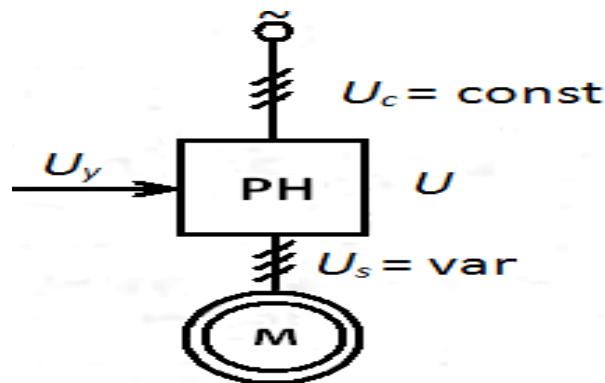


Рисунок 2.4 - Схема електроприводу з АД і регулятором напруги
Частотне регулювання швидкості обертання АД

Частотне регулювання швидкості обертання АД є найбільш економічним і тому розглядається як основний і найбільш бажаний спосіб. Його суть полягає в регулюванні синхронної швидкості за рахунок зміни частоти струму живлення статора АД. Економічність частотного регулювання швидкості пояснюється тим, що при регулюванні частоти не відбувається збільшення ковзання, як, наприклад, при реостатному управлінні [16, 17].

Спрощена схема електроприводу з частотним регулюванням швидкості наведена на рис. 2.5.

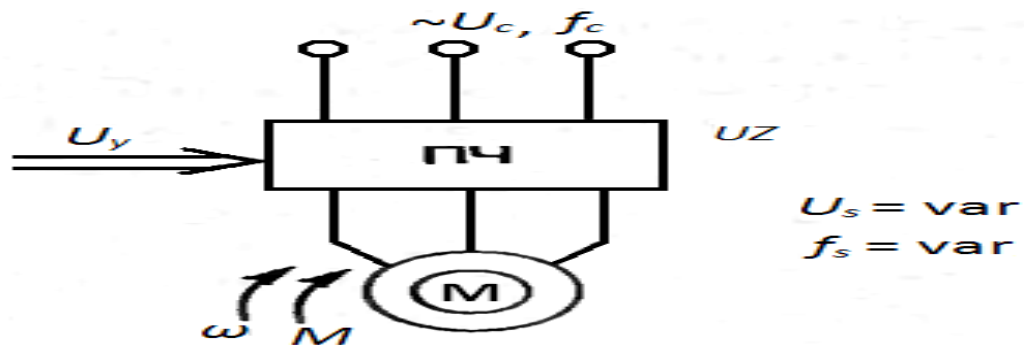


Рисунок 2.5. - Спрощена схема електроприводу з частотним керуванням

Головним елементом цієї схеми є перетворювач частоти (ПЧ), який здійснює регулювання частоти і напруги по одному з законів. Завданням ПЧ є перетворення напруги мережі (U_m , f_m), що подається на АД. За інформаційному каналу на ПЧ подається сигнал управління U_y . Такі електроприводи називаються частотними. Вони розрізняються типами ПЧ, способами формування напруги і видами зворотних зв'язків. Для отримання досконалих характеристик частотного електроприводу застосовуються замкнуті системи[13].

2.3 Структурна схема перетворювача власних потреб

Для підвищення надійності допоміжного приводу використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які живляться від джерела трифазної змінної напруги 380 В, промислової частоти 50 Гц, тому обов'язковим є застосування гальванічної розв'язки високовольтих кіл з допоміжними машинами. На електропоїздах змінного струму (рис. 2.6) роль гальванічної розв'язки як правило виконує тяговий трансформатор, частина вторинної обмотки якого використовується для живлення пристроїв власних потреб. На електропоїздах постійного струму (рис. 2.7) та подвійного живлення (рис.2.8) використовується додатковий трансформатор. В останньому випадку необхідним є також застосування інвертора для живлення обмоток

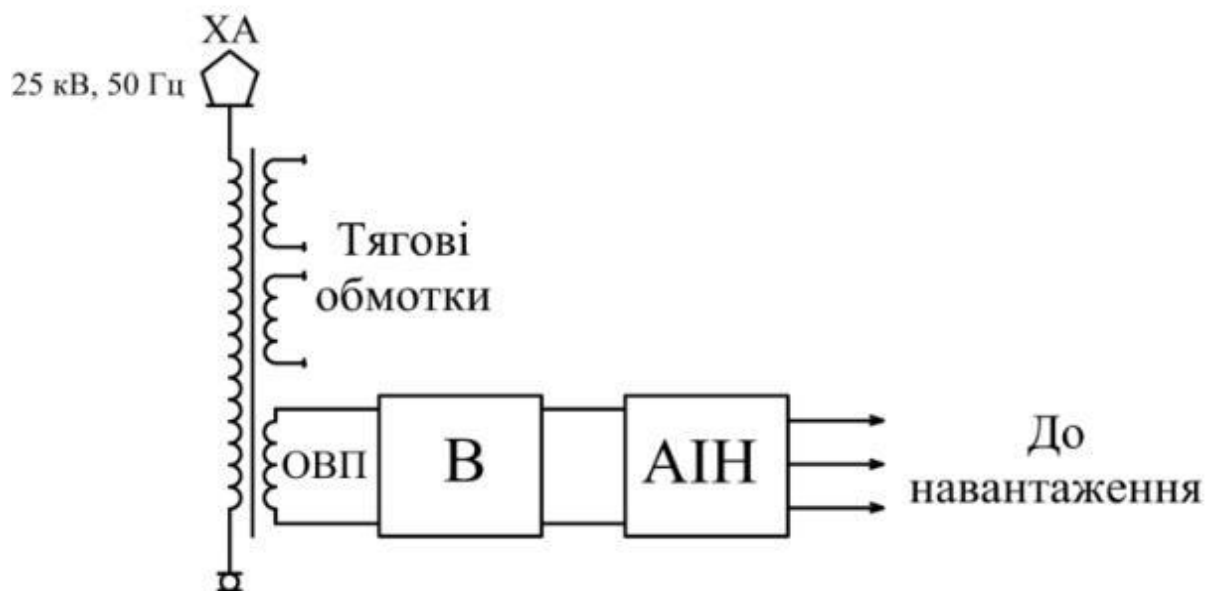


Рисунок 2.6 - Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда змінного струму

трансформатора[18].

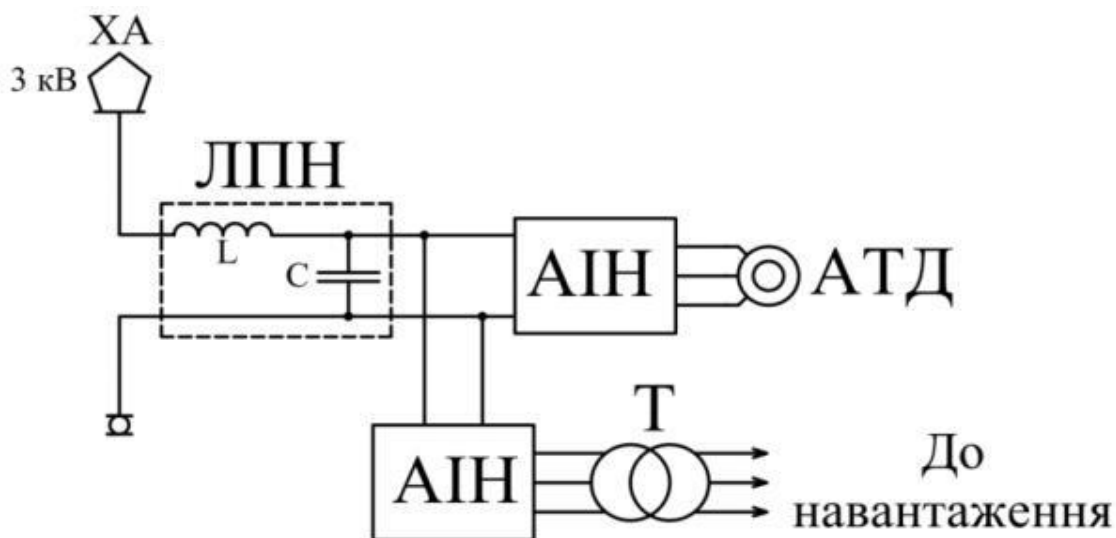


Рисунок 2.7 - Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда постійного струму

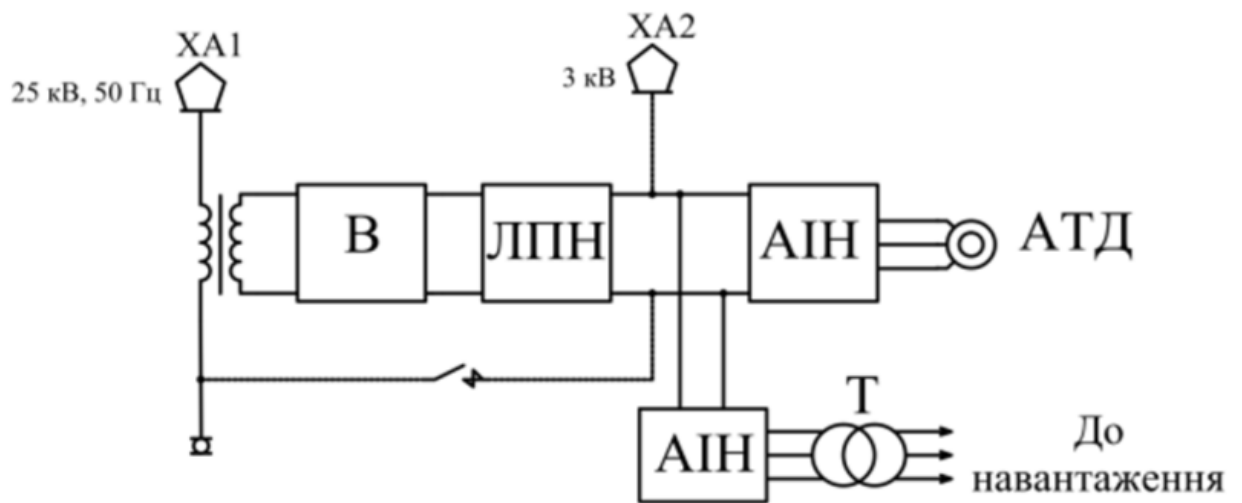


Рисунок 2.8 - Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда подвійного живлення

Найбільш розповсюдженими структурами схем перетворювачів власних потреб електропоїздів подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом є: схема з застосуванням вхідного чопера; схема прямого підключення однофазного АІН; схема прямого підключення трифазного АІН.

Схема з застосуванням вхідного чопера

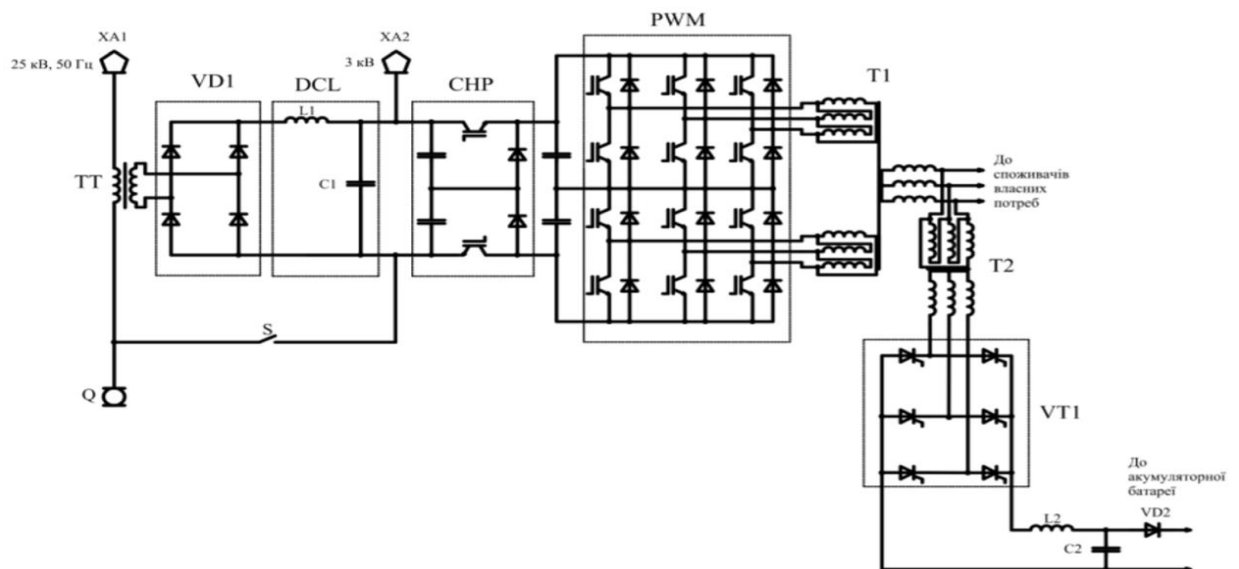


Рисунок 2.9 - Схема з застосуванням вхідного чопера

При живленні від мережі постійної напруги (рис. 2.9) використовуються ємнісний подільник і чопер СНР, які призначені для зниження напруги мережі до рівня, необхідного для роботи автономних інверторів напруги PWM. Два інвертори з'єднані послідовно, а на їх вході встановлено ще один

ємнісний подільник напруги. Таки чином напруга мережі постійного струму поділяється навпіл спочатку одним ємнісним подільником, а потім ще раз навпіл другим ємнісним подільником, що дозволяє використовувати у чопері силові напівпровідникові прилади, розраховані на половину максимальної мережевої напруги, а в інверторах – на одну четверту максимальної напруги тягової мережі постійного струму. Така величина напруг на інверторах

дозволяє використовувати силові напівпровідникові прилади 17 класу, які мають значно вищі показники частотних характеристик та відносно низьку вартість порівняно до приладів такого ж типу більш високого класу (наприклад GTO 45 класу або IGBT 65 класу), що дозволяє підвищити частоту широтно- імпульсної модуляції (ШІМ), а отже, отримати майже ідеальну форму синусоїди струму навантаження інвертора. [18]

При живленні від мережі змінного струму (див. рис.2.9) напруга обмотки власних потреб тягового трансформатора ТТ випрямляється некерованим мостовим випрямлячем VD1, згладжується у ланці постійної напруги DCL і подається на вхід чопера, який знижає і стабілізує напругу.

З виходу інверторів напруга подається до первинних обмоток трифазного трансформатора Т1, який виконує роль гальванічної розв'язки високовольтних кіл з допоміжними машинами. Вторинна обмотка трансформатора живить допоміжні машини трифазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Первинні обмотки трифазного трансформатора як правило з'єднані «трикутником», вторинні – «зіркою». Також до вторинної обмотки трансформатора Т1 підключений трансформатор Т2, на виході якого встановлений керований випрямляч VT1 і фільтр L2C2, які призначені для зарядки акумуляторної батареї [18].

При живленні від мережі постійного і змінного струму рисунок 2.10 напруга ланки постійної напруги DCL перетворюється за допомогою інвертора VT1 в змінну однофазну напругу, яка живить первинну обмотку трансформатора власних потреб Т1. Трансформатор виконує роль гальванічної розв'язки і знижає напругу до не-обхідної величини. Далі напруга вторинної обмотки випрямляється однофазним некерованим мостовим випрямлячем VD1 і подається до поїзної шини власних потреб (train bus supply). З поїзної шини отримують живлення трифазні автономні інвертори напруги, які живлять до-поміжні асинхронні машини та кондиціонери. Також від поїзної шини живляться пристрої обігріву та зарядки акумуляторнонь батареї. Як правило напруга поїзної шини становить

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

570 В, що дозволяє отримати на виході інвертора діюче значення трифазної напруги 380 В, 50 Гц.

Схема прямого підключення однофазного АІН

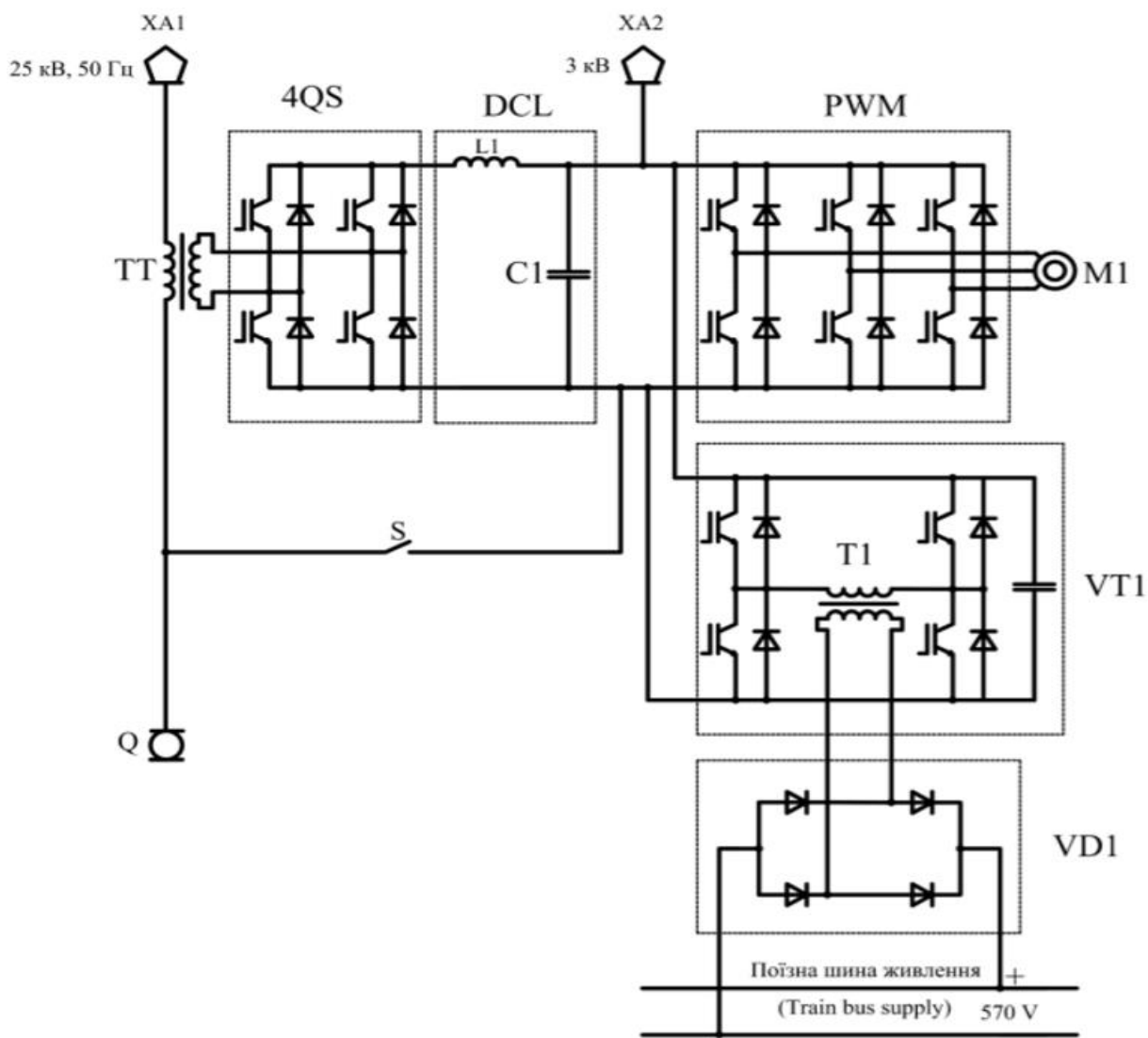


Рисунок 2.10 - Схема прямого підключення однофазного АІН

При живленні від мережі постійного струму (рис. 2.11) напруга ланки постійної напруги DCL1 подається на вхід автономного трифазного інвертора напруги власних потреб PWM2, який живить трифазний трансформатор власних по-треб Т1. Первинні обмотки трансформатора Т1 з'єднані «трикутником», а вторинні – «зіркою». На вторинних обмотках трансформатора за допомогою інвертора власних потреб підтримується стабільна трифазна напруга 380 В, 50 Гц.

При живленні від мережі змінного струму напруга обмотки власних потреб тягового трансформатора ТТ випрямляється, стабілізується і

підвищується до необхідної величини за допомогою чотириквadrантного перетворювача 4QS2 і через ланку постійної напруги DCL2 подається до автономного інвертора напруги PWM2. Таким чином, при живленні від мережі постійного струму напруга на вході інвертора коливається в діапазоні 2000...4000 В, а при живленні від мережі змінного струму до інвертора подається стабільна напруга величиною, як правило 2800 В.

Схема прямого підключення трифазного АІН

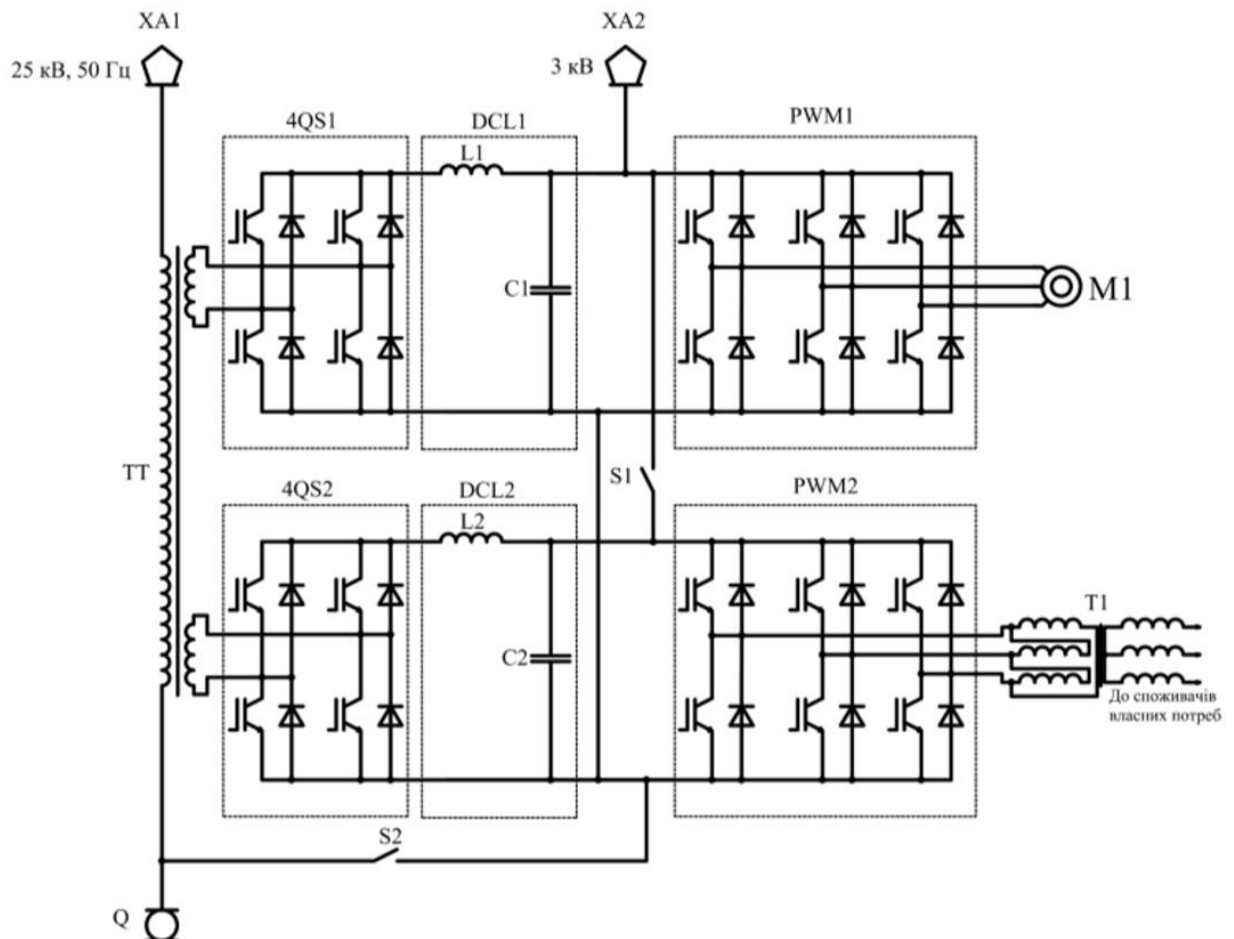


Рисунок 2.11 - Схема прямого підключення трифазного АІН

Наступний варіант схеми передбачає живлення допоміжних машин від ланки постійної напруги при роботі електропоїзда як від мережі постійного струму, так і від мережі змінного струму. При цьому автономний інвертор напруги, який живить первинні обмотки трифазного трансформатора отримує живлення через чофер (рис. 2.12) або безпосередньо від ланки

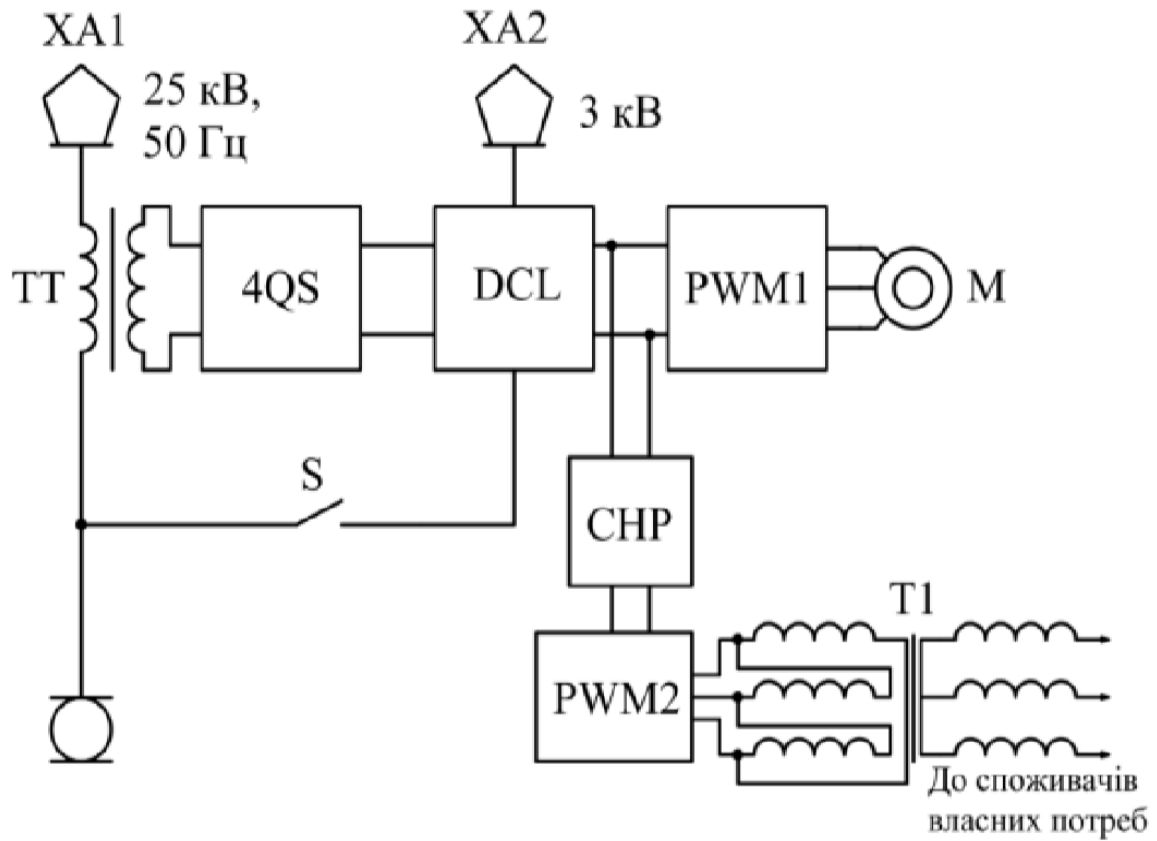


Рисунок 2.12 - Функціональна схема живлення допоміжних машин від ланки постійного струму з вхідним чофером

постійної напруги (рис. 2.13) [18].

При такій топології схеми силові прилади автономних інверторів, які

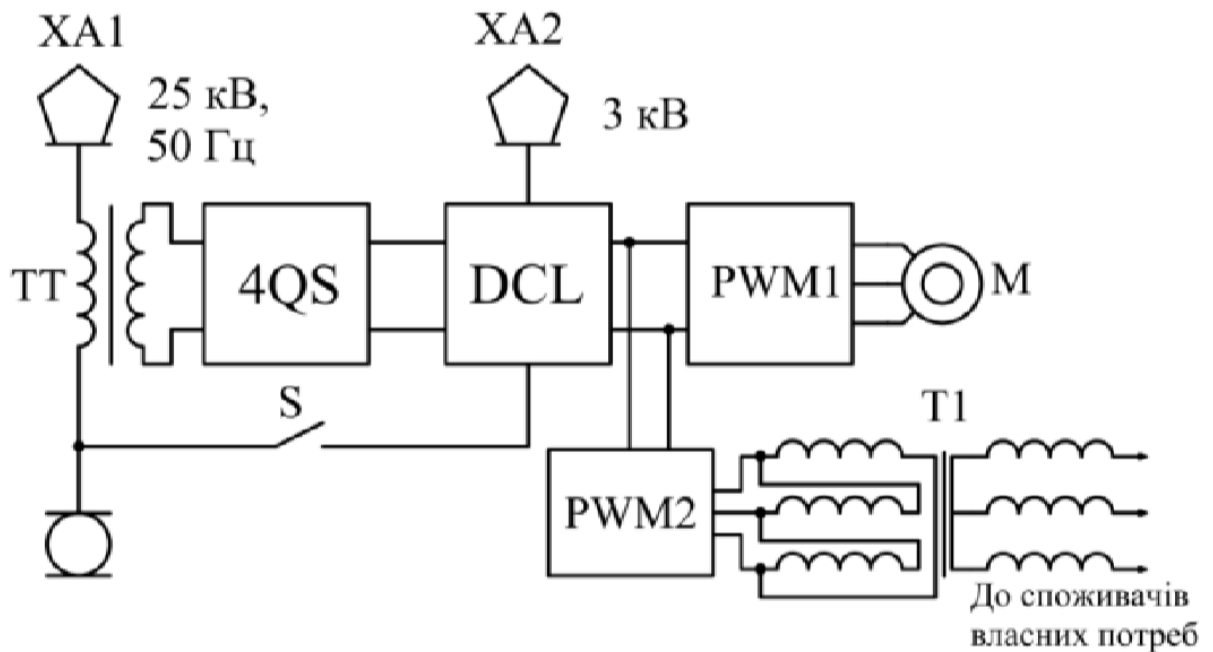


Рисунок 2.13 - Функціональна схема живлення допоміжних машин безпосередньо від ланки постійної напруги

живлять асинхронні тягові двигуни розраховуються на номінальний струм двигунів, а силові прилади чотириквADRантних перетворювачів на більш високі значення струмів, як правило на 20 % більше номінального струму тягового інвертора. Це пояснюється тим, що через силові прилади вхідного чотириквADRантного перетворювача також протікає струм навантаження допоміжних машин.

Схема з застосуванням проміжного трансформатора підвищеної частоти

Новим принципом побудови структур електричних кіл власних потреб є застосування проміжного трансформатора підвищеної частоти, обмотки якого живляться від резонансного інвертора напруги (рис. 2.14) [18].

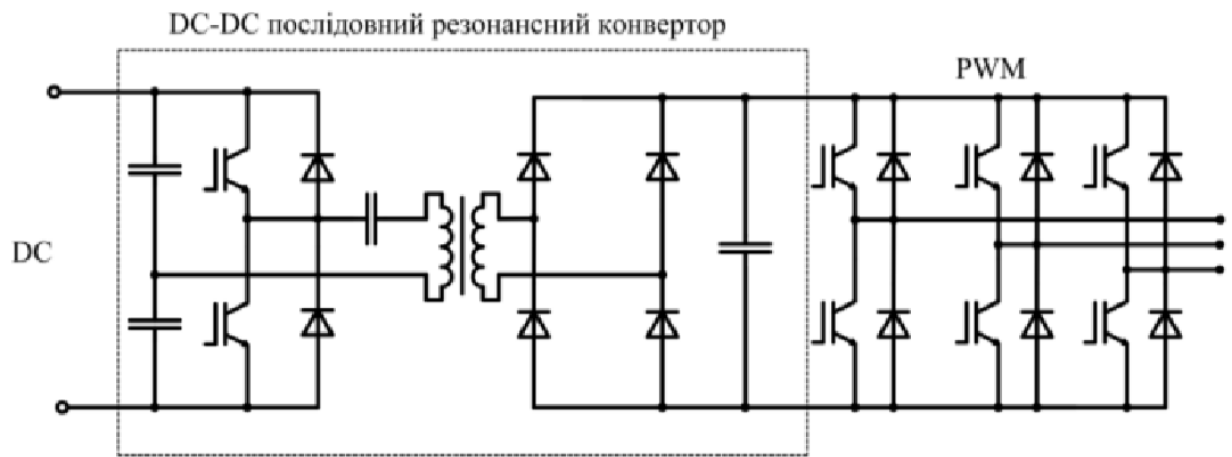


Рисунок 2.14 - Схема резонансного конвертора для живлення АІН власних потреб від мережі постійного струму

Принцип дії наступний. Вхідна напруга знижується до необхідного рівня DC-DC конвертором. Конвертор складається з послідовного резонансного інвертора, який перетворює постійну напругу в змінну, частотою, вищою 50 Гц і живить первинну обмотку трансформатора. За допомогою трансформатора здійснюється гальванічна розв'язка кіл високої і низької напруг. Також трансформатор знижує напругу до потрібної величини для живлення автономного інвертора напруги власних потреб. Напруга вторинної обмотки трансформатора випрямляється однофазним некерованим випрямлячем.

Хоча в схемі з DC-DC конвертором використовується більша кількість елементів відносно традиційної схеми, проте з точки зору вартості, збільшена кількість елементів компенсується зниженням вартості низьковольтних інверторів. Робоча частота трансформатора знаходиться в діапазоні 10 кГц, що дозволяє знизити вагу трансформатора з сотень до десятків кілограмів

Послідовний резонансний перетворювач працює без будь-яких зворотних зв'язків. Фіксоване співвідношення вхідної до вихідної напруги визначається лише коефіцієнтом транс-формації.

Серед діючих схем перетворювачів власних потреб електропоїздів з асинхронним тяговим приводом найбільш широко використовується схема з «поїзною шиною живлення». Застосування такої схеми дозволяє реалізувати живлення допоміжних машин та інших при-строїв від індивідуальних інверторів, що дає можливість регулювати потужність окремих допоміжних машин. При цьому в інверторах використовуються прилади відносно низького (9...12) класу.

Застосування схеми перетворювача власних потреб з використанням проміжного трансформатора підвищеної частоти дозволить знизити масо-габаритні показники перетворювача та його вартість в цілому. Тому схеми подібної концепції можна вважати найбільш перспективними [18].

Проаналізувавши структурні схеми тягових перетворювачів та перетворювачів власних потреб обираємо структурну схему, представлену на рисунку 2.15.

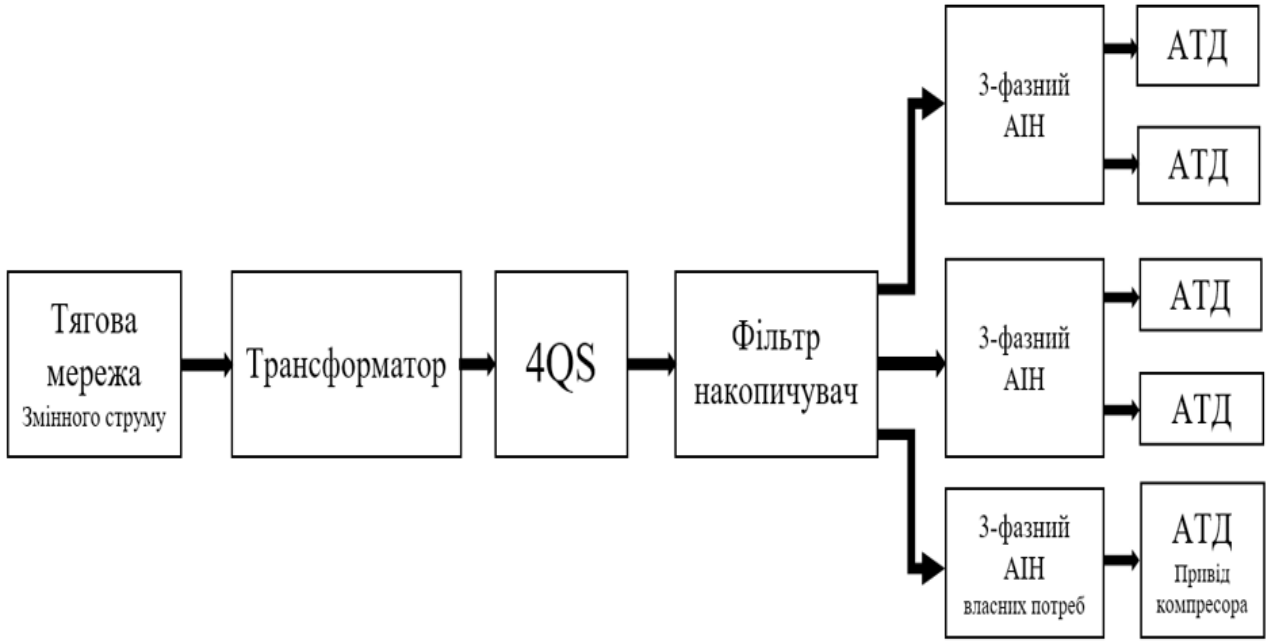


Рисунок 2.15 – Структурна схема перетворювача електропоїзда змінного струму з АТД

3 РОЗРОБКА СИЛОВОЇ СХЕМИ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Розрахунок елементів автономного інвертора напруги

На цей час в якості основного перетворювача з метою живлення асинхронних тягових двигунів використовуються автономні інвертори напруги (АІН) [19, 20].

Трифазні АІН призначені для живлення трифазних споживачів (асинхронних та синхронних двигунів). На рисунку 3.1 зображено базову схему автономного інвертора напруги [19, 20].

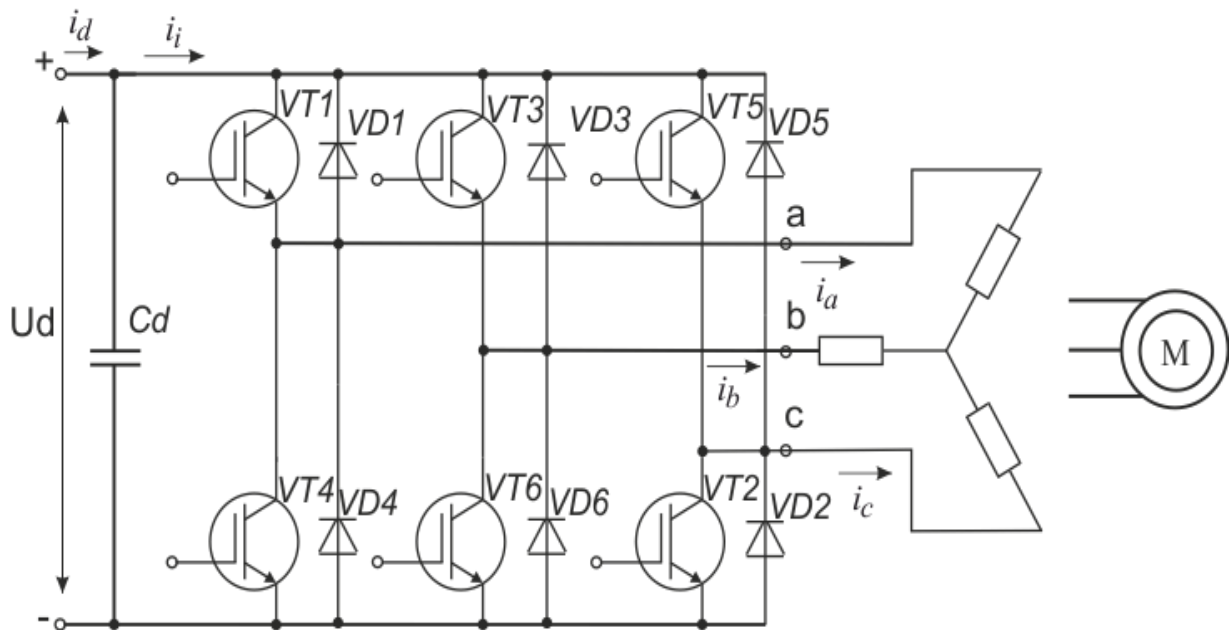
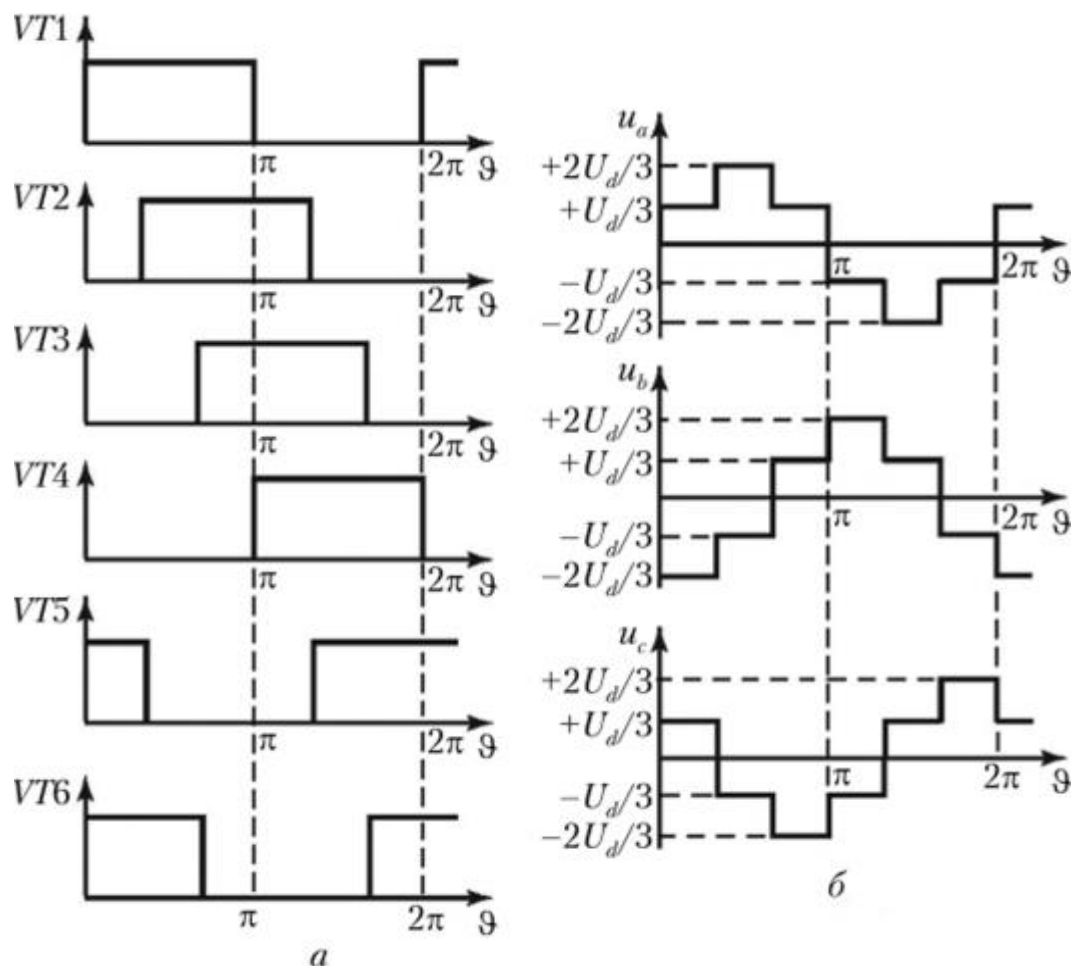


Рисунок 3.1 – Схема трифазного мостового інвертора напруги

Трифазний мостовий інвертор напруги (рис. 3.1). Схема містить шість ключів VSI-VS6, що утворюють міст, шість зустрічно включених діодів VDI-VD6, з'єднаних також за схемою трифазного моста і виконують функцію діодів зворотного потоку, схема управління забезпечує перемикання ключів. Частота вихідної напруги задається схемою управління в результаті зміни тривалості циклу перемикання тиристорних ключів. Пристрої для комутації тиристорів на схемі не показані. Транзистори і діоди трьох фаз a, b і c утворюють анодний (VS1, VS3, VS5; VD1, VD3, VD5) і катодний (VS2, VS4, VS6; VD2, VD4, VD6) групи [20].

Транзистори анодної і катодної груп можуть перемикатися за різними алгоритмами: з одноразовим і багаторазовим перемиканням на інтервалі одного періоду вихідної напруги. При одноразовому перемиканні в періоді кут провідного стану тиристорів θ_{π} може бути рівним 180, 120, 150 ел. град., і в загальному випадку він дорівнює 180 ел. град. На діаграмах (рисунк.3.2 а) дано аналіз роботи трифазного АІН для $\theta_{\pi} = 180$ ел. град. З діаграм видно, що за один період через інтервал змінюється шість комбінацій, відповідних станам трьох транзисторів, що одночасно знаходяться в провідному стані. В результаті на виході інвертора формуються змінні міжфазні (лінійні) напруги u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} прямокутної форми, що мають амплітуду U_d і тривалість імпульсів $2\pi/3$ в кожному з напівперіодів. Напруги фаз u_a , u_b , u_c можуть бути визначені з еквівалентних схем, відповідних змін підключень ланцюгів навантаження (фаз) при комутації ключів інвертора протягом одного періоду.



а) імпульси управління, б) фазні напруги.

Рисунок 3.2 – Часові діаграми для трифазного мостового інвертора напруги при 180° комутації

В результаті фазні напруги мають ступінчасту форму (рис. 3.2 б) [20].

3.1.1 Вибір силових елементів автономного інвертора з амплітудною модуляцією.

Вибір силових елементів автономного інвертора з амплітудною модуляцією ($\lambda=180^\circ$) виконуємо за методикою, що викладена у роботах [20, 21]. При розрахунках братимемо до уваги лише перші гармоніки вихідних напруги та струмів. Похибка при цьому не перевищує 5%.

Основні співвідношення для напруги та струму інвертора витікають з рівняння балансу потужності

$$U_d I_d \approx 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_H \quad (3.1)$$

де $U_{1\phi}, I_{1\phi}$ – діючі значення перших гармонік фазних напруги та струму на виході автономного інвертора;

U_d, I_d – середнє значення напруги та струму на вході інвертора.

Технічні характеристики асинхронного тягового двигуна типу ДТА-380-6УХЛ1:

Потужність, кВт	380;
Номинальна фазна напруга, В	1150;
Номинальний фазний струм, А.....	95;
Номинальна частота напруги живлення, Гц	60;
Номинальна частота обертання, об/хв	1200;
К.к.д, %.....	95;
Коефіцієнт потужності	0,79;
Маса, кг	500

Тяговий двигун ДТА-380-6УХЛ1 розроблено для використання в якості приводу приміського електропоїзда постійного струму ЭТ2А [22].

Вихідними даними під час вибору силових елементів автономного інвертора є номінальні: напруга $U_{\text{фном}}=1150$ В та пусковий струм $I_{\text{фном}}=95$ А асинхронно двигуна.

Пусковий струм $I_{\text{дв.п}}$ одного асинхронного двигуна можливо знайти за формулою

$$I_{\text{дв.п}} = 1,25 I_{\text{фном}}, \quad (3.2)$$

де 1,25 –запас на підвищення струму. Оскільки процес пуску передбачає використання алгоритмів частотного регулювання, тобто пуск

починається з низької частоти та напруги, то традиційних перевантажень, які характерні для прямого пуску двигуна відсутні.

$$I_{\text{дв.п1}} = 1,25 * 95 = 118,75 \text{ A}$$

Відповідно до завдання, від одного автономного інвертора напруги живиться два двигуна, тому необхідно це врахувати

$$I_{\text{дп}} = 2 * I_{\text{дв.п1}} = 2 * 118,75 = 238 \text{ A}$$

Середні струми ключа та зворотного діода

$$I_{\text{VS}} = \frac{I_{\text{дп}}}{\pi\sqrt{2}} (1 + \cos \varphi_{\text{H}}). \quad (3.3)$$

$$I_{\text{VD}} = \frac{I_{\text{дп}}}{\pi\sqrt{2}} (1 - \cos \varphi_{\text{H}}). \quad (3.4)$$

$$I_{\text{VS}} = \frac{238}{\pi\sqrt{2}} (1 + 0.79) = 96 \text{ A};$$

$$I_{\text{VD}} = \frac{238}{\pi\sqrt{2}} (1 - 0.79) = 11 \text{ A};$$

Середній струм на вході автономного інвертора напруги в режимі пуску двигуна, потрібен для вибору дроселя та керованого випрямляча

$$I_{\text{дном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{дп}} \cos \varphi_{\text{H}}, \quad (3.5)$$

$$I_{\text{дном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * 238 * 0,79 = 254 \text{ A}.$$

Середнє значення напруги на вході автономного інвертора при номінальному режимі навантаження.

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{1\text{фном}}}{0,45}, \quad (3.6)$$

$$U_d = \frac{1150}{0,45} = 2555 \text{ В.}$$

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діоди

$$U_{VS} = U_{d\text{ном}} k_{3U1}, \quad (3.7)$$

де $k_{3U1}=1,16$ – коефіцієнт запасу що враховує можливе підвищення напруги живильної мережі на 16%.

$$U_{VS} \geq 2555 * 1,16 = 2964 \text{ В.}$$

Таким чином, параметри модуля, які необхідні для забезпечення необхідної фазної напруги асинхронного двигуна мають значення: напруга не менш 2964 В, та струм не менш 100 А.

З джерела [23] обираємо модуль типу FF450R33T3E3. Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-колектор, В..3300;
 максимальний струм колектору, А.....450;
 напруга насичення типова, В2,9;
 напруга управління, В.....15;
 час затримки включення, мкс0,57;
 час затримки виключення, мкс1,86;
 діапазон температур, °С.....-40...150;
 тип корпусуХНР™3;
 призначеннятяга.

На рис. 3.3 представлено зовнішній вигляд обраного модуля та його схема внутрішніх з'єднань. Виходячи зі схеми можна зробити вивід, що для побудови схеми тягового автономного інвертора для візка з двох асинхронних двигунів слід задіяти три таких модуля.

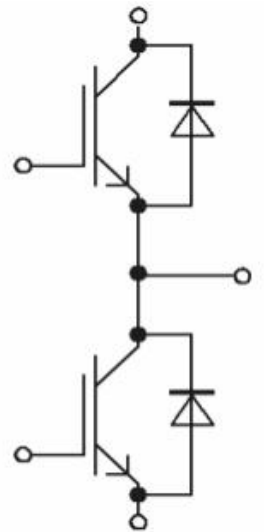


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд та схема з'єднань модуля FF450R33T3E3

3.1.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з ШІМ модуляцією.

Розрахунок виконуємо за методиками, які запропоновано у джерелах [20, 21].

Максимально можлива глибина модуляції для вибраного модуля

$$\mu_m \approx 1 - 4t_v f_m, \quad (3.8)$$

де $t_v = 1,86$ мкс – тривалість відновлення запірних властивостей модуля;

f_m = Гц – частота модуляції, приймаємо $f_m = 400$ Гц.

$$\mu_m \approx 1 - 4 * 1,86 * 10^{-6} * 400 = 0,997$$

Фазна напруга, яку можна забезпечити від визначеного раніш джерела живлення для забезпечення алгоритму широтне-імпульсної модуляції.

$$U_\phi = \frac{\mu_m k_{вн} U_d}{\sqrt{2}}, \quad (3.9)$$

де $k_{\text{BH}} = 0,5$ – коефіцієнт використання напруги при вертикальному керуванні [21].

$$U_{\phi} = \frac{0,997 \cdot 0,5 \cdot 2555}{\sqrt{2}} = 900 \text{ В},$$

Найбільше значення середнього вхідного струму

$$I_d = 3\sqrt{2}\mu_m k_{\text{BH}} I_{\text{дп}} \cos \varphi_{\text{H}}, \quad (3.10)$$

$$I_d = 3\sqrt{2} * 0,997 * 0,5 * 238 * 0,79 = 397 \text{ А}.$$

Середній струм ключів та діодів

$$I_{\text{VS}} = \frac{I_{\text{дп}}}{\pi\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos \varphi_{\text{H}} \right), \quad (3.11)$$

$$I_{\text{VD}} = \frac{I_{\text{дп}}}{\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos \varphi_{\text{H}} \right), \quad (3.12)$$

$$I_{\text{VS}} = \frac{397}{\pi\sqrt{2}} \left(1 + \frac{0,997 \cdot \pi}{4} 0,79 \right) = 144 \text{ А},$$

$$I_{\text{VD}} = \frac{397}{\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{0,997 \cdot \pi}{4} 0,79 \right) = 34 \text{ А}$$

Ємність конденсатора на вході АІН з ШІМ

$$C \geq \frac{\sqrt{3}\mu_m I_{\text{дп}}}{\sqrt{2}f_m \Delta U_d} \sin^2 \frac{\varphi_{\text{H}} - \frac{\pi}{6}}{2}, \quad (3.13)$$

Де ΔU_d – допустимі коливання випрямленої напруги.

Приймаємо

$$\Delta U_d = 0,05 U_d \text{ В}.$$

$$\varphi_{\text{H}} = \arccos(\cos \varphi_{\text{H}}) \text{ гр. ел.}$$

$$\varphi_{\text{H}} = \arccos(0,79) = 37,8 \text{ гр. ел.}$$

$$C \geq \frac{\sqrt{3} * 0,997 * 397}{\sqrt{2} * 400 * 0,05 * 2555} \sin^2 \frac{37,8 - \frac{\pi}{6}}{2} = 174 * 10^{-6} \text{ Ф},$$

Визначаємо зміну частоти основної гармоніки напруги живлення асинхронного двигуна.

Під час процесу пуску, коли сила тяги постійна та слід забезпечити максимальний пусковий момент, регулювання (зміна фазної напруги U_1 та частоти f_1) йде за законом $U_1/f_1 = \text{const}$. Звідки можна визначити частоту трифазної напруги:

$$f_1 = f_{\text{ном}} \cdot \frac{U_1}{U_{\text{ном}}} \quad (3.14)$$

При фазній напрузі 900 В, коли закінчуються можливості регулювання за допомогою ШІМ модуляції частота складатиме

$$f_1 = 60 \cdot \frac{900}{1150} = 46,95 \text{ Гц.} \quad (3.14)$$

Подальша зміна напруги та частоти відбувається за законом зміни $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$, звідки зміна стрибок напруги під час переходу до цього закону обчислюється за виразом

$$U_1 = U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{f_1}{f_{\text{ном}}}} \quad (3.15)$$

$$U_1 = 1150 \cdot \sqrt{\frac{46,95}{60}} = 1017 \text{ В.}$$

Максимальну швидкість поїзда у першому наближенні визначимо прийняв допущення, що конструкційна швидкість 130 км/год досягається наприкінці ШІМ модуляції, тобто при фазній напрузі 900 В і частоті 46,95 Гц. Тоді максимальна швидкість поїзда

$$V_{\text{max}} = V_{\text{к}} \cdot \frac{f_{\text{ном}}}{f_{\text{ШІМ}}}, \quad (3.16)$$

$$V_{\max} = 130 \cdot \frac{60}{49,65} = 166 \text{ км/год.}$$

3.2 ЧотириквADRантний випрямляч (4QS)

Функцією чотириквADRантного випрямляча є перетворення змінної вхідної напруги (однофазної змінної напруги тягової обмотки трансформатора) у задану постійну напругу проміжного контуру.

Випрямляч 4QS складається з двох паралельно включених фазних модулів. Фазний модуль містить силові напівпровідникові прилади (IGBT-транзистори), а також діоди захисту від накопиченої енергії в індуктивних складових навантаження і розвантажувальні елементи.

IGBT-транзистор виконує функцію потужного вимикача, що дозволяє виконувати комутаційні операції з великою частотою. Розвантажувальні елементи служать для зменшення потужності втрат, які виникають у IGBT-транзисторах під час кожного включення і виключення.

ЧотириквADRантний випрямляч управляє переміщенням потоку енергії і забезпечує регулювання кута зсуву фаз між напругою і струмом у чотирьох робочих квадрантах за допомогою регулювання фази включення і черговості роботи IGBT-модулів. Електропоїзд може як споживати енергію з контактної мережі в тяговому режимі, так і віддавати енергію в мережу в режимі рекуперації. Зсув фаз між струмом і напругою досягається за рахунок різного ступеня модуляції IGBT-модулів. Оскільки напруга може регулюватися за фазою, то можна досягти значення $\cos \varphi_n$, що наближається до 1 [14, 19, 20].

Принципова схема фазного модуля зображена на рисунку 3.4.

Джерело живлення змінного струму через дросель L_1 приєднаний до плечей 4qS-перетворювача, утвореними IGBT-транзисторами VT1-VT4 і діодами VD1-VD4. До виходу перетворювача підключені головний C1 і резонансний L2-C2 фільтри паралельно навантаженню. Особливістю роботи 4qS-перетворювача є формування кривої струму джерела живлення у вигляді синусоїди з заданим зсувом по фазі щодо напруги живлення. Вихідна напруга 4qS-перетворювача регулюється глибиною модуляції сигналів управління і може змінюватися в широкому діапазоні. Змінюючи кут зсуву між мережевою напругою і сигналами управління, можна регулювати кут зсуву між напругою і струмом (споживаються або повертається) мережі від нуля в режимі тяги до 180 ел. градусів в режимі рекуперації.

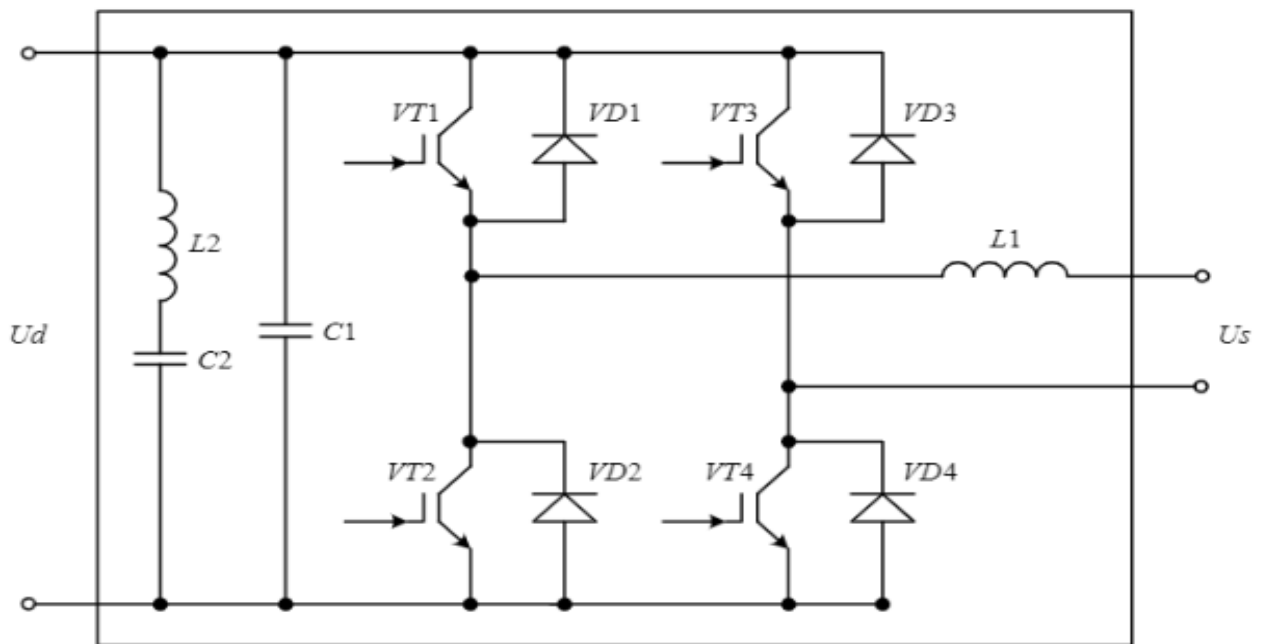


Рисунок 3.4 - Принципова схема 4QS перетворювача

Чотириквadrантний перетворювач є перетворювачем підвищуючого типу, напруга на конденсаторі C1 завжди більше амплітуди напруги джерела живлення. Висока точність регулювання параметрів 4qS перетворювача гарантує симетричність навантаження між обмотками тягового трансформатора і відсутність підмагнічування постійним струмом. Управління роботою 4qS-перетворювача здійснюється за допомогою цифрової мікропроцесорної системи управління. Новою функцією цифрових систем управління є можливість регулювання параметрів силового перетворювача: величини вихідної напруги, струму, швидкості обертання, сили тяги і температури обмоток тягових двигунів і напівпровідникових приладів, коефіцієнта потужності тягового приводу змінного струму, відображати контрольовані параметри в зручній для візуального сприйняття формі. Однією з функцій цифрових систем управління є плавний пуск тягових двигунів, що дозволяє уникнути великих струмів в силовій схемі і динамічних перевантажень елементів тягового приводу. У процесі пуску струм в обмотках двигунів плавно наростає, при цьому динамічні навантаження на елементи тягового приводу знижуються до допустимих величин незалежно від миттєвих напруг в контактній мережі. Незаперечною перевагою цифрових систем управління є можливість підтримки постійної напруги (струму) тягових двигунів, а отже, і сили тяги при значних змінах напруги контактної мережі [14, 19, 20].

Розрахунок 4 QS перетворювача

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

На початку розрахунку встановимо відомі дані. Так, до відомих даних відносяться необхідна напруга на вході автономного інвертора з АІМ модуляцією $U_d = 2555 \text{ В}$ та струм $I_d = 397 \text{ А}$.

Приймаємо глибину модуляції 4qS перетворювача в межах $\mu = 0,6 \dots 0,8$ та коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n = 0,95$.

Необхідне значення діючої напруги на вході 4qS перетворювача

$$U_{2max} = \mu U_d \cos \varphi_n \quad (3.17)$$

$$U_{2max} = 0.7 * 2555 * 0.95 = 1699 \text{ В}$$

Необхідне значення індуктивності L_1 , яка вводиться в коло вторинної обмотки трансформатора для забезпечення режиму підвищення напруги:

$$L_{1max} = \frac{U_{2max}^2}{2\omega P_{dmax}}, \quad (3.18)$$

де ω – кутова частота напруги мережі живлення,

P_{dmax} – потужність споживачів.

Потужність споживачів P_{dmax} визначається потужністю одночасно ввімкнених споживачів. Одночасно можливе включення тягових двигунів, насос трансформатора, компресор. Тобто максимальна можлива потужність споживачів, які приєднано до обмотки живлення допоміжних машин

$$P_{dmax} = 4P_{дв} + P_n + P_k, \quad (3.19)$$

$P_{дв}$ – потужність тягового двигуна;

P_n – потужність насоса трансформатора;

P_k – потужність компресора.

$$P_{dmax} = 4 * 380 + 0,82 + 11 = 1532 \text{ кВт}$$

$$L_{1max} = \frac{1699^2}{2 * 2 * \pi * 50 * 1532 * 10^3} = 0,003 \text{ Гн.}$$

Середній струм навантаження 4qS перетворювача

$$I_d = \frac{P_{dmax}}{U_d}, \quad (3.20)$$

$$I_d = \frac{1532 * 10^3}{2555} = 600 \text{ A}$$

Струм вентильної групи в режимі випрямляча

$$I_a = I_d / 2 \quad (3.21)$$

$$I_a = 600 / 2 = 300 \text{ A.}$$

Повний струм транзистора в режимі перетворювача, що підвищує напругу [25]

$$I_{VT} = I_a + \frac{E_d}{2L_1} t_T, \quad (3.22)$$

де E_d – середнє значення напруги на виході не керованного випрямляча;

t_T – час відкритого стану транзистора.

$$E_d = 0,9 U_2, \quad (3.23)$$

$$E_d = 0,9 * 1699 = 1529 \text{ В,}$$

Час відкритого стану транзистора визначається у випадку, коли є відомими частота роботи перетворювача та коефіцієнт заповнення імпульсної послідовності транзистора λ .

Оскільки відсутні конкретні рекомендації з вибору частоти модуляції [24], то приймаємо частоту модуляції $4qS$ перетворювача $f_m = 1000 \text{ Гц}$ ($T_m = 0,001 \text{ с}$).

Середнє значення коефіцієнта заповнення визначаємо з виразу [25]

$$U_d = E_d \frac{1}{1-\lambda}, \quad (3.24)$$

Звідки

$$\lambda = 1 - \frac{E_d}{U_d} \quad (3.25)$$

$$\lambda = 1 - \frac{1529}{2555} = 0,4.$$

Час відкритого стану транзистора

$$t_T = \lambda T_M, \quad (3.26)$$

$$t_T = 0,4 * 0,001 = 0,0004 \text{ с.}$$

$$I_{VT} = 300 + \frac{1529}{2 * 0,004} 0,0004 = 376 \text{ А}$$

Напругу вентилів приймаємо таку ж саму, як для вентилів автономного інвертора.

Ємність фільтрового конденсатора C_d з урахуванням впливу роботи АІН, а також для зняття пульсацій напруги, викликаних керуванням мережевим перетворювачем визначається

$$C_d = \frac{I_d}{8f_M \Delta U_{Cmax}}, \quad (3.27)$$

де ΔU_{Cmax} – номінальне допустиме підвищення напруги в колі мережі постійної напруги,

$$\Delta U_{Cmax} = 0,1 U_d = 0,1 * 2555 = 255 \text{ В}$$

$$C_d = \frac{600}{8 * 1000 * 255} = 294 \text{ мФ,}$$

Ємність конденсатора C_P для шунтування гармоніки 100 Гц визначається

$$C_P = \frac{I_d k_n}{628 \Delta U_{Cmax}}, \quad (3.28)$$

де k_n – коефіцієнт пульсації випрямленого струму. Приймаємо значення характерне для шестипульсових схем випрямлення, рівне 0,057.

$$C_P = \frac{600 * 0.057}{628 * 255} = 213 \text{ мФ},$$

Індуктивність для шунтування гармоніки 100 Гц, проміжної ланки постійної напруги визначається

$$L_P = \frac{1}{16\pi^2 f_M^2 C_P}, \quad (3.29)$$

де f_M – частота живлячої мережі.

$$L_P = \frac{1}{16 * \pi^2 * 50^2 * 213 * 10^{-6}} = 0,0118 \text{ Гн}.$$

IGBT– модуль типу IXBL64N250, який було вибрано для автономного інвертора напруги цілком задовольняє умовам використання і в 4qs перетворювачі.

Кінцева схема перетворювача зображена на рисунку 3.5

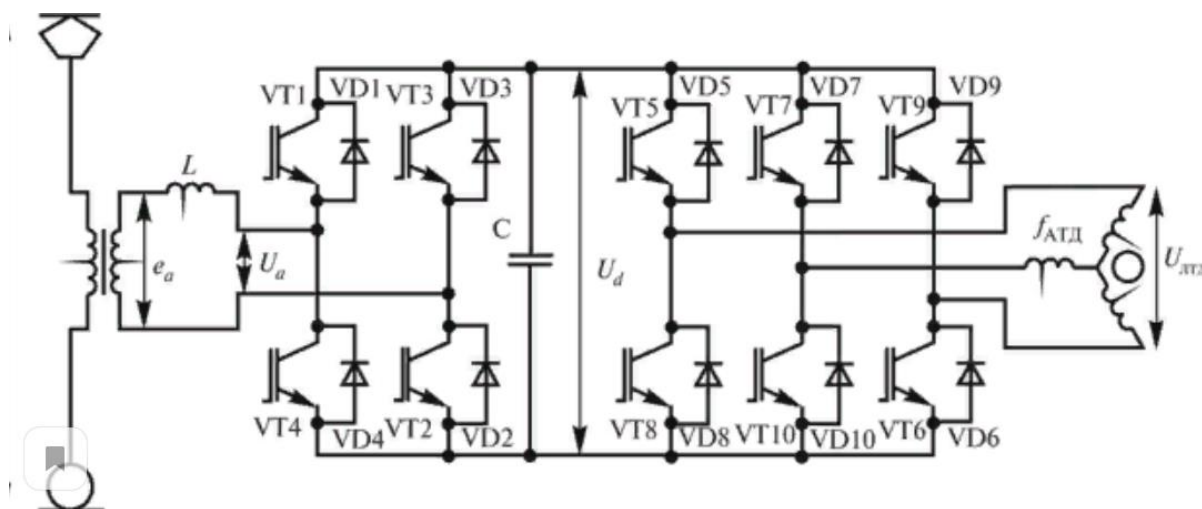


Рисунок 3.5 – Схема перетворювача електропоїзда змінного струму з АТД

3.3 Втрати потужності

Тепловий режим силових напівпровідникових приладів

Відповідно до умов нормальної експлуатації напівпровідникового приладу є необхідним підтримання теплового стану у заданих для конкретного пристрою межах, який визначається потужністю втрат що виділяються і процесом передачі теплової енергії в охолоджуюче середовище. Для відводу від приладу заданої кількості тепла використовують радіатори.

Тягові перетворювачі можуть мати природне повітряне охолодження. Це найбільш простий, надійний і дешевий спосіб охолодження, який здійснюється без додаткових витрат енергії. Інтенсивність такого охолодження невелика, тому використання цього способу можливо при невеликих питомих потужностях розсіювання, тобто в перетворювачах, які працюють в полегшеному тепловому режимі. При природному повітряному охолодженні конвекційний теплообмін здійснюється між елементами перетворювача і повітрям, причому повітря переміщається за рахунок енергії, що розсіюється елементами перетворювача.

Примусове повітряне охолодження – створюється системами вентиляції.

Природне рідинне охолодження. Воно полягає в зануренні елементів перетворювачів в бак з охолоджувальною рідиною.

Примусове рідинне охолодження, яке застосовується при високих питомих потужностях розсіювання. Рідина прокачується насосом через спеціальні канали в охолоджуваних вузлах приладів.

Як рідкі теплоносії зазвичай застосовуються вода, водо-спиртові суміші (антифриз), трансформаторне масло, кремнійорганічні і фторорганічні рідини.

Природне випарне охолодження. Воно дозволяє підвищити питому потужність розсіювання перетворювача і використовується при охолодженні теплонавантажених блоків і великих елементів. Охолоджувана поверхня занурюється в рідину, над якою є паровий обсяг. Відведення тепла здійснюється в процесі кипіння рідини на охолоджуваній поверхні. Рух рідини відбувається за рахунок різниці її щільності поблизу охолоджуваної поверхні і на межі поділу рідина-пар. Різниця температур між охолоджуваною поверхнею і киплячою рідиною зазвичай мала, тому температура кипіння обраного теплоносія при певному тиску повинна бути трохи нижче допустимих температур охолоджуваної поверхні.

Примусове випарне охолодження. Воно виконується за такою ж схемою, що і примусове рідинне охолодження. Рідина з допомогою насоса прокачується через спеціальні канали в охолоджуваних вузлах. Якщо допустима температура охолоджувальної поверхні буде вище температури кипіння теплоносія при даному тиску, а температура теплоносія в ядрі потоку підтримується рівною або менше температури кипіння, то в невеликому поверхневому шарі поблизу охолоджуваної поверхні почнеться режим бульбачкового кипіння. Виникаючі в поверхневому шарі бульбашки будуть під дією потоку рідини віддалятися з поверхні і конденсуватися в ядрі потоку. Зародження, рух і конденсація парових бульбашок викликають інтенсивний теплообмін між поверхневим шаром і ядром потоку рідини, особливо якщо воно недогріте. При цьому щільність теплового потоку може досягати дуже великих величин. Граничні потужності розсіювання обмежені переходом бульбачкового режиму в плівковий. Однак завдяки інтенсивному руху холодного ядра рідини криза кипіння при примусовому випарному охолодженні настає при набагато більш високій потужності розсіювання, ніж при природному випарному охолодженні.

Примусове випарне охолодження є найефективнішим з усіх розглянутих способів охолодження і дозволяє забезпечити нормальний тепловий режим роботи перетворювачів при максимальних питомих потужностях розсіювання [20].

3.3.1 Визначення втрат потужності в ключових елементах АІН

Визначним для розрахунку параметрів системи охолодження є режим ШІМ модуляції [26].

Динамічні втрати в керованому ключі:

$$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} = (E_{\text{вкл}} + E_{\text{вимк}}) * f * \frac{1}{\pi}, \quad (3.30)$$

де $E_{\text{вкл}}$ – енергія втрат під час включення силового ключа в схемах з активно-індуктивним навантаженням;

$E_{\text{вимк}}$ – енергія втрат під час виключення силового ключа в схемах з активно-індуктивним навантаженням.

$$E_{\text{вкл}} = \frac{I_d * E * t_{\text{вкл}}}{2}, \quad (3.31)$$

де I_d – середнє значення струму;

E – напруга на зачиненому ключі;

$t_{\text{вкл}}$ – час включення приладу.

$$E_{\text{вкл}} = \frac{144 * 2555 * 0,57 * 10^{-6}}{2} = 0,105 \text{ Втс.}$$

$$E_{\text{вимк}} = \frac{I_d * E * t_{\text{вимк}}}{2}, \quad (3.32)$$

де I_d – середнє значення струму;

$t_{\text{вимк}}$ – час виключення приладу.

$$E_{\text{вимк}} = \frac{144 * 2555 * 1,86 * 10^{-6}}{2} = 0,342 \text{ Втс.}$$

$$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} = (0,105 + 0,342) * 400 * \frac{1}{\pi} = 57 \text{ Вт}$$

Статичні втрати в керованому ключі

$$P_{\text{стVT}} = I_{\text{фТ}} * U_{\text{вкл}} * \left(0,125 + \frac{\mu}{3\pi} \cos \varphi_n\right), \quad (3.33)$$

де $I_{\text{фТ}}$ – номінальний фазний струм;

$U_{\text{вкл}}$ – напруга включеного стану ключа;

μ – коефіцієнт модуляції АІН;

$\cos\varphi_H$ – коефіцієнт потужності двигуна.

$$P_{\text{стVT}} = 95 * 2,9 * \left(0,125 + \frac{0,997}{3\pi} 0,79\right) = 57,4 \text{ Вт.}$$

Статичні втрати в зворотному діоді

$$P_{\text{стVD}} = I_{\text{фТ}} * U_{\text{вкл}} * \left(0,125 - \frac{\mu}{3\pi} \cos \varphi_H\right), \quad (3.34)$$

$$P_{\text{стVD}} = 95 * 2,75 * \left(0,125 - \frac{0,997}{3\pi} 0,79\right) = 10,8 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати в приладі

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} + P_{\text{стVT}} + P_{\text{стVD}}, \quad (3.35)$$

$$P_{\text{заг}} = 57 + 57,4 + 10,8 = 125,2 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати в напівпровідниковому перетворювачі

$$P_{\text{АІН}} = \sum_1^6 P_{\text{заг}}, \quad (3.36)$$

$$P_{\text{АІН}} = 6 * 125,2 = 751,2 \text{ Вт.}$$

Під час амплітудне-імпульсної модуляції знижується компонента втрат потужності переключення транзисторів за рахунок зниження частоти комутації до 60 Гц:

$$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} = (0,105 + 0,342) * 60 * \frac{1}{\pi} = 8,5 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати в модулі:

$$P_{\text{заг}} = 8,5 + 57,4 + 10,8 = 76,7 \text{ Вт.}$$

В одному автономному інверторі:

$$P_{\text{АІН}} = 6 * 76,7 = 460,2 \text{ Вт.}$$

3.3.2 Визначення втрат потужності в ключових елементах 4QS

Визначаємо за формулами попереднього пункту з врахуванням напруги та струмів, що комутуються ключами перетворювача.

Енергія втрат під час включення силового ключа:

$$E_{\text{вкл}} = \frac{600 * 2555 * 0,57 * 10^{-6}}{2} = 0,436 \text{ Втс.}$$

Енергія втрат під час виключення силового ключа:

$$E_{\text{вимк}} = \frac{600 * 2555 * 1,86 * 10^{-6}}{2} = 1,42 \text{ Втс.}$$

Динамічні втрати в керованому ключі:

$$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} = (0,436 + 1,42) * 1000 * \frac{1}{\pi} = 590 \text{ Вт}$$

Статичні втрати в керованому ключі

$$P_{\text{стVT}} = 600 * 2,9 * \left(0,125 + \frac{0,7}{3\pi} 0,95\right) = 340 \text{ Вт.}$$

Статичні втрати в зворотному діоді

$$P_{\text{стVD}} = 600 * 2,75 * \left(0,125 - \frac{0,7}{3\pi} 0,95\right) = 90 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати в приладі

$$P_{\text{заг}} = 590 + 340 + 90 = 1020 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати в напівпровідниковому перетворювачі

$$P_{4QS} = \sum_1^4 P_{\text{заг}}, \quad (3.37)$$

$$P_{4QS} = 4 * 1020 = 4080 \text{ Вт.}$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 3.3.1:

Таблиця 3.3.1 – Результати розрахунків втрат потужності в перетворювачі для режиму ШІМ (400 Гц)

	Втрати в АІН, Вт	Втрати 4QS, Вт
$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}}$	57	590
$P_{\text{стVT}}$	57,4	340
$P_{\text{стVD}}$	10,8	90
$P_{\text{заг}}(1 \text{ модуль})$	125,2	1020
$P_{\text{заг}}(\text{перетворювач})$	751,2	4080
$P_{\text{заг}}(\text{секція})$	1502,4	4080
Загальні втрати в перетворювальних блоках однієї секції: 5582,4 Вт		
Потужність, що передається споживачам: 1532000 Вт		
Коефіцієнт корисної дії перетворювальних блоків: 0,9963		

Таблиця 3.3.2 – Результати розрахунків втрат потужності в перетворювачі для режиму АІМ (60 Гц)

	Втрати в АІН, Вт	Втрати 4QS, Вт
$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}}$	8,5	590
$P_{\text{стVT}}$	57,4	340
$P_{\text{стVD}}$	10,8	90
$P_{\text{заг}}(1 \text{ модуль})$	76,7	1020
$P_{\text{заг}}(\text{перетворювач})$	460,2	4080
$P_{\text{заг}}(\text{секція})$	920,4	4080
Загальні втрати в перетворювальних блоках однієї секції: 5000,4 Вт		
Потужність, що передається споживачам: 1532000 Вт		
Коефіцієнт корисної дії перетворювальних блоків: 0,9967		

4 РОЗРОБКА СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПРИВОДУ КОМПРЕСОРА ЕКВО – 0,8/9

4.1 Технічні дані компресора ЕКВО – 0,8/9

Електричний компресор ЕКВО – 0,8/9 (рисунок 4.1); ЕКВО – 0,8/9-0,1, призначений для одержання стисненого повітря тиском до 9 кгс/см^2 і постачання їм гальмівної пневматичної системи і інших приладів рухомого складу залізничного транспорту, в тому числі електропоїздів і дизель-поїздів виробництва ПО «Луганськтепловоз». Можливе використання електрокомпресора як джерело стисненого повітря для пневмосистем інших машин та агрегатів [27].

Компресор ЕКВО – 0,8/9 відрізняється від компресора ЕКВО – 0,8/9-0,1 наявністю тенів для підігріву мастила.

Конструкція компресора забезпечує її працездатний стан при експлуатації в нижчеперелічених умовах навколишнього середовища: температура навколишнього повітря від -40 до $+400$ $^{\circ}\text{C}$, атмосферному тиску не нижче 650 мм.рт.ст.

До складу електрокомпресора входить: компресор ВО-0,8/9, електродвигун АИР 132М4, передня опора, опора електродвигуна, повітряний фільтр [27].

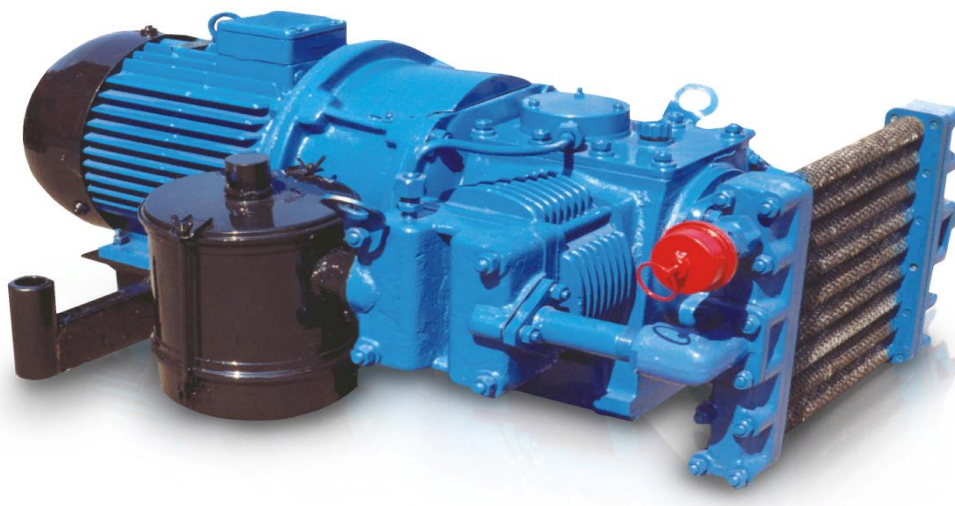


Рисунок 4.1 – Компресор ЕКВО – 0,8/9

Для розрахунку автономного інвертора напруги необхідно прийняти вихідні дані. Пропонується заміна існуючого мотор-компресора на компресор типу ЕКВО-0,8/9 з асинхронним двигуном АИР132М4, які

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються на електропоїздах ЕПЛ9Т та є перевіреними у умовах застосування в колах електропоїздів.

Технічні характеристики компресора ЭКВО-0,8/9:

продуктивність всмоктування, м³/хв. 0,8;
 тиск нагнітання, кгс/см² 9;
 потужність, що споживається, кВт 7,5;
 частота обертів колінчатого валу, об/хв. 1450;
 режим роботи ПВ 50;
 охолодження повітряне;
 компресор ВО-0,3/8-13;
 електричний двигун АИР132М4;
 габаритні розміри:
 довжина, мм 1000;
 ширина, мм 725;
 висота, мм 400;
 вага, кг 220.

Технічні характеристики асинхронного трьохфазного двигуна з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення АИР132М4:

струм змінний;
 потужність, кВт 11;
 напруга, В 380;
 частота, Гц 50;
 частота обертів, об/хв. 1450;
 ККД, % 88,5;
 коефіцієнт потужності 0,83;
 відношення пускового струму до номінального 7,5;
 відношення пускового моменту до номінального 2,4;
 відношення максимального моменту до
 номінального 2,9;
 вага, кг 66,3.

4.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги живлення компресора.

Основною метою роботи є вибір напівпровідникових елементів автономного інвертора напруги. За базовий алгоритм приймаємо керування напівпровідниковими ключами протягом 180 ел. град. з амплітудноімпульсною модуляцією. Причиною цього є то, що цей алгоритм базовий для подальшого широтне-імпульсного регулювання.

						Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок виконуємо за методикою, яка запропонована в [21]. При виборі братимемо до уваги лише перші гармоніки вихідних напруг та струмів. Похибка при цьому не перевищує 5%.

Основні співвідношення для напруг та струмів інверторів витікають з рівняння балансу потужностей

$$U_d I_d \approx 3 U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_n, \quad (4.1)$$

де $U_{1\phi}, I_{1\phi}$ – діючі значення перших гармонік фазних напруги та струму на виході автономного інвертора,

U_d, I_d – середнє значення напруги та струму на вході інвертора.

Вихідними даними під час вибору силових елементів автономного інвертора є номінальні напруга $U_{\partial n}$ та пусковий струм $I_{\partial n}$ асинхронного двигуна.

Пусковий струм $I_{\partial i}$ асинхронного двигуна

$$I_{\partial n} = \lambda_I I_{1\phi}^H, \quad (4.2)$$

де λ_I – кратність пускового струму;

$I_{1\phi}^H$ – номінальний фазний струм.

$$I_{1\phi}^{\text{ном}} = \frac{P_1}{3 U_{1\phi}^H \cos \varphi_n}, \quad (4.3)$$

де P_1 – потужність двигуна;

$U_{1\phi}^H$ – номінальна фазна напруга;

$\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності.

$$I_{1\phi}^{\text{ном}} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,83} = 20 \text{ А};$$

$$I_{\partial n} = 7,5 \cdot 20 = 150 \text{ А}.$$

Середні струми ключа та зворотного діода

						Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{VS} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 + \cos\varphi_H), \quad (4.4)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 - \cos\varphi_H). \quad (4.5)$$

$$I_{VS} = \frac{150}{\sqrt{2}\pi} (1 + 0,83) = 62 \text{ A},$$

$$I_{VD} = \frac{150}{\sqrt{2}\pi} (1 - 0,83) = 5,7 \text{ A}.$$

Середній струм на вході автономного інвертора напруги в режимі пуску двигуна, потрібний для вибору дроселя та випрямляча

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\partial n} \cos\varphi_H, \quad (4.6)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 150 \cdot 0,83 = 168 \text{ A}.$$

Середній номінальний струм на вході автономного інвертора напруги

$$I_{d\text{ном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 20 \cdot 0,83 = 22,4 \text{ A}.$$

Найбільша середня вхідна напруга, що визначає напругу на ключах

$$U_{d0} = \frac{\pi}{\sqrt{2}\sqrt{3}} U_d^{\text{ном}}, \quad (4.7)$$

де $U_d^{\text{ном}}$ – середнє значення напруги на вході автономного інвертора при номінальному режимі навантаження. Виходячи з рівняння балансу потужностей

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_d^{\text{НОМ}} = \frac{3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_H}{I_{d\text{НОМ}}}, \quad (4.8)$$

$$U_d^{\text{НОМ}} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 20 \cdot 0,83}{22,4} = 489 \text{ В},$$

$$U_{d0} = \frac{\pi}{\sqrt{2}\sqrt{3}} \cdot 489 = 627 \text{ В}.$$

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діоди

$$U_{VS} \geq U_{d0} k_3 U, \quad (4.9)$$

де $k_3 U$ – коефіцієнт запасу що враховує можливе підвищення напруги живильної мережі на 50%.

$$U_{VS} \geq 627 \cdot 1,5 = 940 \text{ В}.$$

Таким чином, для забезпечення необхідних пускових струмів асинхронного двигуна необхідно мати параметри ключів зі струмом не менш 62 А, діодів зі струмом не менш 5,7 А та напругою не менш 940 В в обох випадках.

Обираємо IGBT- модуль типу IRG4PSH71UDPBF фірми International Rectifier який представляє собою транзистор та діод в одному корпусі. Для реалізації принципової схеми інвертора необхідно шість таких модулів. Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-
колектор, В1200;
максимальний струм колектора, А78;
структура N-канал+діод;
напруга насичення при максимальному струмі, В..2,6;
напруга управління, В15;
максимальна потужність, Вт350;
максимальна частота переключень, кГц20;
діапазон температур, °С -55...150;
тип корпуса Super247.

						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для живлення приводу насоса трансформатора необхідно забезпечення пускового струму плеча близько 6 А при напрузі не менш 940 В.

Обираємо IGBT- модуль типу IRG4PH50SPbF фірми International Rectifier який представляє собою транзистор та діод в одному корпусі. Для реалізації принципової схеми інвертора необхідно шість таких модулів. Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-
колектор, В1200;
максимальний струм колектора, А33;
структура N-канал+діод;
напруга насичення при максимальному струмі, В..1,47;
напруга управління, В15;
максимальна потужність, Вт200;
максимальна частота переключень, кГц1;
діапазон температур, °С-55...125;
тип корпусу TO247АС.

						Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи можливо зробити наступні висновки:

Проведено аналіз схем тягових перетворювачів електропоїздів змінного струму і встановлено, що розробка поїздів змінного струму для забезпечення приміських перевезень є актуальною, оскільки за залізницях України використовуються застарілі електропоїзди серії EP9.

В якості системи живлення асинхронних тягових двигунів прийнята типова структурна схема перетворювача, яка складається з наступних функціональних блоків: тяговий трансформатор, що отримує живлення від контактної мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц; некерований випрямляч з широтне-імпульсною модуляцією (4QS); автономний інвертор напруги, що живить два асинхронних тягових двигуна. Від одного випрямляча отримує живлення два інвертори та кола власних потреб. Така структура є прийнятою у всіх виробників сучасного моторвагонного рухомого складу.

Розрахунок показав на можливість використання єдиного IGBT модуля серії IXBL64N250 для всіх силових перетворювачів, які задіяні у контурі живлення тягових двигунів. Це підвищує рівень уніфікації системи та спрощує організацію подальшого обслуговування.

З метою більш раціонального використання напруги постійного струму, яка надходить з виходу 4QS-перетворювача, автономні інвертори напруги тягових двигунів мають два види модуляції. Перша модуляція – ШІМ під час розгону та досягнення конструкційної швидкості 130 км/год. Частота модуляції до 46,95 Гц. Подальший збільшення швидкості до максимального значення – 166 км/год з АІМ (до частоти 60 ГЦ). Це дозволяє і збільшити коефіцієнт корисної дії перетворювача з 99,63 % до 99,67 %.

						Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В якості компресора вибрано електричний компресор ЕКВО – 0,8/9, який зарекомендував себе на електропоїздах вітчизняного виробництва серій ЕПЛ9Т та ЕПЛ2Т.

З метою живлення приводу компресора прийнята схема автономного інвертора напруги, яка отримує живлення від мережі постійного струму 4QS-перетворювача та проміжній перетворювач зниження напруги.

Розрахунки та вибір елементів схем показав на можливість такої розробки та її виготовлення.

						Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. ЭР9 (Электропоезд Рижский, 9-й тип) [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ЭР9>.
2. Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации. Книга 1 / отв. за выпуск Рожковая В. Г. – Р.: РВЗ, 1977. – 476 с.
3. Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации. Книга 2 / отв. за выпуск Рожковая В. Г. – Р.: РВЗ, 1977. – 159 с.
4. Басов, Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу [Текст] / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: Апекс+, 2005. – 248 с.
5. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.
6. Авдеев, М. М. Электропоезда переменного тока [Текст] / М. М. Авдеев, В. А. Гут, В. И. Томчук, В. А. Хряев. – М.: Транспорт, 1985. – 368 с.
7. Повышение надежности работы систем автоматического регулирования скорости электропоездов: Монография коллектива авторов [Текст] / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. О. Забарыло – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
8. Скоростной электропоезд ЭС1 "Ласточка" [Текст] : учебное пособие / [А. Ю. Слизов и др.] ; под ред. А. В. Ширяева. - Москва : Автограф, 2015. – 235 с.
9. Ред. Боравская Е.Н., Шапилов Е.Д. Высокоскоростной электропоезд «Сокол» // Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт / Ковалёв И. П.. — СПб: ГИИПП «Искусство России», 2001. — Т. 1.
10. Литовченко В.В., Шаров В.А., Баранцев О.Б., Корзина Е.В. Устройство и работа тягового электропривода электропоезда ЭД6 // Локомотив 2001. -№9. - с. 32-36.
11. Дядичко В.Я., Лещев А.И., Малышев В.М., Кириллов В.С. Электропоезд ЭНЗ: особенности конструкции и электрических схем // Локомотив : журнал. — 2000. — № 5. — С. 0—1, 34—37.
12. Крамсков С.А., Ершов Д.П. Электропоезд переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями // Электровозостроение. — Сб. науч. тр. ВЭЛНИИ. — 1998. — Т. 40. — С. 195—205.
13. Профессионально об электропоездах. Электропоезд переменного тока ЭНЗ [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://emupages.ru/trains-en3.htm>

						Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 14.Солодунов А. М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями./ Солодунов А. М., Иньков Ю. М. и др. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
- 15.Муха, А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів [Текст] : автореферат дис. д-ра техн. наук / А. М. Муха. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 35 с.
- 16.Гейлер Л. Б. Основы электропривода / Гейлер Л. Б. – Мн.: Вышэйш. школа, 1972. – 608 с.
- 17.Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. Учебник для вузов - 6-е изд., доп. и перераб. - М.:Энергопромиздат, 1981. – 576 с.
- 18.Забарило Д. О. Принцип будови електричних схем перетворювачів власних потреб / Д. О. Забарило, Д. М. Мамасуєв // Електрифікація транспорту, № 10. – 2015 – С. 59-63.
- 19.Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.
- 20.Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков – М.; Транспорт, 1999. – 464с.
- 21.М. М. Казачковський. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти. Д. : НГА України, 2000. – 196 с.
- 22.ЭТ2А. [Електрон. ресурс] – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%A22%D0%90#%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>
- 23.Продукты Infinition. [Електрон. ресурс] – Режим доступу: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules/ff450r33t3e3/#>
- 24.Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4qS преобразователями // Электротехника. – 1993, № 3. – С. 23–31.
- 25.Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: пер. с англ. / Б. Уильямс М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

						Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 26.Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / Воронин П. А.– М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.
- 27.Компрессоры Полтавского компрессорного завода. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://kompressor.org.ua/kompressory-poltavskogo-zavoda/kompressoryi-ekvo.html>

						Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

1. Електропоїзди приміського сполучення змінного струму залізниць України
2. Структурна схема тягового перетворювача електропоїзда змінного струму з асинхронним тяговим приводом
3. Розрахункова схема трифазного автономного інвертора напруги
4. Основні параметри транзистора АІН
5. Розрахункова схема 4QS перетворювача
6. Складові втрат потужності в силових елементах перетворювачів
Режим широтне-імпульсної модуляції АІН
7. Складові втрат потужності в силових елементах перетворювачів
Режим амплітудне-імпульсної модуляції АІН

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А
**Демонстраційні матеріали до захисту проекту «Проект тягового
перетворювача для приміського електропоїзда змінного струму з
асинхронним тяговим приводом»**

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

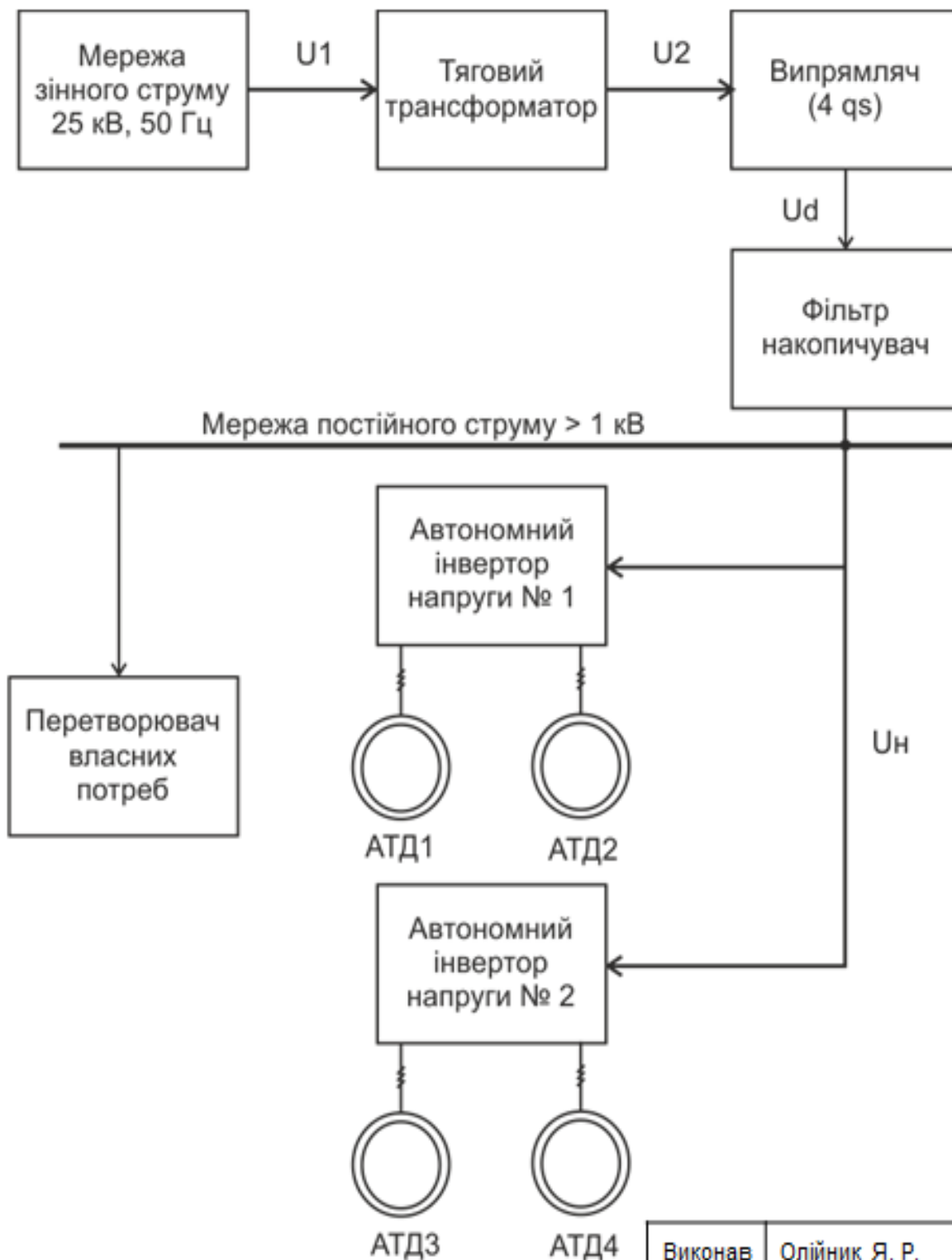
ЕЛЕКТРОПОЇЗДИ ПРИМІСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Постійний струм	
ЭР1	21
ЭР2	77
ЭР2Т	12
ЕПЛ2Т	24
ЭР2Р	14
Всього	148
Змінний струм	
ЭР9П	38
ЭР9М	80
ЭР9Т	18
ЭР9Е	28
ЭР9ЕТ	1
ЕПЛ9Т	15
Всього	180

Рід струму	кількість	%
Постійний	148	43.27%
Змінний	180	52.63%
Постійного/змінного	14	4.09%

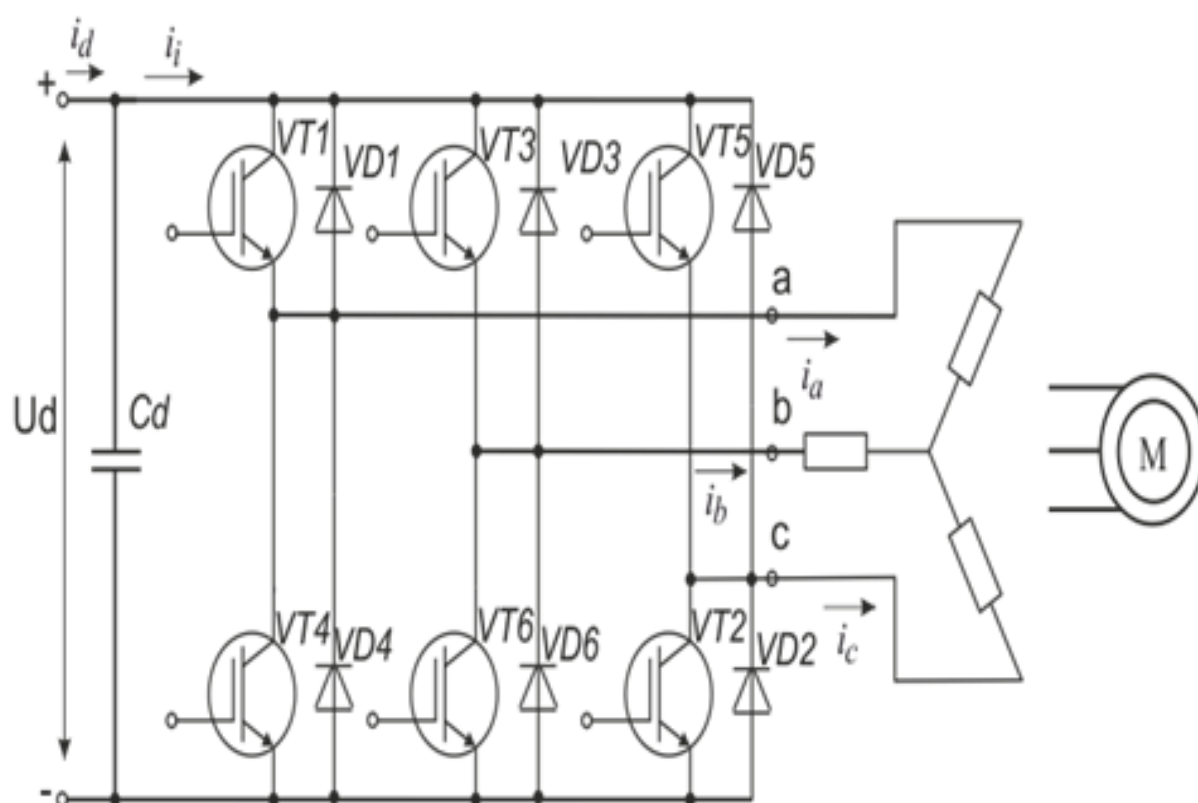
Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

СТРУКТУРНА СХЕМА ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗМІННОГО СТУМУ З АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ



Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ТРИФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ



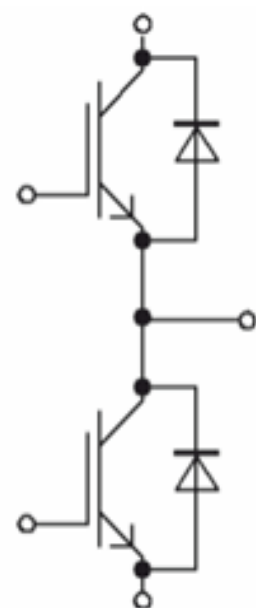
Прототип двигуна - ДТА-380-6УХЛ1:

Потужність, кВт	380;
Номінальна фазна напруга, В	1150;
Номінальний фазний струм, А	95;
Номінальна частота напруги живлення, Гц	60;
Номінальна частота обертання, об/хв	1200;
К.к.д, %	95;
Коефіцієнт потужності	0,79;
Маса, кг	500

Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ТРАНЗИСТОРА АІН

IGBT модуль IXBL64N250:

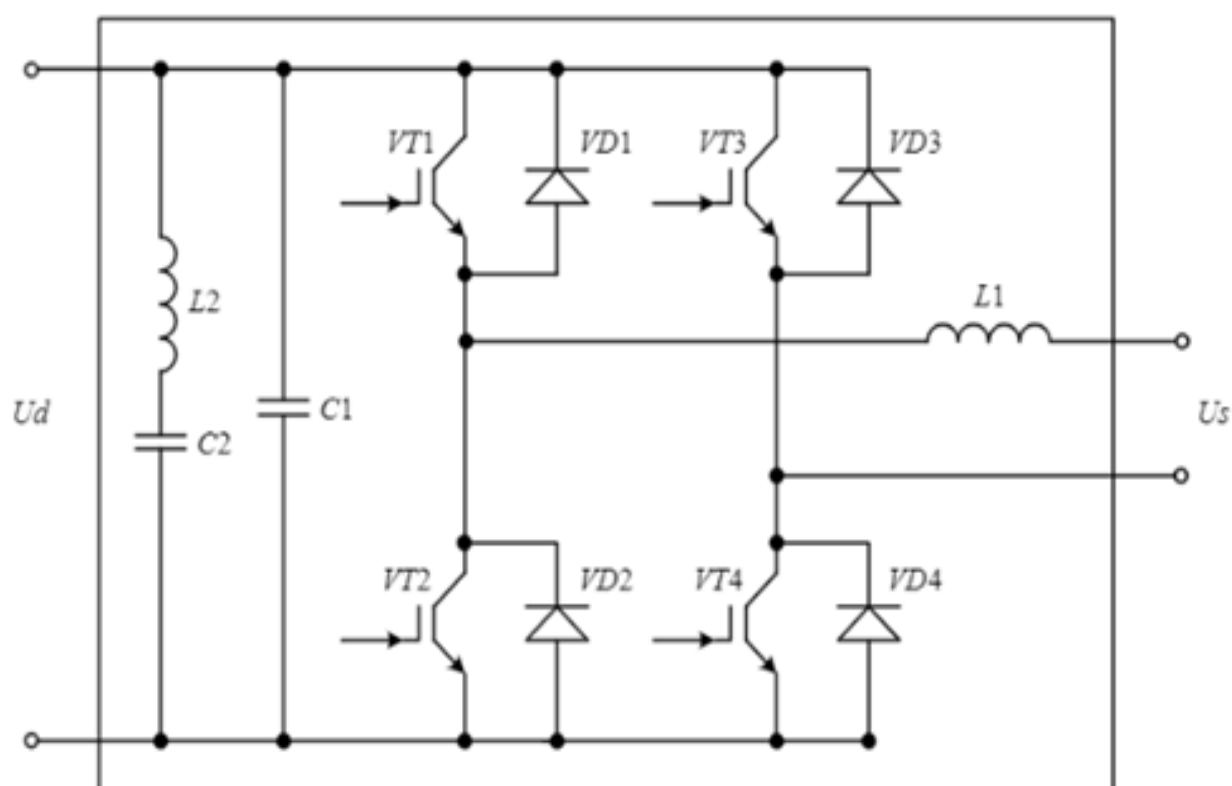


Основні технічні дані транзистора:

- максимальна напруга колектор-емітер	3300 В
- напруга насичення колектор-емітер	2,9 В
- номінальний струм транзистора	450 А
- час включення	0,57 мкс;
- час вимкнення	1,89 мкс;
- температурний діапазон	-40...150° С
- тип корпусу	ХНР™3
- призначення	тяга

Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

Розрахункова схема 4QS перетворювача



Основні параметри розрахунку

Напруга на виході, В	2555
Потужність споживачів, кВт	1532
Необхідне значення діючої напруги на вході, В	1699
Необхідне значення індуктивності L_1 , Гн	0,003
Повний струм транзистора, А	376

Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

СКЛАДОВІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Режим широтне-імпульсної модуляції АІН

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}} + P_{\text{стVT}} + P_{\text{стVD}}$$

	Втрати в АІН, Вт	Втрати 4QS, Вт
$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}}$	57	590
$P_{\text{стVT}}$	57,4	340
$P_{\text{стVD}}$	10,8	90
$P_{\text{заг}}(\text{1модуль})$	125,2	1020
$P_{\text{заг}}(\text{перетворювач})$	751,2	4080
$P_{\text{заг}}(\text{секція})$	1502,4	4080
Загальні втрати в перетворювальних блоках однієї секції: 5582,4 Вт		
Потужність, що передається споживачам: 1532000 Вт		
Коефіцієнт корисної дії перетворювальних блоків: 0,9963		

В режимі ШІМ автономні інвертори тягових
двигунів працюють до частоти 46,95 Гц та
швидкості поїзда 130 км/год

Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.

СКЛАДОВІ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Режим амплітудне-імпульсної модуляції АІН

7

	Втрати в АІН, Вт	Втрати 4QS, Вт
$P_{\text{ВКЛ}} + P_{\text{ВИМК}}$	8,5	590
$P_{\text{стVT}}$	57,4	340
$P_{\text{стVD}}$	10,8	90
$P_{\text{заг}}(1\text{модуль})$	76,7	1020
$P_{\text{заг}}(\text{перетворювач})$	460,2	4080
$P_{\text{заг}}(\text{секція})$	920,4	4080
Загальні втрати в перетворювальних блоках однієї секції: 5000,4 Вт		
Потужність, що передається споживачам: 1532000 Вт		
Коефіцієнт корисної дії перетворювальних блоків: 0,9967		

В режимі АІМ автономні інвертори тягових двигунів працюють до частоти 60 Гц та швидкості поїзда 166 км/год

Виконав	Олійник Я. Р.
Керівник	Білухін Д. С.