

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ «Електрорухомий склад залізниць»
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Г.К.Гетьман
(підпис) (ПІБ)

2020 р. _____ «___»

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

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

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

Спеціалізація _____ «Електричний транспорт»
(повна назва)

Тема _____ Проект модернізації системи
живлення приводів допоміжних
машин електропоїздів серії ЕР9

Theme _____ A modernization project
on the power system of the auxiliary ER9
electric train's drives

Керівник дипломної
магістерської роботи _____ доцент, к.т.н _____ Білухін Д.С.
(посада) (підпис) (П. І. Б.)

Студент групи _____ ЕТ1926 _____ Комягін Д. Ю.
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student _____ Komiahin Dmytro
(Family name)

Дніпро

2020

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами» Кафедра «Електрорухомий склад залізниць»
Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

_____ Г.К.Гетьман

" ____ " _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до магістерської роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Студента групи ET1926

Комягін Дмитро Юрійович

(П. І. Б.)

1 Тема магістерської роботи: _____

Проект модернізації системи живлення

приводів допоміжних машин електропоїздів серії ЕР9

затверджена наказом по університету № 200ст від «9» червня 2020 р.

2 Термін подання студентом закінченої роботи: «14» грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до магістерської роботи: _____

У якості базової схеми допоміжних кіл прийняти схему електропоїзда ЕР9М, який знаходиться в експлуатації у більшій кількості; трансформатор ОЦР-1000/25;

фазорозчеплювач РФ–1Д.5; напруга живлення допоміжних кіл трифазна 380 В. Для модернізації електропоїзда ЕР9М виконати аналіз допоміжних та силових схем;

розробити структурну схему перетворювача у складі керованого випрямляча, що отримує живлення від обмотки власних потреб електропоїзда, індивідуальні на

кожен привід вентилятора та компресора автономні трифазні інвертори напруги;

розрахувати та вибрати елементи силової схеми; випрямляч некерований з

широтне-імпульсним регулюванням, інвертори на основі IGBT; систему керування

автономними трифазними інверторами вибрати типову, для випрямляча систему

управління не розроблювати.

4 Розділи магістерської роботи та терміни виконання.

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %	Кількість демонстраційних листів	Рекомендована література
Вступ, реферат, зміст.	04.11–13.12	3		
1 Аналіз системи живлення допоміжних кіл електропоїзда ЕР9	09.09–27.09	15	2	1
2 Вибір структурної схеми перетворювача	28.09–11.10	15	1	2, 3
3 Розрахунок та вибір елементів силової схеми перетворювача	12.10–08.11	30	2	2-6
4 Вибір системи керування трифазним автономним інвертором	08.11–29.11	20	2	5, 6
Висновки	30.11–06.12	2		
Оформлення роботи	02.11–13.12	15		

5 Рекомендована література

1 Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации. Книги 1 / 2 отв. за выпуск Рожкова В. Г. – Р.: РВЗ, 1977. – 476 с.

2 Солодунов А. М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. / Солодунов А. М., Иньков Ю. М. и др. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.

3 Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Под ред. Ю. М. Инькова. - М. : Транспорт, 1982. – 263 с.

4 Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Бурков А. Т. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

5 М. М. Казачковський. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посібник для студ. вузів. – Д. : НГА України, 2000. – 196 с.

6 Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: пер. с англ. / Б. Уильямс М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

Дата видачі завдання: « 08 » вересня 2020 р.

Керівник магістерської роботи:

_____ *Білухін Д. С.*
(підпис) (П. І. Б.)

Консультант:

_____ –
(підпис) (П. І. Б.)

Завдання прийняв до виконання:

_____ *Комягін Д. Ю.*
(підпис) (П. І. Б.)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на здобуття освітнього ступеню магістр за темою: «Проект модернізації системи живлення приводів допоміжних машин електропоїздів серії ЭР9» виконаний на 85 сторінках і містить: додатків – 1, таблиць – 2, ілюстрацій – 23, джерел – 25. Робота складається з чотирьох розділів.

В першому розділі роботи виконано аналіз електричного обладнання, яке використовується для забезпечення режиму тяги на електропоїздах серії ЭР9 та живлення допоміжних машин. За основу для проектування прийнята схема електропоїзда ЭР9М. Сформульовані задачі, які повинен виконувати новий статичний перетворювач, що пропонується для заміни існуючого розчеплювача фаз.

У другому розділі розглянуто способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів, структурні схеми джерел живлення сучасного електрорухомого складу (ЕРС) та вибрано структурну схему до розробки.

В третьому розділі виконано розрахунок автономних інверторів напруги для живлення асинхронних двигунів приводів компресора, вентиляторів; розрахунок некерованого випрямляча з широтне-імпульсним регулюванням напруги. Запропоновано заміну компресора типу ЭК7В на більш сучасний типу ЭКВО-0,8/9.

У четвертому розділі вибрано елементи типової схеми керування автономними трифазними інверторами напруги.

Ключові слова: випрямляч, інвертор, асинхронний двигун, розчеплювач, управління, фільтр, трансформатор, транзистор.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

ЗМІСТ

стор.

Вступ	6
1 Аналіз системи живлення допоміжних кіл електропоїзда ЭР9.....	7
1.1 Загальні відомості про електропоїзд ЭР9.....	7
1.2 Аналіз обладнання силових та допоміжних кіл електропоїзда ЭР9М	11
1.3 Схема живлення допоміжних кіл електропоїзда ЭР9М.....	19
1.4 Вихідні дані до проектування перетворювача	23
2 Вибір структурної схеми перетворювача	24
2.1 Аналіз способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.....	24
2.2 Можливі системи живлення асинхронних двигунів на електрорухомому складі змінного струму	28
2.3 Структурні схеми статичних перетворювачів сучасного ЕРС	31
3 Проектування силової схеми перетворювача	42
3.1 Розрахунок автономного трифазного інвертора напруги 380 В.	42
3.2 Розрахунок автономного трифазного інвертора напруги 220 В.	49
3.3 Розрахунок некерованого випрямляча з широтне- імпульсною модуляцією.....	51
3.4 Силова схема перетворювача.	62

					Проект модернізації системи живлення приводів допоміжних машин електропоїздів серії ЭР9						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Комягін Д. Ю.			Розрахунково-пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Білухін Д.С.								4	85
Реценз.								ДНУЗТ ст. гр. ЕТ1926			
Н. Контр.		Білухін Д.С.									
Затверд.		Гетьман Г.К.									

4	Вибір системи керування трифазним автономним інвертором	65
4.1	Вимоги до системи керування	65
4.2	Система керування автономним трифазним інвертором на основі мікроконтролера.....	66
4.3	Зміни в базовій схемі управління.	69
	Висновки.....	72
	Список використаних джерел.....	73
	Перелік графічних робіт	76
	Додатки.....	77

	Додаток А. Демонстраційні матеріали до захисту проекту «Проект модернізації системи живлення приводів допоміжних машин електропоїздів серії ЭР9»	78
--	--	----

ВСТУП

На Україні експлуатаційна довжина залізниці складає близько 21655 кілометрів. Залізничний транспорт забезпечує виробничі та невиробничі потреби промисловості і населення в усіх видах перевезень.

Сучасний стан залізниць України характеризується помітним спрацюванням основних фондів, що істотно зменшує техніко-технологічні, економіко-організаційні та інші можливості залізниць. Тому оновлення цих фондів, їх технічне переоснащення сьогодні є одним із найважливіших завдань вітчизняного залізничного транспорту відповідно до сучасних вимог. Одним із найбільш фондомістких підрозділів галузі є локомотивне господарство, а головна складова частина його фондів – це вартість тягового рухомого складу. Локомотивне господарство Укрзалізниці нараховує 68 основних та 41 оборотне локомотивне депо.

Останні роки на залізниці України надходять нові електровози та електропоїзди. Так, вже більш 10 років знаходяться в експлуатації електровози виробництва Дніпропетровського електровозобудівного заводу ДЕ1 та ДС3. На жаль, виробництво цих електровозів призупинено. З ПАО «Луганськтепловоз» надходили до залізниць якісні електропоїзди ЕПЛ2Т та ЕПЛ9Т.

На залізницях, які електрифіковано змінним струмом 25 кВ для міських перевезень пасажирів використовуються електропоїзди серії ЕР9, які були введені в експлуатацію ще в шістдесяті роки і вже відпрацювали встановлений ресурс, а також більш сучасні електропоїзди серії ЕПЛ9Т. Більшу частину складають електропоїзди ЕР9М.

На даному етапі капітально-відновлювальний ремонт рухомого складу є одним із напрямків продовження терміну служби. Це пояснюється тим, що ремонт одиниці дещо дешевший, ніж її придбання. Після капітального ремонту термін служби електровоза та електропоїзда може бути подовжений на 10..15 років, але при цьому зростають додаткові витрати матеріалів, паливно-енергетичних, людських та інших ресурсів.

Під час капітально-відновлювального ремонту доцільно виконання і модернізації електричного обладнання. В даній роботі пропонується замінити розщеплювач фаз електропоїздів серії ЕР9 на статичний перетворювач. другою пропозицією є заміна застарілого компресора на сучасний українського виробництва типу ЕКВО.

						Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ КІЛ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЭР9

1.1 Загальні відомості про електропоїзд ЭР9

ЭР9 – серія електропоїздів змінного струму, які випускалися з 1962 р. Ризьким вагонобудівним заводом. З другої половини 1960-х та протягом більш 4 десятиріч виконує основний обсяг приміських пасажирських перевезень на залізницях Радянського Союзу та простору колишнього СРСР [1].

В кінці 1961 року Ризький вагонобудівний і Ризький електромашинобудівний завод випустили двох вагонну секцію (моторний і головний вагони) серії ЭР9, які незначно відрізнялися від вагонів електропоїздів ЭР7К, фактично будучи їх різновидом. Справедливіше було б новим електровагонам привласнити серію ЭР7М (модернізована).

На початку 1962 року нова секція випробовувалася на експериментальному кільці ЦНДІ МШС, а з другої половини цього року почалося створення електропоїздів ЭР9 у складі з 10 вагонів. Моторні вагони будувалися Ризьким вагонобудівним заводом (RVR), причіпні (головні і проміжні) — Калінінським вагонобудівним заводом, тягові електродвигуни і ряд апаратів — Ризький електромашинобудівний завод, трансформаторне обладнання — Талінським заводом ртутних випрямлячів, випрямні установки — Саранським заводом «Електровипрямляч» і Талінським заводом ртутних випрямлячів, головні повітряні вимикачі — заводом «Уралелектроапарат», а потім Нальчинським заводом високовольтної апаратури.

Кузова вагонів – суцільнометалеві зварні несучої конструкції. В основному елементи конструкції кузовів ті ж, що і в кузовах вагонів електропоїзда ЭР2. Різні лише елементи для розміщення та встановлення електричного обладнання, специфічного для електропоїзди змінного струму. Наприклад, для підвіски тягового трансформатора, випрямної установки і згладжує реактора в рамі моторного вагона встановлені більш потужні поперечні балки. Також передбачені місця: для кріплення головного вимикача (ГВ) на даху вагона і для високовольтного введення на торцевій стіні. Внутрішнє обладнання та планування вагонів в основному такі ж, як у

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вагонів ЕР2. Однак в моторних вагонах поїздів ЕР9М, ЕР9Е, і ЕР9Т встановлені високовольтні шахти в центрі вагона. У цих шахтах розташований шинні введення, які замінюють високовольтні кабельні введення.

Базова модель електропоїзда ЕР9 пройшла декілька модернізацій.

Першою модифікацією було ЕР9П. Дана модифікація випускалася з 1964 року. На відміну від ЕР9, 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. З № 307 була змінена підвіска редуктора, з серповидної перейшли на стрижневу. На моторні вагони були додані авторегулятори, для автоматичного регулювання штоків гальмівних циліндрів. Також була змінена внутрішня обробка салонів і тамбурів. У 1974 р з поїзда № 345 змінено форму лобових частин головних вагонів (з круглою на квадратну).

Найбільшою в кількості випущених електропоїздів була модифікація ЕР9М. Дана модифікація випускалася з 1976 року. На відміну від ЕР9 і ЕР9П у електропоїздів ЕР9М 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 ЕР9П і ЕР9 (за аналогією з ЕР2 з номера 1112). Згодом шинний високовольтний ввід встановлений також на більшості ЕР9П. 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 фазорозчеплювача) не змінилися. Серія ЕР9М використовується Російськими залізницями, Білоруської залізницею, Литовськими залізницями, Українськими залізницями і Узбекистанською залізницею.

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електропоїзд ЕР9М 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.

Салони електропоїзда мають напівм'які сидіння, примусову вентиляцію, калориферне опалення та радіо оповіщення пасажирів.

Моторний вагон електропоїзда ЕР9М важить 60 т, причіпний — 37,0 т, головний — 39,0 т. Число місць для сидіння у вагонах відповідно 107, 107 і 83 [2, 3].

Основні параметри для 10-вагоного електропоїзда ЕР9М:

довжина по осях автозчепів – 201810 мм;

маса тари – 470–484 т;

число сидячих місць – до 1050;

годинна потужність на валах тягових електричних двигунів – 3640 кВт (для порівняння: 2ТЭ10 і 2ТЭ116 — 3600 кВт, ВЛ8 – 4200 кВт);

сила тяги на ободах рушійних коліс – до 26350 кгс;

конструкційна швидкість – 130 км/год (по тягових електродвигунах;

прискорення при пуску – 0,6–0,7 м/с².

За основну одиницю поїзду прийнято електропоїзд з 10 вагонів, який складено з двох головних, п'яти моторних, трьох причіпних. Вагонів. Поїзд можна формувати з 4, 6, 8 та 12 вагонів. Зменшення кількості вагонів досягається виключенням однієї, двох або трьох секцій. Кожна секція складається з моторного та причіпного вагонів.

Наступною модифікацією став електропоїзд ЕР9Е. Дана модифікація випускалася з 1981 по 1987 рік. Відрізняються від ЕР9М природним охолодженням силового обладнання: радіатор випрямної установки охолоджується потоком повітря, що набігає; реактор, що згладжує, на відміну від ЕР9М, занурений в масло трансформатора і охолоджується разом з трансформатором; масляний радіатор, в свою чергу, теж

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обдувається тільки потоком, що набігає. Фазорозщеплювач механічного навантаження на валу не має. Останній електропоїзд ЭР9Е – ЭР9Е-666 був перероблений під ЭР9Т і отримав позначення ЭР9ЕТ-666. Згодом цей електропоїзд переданий Українській РСР, де з 1987-1988 року експлуатувався електрифікованим після аварії на ЧАЕС ділянці Чернігів - Славутич - Йолча. Після возз'єднання з рештою електрифікованої мережею Південно-Західної залізниці (1999-2000 рр.) Продовжує регулярні пасажирські перевезення по території України ЭР9ЕТ-666, ветеран Чорнобиля.

Остання модифікація поїздів цієї серії – це ЭР9Т. Дана модифікація випускалася з 1988 року і аж до припинення випуску цієї серії Ризьким заводом у 1996 році. Ця модифікація мала модернізовані візки, тягові двигуни і реостатний гальмо. У жовтні 1996 року був побудований електропоїзд ЭР9ТМ-801, який у березні 1997 року вступив в експлуатацію в депо Мінськ-Північний Білоруської залізниці. При будівлі електропоїзди застосований новий комплект електрообладнання виробництва РЕЗ, такий же, як і на електропоїздах серії ЭД9Т, через що в позначенні серії був доданий індекс «М» - модернізований. Електропоїзди ЭР9Т-746 (у 2001 році) і ЭР9Т-747 (у 2003 році) були побудовані в Києві на Київський електровагоноремонтний завод на базі кузовів, куплених у РЕЗ. Зовні ЭР9Т легко відрізнити від інших модифікацій за встановленими на дахах моторних вагонів гальмівним реостатів.

Серія ЭР9М використовується Російськими залізницями, Білоруської залізницею, Литовськими залізницями, Українськими залізницями і Узбекистанською залізницею.

В таблиці 1.1 показано розподіл електропоїздів серії по залізницях та депо України. Виходячи цієї таблиці можна зробити висновок, що приписний парк електропоїздів змінного струму приміського сполучення складається з 175 електропоїздів, з яких 41% складатиме електропоїзди ЭР9М.

Таблиця 1.1 – Аналіз стану парку електропоїздів змінного струму залізниць України.

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№	Тип електропоїзда	Залізниця	Депо	Кількість
1	ЭР9Е	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9	11
		Південно-західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	17
		Усього		28
2	ЭР9М	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9	1
		Львівська	Здолбунів РПЧ-3	3
		Південно-західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	60
			Чернігів РПЧ-9	1
		Південна	Полтава РПЧ-2	5
			Люботин оборотне депо Куп'янськ	1
		Усього		71
3	ЭР9П	Одеська	Одесса-Застава РПЧ-9	9
		Львівська	Здолбунів РПЧ-3	11
		Південна	Полтава РПЧ-2	5
			Люботин оборотне депо Куп'янськ	13
		Усього		38
4	ЭР9Т	Львівська	Здолбунів РПЧ-3	1
		Південно-західна	Чернігів РПЧ-9	12
		Усього		13
5	ЭД9М	Південно-західна	Фастів моторвагонний РПЧ-8	9
6	ЭР9ЕТ	Південно-західна	Чернігів РПЧ-9	1
7	ЕПЛ9Т	Південно-	Фастів	8

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

		західна	моторвагонний РПЧ-8	
		Південна	Полтава РПЧ-2	7
		Усього		15
Загальна кількість				175

1.2 Аналіз обладнання силових та допоміжних кіл електропоїзда ЕР9М

На кожному моторному вагоні встановлено по чотири тягових електродвигуна постійного струму. Двигуни з'єднані в дві паралельні групи, по два послідовно. Двигуни отримують живлення від контактної мережі через: струмоприймач Л-13У01 (або Л-14М01), силовий трансформатор, контролер силовий пневматичний (КСП), випрямну установку, реактор що згладжує та лінійні контактори. КСП служить для регулювання напруги, ВУ і СР – для перетворення змінного струму в постійний, ЛК – для оперативного включення і відключення струму. Струмоприймач розташований на даху моторного вагона. Він з'єднаний з первинною (мережевою) обмоткою силового трансформатора високовольтним шинним вводу. Струмоприймачі всіх моторних вагонів можуть з'єднуватися паралельно для підвищення надійності роботи і можливості опустити кілька струмоприймачів для утримання їх в резерві, для цього по дахах причіпних і моторних вагонів прокладена шина на ізоляторах, між вагонами шини з'єднуються гнучкими перемичками.

Силовий трансформатор (ОЦР-1000/25, однофазний масляний) встановлений під кузовом вагона. Трансформатор має чотири обмотки: одну первинну (мережеву) на номінальну напругу 25 кВ при частоті 50 Гц, три вторинних (тягову, опалювальну на напругу 628 В і допоміжну на напругу 220 В). Призначений для живлення випрямного пристрою, допоміжних кіл, приладів опалення та освітлення [3].

Технічні дані трансформатора ОЦР-1000/25

Номінальна потужність мережевої обмотки, кВА	965
Номінальна напруга тягової обмотки, В	1744
Номінальна потужність тягової обмотки, кВА.....	773
Номінальний струм, А	350
Часовий струм, А	530
Номінальна напруга опалювальної обмотки, В	628
Потужність опалювальної обмотки, кВА.....	100

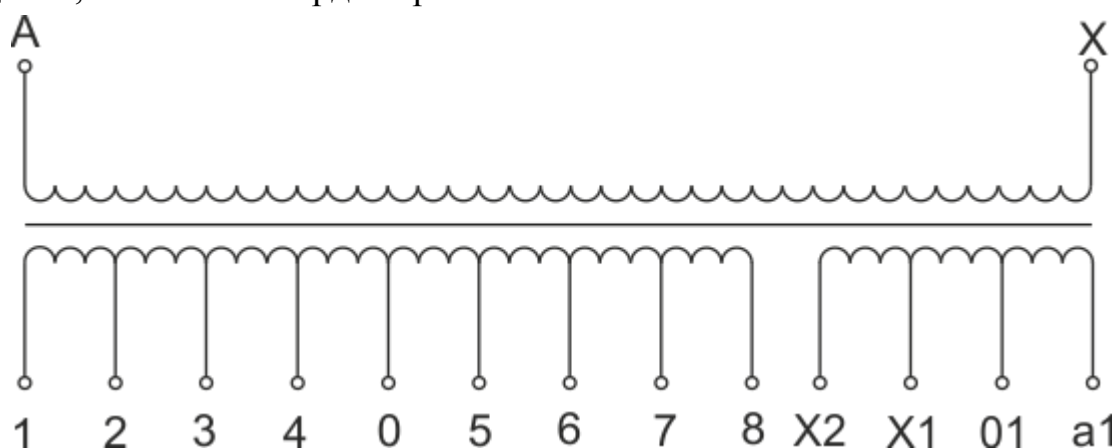
						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номинальна напруга обмотки допоміжних кіл, В.....	220
Номинальна потужність обмотки допоміжних кіл, кВА	92
Струм холостого ходу, %	3,5
Втрати холостого ходу, кВт.....	3
Коефіцієнт корисної дії, %.....	97,3
Загальна маса, кг	3122
Габаритні розміри, мм	3005×1590×929.

Трансформатор має спеціальну конструкцію, яка протидіє тряскі та поштовхам. Активна частина трансформатора розміщена у баку, який є резервуаром для масла та захищає активну частину від механічних поштовхів. Кріплення трансформатора на рамі вагону виконується за допомогою балок, які приварені до кришки трансформатора.

Магнітопровід стрижневого типу, розташування горизонтальне, стрижні розміщено паралельно рельсовій колії. магнітопровід зібрано з пластин електротехнічної сталі Э-330 товщиною 0,35 мм, які вкрито тонким шаром ізоляційного лаку. Розташування обмоток на стрижнях концентричне. Першою на стрижні розміщено мережева обмотка АХ, безперервна, з 2624 витків, які намотані плазом на бакелітовому циліндрі. Половина котушок розташовано на стрижні А, друга половина на стрижні Х, з'єднання котушок послідовно.

Після мережевої обмотки розташовано тягова, яка виконана у вигляді двохходової спіралі на бакелітовому циліндрі. кожна спіраль складається з восьми паралельних дротів. Після намотування кожні два сусідні проводи спіралі з'єднуються між собою та створюють самостійну гілку тягової обмотки. Всього в обмотці 8 таких кіл. З'єднання гілок на кожному осерді послідовне, а обмоток осердь паралельне.



												Арк.
												13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								

Рисунок 1.1 – Принципова схема трансформатора ОЦР-1000/25

На наступному циліндрі розташовано обмотки допоміжного обладнання: на стрижні А – обмотка опалення $a_1 - 0_1$, на стрижні Х – обмотка власних потреб $0_1 - X_1$ (X_2). Обидві обмотки шарового типу.

Охолодження трансформатора здійснюється за допомогою примусової циркуляції трансформаторного масла через секції охолодження, які встановлюються окремо від трансформатора на реакторі що згладжує. Циркуляція масла здійснюється електронасосом трансформаторним герметичним типу 2ТТ-16/10-01 ТУ 16-539.884-74.

Електрична схема трансформатора показана на рис. 1.1.

Випрямна установка перетворює змінний струм в постійний (пульсуючий) для живлення тягових двигунів. На електропоїзді ЕР9 випрямні установки розташовані в тамбурних шафах, на решті модифікацій, що становлять переважну більшість серії – під вагоном. На електропоїзді ЕР9М встановлена випрямна установка типу УВП-3.

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, примусове

Витрати повітря, м³/год 4000

Маса, кг 370

Пристрій УВП-3 представляє собою пилонепроникну камеру з обслуговувань з двох сторін. В камері розташовані 8 блоків з напівпровідникових лавинних вентилів ВЛ-200-6: 6 блоків з 12 вентилів, які розташовано в шість горизонтальних рядів по два вентилі в кожному, та два блоки з шести вентилів, які розташовані в три горизонтальних ряди по два

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вентилі в кожному. вентилі обладнано охолоджувачами на основі алюмінію. Всі блоки знімні, що забезпечує легкий доступ для очищення всього повітряного каналу установки.

Схема випрямної установки показана на рис. 1.2. 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.

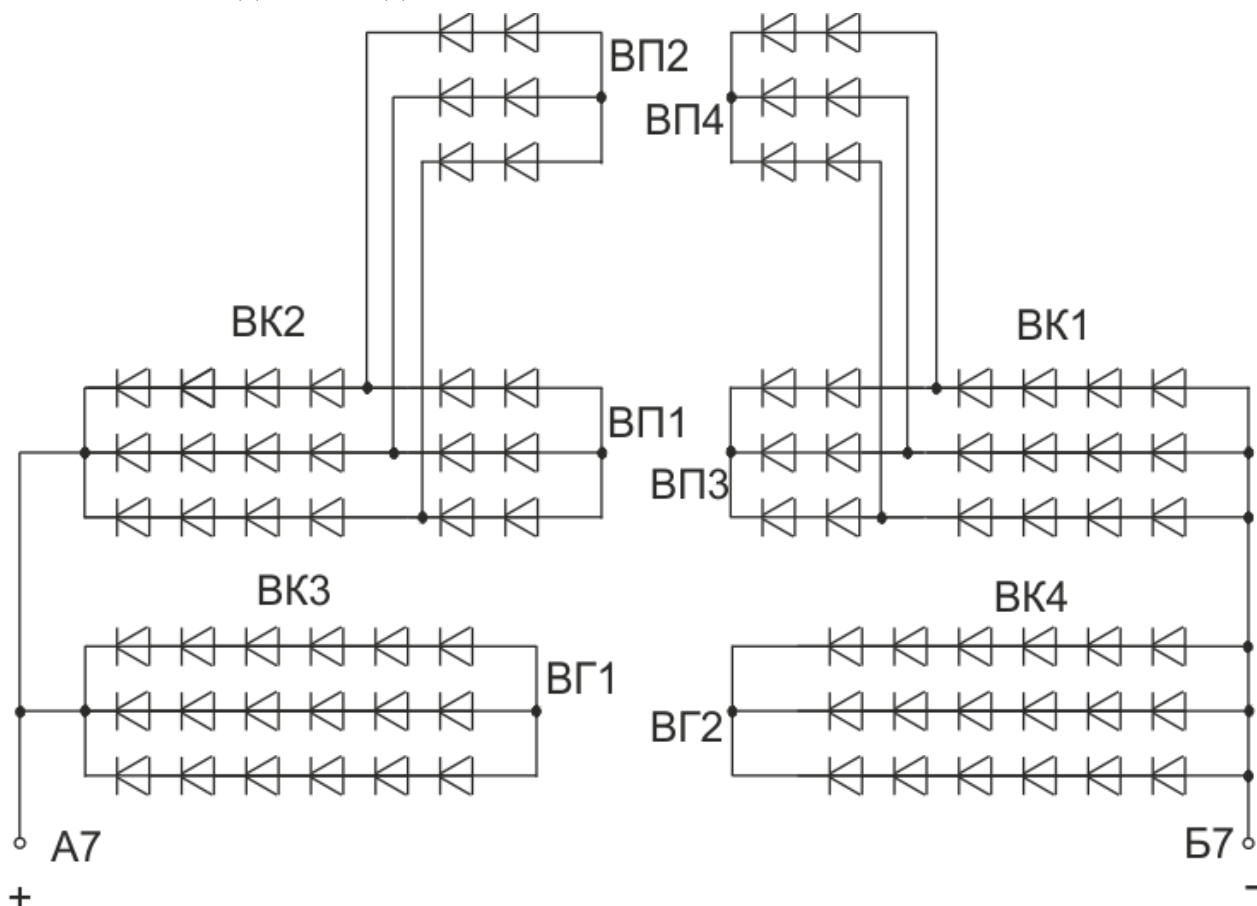


Рисунок 1.2 – Схема випрямного пристрою УВП-3

Мотор-компресор, насос трансформатора, мотор-вентилятори калориферів опалення живляться трифазною змінною напругою 220 В, яка вироблюється розчеплювачем фаз, який живиться однофазною напругою 220 В від силового трансформатора.

Реактор, що згладжує СР-800 являє собою котушку індуктивності. Реактор призначений для зменшення пульсацій випрямленого струму, що надходить до тягових електродвигунів. реактор однофазний сухий з примусовим охолодженням.

Технічні дані реактора СР-800

					Арк.
					15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Номінальна напруга, В	2208
Тривалий постійний струм, що протікає через реактор, А.....	400
Змінна складова струму, А.....	85
Індуктивність, під час підмагнічування: постійним струмом 250 А, мГ	20±2
постійним струмом 530 А, мГ	10±1
Втрати в міді, кВт.....	10,5
Габаритні розміри, мм	1400×906×773
Маса, кг	966

Охолоджується силове обладнання примусово: на валу фазорозщеплювача встановлений відцентровий вентилятор, повітря від якого послідовно проходить випрямним установку, СР-800, масляний радіатор трансформатора і викидається на вулицю. На електропоїздах ЭР9 ВУ охолоджуються окремими вентиляторами. КСП – кулачковий контролер, що приводиться в рух пневматичним приводом і близький по конструкції до реостатному контролеру електропоїздів ЭР2. КСП перемикає відпайки тягової обмотки трансформатора, ступінчате змінюючи напругу на тягових двигунах, всього ступенів 20, перемикання йде під контролем реле прискорення, що допускає включення наступному ступені після спадання струму тягових електричних двигунів до 365 А (при включенні в кабіні кнопки «Знижений прискорення» – до 300 А).

На електропоїзді встановлено тяговий електричний двигун типу РТ-51Д, який призначено для приводу колісних пар та встановлений на візку моторного вагона.

Технічні дані двигуна РТ-51Д

Номінальна напруга, В	825
Потужність часового режиму, кВт	200
Частота обертання в часовому режимі, об/хв.	1140
Струм часового режиму, А	266
Маса, кг	2000
Опір обмоток при 20°С, Ом	0,0556.

Тягові двигуни електропоїзда самостійно вентилюються. Повітря для охолодження кожного двигуна береться через спеціальні жалюзі на даху вагону, які поєднані зі спеціальними фільтрами на горищі. У фільтрах

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря очищується від пилу та вологи та поступає по спеціальним каналам до двигунів.

Обладнання для охолодження випрямного пристрою складається із жалюзі для всмоктування, які розташовані на боковій стіні вагону, фільтрової камери з фільтрами та вентилятора, який встановлено на валу фазорозчеплювача.

Продуктивність вентилятора 5300 м³/год.

Система побудована таким чином, що від одного вентилятора, крім випрямного пристрою охолоджується також фазорозчеплювач, реактор що згладжує та масло трансформатора.

Зовнішнє повітря всмоктується через жалюзі під вагоном у фільтрову камеру, де проходить через фільтри. Потім очищене повітря нагнічується вентилятором та подається по двом трактам: фазорозчеплювач – атмосфера; випрямна установка, реактор, масляний радіатор силового трансформатора – атмосфера. У зимовий період додатково встановлюється щиток для затримки снігу.

Розчеплювач фаз РФ-1Д.5.

Розчеплювач фаз перетворює однофазний змінний струм у трифазний для живлення допоміжних двигунів. Підвищено його під кузовом моторного вагону безпосередньо на лапах. Розчеплювач фаз є асинхронною машиною з короткозамкненим ротором і несиметричною трифазною обмоткою на статорі. Він живиться напругою 220 В, яка підводиться до фаз А і С. Споживачі отримують трифазний струм від фаз А, В і С. При пуску між фазами А і В включається пусковий резистор на 0,42 Ом, що відключається після розгону машини.

Технічні дані розчеплювача фаз РФ-1Д.5

Потужність тривалого режиму, кВт..... 18
Частота струму, Гц..... 50
Частота обертання, об/хв..... 1470
Маса, кг 320.

Електрокомпресор повітряний ЭК7В.

Компресор призначено для живлення стислим повітрям гальм та пневматичних приладів електропоїзда. Встановлюється на кожному головному та причепному вагонах. В якості приводу компресора використовується трифазний асинхронний двигун типу 548А.

Технічні дані компресора ЭК7В

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Споживана потужність, кВт.....	4,7
Кількість ступенів стиснення	1
Продуктивність, м ³ /хв.....	1470
Частота обертання колінчастого вала, об/хв.....	540
Робочий тиск стислого повітря, кгс/см ²	8
Маса, кг	428.

Двигун змінного струму типу 548А призначений для приводу головного компресора. Двигун трифазний, асинхронний, з підвищеним ковзанням. Виконання горизонтальне, фланцевий без лап, закритий (обдув відсутній). Корпус покрито нітроцелюлозою емаллю. Вихідний кінець валу має ущільнення, яке виключає проникнення масла з редуктора компресора в порожнину корпусу двигуна.

Технічні дані двигуна 548А

Номінальна напруга, В	220/380
Номінальний струм, А	28/16
Номінальна потужність, кВт.....	5
Частота струму, Гц.....	50
Частота обертання, об/хв.....	975
Маса, кг	310.

Електричні двигуни АОМ

На електропоїзді встановлені трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором: АОМ32-4 - для приводів вентиляторів вагона; АОМ22-2 - для приводу вентилятора кабіни. Технічні дані двигунів вказані в таблиці 1.2

Електронасос 2ТТ-16/10

Електронасос 2ТТ-16/10 призначений для перекачування трансформаторного масла в системі охолодження силового трансформатора. Його технічні дані такі:

Номінальна напруга, В	220/380
Номінальний струм, А	3,5/2
Номінальна потужність, кВт.....	0,82
Частота струму, Гц.....	50
Частота обертання, об/хв.....	2900
Подача, м ³ /год.....	16
Режим роботи	тривалий
Маса, кг	55.

						Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Технічні дані двигунів АОМ

Тип двигуна	АОМ32-4	АОМ22-2
Потужність, кВт	1,5	1,0
Напруга, В	220	220
Номинальний струм, А	7,62	4,4
Частота, Гц	50	50
Ккд	0,78	0,78
cosφ	0.88	0.88
Частота обертання, об/хв	1390	2820
Маса, кг	23,5	12,5

1.3 Схема живлення допоміжних кіл електропоїзда ЕР9М

На рис. 1.3 представлена схема живлення допоміжних кіл електропоїзда ЕР9М.

Після включення акумуляторних батарей і появи постійної напруги на проводах 15-30 розмикаючи контакти реле напруги РН (15Н-15НА) отримують живлення котушки реле часу пуску РВН і реле часу розчеплювача фаз РВФ.

Реле РВП і РВФ включаються і перемикають свої контакти, готуючи схему управління розчеплювача фаз до запуску і замикаючи коло живлення блоку управління БУС. Після включення високовольтного вимикача ВВВ при включеному автоматі АВ спрацьовує реле напруги РН, котушка якого через автомат АВ підключена до відпайки о1-х1 допоміжної обмотки головного трансформатора і своїм контактом (15Н-15НА) розмикає коло живлення котушок РВП і РВФ (при цьому контакти реле залишаються в колишньому положенні на час витримки часу реле), а контактом (15У-15Д) замикає коло живлення котушки контактора КНР. Контактор КНР включається, підключаючи генераторну фазу розчеплювача фаз через пусковий резистор R26 паралельно рухомої фази. Блокувальний контакт КНР (15Д-15Г) замикає коло живлення котушки контактора КР, а інший контакт КНР (63Ц-63) готує коло котушки реле напруги фазорозчеплювача РНФ до включення.

						Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

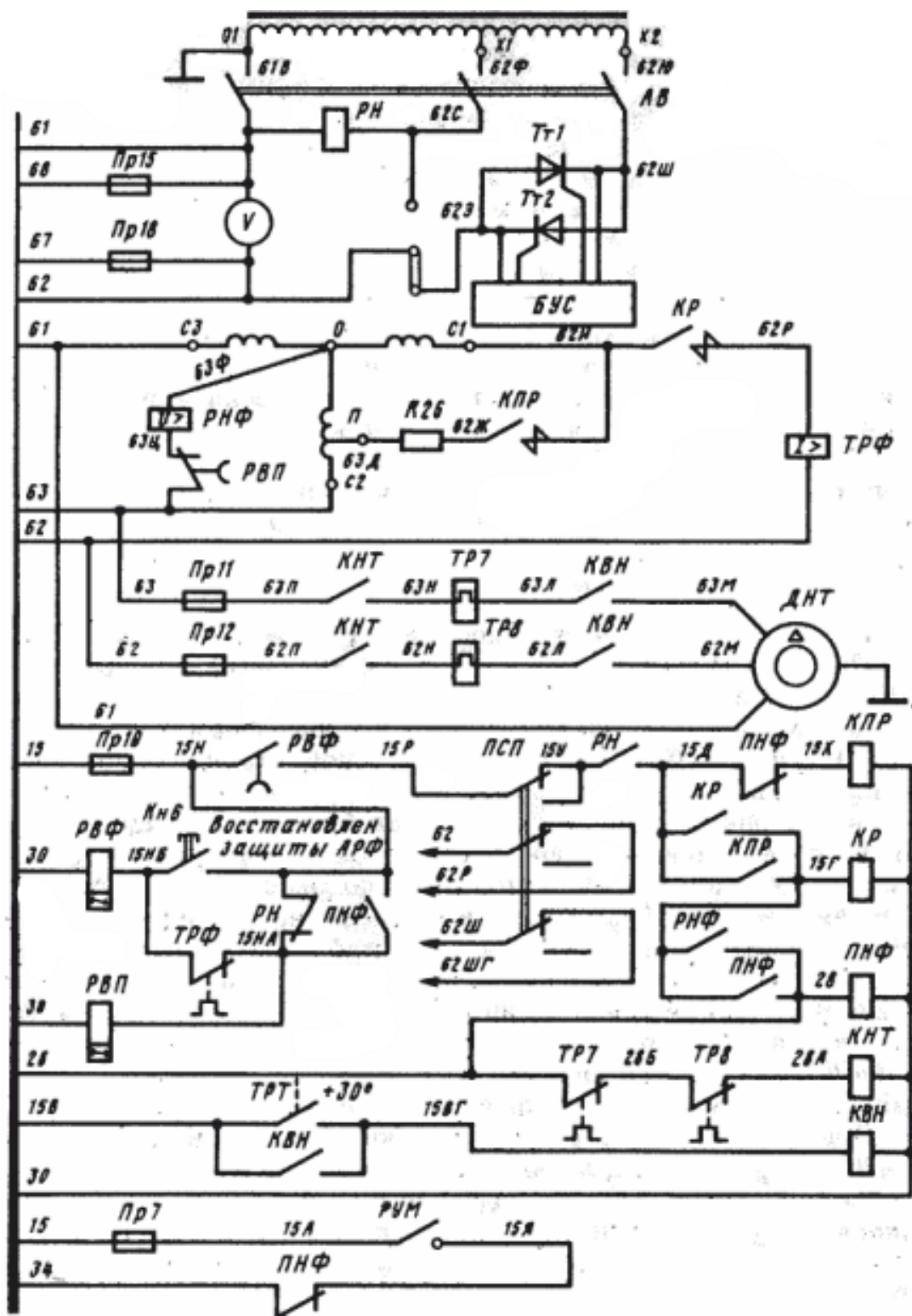


Рисунок 1.3 – Схема живлення допоміжних кіл електропоїзда ЭР9М

Після включення блоку управління БУС починає працювати тиристорний стабілізатор напруги. На виході стабілізатора і, отже, на проводах 61-62 з'являється змінна напруга. При спрацьовуванні контактора КР починається пуск розчеплювача фаз. У міру збільшення його швидкості

обертання зростає е.р.с. генераторної фази. Паралельно генераторній фазі розчеплювача підключена котушка реле напруги фазорозчеплювача РНФ.

Після досягнення на генераторній фазі напруги, близької до номінальної, спрацьовує реле РНФ і своїм контактом (15Г-28) замикає коло котушки реле повторювача напруги ПНФ: замикаються контакти ПНФ (15Г-28), (15Н-15На) і відповідно шунтують контакт РНФ в колі котушки ПНФ і контакт РН в колі котушок реле РВФ і РВП. Контакти ПНФ (15Д-15Х) і (34-15Я) розмикають коло живлення котушок контактора КПр і сигнальної лампи РН.

Контактор КПр відключається, розмикає коло пускового опору і коло котушки реле РНФ. Реле РНФ відключається. Контактор КР залишається включеним, так як контакт КПр (15Д-15Г) шунтований контактом контактора КР. При нормальній роботі розчеплювача фаз реле ПНФ, РВП і РБФ постійно включені.

У момент зникнення змінної напруги відключається реле напруги РН і своїм контактом (15У-15Д) розмикає коло живлення контакторів КРШ КПр, а контактом (15І-15НА) замикає коло живлення реле РВФ і РВП, готуючи пускову схему розчеплювача фаз до повторного пуску.

Захист від перевантажень, коротких замикань і інших аварійних режимів забезпечується за допомогою струмового реле ТРФ і автомата АВ. При пуску розчеплювача, а також в аварійних режимах, коли струм, споживаний розчеплювачем, досягне уставки струмового реле ТРФ, останній спрацьовує і своїм контактом (15НА-15НБ) розмикає коло живлення котушки реле часу РВФ. При нормальному пуску за час, менше витримки реле РВФ, висока напруга, яка через струмовий котушку ТРФ, стане менше струму утримання, реле ТРФ відключиться, а реле РВФ залишиться включеним.

Якщо за час витримки часу реле РВФ струм не падає нижче уставки ТРФ, то реле РВФ відпадає і своїм контактом (15Н-15Р) перериває коло живлення котушок контакторів КР, КПр і реле ПНФ, а контактом (22-22В) - блоку управління БУС. Контактор КР відключає розчеплювач фаз, реле, ПНФ своїм контактом (34-15Я) замикає коло живлення сигнальної лампи РН, а контактом (15Г-28) розмикає коло живлення котушок контакторів допоміжних машин.

Повторне включення розчеплювача після спрацьовування захисту

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можна здійснити кнопкою відновлення захисту АРФ, яка замикає коло котушок реле РВП і РВФ. При знятті і відновленні змінної напруги, наприклад при проїзді нейтральної вставки, реле РВФ відновлюється автоматично, так як замикається контакт (15Н-15НА) реле РН.

Для виключення систематичних спрацьовувань захисту при несправності АРФ необхідно вимкнути перемикач ПС11 в колі котушки контактора КР.

Перемикач системи живлення ПСП має три положення: «Нормально», коли замкнуті його контакти (15Р-15У), (22В- 22ВА) і (62-62Р); нульове «О» коли все його контакти розімкнуті; «Резерв», коли замкнутий тільки контакт (15Р-15У), який дозволяє працювати розчеплювачу фаз при відключенні стабілізації напруги (в разі коли перекидна шина на блоці 1Б.214 варто в положенні «Резерв»).

Насос трансформатора служить для циркуляції масла головного трансформатора і приводиться в дію електродвигуном ДНТ (рис. 1.3), який включає контакторами насоса трансформатора КНТ і КВН після появи напруги 220 В на проводах 61-62, після закінчення запуску розчеплювача фаз АРФ і при температурі масла трансформатора вище 30° С. Це забезпечується наявністю в колі котушки КНТ контакту ПНФ (15Г-28), а в колі котушки КВН - контакту датчика температури масла ТРТ4 30°С.

Контактор КНТ спрацьовує і своїми контактами (62Л-62М) і (63Л-63М) включає двигун ДНТ при включеному контакторі КВН.

Аварійне відключення контактора КНТ відбувається при спрацьовуванні теплових реле ТР7, ТР8 (розмикання контакту в колі 28-28А), відбувається відключення ДНТ. В цьому випадку не повинно бути тягових навантажень на трансформаторі, так як можливий його перегрів. У зв'язку з цим при непрацюючому ДНТ блокування КНТ (11Г-11Д) розірве коло живлення лінійних контакторів силового кола.

1.4 Вихідні дані до проектування перетворювача

Аналіз допоміжного обладнання, що використовується в електропоїзді ЕР9М дозволяє зробити деякі висновки щодо можливості проектування схеми живлення трифазних споживачів.

Живлення розчеплювача фаз відбувається від обмотки тягового трансформатора Х2 з номінальною напругою 276 В, яка при коливаннях напруги контактної мережі від 19 кВ до 29 кВ має також відхилення від 209

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В до 320 В.

Всі асинхронні машини використовують номінальну напругу живлення 220 В у зв'язку з чим, приводи компресора та насоса трансформатора з'єднано трикутником, що є не зовсім оптимальним з куту зору використання асинхронних двигунів. Однак, при рівні напруги обмотки трансформатора 220 В іншого не можливо.

Компресор та його привід достатньо є застарілими. Тому, з метою модернізації, виконуємо заміну на компресор вітчизняного виробництва типу ЕКВО-0,8/9 з асинхронним двигуном типу АИР132М4.

Таким чином визначено два необхідні рівні напруг трифазної мережі: 380 В, та 220 В. При використанні типового схемного рішення на основі автономного трифазного інвертора напруги необхідно мати мережу живлення постійного струму не менш 490 В, що не можливо отримати на виході типового випрямляча, який приєднати до вторинної обмотки трансформатора 276 В. Тому для збільшення рівня напруги проміжної мережі постійного струму будемо використовувати схему підвищення напруги.

Приводи вентиляторів ще й досі є серійними машинами, тому заміну їх виконувати не будемо.

						Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ВИБІР СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Аналіз способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Від трансформатора асинхронна машина відрізняється тим, що між первинною (статором) і вторинною (ротором) частинами є повітряний проміжок, який для покращення магнітного зв'язку між обмотками роблять мінімальним (0,3-1,2 мм); крім того, вторинна частина у асинхронної машини рухома (обертається).

Якщо трифазну обмотку статора, що має p пар полюсів, підключити до мережі з частотою струму f_1 , то з'явиться обертове магнітне поле, частота обертання якого дорівнює [4, 5]:

$$n_1 = \frac{\omega_1}{2\pi p} = \frac{f_1}{p} \quad (2.1)$$

Обертове магнітне поле статора (потік Φ) перетинає провідники обмотки статора і ротора і індукує в них електрорушійна сила E_1 і E_2 під дією останньої в обмотці ротора виникає струм I_2 .

Взаємодія потоку статора і струму ротора призводить до появи електромагнітного обертового моменту. Ротор починає обертатися з частотою $n < n_1$ в ту ж сторону, що і поле статора.

Якщо уявити собі, що ротор обертається з синхронною частотою, тобто $n = n_1$, то ротор і магнітний потік статора будуть нерухомі один відносно іншого. При цьому потік Φ не буде перетинати провідників ротора, у них не буде індуктуватися електрорушійна сила E_2 , не буде струму I_2 і машина працювати не зможе.

Таким чином, невід'ємною умовою виникнення обертаючого електромагнітного моменту є несинхронна частота обертання ротора, тобто $n \neq n_1$. З цієї причини машина отримала назву асинхронної.

Відносна різниця частот обертання поля статора і ротора називається ковзанням:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.2)$$

Воно характеризує ступінь «відставання» ротора від поля статора. Зі співвідношення величини ковзання (2.2) можна отримати вираз частоти обертання ротора:

						Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p(1 - s)} \quad (2.3)$$

При роботі багатьох механізмів, які обертаються за допомогою асинхронних двигунів, у відповідності з технологічними вимогами виникає необхідність регулювати швидкість обертання цих механізмів.

Із формули (2.3) слідує, що є три принципово можливих способів регулювання частоти обертання ротора n : зміною частоти f_1 живлячої напруги, числа пар полюсів p і зміни величини ковзання S .

2.1.1 Регулювання частоти обертання АД за допомогою резисторів в колі ротора.

Один з поширених способів регулювання швидкості, струму і моменту АД з фазним ротором пов'язаний із введенням і зміною додаткових резисторів у коло його ротора (зміни величини ковзання S). При збільшенні опору резистора збільшуються електричні втрати p_{em2} і, частота обертання n зменшується. При заданому статичному моменті $M_{ст}$ відбувається перехід з характеристики 1 на характеристику 2, 3 і т.д. із збільшенням ковзання (рисунок 2.1). Цей спосіб дозволяє змінювати частоту обертання в широкому діапазоні.

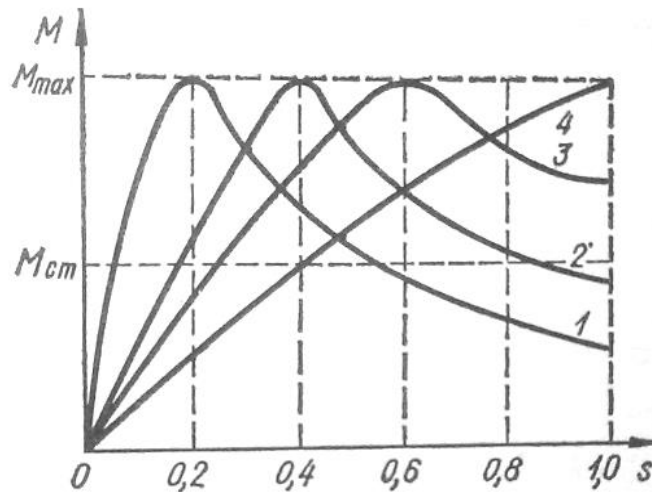


Рисунок 2.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних величинах опору кола ротора

Основні недоліки цього способу:

1. Електричні втрати в роторному колі p_{em2} , які ще називаються втратами ковзання. Чим більше ковзання S , тим більше втрати в роторному ланцюзі, тому реалізація великого діапазону регулювання швидкості призводить до значних втрат енергії і зниження ККД електропривода.

					Лист
					25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

2. Механічна характеристика асинхронного двигуна зі збільшенням активного опору ротора стає м'якшою, тобто знижується стійкість роботи двигуна.

3. Неможливо плавно регулювати частоту обертання.

4. Із-за перерахованих недоліків цей спосіб застосовують для короткочасного зниження частоти обертання.

2.1.2 Регулювання частоти обертання АД зміною числа пар полюсів.

Регулювання зміною числа пар полюсів застосовується у двигунах з короткозамкненим ротором, так як при цьому досить обійтися тільки перемиканням обмотки статора. Якщо на статорі укласти обмотку, яка допускає перемикання числа пар полюсів у відношенні 1:2, то вийде двошвидкісна машина.

Іноді на статорі укладають дві обмотки, які переключаються, і тоді виходить чотиришвидкісна машина. Наприклад, двигун з двома перемикаючими обмотками на $p = 2$ і 4 , $p = 3$ і 6 при $f_1 = 50$ Гц має синхронну частоту обертання 1500/1000/750/500 об/хв. Схема з'єднання і магнітне поле статора двигуна при паралельному і послідовному з'єднанні напівобмоток показана на рисунку 2.2.

Багато-швидкісні двигуни більші за розмірами, масою і вартістю в порівнянні з двигунами нормального виконання; регулювання частоти їх обертання обмежена, як правило, чотирма ступенями.

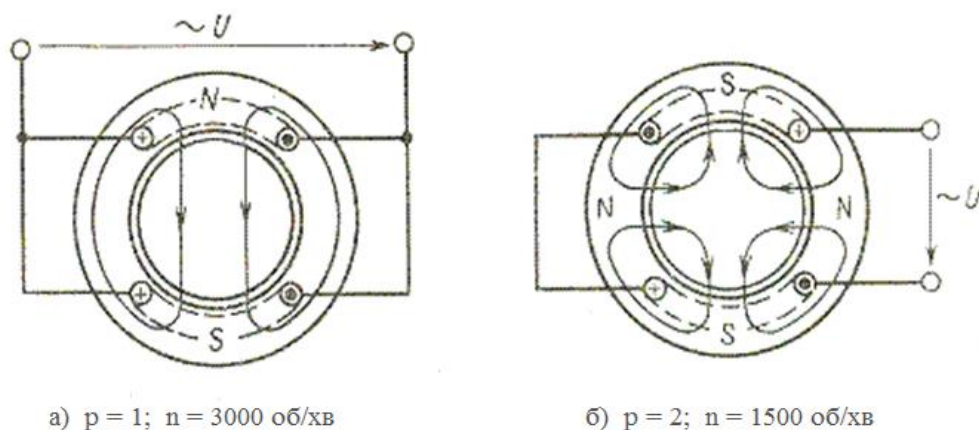


Рисунок 2.2 – Схема з'єднання і магнітне поле статора двигуна при паралельному (а) і послідовному з'єднанні (б) півобмоток.

При перемиканні числа пар полюсів змінюється і магнітний потік в зазорі, що призводить до зміни критичного моменту $M_{кр}$ (рисунок 2.3, б). Якщо при зміні числа пар полюсів одночасно змінювати і підведену напругу,

то критичний момент може залишитися незмінним (рисунки 2.3, а). Тому при цьому способі регулювання можуть бути отримані два види сімейства механічних характеристик.

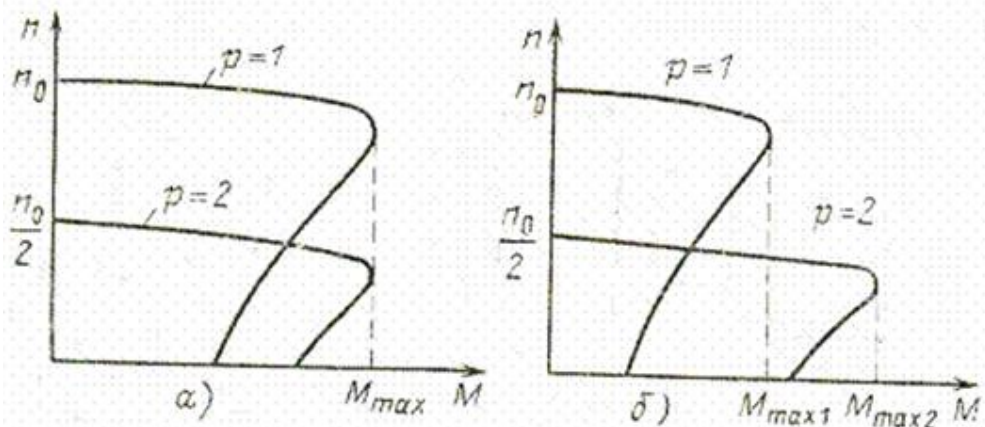


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні числа пар полюсів.

Переваги цього способу: можливість підвищувати і знижувати частоту обертання, збереження жорсткості механічних характеристик, економічність.

В даному випадку ми не можемо застосувати цей спосіб регулювання частоти, тому що на електровозі встановлені асинхронні двигуни в яких не передбачена можливість переключання числа пар полюсів, а заміна цих двигунів на нові економічно не вигідно.

2.1.3 Частотне регулювання частоти обертання АД.

Частотне регулювання потребує застосування спеціальних джерел живлення із змінною частотою. Швидкий розвиток напівпровідникової техніки робить цей спосіб регулювання все більш поширеним. Особливо важливе значення таке регулювання має для тягового електроприводу, так як плавне безступінчасте регулювання частоти f_1 дає можливість так само плавно змінювати частоту обертання двигуна n , а значить, і швидкість руху екіпажу.

В якості таких джерел живлення в даний час почали знаходити застосування перетворювачі частоти (ПЧ), що виконуються на потужних напівпровідникових приладах - тиристорах. З рівняння трансформаторної електрорушійної сили $U_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot f \cdot \Phi$ випливає, що для збереження незмінним магнітного потоку, тобто для збереження перевантажувальної здатності двигуна, необхідно разом з частотою змінювати і діюче значення

підведеної напруги. При виконанні співвідношення, критичний момент не змінюється і виходить сімейство механічних характеристик (рисунку 2.4).

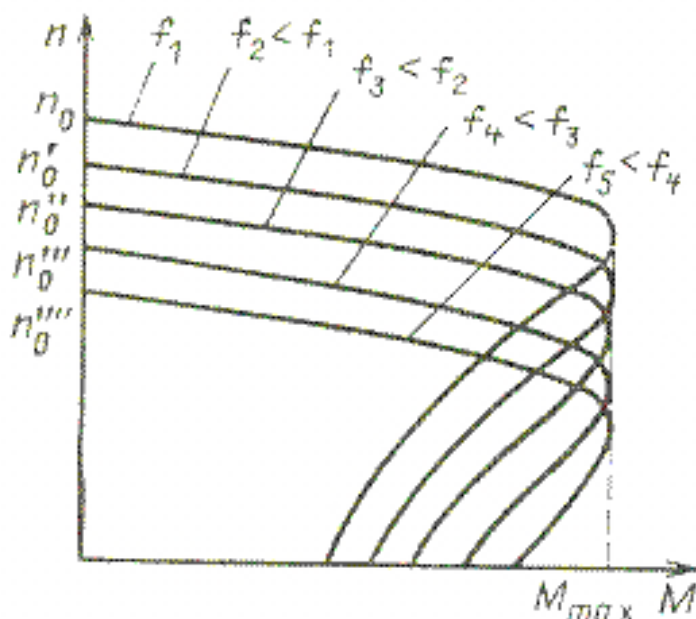


Рисунок 2.4 – Приведені механічні характеристики при частотному регулюванні.

Основний закон частотного регулювання виражений М. П. Костенко наступною формулою [4, 6]:

$$\frac{U'}{U} = \frac{f'}{f} \cdot \sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (2.4)$$

де U, f, M – номінальні діюче значення напруги, частоти та моменту асинхронного двигуна;

U', f', M' – поточні значення напруги, частоти і обертового моменту.

Переваги цього способу: плавне регулювання, можливість підвищувати і знижувати частоту обертання, збереження жорсткості механічних характеристик, економічність. Основний недолік - потрібно перетворювач частоти, тобто додаткові капітальні вкладення.

2.2 Можливі системи живлення асинхронних двигунів на електрорухомому складі змінного струму

Штатним перетворювачем власних потреб електропоїзда ЕР9М є фазоперетворювач. Маючи великий термін експлуатації, ці перетворювачі

багато раз проходили капітальний ремонт з постійно зростаючою вартістю і зниженням надійності. Через це число їх відмов при роботі збільшується щорік. Необхідно відзначити, що в цілому при дотриманні умов експлуатації фазоперетворювач представляє собою досить надійну, просту по управлінню і ремонтпридатну (за винятком пошкоджень якоря), хоча і громіздку, дорогу і шумну систему живлення допоміжних кіл електропоїзда ЭР9М. Розвиток силової напівпровідникової електроніки дозволяє вирішити проблему систем живлення допоміжних кіл електровозів змінного струму шляхом створення спеціально пристосованого статичного перетворювача.

Сучасний електрорухомий склад містить різні перетворювачі, побудовані на базі сучасних напівпровідникових приладів. Удосконалюються схеми силових, а також допоміжних кіл електрорухомого складу, в трьох напрямках: створення економічніших, надійніших і зручніших в експлуатації перетворювачів [7, 8].

В даний час можуть бути запропоновані наступні схеми живлення допоміжних кіл:

- а) безпосередньо від контактної мережі (сучасний рухомий склад постійного струму);
- б) від перетворювача фаз, що обертається (сучасний рухомий склад змінного струму);
- в) від безпосереднього перетворювача частоти (на електровозах змінного струму з асинхронними допоміжними машинами);
- г) від трифазного автономного інвертора (асинхронні машини на електровозах постійного струму);
- д) від перетворювача «автономний однофазний інвертор трансформатор - керовані випрямлячі» (на електровозах постійного струму).

Можливі інші схеми живлення допоміжних машин, не перераховані вище.

Перетворювачі в силових колах електровозів і електропоїздів використовують для наступних цілей: випрямлення змінного струму (випрямлячі), перетворення постійного струму в змінні (інвертори), імпульсного регулювання напруги (імпульсні перетворювачі), перетворення однофазного змінного струму в трифазний і зміни частоти напруги джерела живлення (перетворювачі ПЧФ). Всі ці перетворювачі виконані на напівпровідникових приладах (діодах і тиристорах). За типом використання напівпровідникових приладів перетворювачі підрозділяють на діодні, діодно

						Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- тиристорні і тиристорні, за системою охолодження діодів і тиристорів з примусовим і природним охолодженням.

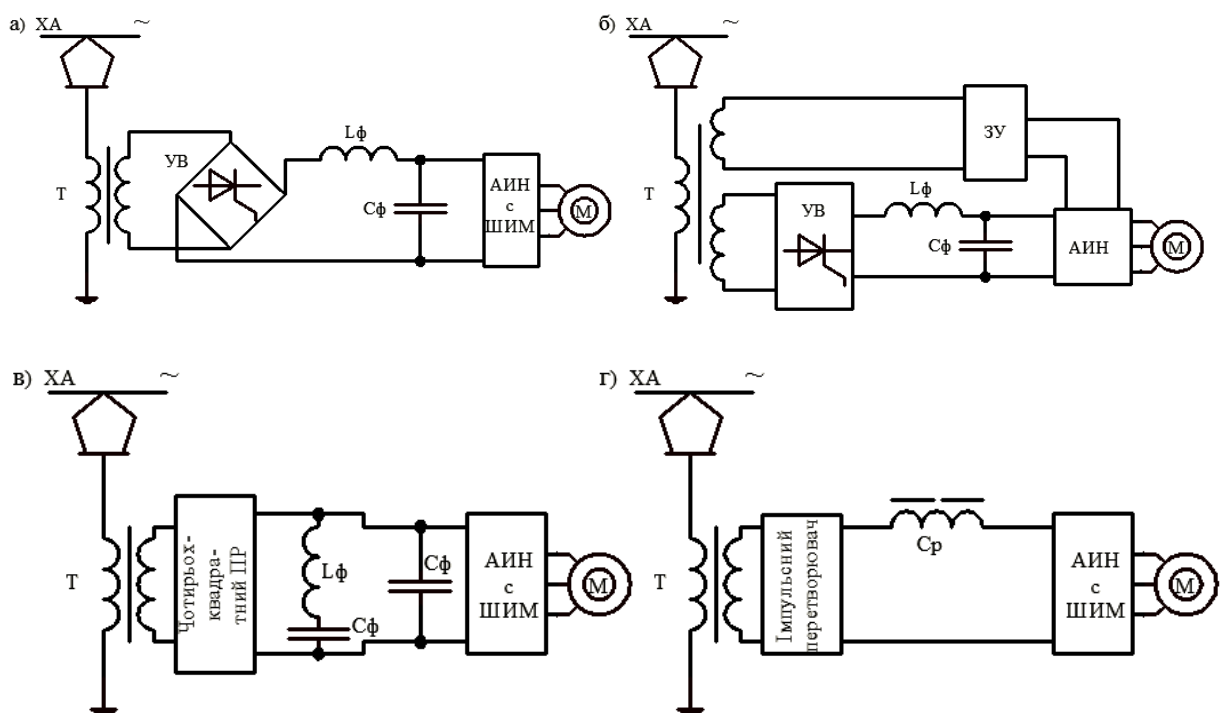
Для електрорухомого складу змінного струму система живлення асинхронних двигунів виконується зазвичай з проміжною ланкою випрямленого струму [7–9].

Можливі системи живлення асинхронних двигунів приведені на рисунку 2.5 [10].

Перетворювач частоти, який виконується з проміжною ланкою постійного струму, складається з однофазного випрямляча, згладжувального фільтра і трифазного АІН. Причому тут може бути використаний як АІН з ШІМ (рисунок 2.5, а), АІН з амплітудним способом регулювання напруги (АР) (рисунок 2.5, б), так і автономним інвертором струму. В системі, представлений на рисунку 2.5б, передбачене спеціальний пристрій підзарядки комутуючих конденсаторів (ЗП).

Якщо не передбачене рекуперативне гальмування, в системі, яка зображена на рисунку 2.5а, можна застосувати некерований випрямляч.

В якості перетворювачів частоти можуть бути використані автономні інвертори напруги і автономні інвертори струму [10–11].



Керований випрямляч (КВ), фільтр (L_{ϕ} , C_{ϕ}), автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), асинхронний двигун (АД) (а); керований випрямляч (КВ), фільтр (L_{ϕ} , C_{ϕ}), автономний інвертор напруги (АІН), асинхронний двигун (АД) (б); чотирихкватратний

перетворювач, фільтр (L_{ϕ} , C_{ϕ}), автономний інвертор напруги (АІН), асинхронний двигун (АД) (Γ); імпульсний випрямляч, згладжувальний випрямляч (C_p), автономний інвертор струму (АІТ), асинхронний двигун (АД).

Рисунок 2.5 - Можливі системи живлення асинхронних двигунів

Автономні інвертори струму характеризуються своєю відносною простотою (він має всього 6 тиристорних плечей) і відсутністю допоміжних комутуючих тиристорів. В колі АІС не потрібен фільтровий конденсатор і на вході АІС достатньо ввімкнути згладжувальний конденсатор C_p . Так перевагою АІС є можливість використання тиристорів з відносно великим часом включення, як мають більш високий клас по напрузі.

Загальним для всіх АІС недоліком являється наявність вхідного дроселя з великою індуктивністю, інтенсивний енергообмін між великим числом накопичувачів енергії, складність регулювання струму внутрішніми засобами.

В якості автономних інверторів напруги можуть бути застосовані інвертори з широтне-імпульсною модуляцією (АІН з ШІМ рисунок 2.5, в) і автономні інвертори з амплітудним регулюванням напруги (АІН з АР).

Для АІН з ШІМ частота комутації тиристорів (з розрахунку на одну фазу) максимальна в режимі виходу на номінальну частоту струму статора АД $f_{1н}$ і зазвичай складає біля $(3-6) f_{1н}$. Це вимагає застосування тиристорів з малим часом виключення, які мають невисокий клас по напрузі. Останній чинник супроводжується збільшенням числа послідовно включених тиристорів в плечі і зниженням к.к.д. перетворювача.

На вітчизняних електровозах застосований АІН з АР, де на АІН покладена тільки задача регулювання частоти, а регулювання напруги здійснюється в ланці випрямляча. Найбільша частота комутацій у такому інверторі дорівнює найбільшій частоті струму статора f_{1max} , що значно нижче ніж в АІН з ШІМ. Проте для досягнення високої комутаційної здатності при регулюванні вхідної напруги АІН повинен мати пристрій підзарядки (ЗП) комутуючого конденсатора від додаткового джерела.

Робота АІН в режимі холостого ходу неможлива із-за великих струмів перезарядки конденсаторів, а робота при перевантаженнях утруднена за рахунок зменшення часу існування зворотної напруги на тиристорі, який вимикається.

						Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.3 Структурні схеми статичних перетворювачів сучасного ЕРС

2.3.1 Варіанти структурних схем перетворювачів частоти та кількості фаз для живлення асинхронних тягових двигунів.

Для подання електронних пристроїв і їх вузлів застосовуються три основні типи схем: принципова, структурна, функціональна.

Розрізняються ці три види схем своїм призначенням і, найголовніше, ступенем деталізації зображення пристрою.

Принципова схема – це найбільш докладна схема. Вона обов'язково показує використані елементи і всі зв'язки між ними. Принципова схема повинна дозволити повністю відтворити пристрій на ній зображений. Позначення принципової схеми жорстко стандартизовані, відхилення від стандартів не допускається. До принциповій схемі додається перелік.

Структурна схема – це найменш детальна схема. Вона призначена для відображення загальної структури пристрою, тобто його основних блоків, вузлів, частин і головних зв'язків між ними. З структурної схеми має бути зрозуміло, навіщо потрібно даний пристрій, і що воно робить в основних режимах роботи, як взаємодіють його частини. Позначення структурної схеми можуть бути досить довільними, з використанням загальноприйнятих позначень. З розробки структурної схеми, як правило, починається проектування складного електронного пристрою.

Функціональна схема – це гібрид структурної і принципової схем. Функціональна схема дозволяє зрозуміти всю логіку роботи пристрою, всі його відмінності від інших подібних пристроїв, але не дозволяє без додаткової самостійної роботи відтворити цей пристрій. На функціональній схемі найбільш прості блоки, вузли, частини пристрою відображаються на ній як на структурній схемі, інші – як на принциповій схемі.

У технічній документації обов'язково наводиться структурна або функціональна схема, а також обов'язково принципова схема зі специфікацією. У наукових статтях і книгах найчастіше обмежуються структурної або функціональної схемою, приводячи принципову тільки деяких вузлів.

Огляд можливих варіантів побудови силових кіл перетворювальних пристроїв для ЕРС дозволяє виявити можливі структури перетворювачів. До цього моменту ми розглядали принципи дії електричних схем статичних перетворювачів, їх властивості, використання для конкретного випадку. Звичайно, розробка того чи іншого перетворювача починається з вибору

						Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

конкретної структури. Однак, вивчення структур без знання конкретних схем недоцільне. Це вимагає більшого часу.

Після освоєння виробництва швидкодіючих напівпровідникових приладів великої одиничної потужності та мікропроцесорів з високою продуктивністю побудова електровозів з асинхронним тяговим двигуном є задачею, яка реальна, перспективна і вже вирішена.

На рис. 2.6 показані можливі варіанти силових схем статичних перетворювачів електричної енергії для магістральних електровозів [12].

Виходячи з цієї структурної схеми можна зробити висновок, що при використанні асинхронних тягових двигунів можливі 16 варіантів схем.

Розглянемо варіанти, які вже використовувалися, або перспективність використання тих чи інших можливих варіантів.

Встановлено, що на цей момент використання автономних інверторів струму (АІС) в сучасному електровозобудуванні є не доцільним [7, 8], тому відразу можна відмовитися від розглядання 8 варіантів в яких вихідним блоком є АІС.

Живлення від мережі постійного струму.

У відповідності до загальної структурної схеми можливі три варіанти: пряме від мережі, імпульсний регулятор тяги, імпульсний регулятор тяги та рекуперації.

Пряме живлення цілком зрозуміло. Імпульсні регулятори використовуються ще й досі. Однак для нового ЕРС, що проектується вже прийнятна структура прямого живлення від контактної мережі постійного струму.

Імпульсні регулятори є ідентичною системою, яка використовувалася для ЕРС постійного струму з колекторними двигунами (наприклад, електропоїзди ЕР12, ЕР200). Використання в ЕРС з АТД пояснюється необхідністю на вході АІН мати стабільну напругу, наприклад, нижній рівень 2,2 кВ. Тобто імпульсний регулятор виконував стабілізацію напруги в режимі тяги та повернення енергії до мережі під час гальмування. До такоко ЕРС можна віднести двохсистемний електровоз ЕП10, електропоїзд ЕД6 та інші [12, 13]. На цей час використовуються більш складні системи управління перетворювачами, які дозволяють виключити цю ланку зі структури та зменшити втрати потужності, тобто використовувати пряме включення АІН до контактної мережі.

Живлення від мережі змінного струму.

						Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 варіант. Випрямляч з секторним регулюванням – АІН. Схема використовувалася на одній експериментальній секції електровоза ВЛ80-238. Секція мала ступеневу (32 позиції) високовольтне регулювання напруги, далі змінний однофазний струм перетворювався в постійний в випрямних установках, а далі в змінний трифазний допомогою інверторів напруги.

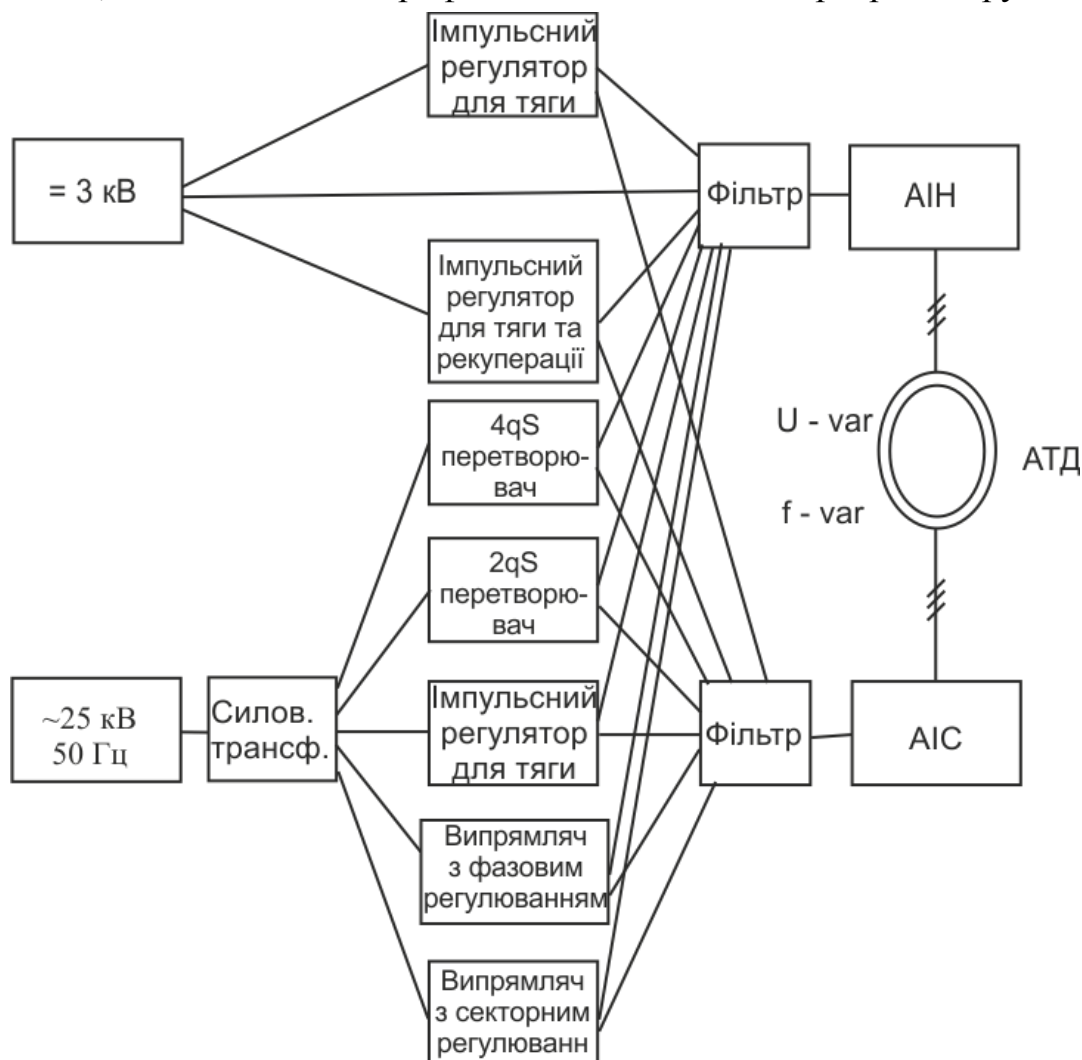


Рисунок 2.6 – Варіанти структурних схем перетворювачів частоти та кількості фаз для живлення АТД.

2 варіант. Випрямляч з фазовим регулюванням – АІН. Використовувалося на електровозі ВЛ80А. На даному електровозі регулювання вихідної плавне зонно-фазове (по 7 зонам). Перетворення в трифазну напругу здійснювалося в автономних інверторах напруги – по одному на кожен тяговий двигун. Однак недосконалість наявної в той час силової електронної бази призвело до згорання заводом робіт з досліджень.

3 варіант. Імпульсний регулятор для тяги – АІН. Відомості про дослідження відсутні.

4 варіант. 2qS – АІН. За відсутністю можливості забезпечення режиму рекуперації варіант не є доцільним.

5 варіант. 4qS – АІН. Основний на цей час варіант структури ЕРС під час живлення від мережі змінного струму. Перший вітчизняний електровоз за цією структурою – ВЛ86Ф, який не випускався серійно. З ЕРС які використовуються на залізницях України за такою структурою побудовано перетворювач електровозу ДСЗ, міжрегіональних двохсистемних електропоїздів Hyundai Rotem та Skoda Vagonka.

2.3.2 Структурні схеми джерел живлення допоміжних кіл.

Види допоміжних кіл та машин.

До допоміжних на ЕРС відносяться наступні кола: допоміжних машин (мотор-вентилятора, мотор-компресора, мотор-генераторів та ін.); електроопалення; джерел живлення кіл управління; освітлення та сигналізації; управління допоміжним обладнанням.

Допоміжними машинами на ЕРС називають агрегати, які складаються з допоміжної машини (вентилятор, компресор, насос) та приводного електродвигуна. До допоміжних машин відносяться машинні перетворювачі струму: мотор-генератори, подільники напруги (динамотори), перетворювачі фаз (розчеплювачі).

На більшості ЕРС постійного струму країн СНД у якості перетворювачів власних потреб на цей час в основному застосовуються малоефективні електромашинні перетворювачі та двигуни постійного струму високої напруги (3 кВ), які мають наступні недоліки:

- наявність обертових елементів і колекторно-щіткового вузла, що обумовлює низьку надійність і високі витрати на проведення ремонту й обслуговування;
- низький загальний ККД електромеханічного перетворення енергії;
- складність забезпечення живлення від декількох значень напруг і родів струму контактної мережі;
- високі масо-габаритні показники, які не дозволяють продуктивно використовувати кузовний або підвагоний простір.

На ЕРС змінного струму використовуються двигуни постійного струму (до низької напруги 220 В), які отримують живлення від напівпровідникових випрямлячів та асинхронні короткозамкнені двигуни. Асинхронні двигуни виконуються конденсаторними для прямого включення

						Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

до однофазної обмотки трансформатора, або трьохфазними для живлення від розчеплювача фаз.

Виходячи з умови безпеки руху поїздів і безвідмовної роботи силового обладнання (тяговий трансформатор, тягові двигуни, гальмівне обладнання, пневматичне обладнання ланцюгів управління) система допоміжних машин є важливою ланкою в загальному комплексі обладнання рухомого складу. Надійність приводу допоміжних машин і механізмів має велике значення і необхідна для забезпечення нормальної роботи основних вузлів електровоза.

На сьогоднішній день економне використання енергоресурсів один із пріоритетних напрямків в економічній політиці України. В сучасних умовах інтенсифікації роботи об'єктів залізничного транспорту, коли основний обсяг перевезень здійснюється на електрифікованих ділянках залізниць, призводить до підвищення енергоспоживання. З огляду на високі тарифи на електроенергію, галузева політика державної адміністрації залізничного транспорту України передбачає перехід до енергозберігаючих технологій і ефективного зниження втрат електроенергії. Ця проблема вирішується на ЕРС нового покоління впровадженням статичних перетворювачів електричної енергії.

Статичні перетворювачі у порівнянні з електромашинними мають наступні переваги:

- відсутність механічних частин обертового типу, що значно підвищує надійність системи;
- використання височастотного способу перетворення енергії, який дозволяє значно знизити масу мідних провідників, залізних магнітопроводів, а також забезпечити гальванічний розв'язок між вхідною високовольтною напругою мережі живлення та вихідною напругою кіл живлення власних потреб рухомого складу;
- можливість живлення статичного перетворювача власних потреб від декількох видів струму за рахунок схемотехнічних рішень;
- для забезпечення високої ремонтпридатності використовується спосіб побудови конструкції у вигляді блоків та з мікропроцесорною системою діагностики;
- можливість компанувати блоки в ящику під вагонами при застосування на моторвагонному рухомому складі, завдяки чому, простір під вагонами використовується більш продуктивно.

						Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Структурна схема для ЕРС постійного струму.

На сучасному ЕРС постійного струму з асинхронними тяговими двигунами в якості допоміжних машин перевага віддається також трифазним асинхронними машинам. Для живлення таких машин необхідна трифазна система напруг. Ця особливість враховується під час вибору та проектування статичних перетворювачів для такого ЕРС.

Для отримання змінної напруги на електрорухомому складі постійного струму можливі два шляхи:

1) використання традиційної схеми, яка складається з двигуна послідовного збудження 3 кВ до валу якого приєднано синхронний генератор;

2) використання трифазного автономного інвертора напруги, що приєднується до напруги контактної мережі, та формує трифазну напругу на асинхронному двигуні.

Перший варіант використовується на електропоїздах ЭР2Р, ЭР2Т, ЕПЛ2Т. До недоліків цього варіанту відносимо наявність обертових машин.

Узагальнена структурна схема статичних перетворювачів сучасного ЕРС постійного струму представлена на рис. 2.7.

Розглянемо структурні вузли структурної схеми (див. рис. 2.7). Вхідним перетворювачем є автономний інвертор напруги АІН1. Виконує задачу перетворення напруги контактної мережі в змінну. Може бути стабілізованим, тобто виконувати стабілізацію діючого значення напруги в залежності від коливань напруги контактної мережі, може бути не стабілізованим. Найчастіше в якості інвертора використовується однофазний АІН за мостовою схемою. Це пояснюється тим, що необхідно застосовувати напівпровідникові ключі в плечах АІН високого класу за напругою, які також мають значний струм. Тому при виборі між трифазним варіантом та однофазним перевага віддається останньому, що дає більше використання ключів за струмом. АІН1 може бути виконано за каскадним включенням, тобто з послідовно з'єднаних декількох мостових схем для зниження класу напруги ключів, як це зроблено на електровозі ВЛ11М6. Може бути використано схему півмостову, як на електровозі ДЕ1. Навантаженням є трансформатор ТР1, до виходу якого приєднано випрямляч В1, який може бути нестабілізованим, якщо стабілізація напруги виконується в АІН1, або стабілізованим.

						Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Виходом випрямляча В1 є проміжна шина постійного струму 550 В. Причиною вибору такої напруги є необхідність приєднання до цієї шини перетворювачів частоти та кількості фаз АІН4...АІНп, які формують трифазне живлення приводів компресора, вентиляторів та ін., а саме такий рівень напруги є необхідним для нормального управління АД під час використання частотних принципів регулювання швидкості.

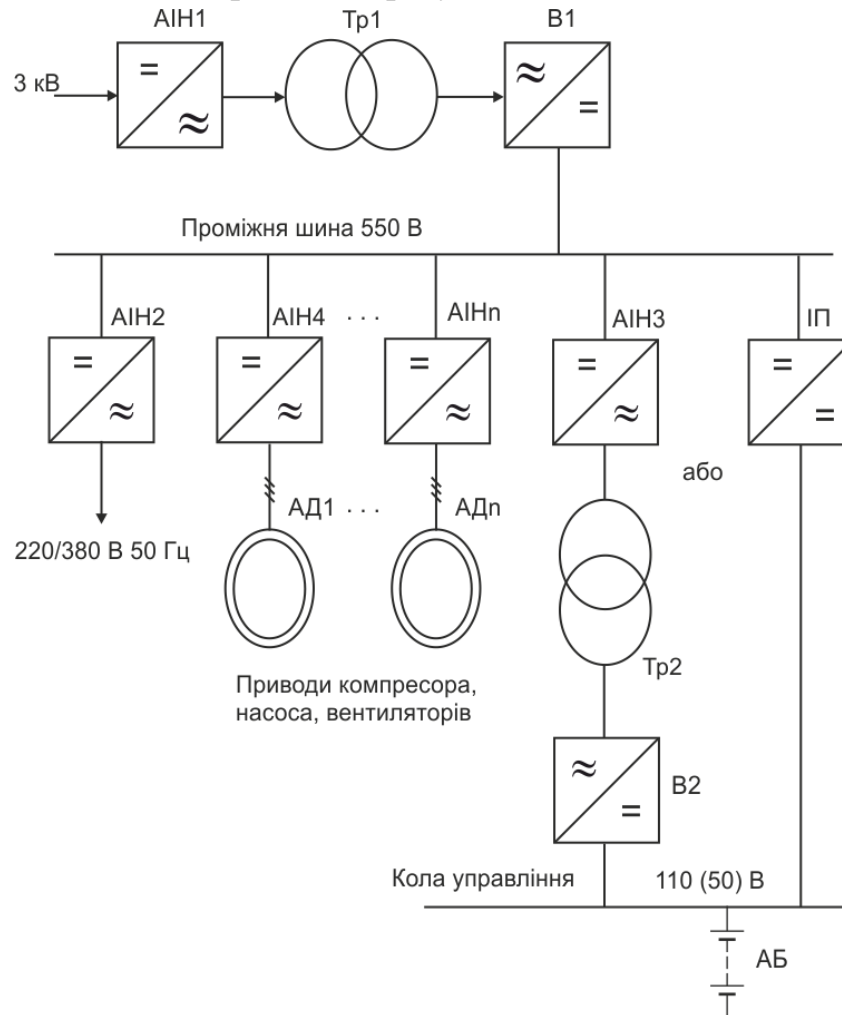


Рисунок 2.7 – Структурна схема статичних перетворювачів допоміжних кіл сучасного ЕРС постійного струму.

Схема живлення асинхронних допоміжних машин за допомогою автономного трифазного інвертора має наступні переваги в порівнянні із традиційною схемою:

а) менша встановлена потужність допоміжних машин (мотор – компресора, мотор – вентилятора й ін.) через відсутність коливань напруги на них і, зокрема, спадання напруги до мінімальної величини, що є звичайною причиною збільшення потужності приблизно на 15...20% у

допоміжних машин, установлюваних на сучасному електрорухомому складі змінного струму;

б) можливість установки стандартних машин загальнопромислового призначення;

в) можливість підвищити надійність роботи, зменшити габарити, вартість;

г) поліпшені умови експлуатації машин, зв'язані зі стабільністю напруги на них, тому що ні колювання, ні кидки напруги на них практично не можливі через наявність вхідного й вихідного фільтрів перетворювача або керованого випрямляча, що стабілізує напругу на вході автономного інвертора;

д) можливість автоматичного пуску допоміжних машин при стабілізації пускового струму, а також можливість регулювання швидкості обертання мотор – вентилятора у функції нагріву тягових двигунів.

Другим споживачем є так звані системи сервісу, яким необхідна змінна однофазна напруга 220/380 В 50 Гц (холодильник, кондиціонер тощо). Найчастіше на цю напругу випускаються зараз різні обігрівачі.

Наступним споживачем є кола управління 110 (50) В постійного струму та акумуляторна батарея. Можливе два варіанти. Перший варіант це використання АІНЗ, трансформатора Тр2, випрямляча В2. Другий варіант використання імпульсного перетворювача ІП знижуючого типу (наприклад ВЛ11М6, ДЕ1). Рішення обговорюється під час формування технічного завдання на проектування електровозу.

Структурна схема для ЕРС змінного струму.

На новому ЕРС джерелом живлення кіл власних потреб є стабілізована шина високої напруги, яка утворена некерованим випрямлячем з широтно-імпульсною модуляцією (4qS-перетворювач). Напруга цієї шини часто нижча ніж напруга контактної мережі постійного струму. Структурна схема перетворювача представлена на рис. 2.8.

На структурній схемі статичних перетворювачів допоміжних кіл сучасного ЕРС змінного струму показано наявність 4qS-перетворювача. Повна структура цього блоку не показана оскільки це розглядалося раніше. Зрозуміло, що під цим блоком мається на увазі і присутність тягового трансформатора, випрямляча, захисних кіл тощо. 4qS-перетворювач виконує живлення АІН тягових двигунів (на схемі не показано) та АІН1 допоміжних кіл. Як і у випадку з ЕРС постійного струму АІН1 високочастотний, подає

						Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

напругу на вхід трансформатора. У випадку ЕРС змінного струму, коли напруга пліч нижча, а струм більший, виробники йдуть за шляхом використання трифазних АІН.

Інші блоки ідентичні за схемою для ЕРС постійного струму.

Слід зауважити, що показані структурні схеми статичних перетворювачів допоміжних кіл ЕРС постійного та змінного струмів не є остаточними.

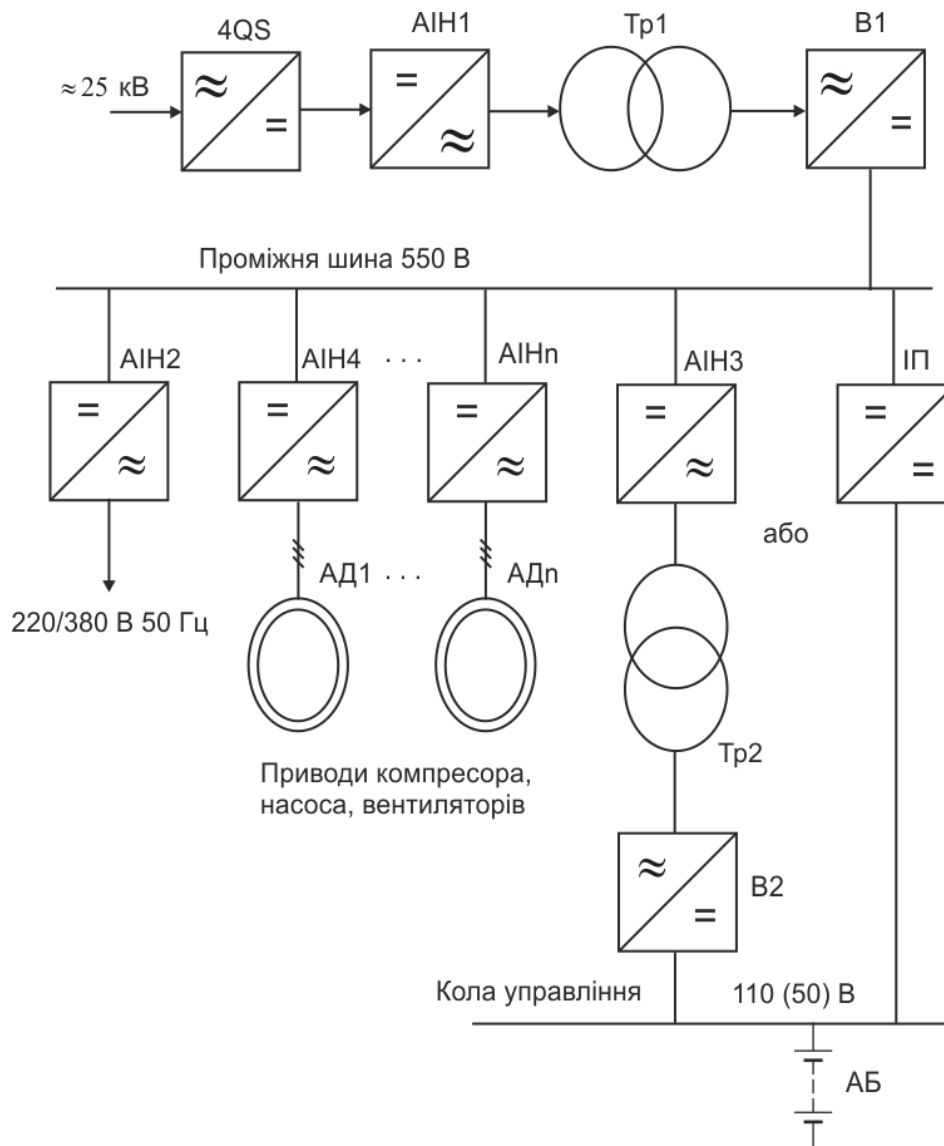


Рисунок 2.8 – Структурна схема статичних перетворювачів допоміжних кіл сучасного ЕРС змінного струму.

Структурна схема статичних перетворювачів допоміжних кіл сучасного ЕРС подвійного живлення не відрізняється від ЕРС змінного струму. Різниця полягає лише у приєднанні до входу АІН1 напруги (від 4qS-перетворювача або від мережі постійного струму).

Враховуючи сказане, а також специфіку електроприводу (важкі пуски, широкий діапазон зміни частоти і так далі), на електрорухомому складі змінного струму і тепловозах в основному застосовані автономні інвертори напруги. Замість 4qS-перетворювача використовуємо 2qS-перетворювач, оскільки режим рекуперації від приводів компресорів, вентиляторів та насосів не є можливим. Достатньо лише підвищення напруги, що продиктоване низькою напругою вторинної обмотки трансформатора, та високою напругою на вході автономних інверторів трифазної мережі.

Структурна схема перетворювача представлена на рисунку 2.9.

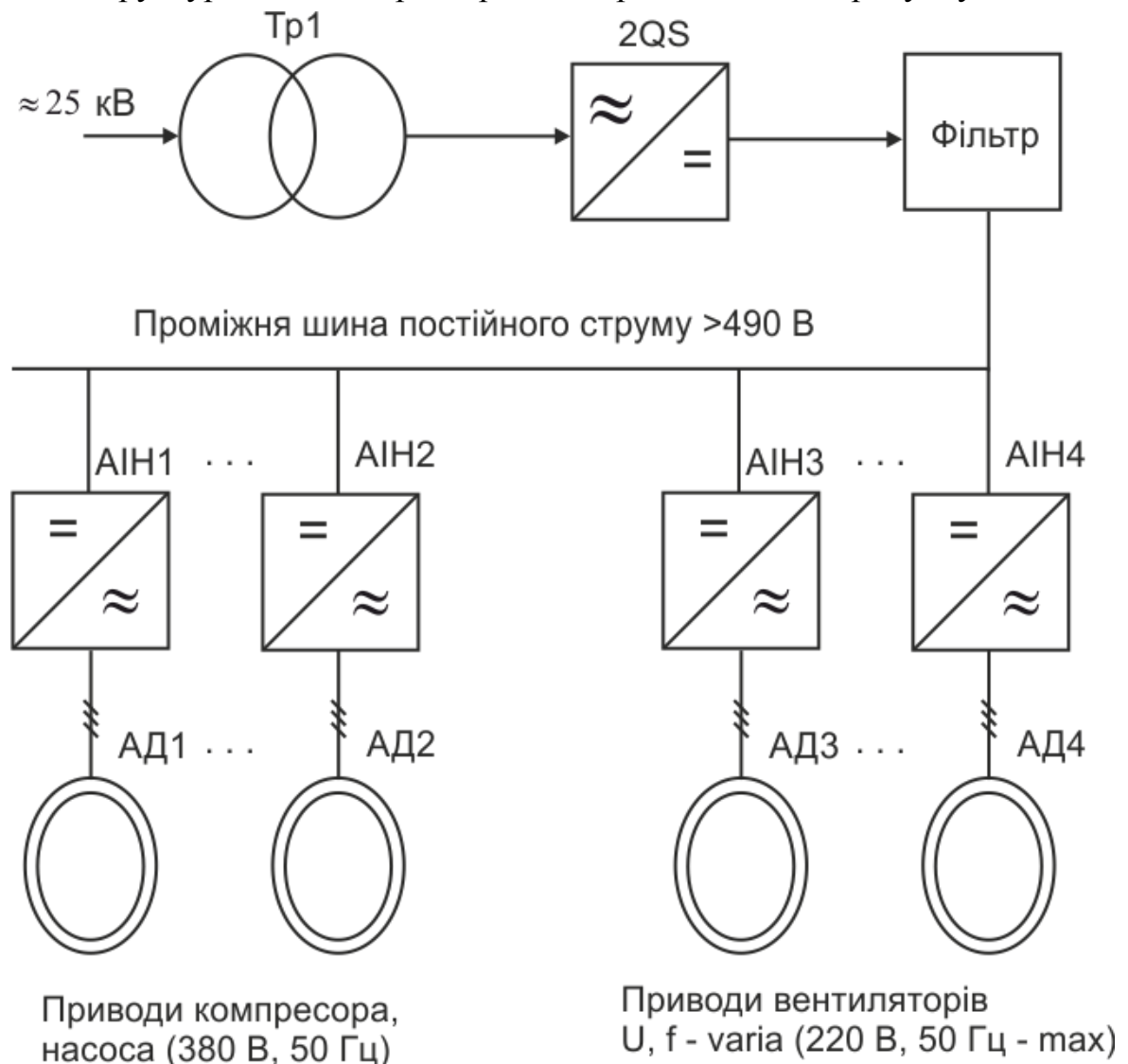


Рисунок 2.9 – Структурна схема перетворювача.

3 ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1 Розрахунок автономного трифазного інвертора напруги 380 В.

Інвертування – це перетворення енергії постійного струму в енергію змінного струму при заданій вихідній напрузі або струмі та частоті.

В залежності від характеру навантаження такі перетворювачі можуть стабілізувати вихідну напругу або потужність, можуть змінювати за заданим законом частоту вихідного сигналу для регулювання кількості оборотів двигуна змінного струму.

Вихідний сигнал інвертора звичайно містить багато гармонічних складових. Їх набір може змінюватися шляхом використання фільтрів або широтно-імпульсної модуляції.

Найбільш широке використання в тягових електроприводах залізничного транспорту знайшли трьохфазні мостові схеми автономних інверторів.

Трифазні автономні інвертори напруги призначені для живлення трифазних споживачів (звичайно асинхронних та синхронних двигунів).

Схема живлення асинхронних допоміжних машин за допомогою автономного трифазного інвертора має наступні переваги в порівнянні із традиційною схемою:

а) менша встановлена потужність допоміжних машин (мотор – компресора, мотор – вентилятора й ін.) через відсутність коливань напруги на них і, зокрема, спадання напруги до мінімальної величини, що є звичайною причиною завищення потужності приблизно на 15...20% у допоміжних машин, установлюваних на сучасному електрорухомому складі змінного струму;

б) можливість установки стандартних машин загальнопромислового призначення;

в) можливість підвищити надійність роботи, зменшити габарити, вартість;

г) поліпшені умови експлуатації машин, зв'язані зі стабільністю напруги на них, тому що ні коливання, ні кидки напруги на них практично не можливі через наявність вхідного й вихідного фільтрів перетворювача або

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керованого випрямляча, що стабілізує напругу на вході автономного інвертора;

д) можливість автоматичного пуску допоміжних машин при стабілізації пускового струму, а також можливість регулювання швидкості обертання мотор – вентилятора у функції нагріву тягових двигунів.

Принципова схема трифазного мостового інвертора напруги представлена на рисунку 3.1.

Схема складається з шести транзисторних ключів, які утворюють міст, шести зустрічно ввімкнених діодів, які з'єднані за схемою трифазного моста та виконують функцію діодів зворотного струму. Схема керується від системи управління, яка забезпечує перемикання транзисторних ключів за заданим алгоритмом зі станом провідності необхідної тривалості. Частота вихідної напруги визначається системою управління шляхом зміни тривалості циклу переключення транзисторних ключів. Транзистори та діоди трьох фаз *a*, *b*, *c* утворюють парну та не парну групи. Система управління та пристрій формування імпульсу на затворах транзисторів в схемі рисунка 3.1 не показані.

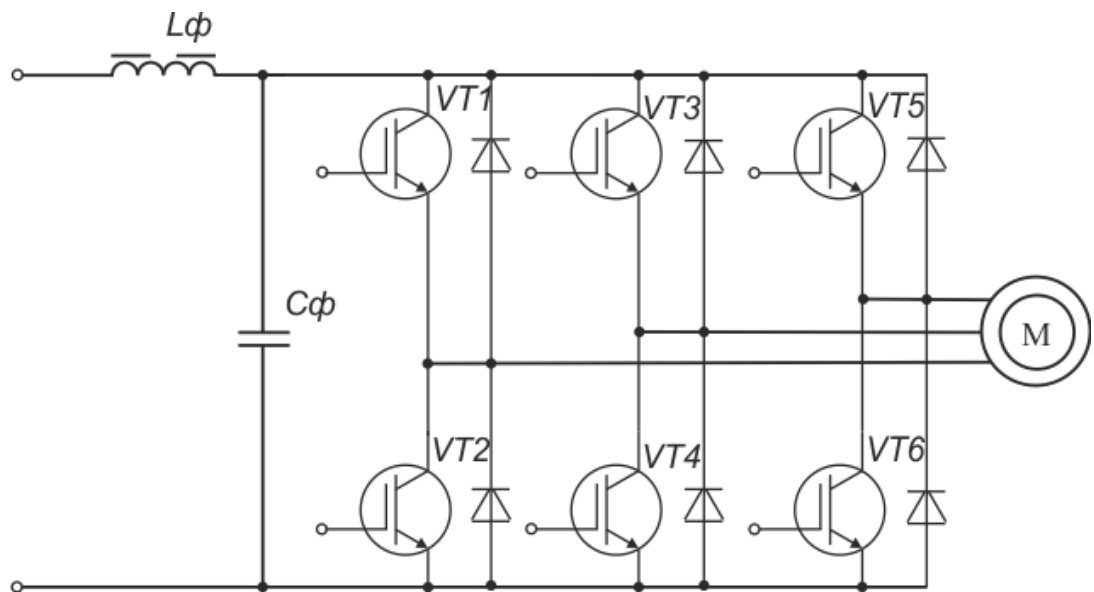


Рисунок 3.1 – Трифазний автономний інвертор напруги по мостовій схемі

Транзистори парної та не парної груп можуть переключатися по різноманітним алгоритмам: з однократним чи багатократним перемиканням на інтервалі одного періоду вихідної напруги. При однократному

перемиканні в періоді кут провідного стану транзисторів може дорівнювати 180, 150, 120 електричних градусів [7, 8, 11, 14].

Алгоритми багато імпульсної модуляції, з яких найбільше використання знаходять широтно-імпульсна модуляція з формуванням огинаючої у вигляді прямокутника, трапеції та синусоїди. Прямокутна модуляція зветься широтно-імпульсним регулюванням (ШІР). На інтервалі одного півперіоду вихідної напруги транзистори інвертора вмикаються та вимикаються багатократно з частотою, яка перевищує основну частоту деяку кількість разів. Подібний спосіб регулювання використовується у разі живлення автономних інверторів напруги від нерегульованого джерела напруги. Інвертор, таким чином виконує дві функції: зміну частоти та рівня вихідної напруги. Існує велика кількість алгоритмів широтно-імпульсного регулювання [14], які відрізняються частотою та порядком перемикання ключів. Для трифазної мостової схеми призначений алгоритм, який базується на алгоритмі з тривалістю провідного стану транзисторів 180 ел. град., який використовується автономним інвертором напруги (АІН) з амплітудною модуляцією.

До переваг АІН з ШІР у порівнянні з амплітудною модуляцією відносяться:

- можливість живлення АІН від джерела не стабільної напруги;
- незалежність напруги на комутуючих конденсаторах від вихідної частоти внаслідок незмінності живильної напруги та обумовлена цим стабільність процесу штучної комутації однеопераційних тиристорів;
- згладжу вальний дросель у колі постійного струму не потрібен унаслідок малих коливань випрямленого струму;
- ємність конденсатора фільтра набагато менша.

Сфера застосування АІН з ШІР обмежується досить потужними електроприводами з неглибоким регулюванням швидкості та не високою швидкодією.

Таким чином, виходячи з попереднього розділу, в якому запропонована функціональна схема, автономний інвертор напруги з широтно-імпульсним регулюванням прийнятний для виконання поставленої мети. Коло постійного струму передбачається не стабільним в зв'язку з нестабільністю мережі та необхідністю обмежувати заряд акумуляторної

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

батареї, то ця нестабільність може виправлятися саме за рахунок цього алгоритму.

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

						Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 широтно-імпульсного регулювання.

Розрахунок виконуємо за методикою, яка запропонована в [14]. 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

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

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.

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

$$I_{\partial n} = \lambda_I I_{1\phi}^H, \quad (3.2)$$

де λ_I – кратність пускового струму;

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

$$I_{1\phi}^{\text{ном}} = \frac{P_1}{3U_{1\phi}^H \cos\varphi_n}, \quad (3.3)$$

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.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{VS} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 + \cos\varphi_H), \quad (3.4)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 - \cos\varphi_H). \quad (3.5)$$

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

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

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

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\partial n} \cos\varphi_H, \quad (3.7)$$

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

Середній номінальний струм на вході автономного інвертора напруги

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

Найбільша середня вхідна напруга, що визначає напругу на ключах

$$U_{d0} = \frac{\pi}{\sqrt{2}\sqrt{3}} U_d^{\text{ном}}, \quad (3.9)$$

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

$$U_d^{\text{ном}} = \frac{3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos\varphi_H}{I_{d\text{ном}}}, \quad (3.10)$$

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

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

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діоди

$$U_{VS} \geq U_{d0} k_3 U, \quad (3.11)$$

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

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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 [15]:

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.

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;

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тип корпусу ТО247АС.

3.2 Розрахунок автономного трифазного інвертора напруги 220 В.

Причиною окремого розрахунку автономних інверторів напруги є необхідність саме в рівнях напруг 380 та 220 В. Приводи вентиляторів на основі асинхронних двигунів АОМ32-4 та АОМ22-2 отримують живлення від мережі 220 В та не передбачають заміну відповідно до завдання. Привід насоса трансформатора, про який велося раніше, дозволяє живлення від 220 та 380 В, а привід нового компресора лише 380 В.

Напругу проміжної мережі живлення постійним струмом інвертора приймаємо 490 В, що відповідає вимогам попереднього розрахунку, коли використовувався АІН з амплітудноімпульсною модуляцією 180 град. ел.

Для формування системи напруг 220 В вибираємо алгоритм широтно-імпульсної модуляції.

Вибір параметрів силових елементів автономного інвертора напруги з ШІМ модуляцією.

Необхідна для забезпечення заданого рівня напруги на виході АІН із заданою напругою входу глибина модуляції [14]

$$\mu = \frac{k_{\text{ВН}} U_d}{\sqrt{2} U_{\text{дн}}}, \quad (3.12)$$

де $U_{\text{дн}}$ – номінальна напруга двигуна лінійна;

$k_{\text{ВН}} = 0,5$ – коефіцієнт використання напруги при вертикальному керуванні;

U_d – напруга проміжної ланки постійного струму.

$$\mu = \frac{0,5 \cdot 490}{\sqrt{2} \cdot 220} = 0,787.$$

Найбільше значення середнього вхідного струму

$$I_d = 3\sqrt{2}\mu k_{\text{ВН}} I_{\text{дп}} \cos \varphi_{\text{н}}, \quad (3.13)$$

де $I_{\text{дп}}$ – пусковий струм (для АОМ32-4 – 53 А, для АОМ22-2 – 31 А).

Розрахунок виконуємо для більш потужного приводу на основі двигуна для АОМ32-4.

$$I_d = 3\sqrt{2} \cdot 0,787 \cdot 0,5 \cdot 53 \cdot 0,88 = 99 \text{ А.}$$

Середній струм ключів та діодів

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{VT} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos\varphi_H \right); \quad (3.14)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos\varphi_H \right); \quad (3.15)$$

$$I_{VT} = \frac{99}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{0,787 \cdot \pi}{4} \cdot 0,88 \right) = 34 \text{ A};$$

$$I_{VD} = \frac{99}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{0,787 \cdot \pi}{4} \cdot 0,88 \right) = 10 \text{ A}.$$

Ємність конденсатора на вході АІН з ШІМ

$$C \geq \frac{\sqrt{3}\mu I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}f_M \Delta U_d} \sin^2 \frac{\varphi_H - \frac{\pi}{6}}{2}, \quad (3.16)$$

де ΔU_d – допустимі коливання випрямленої напруги на вході автономного інвертора. Приймаємо $\Delta U_d = 0,05U_d = 0,05 \cdot 490 = 24,5 \text{ В}$;

f_M – частота модуляції. Приймаємо $f_M = 400 \text{ Гц}$;

$\varphi_H = \arccos(0,88) = 28,3 \text{ град. електричних.}$

$$C \geq \frac{\sqrt{3} \cdot 0,787 \cdot 99}{\sqrt{2} \cdot 400 \cdot 24,5} \sin^2 \frac{28,3 - 30}{2} = 0,000002142 \text{ Ф.}$$

Приймаємо ємність конденсатора відповідно стандартного ряду E12 2,4 мкФ [16].

Обираємо IGBT- модуль типу IRGP20B120UD-E 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, А40;
структура N-канал+діод;
напруга насичення при максимальному струмі, В..3,05;
напруга управління, В15;
максимальна потужність, Вт300;
максимальна частота переключень, кГц30;
діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$ -55...150;
тип корпуса TO247AD.

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою уніфікації елементної бази, яка використовується на ЕРС в якості інвертора для формування напруг асинхронного двигуна АОМ22-2 приймаємо такі самі транзистори.

3.3 Розрахунок некерованого випрямляча з широтне-імпульсною модуляцією.

В основі системи випрямлення для живлення мережі постійного струму 490 В приймаємо відому схему 4QS перетворювача, яка широко використовується на сучасному ЕРС в якості тягових перетворювачів під час живлення від мережі змінного струму[7, 12, 13, 17]. Схема перетворювача подана на рис. 3.2.

Транзистори VS1–VS4 та діоди VD1–VD4 утворюють схему чотириквadrантного перетворювача, яка приєднана до джерела змінної напруги e_m через дросель погодження L_M . Індуктивність L_M сприймає різницю напруги e_m та u_1 на вході перетворювача. В коло постійної напруги ввімкнене джерело постійної напруги E_d та конденсатор фільтру C_d , який призначено для шунтування вищих гармонійних складових струму навантаження i_d . Підключення конденсатора великої ємності C_d до джерела E_d надає йому властивості джерела напруги. Транзистори VS1–VS4 та зустрічно паралельно ввімкненні діоди VD1–VD4 утворюють ключові елементи схеми, які мають двосторонню провідність.

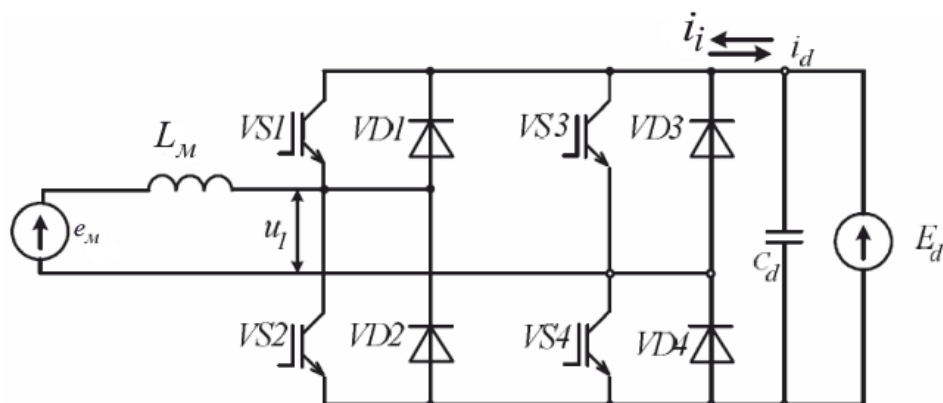


Рисунок 3.2 – Схема включення 4QS перетворювача

Чотириквadrантний перетворювач може працювати в режимах випрямлення, інвертування, тактування та їх сполучення.

Режим випрямлення. Це традиційний режим мостової схеми випрямлення на основі діодів VD1–VD4, транзистори VS1–VS4 не вмикаються. Розглядався раніш.

					Арк.
					51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Режим інвертування (рекуперація енергії). Здійснюється шляхом включення пари транзисторів VS1, VS4 (VS2, VS3) різних груп перетворювача (рис. 3.3).

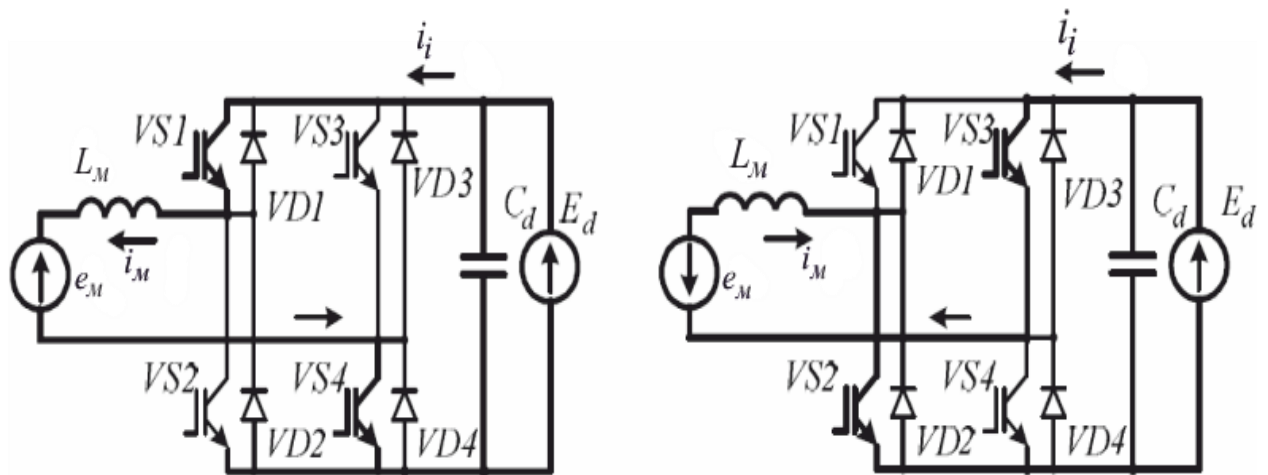


Рисунок 3.3 – Режим роботи інвертора

В такому випадку в перетворювачі протікає струм $i_i = i_m$, який співпадає з E_d та направлений зустрічно напрузі e_m , що вказує на режим генерації енергії джерела E_d та її споживанням колом вхідного джерела e_m . Для реалізації цього режиму напруга E_d на виході перетворювача повинна бути більш амплітудного значення напруги джерела живлення, тобто $E_d > \sqrt{2} e_m$. З цієї умови слідує, що перетворювач не може регулювати вихідну напругу нижче амплітудного значення джерела живлення e_m .

Режим тактування. Основний режим для ЕРС в режимі тяги.

В випадку роботи перетворювача у режимі тактування вхід перетворювача закорочується відчиненням транзистором одного та зворотнім діодом іншого плеча моста (рис. 3.4). Наприклад, при полярності напруги джерела e_m , яка показана на рис. 22.3, струм i_m може протікати через VS2, VS3 та діоди VD1, VD4. В цьому режимі відбувається накопичення магнітної енергії в індуктивності L_M . Після виключення транзисторів накопичена енергія додається до миттєвого значення напруги джерела живлення. В результаті миттєва напруга на навантаженні більша амплітудного значення напруги джерела та складається з імпульсної послідовності. Перетворювач представляє собою підвищуючий імпульсний перетворювач, але в якості джерела виступає не постійна е.р.с., а е.р.с. змінного струму.

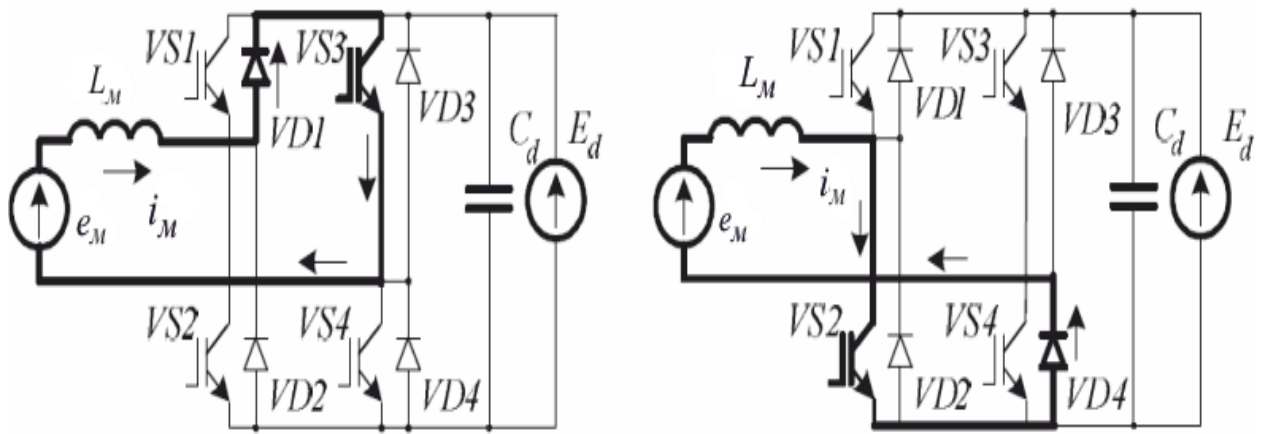


Рисунок 3.4 – Режим тактування

Включення та виключення транзисторів VS1–VS4 перетворювача здійснюється за алгоритмом, який забезпечує широтно-імпульсну модуляцію напруги за синусоїдальним законом. Управляюча напруга для VS1–VS4 формується системою управління шляхом порівняння двох модулюючих напруг u_{m1} , u_{m2} ($u_{m2} = -u_{m1}$) та сигналу генератора пилоподібної напруги $u_{ГПН}$ (рис. 3.5). Частота генератора $f_{ГПН} = k f_m$ повинна бути кратна частоті вхідної мережі f_m не парно. На рис. 22.4 показані діаграми напруг та струмів, які відносяться до роботи 4qS-перетворювача з $k=5$.

Імпульси управління транзисторами VS1–VS4 формуються в моменти рівняння напруг $u_m(-u_m)$ та $u_{ГПН}$. Їм відповідають наступні логічні функції:

$$VS1 = \begin{cases} 1 \text{ при } u_{m1} - u_{ГПН} \geq 0 \\ 0 \text{ при } u_{m1} - u_{ГПН} < 0 \end{cases}$$

$$VS3 = \begin{cases} 1 \text{ при } u_{m2} - u_{ГПН} \geq 0 \\ 0 \text{ при } u_{m2} - u_{ГПН} < 0 \end{cases}$$

$$VS2 = \overline{VS1}, \quad VS4 = \overline{VS3}.$$

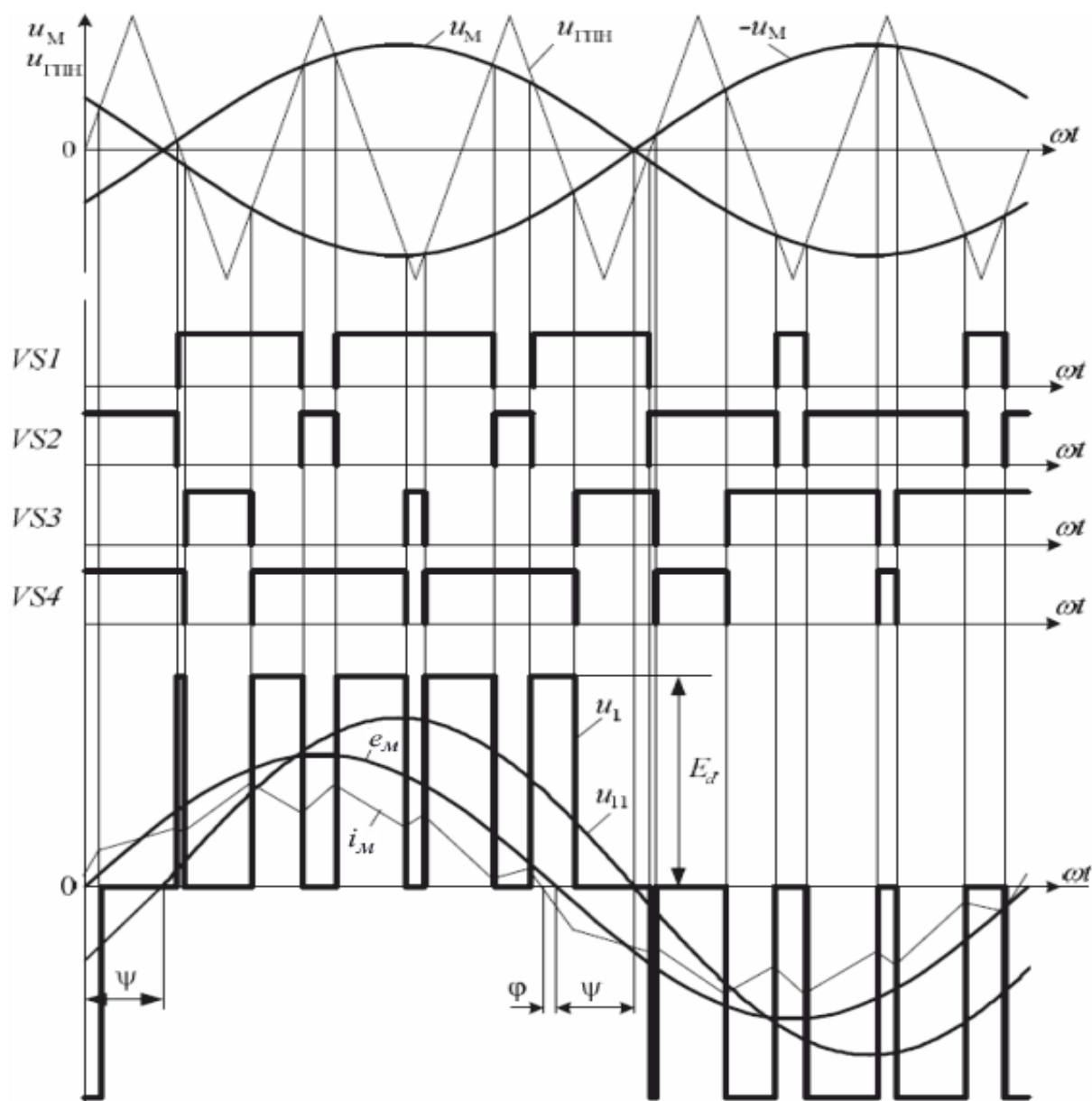


Рисунок 3.5 – Діаграми роботи чотириквadrантного перетворювача.

З рис. 3.5 слідує, що вхідний струм i_M має вигляд ломаної лінії, яка складається з ділянок збільшення та зменшення. Степінь згладження струму визначається індуктивністю L_M вхідного джерела, а також частотою пилоподібної напруги $u_{ГПН}$. Збільшення цих значень робить струм i_M більш згладженим та наближеним до синусоїдальної форми.

В режимі тактування забезпечується два режими – випрямлення та інвертування. Режим роботи 4qS-перетворювача (випрямлення або інвертування) визначається кутом зсуву фаз ψ між мережевою напругою e_M та першою гармонікою напруги u_{11} . Зміна фази ψ напруги u_1 здійснюється шляхом зміни фази моделюючої напруги $u_M(-u_M)$ відносно напруги e_M .

Основні властивості 4QS перетворювачів.

Типова схема тягового перетворювача у складі частотне регульованого електроприводу ЕРС змінного струму з АТД, яка поширена на сучасному ЕРС показано на рис. 3.6.

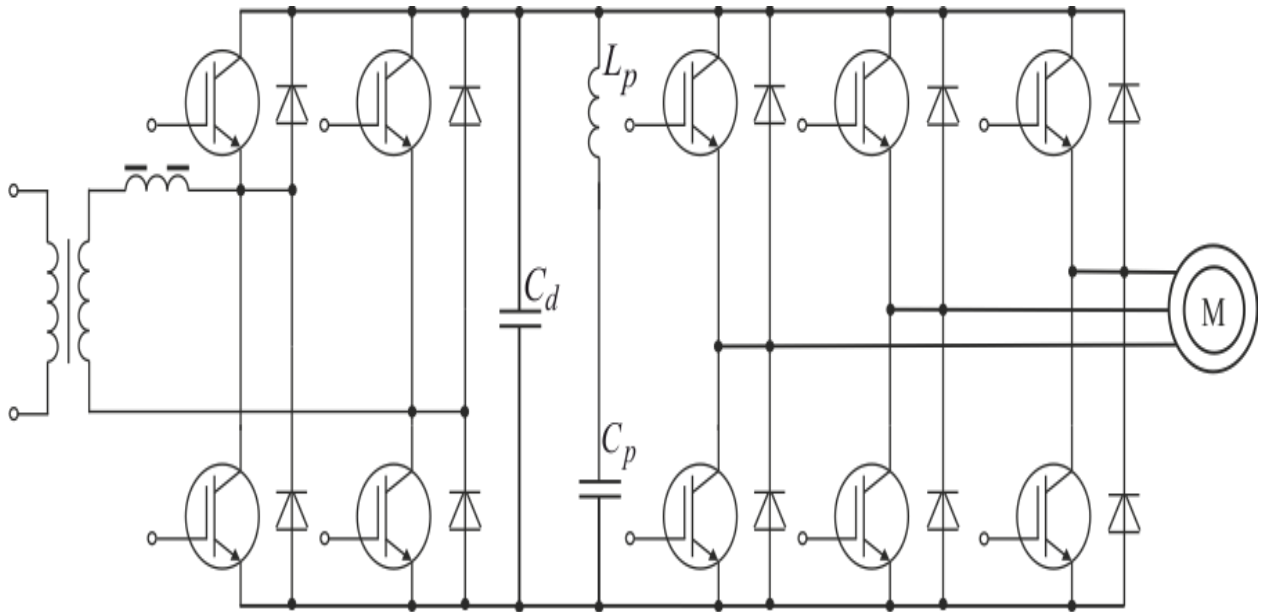


Рисунок 3.6 – Використання 4QS перетворювача у складі частотне регульованого електроприводу ЕРС змінного струму з АТД

Перетворювачі 4QS вирішують такі завдання:

- перетворення однофазного напруги контактної мережі, що змінюється в широких межах, в стабілізовану постійну напругу на вході АІН;
- підтримка синусоїдальної форми струму контактної мережі;
- забезпечення роботи приводу з заданим коефіцієнтом потужності мережі;
- передача енергії навантаженню в режимі тяги, повернення енергії в мережу при гальмуванні.

Дозволяють споживати з контактної мережі струм, що наближається за формою до синусоїди, яка збігається за фазою з напругою. Можна одержати коефіцієнт потужності, не нижчий за 0,98, що відповідає європейським стандартам на якість електроенергії. Зникають негативні наслідки фазового регулювання.

Так наприклад, якщо порівняти два відомих електровози ВЛ65 та ДС3. ВЛ65 потужністю 4650 кВА має зонно-фазове регулювання, в якості приводу двигуни постійного струму послідовного збудження, трансформатор ОНДЦЭ-10000/25 типовою потужністю 10000 кВА. Електровоз ДС3 вже за

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схемою, що показана на рис. 3.6 з трансформатором ОНДЦЭД-6316/25 потужністю 6316 кВА, при чому частина цієї потужності передбачена для опалення пасажирських вагонів. Це простий приклад того, як суттєво знижуються габарити та вага обладнання за рахунок збільшення коефіцієнту потужності.

Недоліки.

1. Збільшені втрати напруги у порівняння зі звичайними перетворювачами ЕРС змінного струму. Причина достатньо зрозуміла – в наявності два контури перетворення напруги (активний випрямляч та інвертор).

2. Не можливо регулювати вихідну напругу у широких межах. Схема ефективна для живлення АІН з ШІМ, якому необхідна стабільна напруга на вході. Для модернізації ЕРС з зонно-фазовим, амплітудним регулюванням напруги на ТЕД постійного струму не придатна.

3. Необхідність складної системи охолодження. Оскільки прилади працюють в високочастотному режимі комутації значних струмів зі швидко наростаючими фронтами, то необхідно застосовувати приводи та системи охолодження, які здатні забезпечити інтенсивне відведення тепла від напівпровідникових елементів. Звичайні системи охолодження у вигляді примусового потоку повітря тут не придатні. Придатні системи охолодження на основі рідин або випарні. Це суттєво підвищує вартість під час побудови та у подальшій експлуатації.

4. Втрати потужності в резонансному контурі.

Розглянемо більш детально. Резонансний контур $L_p C_p$ введено з метою шунтування гармонійної складової частотою $2f_m$. Причини шунтування пояснюються тим, що ця гармонійна складова низькочастотна. Якщо її використовувати як тягову, то це суттєво збільшує габарити фільтра, тому зручніше її шунтувати, а фільтрації підлягають високочастотні гармонійні складові, що суттєво зменшує габаритні розміри ємності фільтра C_d . Конденсатор C_d є одночасно вихідним фільтром випрямляча з частотою ШІМ, так і вхідним фільтром АІН з ШІМ модуляцією.

Наявність резонансного фільтра $L_p C_p$ створює додаткові втрати потужності. Насамперед, амплітуда гармонійної складової частотою $2f_m$ (100 Гц) визначається параметрами схеми мостового випрямляча та відповідно існуючої теорії складає $0,84U_2$. Ця складова шунтується, а струм

						Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмежується введенням додатково опором вторинної обмотки трансформатора або збільшеним опором реактора. В будь-якому випадку, складова враховується під час обліку енергії, а корисної роботи не виконує. До цього слід додати додаткові втрати потужності на збільшеному опорі вторинної обмотки трансформатора від тягової складової струму.

Всі вказані недоліки суттєво не впливають на впровадження таких перетворювачів, оскільки зниження масо-габаритних показників та збільшення коефіцієнта потужності того варти.

У випадку системи, що проектується не має необхідності у поверненні електричної енергії до контактної мережі, оскільки системами, які отримують живлення є приводи вентиляторів, компресор та насос трансформатора. Тому у використанні 4QS перетворювача не має необхідності. Достатньо лише 2QS перетворювач, який дозволяє виконати функцію підвищення напруги, але не дозволяє виконати повернення напруги до мережі змінного струму.

Транзистори широтно-імпульсного модулятора встановлюємо в анодній групі випрямляча, тому що так зручніше організовувати подальше керування такими транзисторами.

Розрахункова схема підвищуючого перетворювача представлена на рис. 3.7.

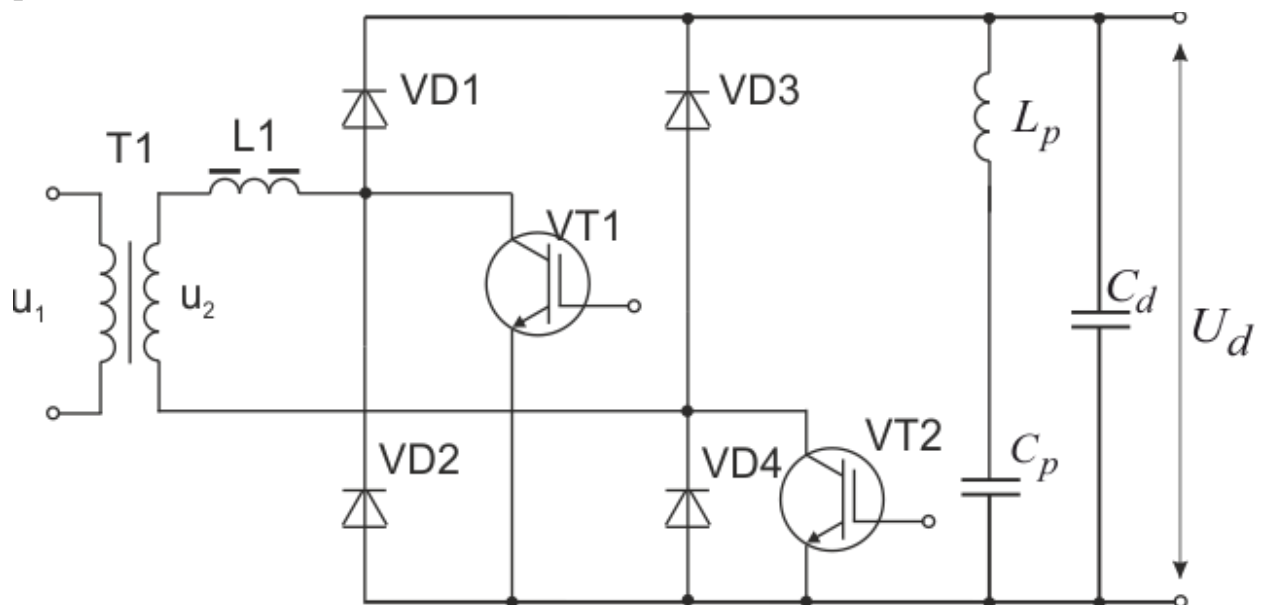


Рисунок 3.7 – Розрахункова схема підвищуючого випрямного перетворювача.

На початку розрахунку встановимо відомі дані. Так, до відомих даних відносяться необхідна напруга на виході некерованого випрямляча з

					Арк.
					57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

широотно-імпульсною модуляцією $U_d=490$ В. Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора номінальне $U_2=276$ В з відхиленнями в межах 209...320 В. Потужність споживачів $P_{d \max}$ визначається потужністю одночасно ввімкнених споживачів. Одночасно можливе включення приводів вентиляторів кабіни та салону, насос постійно, компресор. Тобто максимальна можлива потужність споживачів, які приєднано до обмотки живлення допоміжних машин

$$P_{d \max} = P_{e1} + P_{e2} + P_n + P_k, \quad (3.17)$$

де P_{e1} , P_{e2} – потужність вентиляторів кабіни та салону;

P_n – потужність насоса трансформатора;

P_k – потужність компресора.

$$P_{d \max} = 1,5 + 1 + 0,82 + 11 = 14,32 \text{ кВт.}$$

Ці дані дають змогу визначити необхідне значення індуктивності L_1 , яка вводиться в коло вторинної обмотки трансформатора для забезпечення режиму підвищення напруги [18]:

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

де ω – кутова частота напруги мережі живлення.

$$L_{1 \max} = \frac{320^2}{2 \cdot 314 \cdot 14320} = 0,011 \text{ Гн.}$$

Глибина модуляції

$$\mu = \frac{U_{2 \max}}{U_d \cos \varphi}, \quad (3.19)$$

де φ – зсув між напругою мережі живлення та струмом.
Приймаємо $\cos \varphi = 0,95$

$$\mu = \frac{320}{490 \cdot 0,95} = 0,68.$$

Середній струм навантаження

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

$$I_d = \frac{14320}{490} = 29 \text{ А.}$$

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струм вентильної групи в режимі випрямляча

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

$$I_a = \frac{29}{2} = 14,5 \text{ А.}$$

Повний струм транзистора в режимі перетворювача, що підвищує напругу [19]

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

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

t_T – час відкритого стану транзистора.

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

$$E_d = 0,9 \cdot 276 = 248 \text{ В.}$$

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, то приймаємо частоту модуляції $f_m = 1000$ Гц ($T_m = 0,001$ с).

Середнє значення коефіцієнта заповнення визначаємо [19] з виразу

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

звідки

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

$$\lambda = 1 - \frac{248}{490} = 0,49.$$

Час відкритого стану транзистора

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

$$t_T = 0,49 \cdot 0,001 = 0,00049 \text{ с.}$$

Струм транзистора

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{VT} = 14,5 + \frac{248}{2 \cdot 0,011} \cdot 0,00049 = 20 \text{ А.}$$

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 [20]

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

де $\Delta U_{C_{\max}}$ – номінальне допустиме підвищення напруги в колі мережі постійної напруги,

$$\Delta U_{C_{\max}} = 0,1 U_d = 0,1 \cdot 490 = 49 \text{ В.} \quad (3.28)$$

$$C_d = \frac{29}{8 \cdot 1000 \cdot 49} = 74 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Ємність конденсатора C_P для шунтування гармоніки 100 Гц визначається [20]

$$C_P = \frac{k_n I_d}{628 \Delta U_{C_{\max}}}, \quad (3.29)$$

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

$$C_P = \frac{0,057 \cdot 29}{628 \cdot 49} = 0,000053 \text{ Ф.}$$

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

$$L_P = \frac{1}{16 \pi^2 f_c^2 C_P}, \quad (3.30)$$

де f_c – частота живлячої мережі.

$$L_P = \frac{1}{16 \cdot \pi^2 \cdot 50^2 \cdot 0,000053} = 0,047 \text{ Гн.}$$

В якості транзисторних ключів VT1–VT2 обираємо IGBT- модуль типу IRG7PH35UDPbF фірми International Rectifier який представляє собою

						Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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, А55;
структура N-канал+діод;
напруга насичення при максимальному струмі, В..1,9;
напруга управління, В15;
максимальна потужність, Вт180;
максимальна частота переключень, кГц30;
діапазон температур, °С -55...150;
тип корпуса TO247AC.

В якості діодів VD1, VD3 вибираємо діоди, які швидковідновлюючі типу ДЧ132-40-10. Основні параметри вибраного діода:

імпульсна напруга, що повторюється, В1000;
максимальний струм, А40;
ударний прямий струм, А660;
імпульсна пряма напруга, В2,0;
порогова напруга, не більш, В.....1,1;
динамічний опір, мОм.....7,2;
час відновлення, мкс.....0,8;
діапазон температур, °С -50...125;
охолоджувач типу ОР331-80.

3.4 Силова схема перетворювача.

На рис. 3.8 показана силова схема статичного перетворювача для живлення асинхронних приводів електропоїзда ЕР9.

Схема складається з трьох характерних, класичних, блоків: випрямляча-стабілізатора постійної напруги, інверторів трьохфазної напруги на основі автономного інвертора напруги триточкового на 380 та 220 В.

Випрямляч виконано на основі діодів VD1–VD4 та транзисторів VT1, VT2. Транзистори виконують функцію підвищення напруги, аналогічну транзисторам типового 4qS-перетворювача, про що велася мова раніше. Однак у зв'язку з відсутністю режиму рекуперації достатньо двох транзисторів. Вихідною напругою є напруга 490 В, яка є стабільною. Вхід випрямляча приєднано до виводів допоміжної обмотки трансформатора О1–

						Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Х2. Система дозволяє забезпечити споживання струму мережі з відставанням та з випередженням з метою часткової компенсації низького коефіцієнта потужності основного перетворювача. До схеми додано реактор L_1 з метою забезпечення нормального режиму роботи 2qS-перетворювача.

Напруга з виходу стабілізуючого випрямляча поступає до автономних інверторів напруги. Всього можливо 4 типових інвертори. Розрахунок параметрів інверторів приведено було раніше. Інвертори виконані на основі типової три точкової схеми.

На рис. 3.9 показано типові діаграми фазних напруг на виході автономних інверторів напруги. Як можна бачити з діаграм, то вони дещо відрізняються одна від другої. Причиною цієї різниці є те, що інвертори забезпечують різні значення фазних напруги при живленні від єдиної мережі.

Приводи компресора та насоса трансформатора отримують живлення 380 В. Для забезпечення такої напруги інвертор працює за алгоритмом амплітудноімпульсної модуляції 180 град. ел.

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

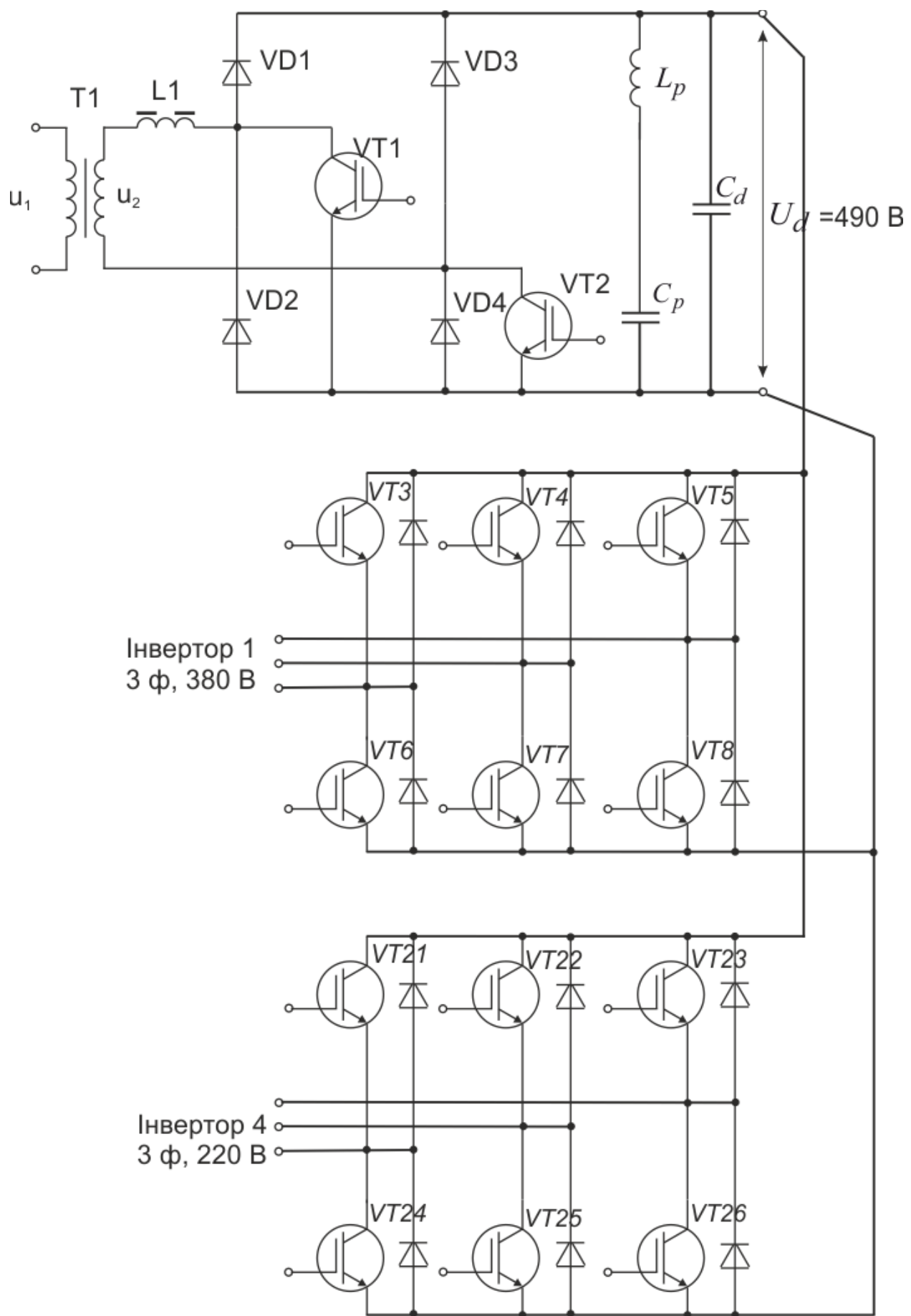


Рисунок 3.8 – Силова схема перетворювача.

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

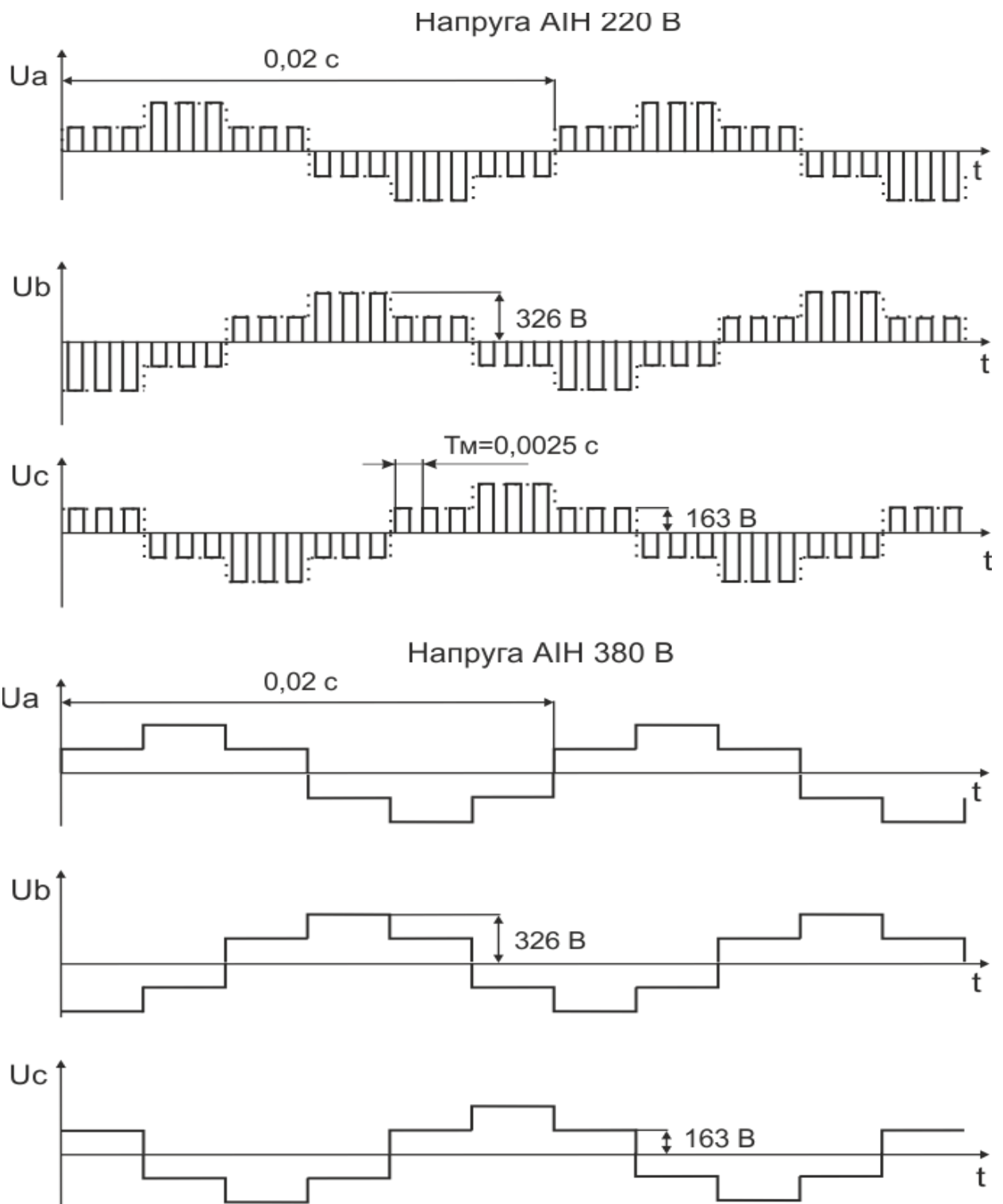


Рисунок 3.9 – Часові діаграми фазних напруг на виході трифазних автономних інверторів.

Приводи вентиляторів кабіни машиніста та салону пасажирів отримують живлення 220 В. Для забезпечення такої напруги автономний інвертор працює за алгоритмом широтне-імпульсної модуляції при живленні від тієї мережі, що і інвертори компресора та насоса.

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

4 ВИБІР СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ АВТОНОМНИМ ІНВЕРТОРОМ

4.1 Вимоги до системи керування

Будь-яка система керування реалізує цілий ряд функціональних завдань у незалежності від того, який тип пристроїв є виконавчим. В існуючій схемі електропоїздів ЭР9 до виконавчих пристроїв відносяться тягові електричні двигуни постійного струму та електричні машини допоміжних приводів. І те й інше є електромашинними перетворювачами. Проміжними пристроями впливу на даний тип перетворювачів є пристрої релейного типу – електромеханічні контактори й регулятори, які і являють собою систему керування пристроями електропоїзда та електропоїздом у цілому. Система керування на основі контакторів реалізує необхідний алгоритм функціонування, забезпечуючи тим самим рівень заданих параметрів системи й стійкість її роботи при певних зовнішніх змінах.

Проектована система заснована на напівпровідникових елементах, здатних працювати на більше високих частотах, на відміну від контакторів. Виконавчим силовим елементом у цьому випадку виступають IGBT модулі.

Нова система керування повинна забезпечувати контроль параметрів, які забезпечувала система керування на основі контакторів, а саме повинен бути збереженим алгоритм включення приводів допоміжних машин, включення приводу компресора вручну та автоматично від реле тиску. Крім того система повинна забезпечувати надійну гальванічну розв'язку між високовольтною напругою й напругою кіл керування з метою безпеки обслуговуючого персоналу й збереження експлуатованих апаратів у низьковольтних колах електровоза.

До недоліку проекрованої системи керування можна віднести необхідність створення додаткових джерел живлення. Ця необхідність продиктована застосуванням напівпровідникових елементів загальнопромислового призначення з рівнями напруг відмінними від напруг електрорухомого складу.

Нова система керування дозволяє ввести додаткові блоки діагностики для швидкого обслуговування при ремонтах. Касетне виконання блоків також збільшує темпи обслуговування при експлуатації. Крім того відбувається зниження габаритів та підвищення надійності усього блоку в цілому на відміну від електромашинних перетворювачів.

						Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4.2 Система керування автономним трифазним інвертором на основі мікроконтролера.

Сучасна тенденція розвитку систем керування перетворювачами характеризується збільшенням ступеню інтеграції елементів. Схеми технічні рішення на базі дискретних компонентів уступають місце інтегральним мікросхемам та мікроконтролерам, які забезпечують перехід від жорстких алгоритмів керування до більш гнучких, які максимально враховують специфіку роботи силового ключа та схеми.

Найбільш універсальним приладом для будови керуючої частини перетворювача є мікроконтролер, якій управляє логікою переключення вентилів силової частини та забезпечує інтерфейсні функції для зв'язку з оператором та іншими технологічними об'єктами [21, 22].

Керування силовими ключами інвертора здійснює по певному алгоритму спеціальний контролер, що керує (інакше кажучи – схема керування). Алгоритм керування має на увазі не лише реалізацію функцій регулювання частоти і значення вихідної діючої напруги, але так само і реалізацію захисту силових ключів від перевантажень та коротких замкнень. В деяких випадках додатково реалізуються функції регулювання моменту на валу асинхронного двигуна і інші специфічні завдання.

Розробка схеми керування інвертором з повним набором функцій – завдання дуже складне. У багатьох конструкціях є декілька недоліків, зокрема, невисока стабільність параметрів із-за змішаного піваналогового - півцифрового підходу, неопрацьованість систем захисту і ін. Спроба позбавитися від цих недоліків і одночасно розширити функціональні можливості системи керування вилася в створення схеми керування інвертором напруги на недорогому мікроконтролері.

Обираємо уже розроблену типову схему керування інвертором (рисунок 4.1). Схема керування була випробувана з використанням потужного інвертора на IGBT транзисторах [23].

Відповідно завданню до вхідних сигналів мікроконтролера відносимо сигнал від блок-контактів реле тиску компресора або сигнали на включення вентиляторів та насосу. До вихідних сигналів відносимо сигнали, які поступають на драйвери, які виконують управління конкретними транзисторами.

Короткі характеристики і особливості:

						Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- формування послідовності імпульсів керування силовими ключами по алгоритму, який реалізовує лінійну залежність значення напруги, що діє, від частоти;
- регулювання частоти вихідної напруги інвертора від 5 - 50 Гц;
- швидкодіючий захист силових ключів інвертора від струмів КЗ;
- можливість використання в якості датчика струму як спеціалізованого датчика (наприклад, фірми LEM), так і звичайного шунта;
- можливість підключення додаткового дисплея з послідовним інтерфейсом для індикації поточної і заданої частоти;
- надзвичайна простота схеми – всього 4 мікросхеми, включаючи мікроконтролер.

У схемі використовується недорогий мікроконтролер AT89C2051-24PI. Він реалізує всі необхідні функції за спеціально розробленою програмою. Програма мікроконтролера формує 6 вихідних сигналів керування силовими ключами інвертора у відповідності з прийнятим алгоритмом.

На рисунку 4.1 представлена схема вузла керування трифазним автономним інвертором напруги, яка адаптована до використання в пристрої, що розроблюється.

На цифрові входи мікроконтролера DD1 поступають сигнали від аналого-цифрового перетворювача, реле тиску та компаратора обмеження струму заряду акумуляторної батареї. Сигнали від АЦП необхідні для обчислення необхідного режиму роботи мікроконтролера – амплітудне-імпульсна модуляція чи широтне-імпульсне регулювання та тривалості пауз між імпульсами останнього виду регулювання в залежності від інформації яку надсилає аналого-цифровий перетворювач. Крім того, на мікроконтролер надходить інформація про наявність режиму обмеження струму заряду акумуляторної батареї, оскільки в такому випадку в системі можливе максимальне зниження напруги на вході автономного інвертора.

З цифрових виходів мікроконтролера формуються імпульси управління драйверами силових транзисторів. Імпульси до драйверів поступають через проміжні буферні мікросхеми DD2-DD3 (K1564АП4) при наявності сигналу дозволу на входах “Gate”.

Схема запускається при наявності від реле тиску (РТ). Мікроконтролер з урахуванням інформації про рівень напруги контактної

						Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

мережі від АЦП та обмеження струму заряду акумуляторної батареї, починає частотний пуск асинхронного двигуна компресори. Під час пуску мікроконтролер працює за алгоритмом ШПР, а в процесі сталої роботи приводу АІМ або ШПР.

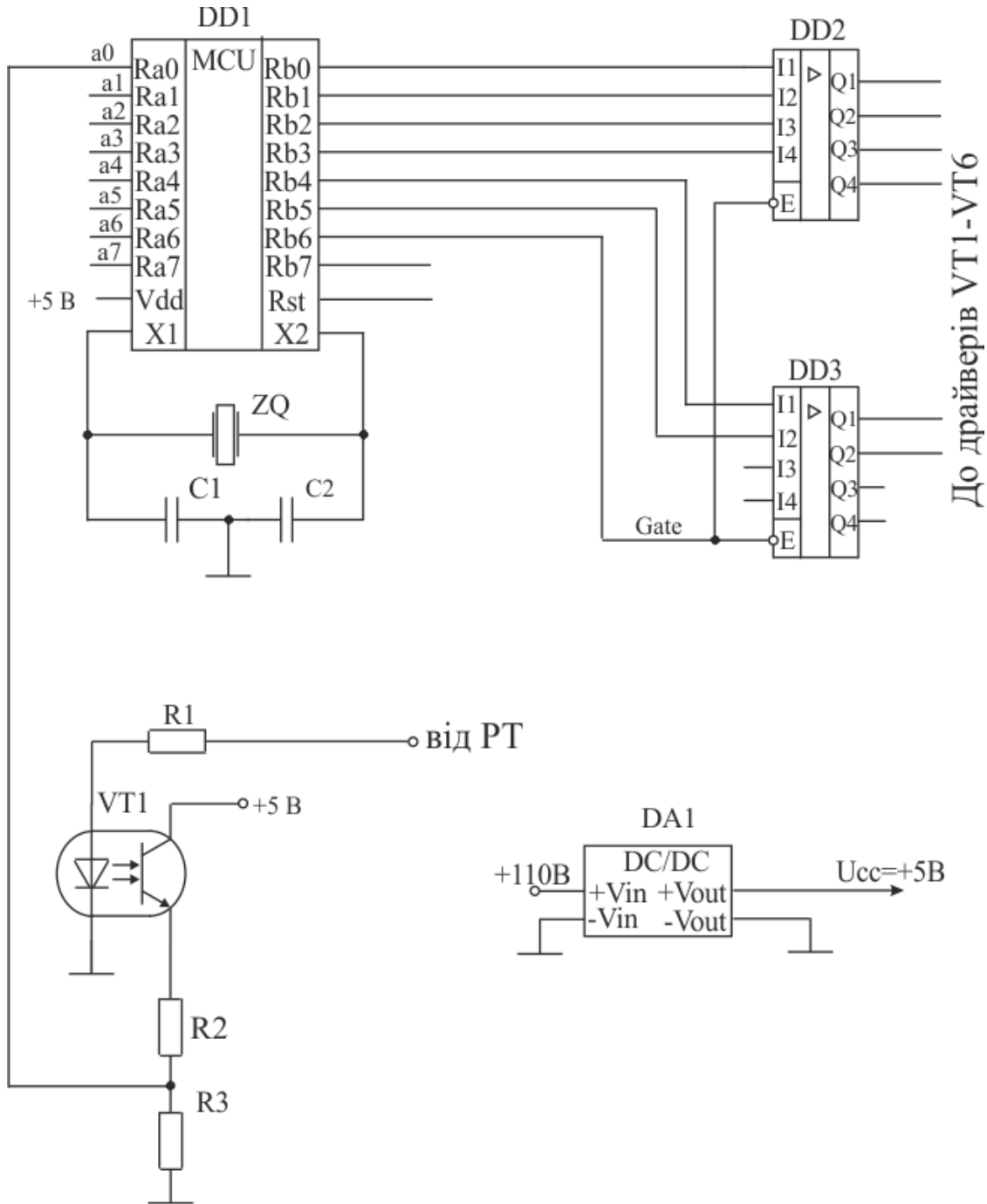


Рисунок 4.1 – Схема вузла управління автономним трифазним інвертором напруги.

Блок живлення системи керування

Живлення схеми необхідно виконувати від первинних джерел живлення кола постійного струму, яке завжди є в наявності на ЕРС у вигляді

кіл живлення власних потреб, що резервуються акумуляторною батареєю. Такий варіант раніше вимагав проектування достатньо складних схем перетворювачів. На цей час промисловість випускає перетворювачі типу DC/DC у вигляді мікросхем та блоків для монтажу на печатні плати для живлення систем управління [24]. Діапазон входних напруг має співвідношення від 1:2 до 1:6. Ряд типових вихідних напруг 5, 12, 15, 18 В. Окремі моделі перетворювачів мають входну напругу 18...80 В, 43...160 В і відповідають вимогам ДСТУ 2773-94 [25].

Блок живлення DC/DC – це перетворювач постійної напруги в постійну з метою одержання необхідних рівнів для вимірювальної частини пристрою, а також для гальванічної розв’язки. При виборі конкретної мікросхеми DC/DC перетворювача необхідно в першу чергу розрахувати максимальний струм навантаження даного елемента, а для цього просумувати входні струми елементів, які підключаються до DC/DC перетворювача. Необхідне значення напруги живлення мікросхем AT89C2051-24PI та K1564АП4 +5 В при максимальному струмі 40 мА. Вибираємо інтегральний стабілізатор напруги типу TEN 8-7211WI фірми TRACO POWER з вихідною напругою +5В при входній напрузі 43...160 В, номінальним струмом 1600 мА [24].

4.3 Зміни в базовій схемі управління.

У зв’язку з тим, що з системи управління електропоїзда виключається розчеплювач фаз, це приводить до ряду змін в базових схемах управління. Розглянемо ці зміни на прикладі схеми управління двигуном компресора. Схема в яку введено зміни показана на рисунку 4.2.

Управління головними компресорами проводиться автоматично під контролем регуляторів тиску АК, які встановлені на головних вагонах (див. рис. 4.2).

Регулятор тиску АК має уставку на включення близько 6 кгс/см², а на відключення – близько 8 кгс/см².

Включення компресорів проводиться контакторами двигунів компресорів КМК тільки при працюючому розчеплювачах фаз АРФ, так як при замкнутих контактах регулятора тиску АК і непрацюючому розчеплювачах фаз спрацьовує реле часу РВК, котушка якого одержує живлення через контакт повторювача реле напруги фазорозчеплювач ПНФ. Контакт РВК розмикається і котушка КМК живлення отримати не може.

						Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В новій схемі контактори КМК зберігаємо. Вони приєднують напругу до входу автономного інвертора напруги та виконують захисні функції, відключення та видимість розриву.

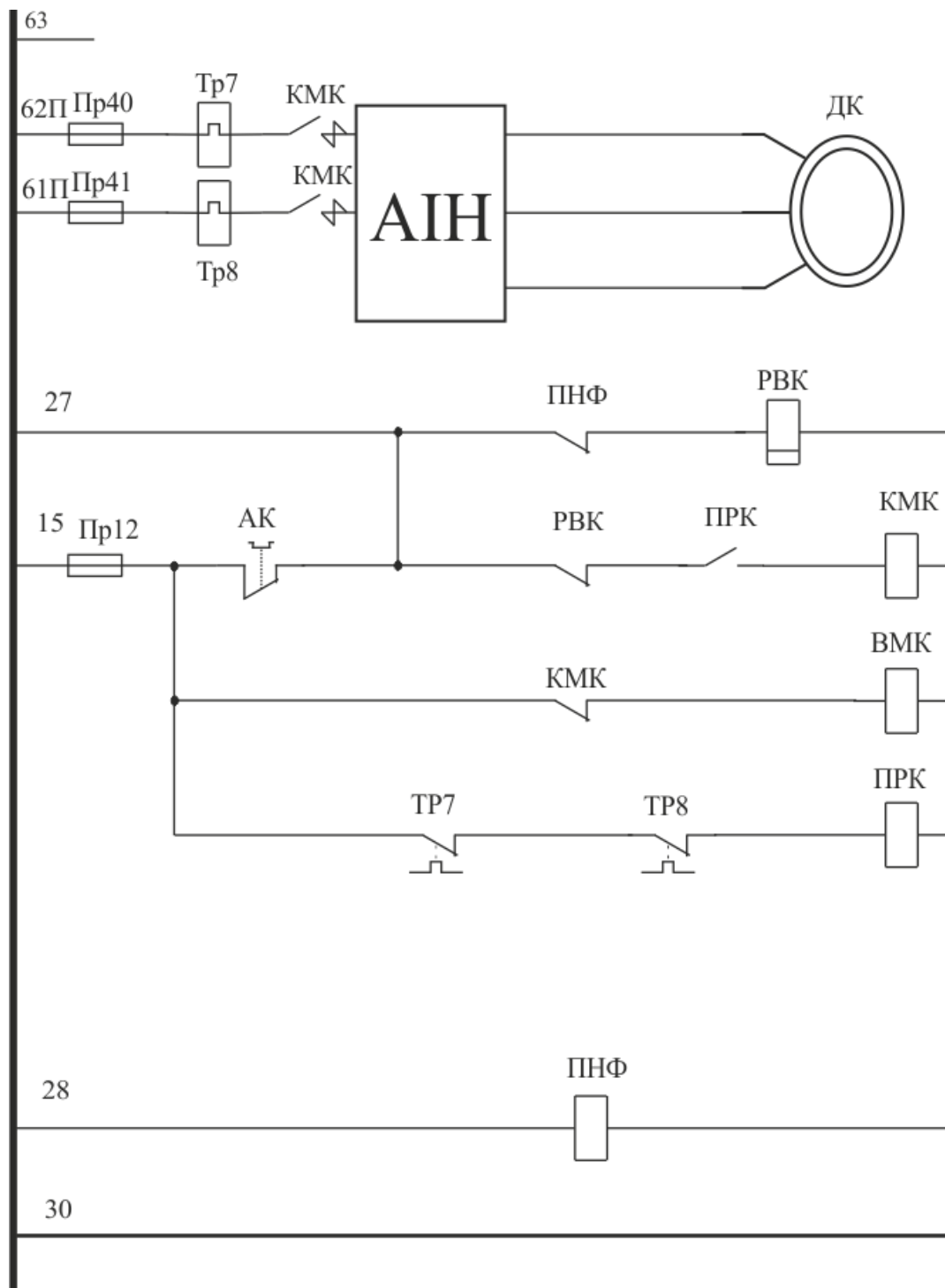


Рисунок 4.2 – Управління двигуном компресора.

Не задіяним залишається провід 63 по якому в існуючій системі знаходиться третя фаза з фазорозчеплювача. Проводи 61 та 62 (на схемі не показані) є вихідними проводами допоміжних виводів трансформатора та приєднуються до входу випрямляча. Тому далі вони в новій схемі більш не

						Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

задіяні. На заміну їм вводимо проводи 61П та 62П, відповідно позитивний та негативний виводи випрямляча. До цих виводів приєднуються всі автономні інвертори.

Після закінчення запуску фазорозчеплювача спрацьовує реле ПНФ і розмикає свій контакт, що призводить до втрати живлення котушкою РВК і замикання з витримкою часу 5 с його контакту в колі КМК. Витримка часу необхідна для виключення одночасного запуску всіх допоміжних двигунів. Таким чином, котушка КМК отримує живлення і контактор КМК своїми контактами включає двигун компресора. Залишаємо цю ділянку, оскільки для заряду конденсаторів фільтру випрямляча необхідний час, тому для цього і використовуємо існуючі елементи системи.

Контактор КМК відключається регулятором тиску АК при досягненні верхньої уставки, контактом ПРК – при спрацьовуванні захисту двигуна компресора, а також у разі зникнення напруги 220 В контактом ПНФ в колі живлення котушки реле РВК, яке в цьому випадку розмикає свій контакт в колі котушки КМК.

У всіх випадках відключення контактора КМК його блок-контакт включає вентиль розвантажувального клапана компресора ВМК, який з'єднує циліндри компресора з атмосферою, забезпечуючи виняток протитиску під час запуску компресора.

Сигналізація про несправність компресора здійснюється за допомогою реле ПРК. При спрацьовуванні теплових реле захисту компресора ТР7, ТР8 їх контакти розмикаються, розриваючи коло живлення котушки ПРК. Якір реле ПРК відпадає, воно розмикає свої контакти у колі реле КМК, що приводе до від'єднання від мережі автономного інвертора напруги. Спалахують лампи аварійної ситуації в кабіні машиніста.

Теплові реле Тр7, Тр8, запобіжники Пр40, Пр41 також залишаємо для виконання захисних функцій.

						Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Розчеплювач фаз типу РФ-1Д.5 є машиною фізично та морально застарілою. Для отримання трьохфазної системи напруг на цей час існує можливість розробити та впровадити статичний перетворювач на сучасних силових напівпровідникових елементах.

2. Для приводу компресора типу ЭК7В на електропоїздів ЭР9 використовується асинхронний двигун типу 548А. Цей тип двигунів вже давно знято з виробництва, що дає деякі складнощі під час організації ремонтів.

3. Особливістю розчеплювача фаз РФ-1Д.5 є те, що він формує трифазну систему напруг з напругами 220/172 В, що вимагає асинхронні двигуни з'єднувати за трикутником та є не раціональним з куту зору використання асинхронного двигуна.

4. Для заміни застарілого компресора ЭК7В з асинхронним двигуном типу 548А в роботі пропонується використання сучасного компресора типу ЭКВО-0,8/9 з асинхронним двигуном типу АИР132М4.

5. З метою забезпечення необхідного рівня живлення асинхронних двигунів з різними лінійними напругами (380 та 220 В) в схемі силового перетворювача передбачено два інвертори з АІМ та ШІМ модуляціями при живленні від єдиної мережі постійного струму.

6. Оскільки необхідно забезпечити напругу мережі постійного струму на вході автономних інверторів напруги >490 В, що не можливо при використанні звичайного випрямляча, то в системі виявлена необхідність використання випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією.

7. З метою зниження собівартості випрямляч з широтно-імпульсною модуляцією має лише ключі підвищення напруги в двох плечах, тому що не має необхідності в забезпеченні режиму повернення енергії. Це ще дає і не значне збільшення коефіцієнту потужності системи у цілому.

						Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Гейлер Л. Б. Основы электропривода / Гейлер Л. Б. – Мн.: Вышэйш. школа, 1972. – 608 с.
5. Безрученко В.Н., Хотян А.С. Электрические машины. 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа. Головное издат. 1987. – 215 с.
6. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. Учебник для вузов - 6-е изд., доп. и перераб. - М.:Энергопромиздат, 1981. – 576 с.
7. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
8. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков – М.; Транспорт, 1999. – 464с.
9. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
10. Ротанов Н.А., Захарченко Д.Д., Некрасов А.В., Иньков Ю.М. Проектирование систем управления электроподвижным составом. Под ред. Н.А. Ротанова. - М.: Транспорт, 1986. – 327с.
11. Сергеев Б. С. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта / Б. С. Сергеев, А. Н. Чечулина. – М.: Транспорт, 1998. – 280 с.
12. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография / Ю. А. Бахвалов и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
13. Электроподвижной состав с электрическим торможением: Учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Жуликов В. Н., Иньков Ю. М., Козлов Л. Г.

									Лист
									73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

- и др. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 412 с.
- 14.М. М. Казачковський. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти. Д. : НГА України, 2000. – 196 с.
 - 15.Подбор IGBT транзисторов по параметрам [Електрон. ресурс] – Режим доступа: http://irf.ru/cgi-bin/igbt_param.pl
 - 16.Промислова електроніка: Завдання на контрольну роботу з методичними вказівками для студентів заочної форми навчання. / Дніпропетр. нац. ун-т залізничн. трансп.; Укл: Білухін Д. С.–Д. 2005. – 16 с.
 - 17.Гетьман Г. К.: Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с.
 - 18.Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4qS преобразователями // Электротехника. – 1993, № 3. – С. 23–31.
 - 19.Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: пер. с англ. / Б. Уильямс М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
 - 20.Автоматизація рухомого складу [Текст]: методичні вказівки до виконання курсової роботи на тему «Розроблення, розрахунок і дослідження роботи системи автоматичного регулювання швидкості електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами» / уклад.: М. Г. Вісін. – Д.: ДПТ, 2009. – 23 с.
 - 21.Предко М. Руководство по микроконтроллерам: В 2 т. Т. I / М. Предко; пер. с англ. под ред. И. И. Шагурина, С. Б. Лужанского. – М.: Постмаркет, 2001. – 416 с.
 - 22.Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум./ За ред. А. Т. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.
 - 23.Простая схема управления трехфазным инвертором напряжения [Електрон. ресурс] – Режим доступа: http://www.kedr-npp.ru/schemes/prostaya_shema_invertor.shtml.

- 24.Tracopower. Reliable. Available. Now. [Електрон. ресурс] – Режим
доступа: [http://www.tracopower.com/products/browse-by-
category/show/railway/dc-dc-3/ten-8wi/1/](http://www.tracopower.com/products/browse-by-category/show/railway/dc-dc-3/ten-8wi/1/)
- 25.ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95) Апарати електричні тягові. Загальні
технічні умови; Введ. 01.07.96. – К.: Держстандарт України, 1996. –
74 с.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75