

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ Електрорухомий склад залізниць _____
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Гетьман Г.К. _____
(підпис) (ПІБ)

« » _____ грудня _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

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

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

Спеціалізація _____ Електричний транспорт _____
(повна назва)

Тема _____ Розробка тягового перетворювача для вантажного електровоза _____
(код) (повна назва)

_____ змінного струму з асинхронним тяговим приводом _____

Theme _____ Development of traction converter for alternating current freight
locomotive with asynchronous traction drive _____

Керівник дипломної роботи _____ доцент _____ Білухін Д.С. _____
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ ст. викладач _____ Білухін Д.С. _____
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи _____ ЕТ 1921 _____ Андріанов Р.В. _____
(група) (підпис) (ПІБ)

Student _____ Andriyanov Rostyslav _____
(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 *ET1921*

Андріянов Ростислав Віталійович

(П. І. Б.)

1 Тема магістерської роботи:

Розробка тягового перетворювача для вантажного

електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом

затверджена наказом по університету № 199ст від «09» червня 2020 р.

2 Термін подання студентом закінченої роботи: «13» грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до магістерської роботи: електровоз подвійного живлення

$U_{км}=25/3$ кВ; осьова формула $2(2_0-2_0)$; потужність тягового двигуна: $P_{год}=1200$

кВт; автономний інвертор напруги індивідуальний для двигуна; живлення від

мережі змінного струму –трансформатор, 4qS; елементна база перетворювача

– IGBT. Виконати аналіз структурних схем тягових перетворювачів

електровозів з АТД які знаходяться в експлуатації залізниць світу; розробити

принципові схеми автономного інвертора напруги живлення АТД та вхідного
випрямляча для двох рівнів напруги проміжного контуру (1,1 кВ та 2.2 кВ) ;

виконати аналіз втрат потужності в елементах схеми тягового перетворювача

для вказаних рівнів та вибрати більш доцільне; Розробити елементи схеми

живлення допоміжних кіл.

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 Вибір структурної схеми силового тягового перетворювача електровоза	09.09–27.09	20	1	1–3
2 Розробка силової схеми тягового перетворювача електровоза	28.09–11.10	35	4	2–5
3 Аналіз втрат потужності в силовому тяговому перетворювачі	12.10–08.11	20	1	4, 6
4 Розробка схеми живлення допоміжних машин	08.11–29.11	15	2	1, 6
Висновки	02.11–13.12	2		
Оформлення роботи	04.11–13.12	5		

5 Рекомендована література

- 1 Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография / Ю. А. Бахвалов и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Маршрут, 2006. – 374 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 завдан-

ня: « 09 » вересня 2020 р.

Керівник магістерської роботи: _____ Білухін Д. С.
(підпис) (П. І. Б.)

Консультант: _____
(підпис) (П. І. Б.)

Завдання прийняв до виконання: _____ Андріянов Р. В.
(підпис) (П. І. Б.)

РЕФЕРАТ

Тема дипломного проекту: «Розробка тягового перетворювача для вантажного електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом».

Пояснювальна записка даного дипломного проекту складає 79 сторінок, 2 таблиці, 14 рисунків, 1 додаток, 19 використаних джерел та 8 мультимедійних слайдів.

В першому розділі викладено вибір структурної схеми силового тягового перетворювача електровоза, загальні вимоги до тягових перетворювальних пристроїв, структурні схеми статичних перетворювачів сучасного ЕРС, вибір структурної схеми тягового перетворювача та структурна схема джерела живлення допоміжних машин.

В другому розділі виконано розрахунок та вибір елементів силової схеми тягового перетворювача електровоза. Розрахунок виконано для двох можливих варіантів: живлення асинхронного тягового двигуна з фазною напругою 990 В, другий напругою 460 В. Потужність двигунів єдина – 1200 кВт. Живлення двигуна від індивідуального автономного інвертора напруги. Інвертори секції отримують живлення від загального для секції некерованого випрямляча з широтне-імпульсним регулюванням

В третьому розділі для двох варіантів, що аналізуються, розраховані втрати потужності в напівпровідникових елементах перетворювача.

В четвертому розділі виконано вибір типових асинхронних двигунів загальнопромислового використання для приводу компресора та вентиляторів. Розраховано та вибрано елементи автономних інверторів напруги, які отримують живлення від мережі постійного струму тягового перетворювача.

Ключові слова: тяговий перетворювач; структурна схема; випрямляч; автономний інвертор; втрата потужності; система охолодження.

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

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	6
1 Вибір структурної схеми силового тягового перетворювача електро- воза.....	8
1.1 Загальні вимоги до тягових перетворювальних пристроїв.....	8
1.2 Структурні схеми статичних перетворювачів сучасного ЕРС.....	10
1.3 Вибір структурної схеми тягового перетворювача.....	11
1.4 Вибір структурної схеми джерела живлення допоміжних машин.....	18
2 Розробка силової схеми тягового перетворювача електровоза.....	21
2.1 Аналіз схем тягового перетворювача електровоза ЕП10.....	22
2.2 Аналіз схем тягових перетворювачів електровоза ЕП20.....	26
2.3 Аналіз схеми тягового чотириохкватратного перетворювача елект- ровоза «Узбекистан».....	29
2.4 Розрахунок елементів автономного інвертора напруги.....	31
2.5 Вибір силових елементів автономного інвертора з амплітудною мо- дуляцією ($\lambda=180^\circ$).....	32
2.6 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з ШІМ мо- дуляцією.....	36
2.7 ЧотириквADRANTНИЙ перетворювач змінно-постійної напруги типу 4QS.....	40
3 Аналіз втрат потужності в силовому тяговому перетворювачі.....	49
3.1 Визначення втрат потужності в напівпровідникових елементах пере- творювача.....	49
3.1.1 Втрати потужності в автономних інверторах напруги.....	49

					Розробка тягового перетворювача для вантажного електровоза змінного струму з асинхронним тяговим перетворювачем				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розрахунково- пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб		Андриянов Р. В.						4	79
Перевір.		Білухін Д.С.							
Реценз.									
Н. Контр.		Білухін Д.С.							
Затверд.		Гетьман Г.К.						ДНУЗТ, ЕТ1921	

3.1.2 Втрати потужності 4QS перетворювача.....	53
3.2 Тепловий режим силових напівпровідникових приладів.....	55
3.3 Системи охолодження тягових перетворювачів	56
4 Розробка схеми живлення допоміжних машин	59
4.1 Вибір основних допоміжних машин	59
4.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з широтне- імпульсною модуляцією	61
Висновок.....	65
Список використаних джерел	67
Список графічних робіт	69
Додатки.....	70
Додаток А Демонстраційні матеріали до захисту магістерської роботи на тему: «Розробка тягового перетворювача для вантажного електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом».....	71

						Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Залізничний транспорт є основою транспортної системи. Він відіграє велику роль у формуванні ринку транспортних послуг і дозволяє ефективно розвивати підприємницьку діяльність у взаємодії з іншими видами транспорту. Залізничний транспорт повинен повною мірою і своєчасно задовольняти потреби всіх галузей народного господарства і населення в перевезеннях. Локомотивне господарство забезпечує перевезення вантажів і пасажирів тяговими засобами і утримання їх у справному стані, що має забезпечувати повну безпеку, точне виконання розкладу та графіку руху поїздів.

Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, який забезпечує 82% вантажних і майже 50% пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту.

Високі темпи розвитку промисловості супроводжуються швидким ростом основних засобів і особливо їх активної частини – машин і обладнання. В забезпеченні найбільш ефективного їх використання важлива роль належить ремонтному господарству.

На долю електрифікованих залізниць України приходить 78,4% (станом на 2017 рік) від обсягу перевезень залізничним транспортом України [23]. На залізницях України застосовують дві системи електричної тяги: змінного струму 25 кВ промислової частоти та постійного струму 3 кВ. З яких 50,8 % від загальної довжина електрифікованих ділянок України працюють на постійному струмі. Світовий досвід застосування різних систем електричної тяги постійного і змінного струмів однозначно свідчить про переважне використання системи змінного струму промислової частоти напругою 25 кВ.

Оскільки капітальні витрати на електрифікацію змінним струмом, навіть із урахуванням реконструкції ліній зв'язку, на 15 - 18 % нижче, ніж при постійному. Число тягових підстанцій менше в 2 - 3 рази, вони істотно простіше, у результаті чого значно нижче витрати на їхнє технічне обслуговування. Легше контактна підвіска - економія міді становить більше 2т на 1 км. Повністю знімається проблема зношування контактних дротів та їхньої періодичної заміни, виключається опор контактної мережі й підземних споруджень.

При рівних обсягах роботи на ділянках змінного струму потрібно на 15 - 20 % менше локомотивів і локомотивних бригад. Пошкоджуваність пристроїв електропостачання й електрорухомого складу (з безколекторним приводом) також помітно нижче. У результаті собівартість перевезень на ділянках змінного струму майже на 20 % менше, ніж при експлуатації електровозів постійного струму.

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

Система змінного струму забезпечує більші переваги в поетапному нарощуванні енергетичних можливостей електричної тяги, а при необхідності й у їхньому зниженні, наприклад, при спаді обсягів перевезень.

До недоліків системи 25 кВ промислової частоти в першу чергу відносять відносно малі показники якості електричної енергії, у тому числі низький $\cos\phi$.

Не потребує доказів той факт, що система 3 кВ постійного струму вичерпала свої можливості, оскільки підвищення потужності локомотивів (підвищення струмового навантаження) приведе до зниження напруги на контактному дроті, що зменшує пропускну здатність завантажених ділянок.

Тягові перетворювачі рухомого складу призначені для керування їх тяговими електродвигунами: регулювання швидкості, переходу від режиму тяги до електричного гальмування та безконтактної зміни напрямку руху - реверса. У даний час тягові перетворювачі виконують на основі напівпровідникових приладів, раніше використовувалися також іонні прилади.

Головна перевага напівпровідникових тягових перетворювачів полягає в тому, що вони дозволяють змінювати усі основні параметри електричної енергії: частоту, напругу, число фаз і гармонічний склад. При цьому забезпечуються високий ККД, невеликі розміри та висока надійність у зв'язку з відсутністю рухомих частин і механічних контактів.

Тому ці перетворювачі найбільшою мірою задовольняють численні та часто важко здійснювані вимоги, що ставляться до пристроїв керування потоком електричної енергії тягових електроприводів.

Основні недоліки:

оскільки напівпровідникові прилади є відносно новими технічними приладами, деякі з них досить дорогі, а також немає достатнього досвіду застосування їх на тяговому рухомому складі;

тягові перетворювачі дають підвищений рівень електромагнітних перешкод в тягових мережах, що ускладнює роботу пристроїв зв'язку, сигналізації та систем керування.

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

1 Вибір структурної схеми силового тягового перетворювача електровоза

1.1 Загальні вимоги до тягових перетворювальних пристроїв

Вимоги, які пред'являються до статичних перетворювачів та пристроїв в їх основі, цілком повинні відповідати особливостям роботи тягових перетворювачів в умовах транспортного виконання. Насамперед, це основні два напрямки [1–5]:

1. Забезпечення мінімальної маси, габаритних розмірів.
2. Висока надійність в експлуатації та ремонтна придатність.

Вказані вимоги можливо забезпечити вдосконаленням напівпровідникових пристроїв.

Енергетична ефективність статичного перетворювача та системи управління ЕРС у цілому оцінюється коефіцієнтом корисної дії (ккд) η і коефіцієнтом потужності K_m . Чим вище значення цих коефіцієнтів, тим більшу енергетичну ефективність має електровоз. ККД електровоза електровозу змінного струму повинно бути не менш 0,86. На ділянках змінного струму вплив ЕРС проявляється у викривленні синусоїдальної форми струму та напруги. Подібні викривлення негативно впливають на лінії телефонної й радіозв'язку, системи сигналізації й автоматичного блокування, а також викликають підвищене нагрівання струмоведучих частин тягової мережі. Якість споживання електроенергії регламентується ГОСТ 13109-97.

Для електровозів зниження масо габаритних показників електроустаткування відкриває можливості збільшення як кількості перевезених пасажирів, так і зменшення собівартості перевезень.

Надійність статичного перетворювача дуже впливає на надійність ЕРС у цілому, оскільки здійснюється регулювання сили тяги в необхідних межах.

Імовірність безвідмовної роботи електровоза залежить від кількості елементів перетворювача і їх якості. Сучасний електровоз є складною системою, що складається з 105-106 деталей. У зв'язку з чим ЕРС необхідно комплектувати такими елементами, які гарантують тривалу роботу в умовах вібрації й зміни температури (ГОСТ17516.1-90Е и ГОСТ15150-80). Для найбільш відповідальних пристроїв, відмова яких вимагає виклику допоміжного локомотива, повинна бути передбачена резервна схема з можливістю роботи зі зниженою потужністю.

Робота локомотивних тягових перетворювачів характеризується наявністю значних перенапружень, що впливають на елементи перетворювача, при коливаннях напруги джерела живлення, спрацьовування захисту, боксуванні електровоза і т.п. Навантаження перетворювальних пристроїв електровоза різко змінне, що пов'язано з режимом ведення поїзда, боксуванням колісних пар.

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

Умови роботи перетворювачів регламентуються ГОСТ4.139-85 і 25953-83, за якими пристрої повинні працювати при температурах навколишнього середовища від -70 до +50 °С, в умовах сильного забруднення повітря пилом, парами масла і палива, а також високої вологості повітря. Перетворювачі повинні стійко функціонувати в умовах агресивних середовищ. Механічні дії на обладнання рухомого складу, які досягають 3g, а можливо значно збільшитися як за частотою, так і за амплітудою, при несправності механічної частини електровоза або шляху.

Кожен тяговий перетворювач електровоза підключається до двох тягових обмоток трансформатора. При цьому кожна тягова обмотка підключається до 4-х квадрантного випрямляча (4QS). Підключення виробляється однофазними вхідними роз'єднувачами. За допомогою вхідного роз'єднувача можливе від'єднання перетворювача від трансформатора також у разі несправності (несправний перетворювач відключається від тягового трансформатора і не впливає на нормальну роботу решти споживачів, підключених до трансформатора).

Кожний з мережевих роз'єднувачів сполучений перемичками з блоком попередньої зарядки. Блок попередньої зарядки складається з контактора попередньої зарядки і опору. При запуску перетворювача через нього заряджає конденсатор проміжного контуру перетворювача перш, ніж буде замкнутий мережевим роз'єднувачем. Таким чином запобігає великому кидку пускового струму, який виник би при включенні вхідної напруги на розряджені конденсатори. Мережевий роз'єднувач включається, коли напруга проміжного контура досягне 95 % теоретичного значення зарядки.

До кожної тягової обмотки на вході тягового перетворювача підключений трансформатор струму для вимірювання вхідного струму.

Особливості режимів роботи тягових перетворювачів [1–5]:

1. Габаритні розміри. Повинні забезпечувати можливість їх розташування на відповідному РС.
2. Ускладнення вентиляції силових напівпровідникових приладів, реалізації необхідних ізоляційних проміжків.
3. Напруга контактної мережі суттєво відрізняється від номінальної (2,4...4 кВ, 19...29 кВ).
4. Напруга на ТД ЕРС постійного струму, який працює в режимі рекуперації, перевищує номінальну напругу контактної мережі на 33 %. Для ЕРС змінного струму ця величина складатиме 1,16 номінальної напруги контактної мережі. Елементи перетворювачів розраховуються на максимальні рівні напруги контактної мережі.

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

5. В наслідок коливань напруги, відривів струмоприймача, робота всього електрообладнання супроводжується зміною струмів до 106 А/с. Це впливає на вихідні каскади пристроїв управління тиристорами.
6. Змінна величина індуктивності контактної мережі.
7. Перенапруження до 15-20 кВ.
8. Навантаження перетворювальних пристроїв локомотивів різко змінне (від коливань напруги та боксувань).
9. При температурах навколишнього середовища від -70 до +50 оС, в умовах сильного забруднення повітря пилом, парами масла, а також високої вологості повітря.
10. В нормальному стані ЕРС динамічні інерційні прискорення досягають 25g.

1.2 Структурні схеми статичних перетворювачів сучасного ЕРС

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 детальна схема. 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 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.

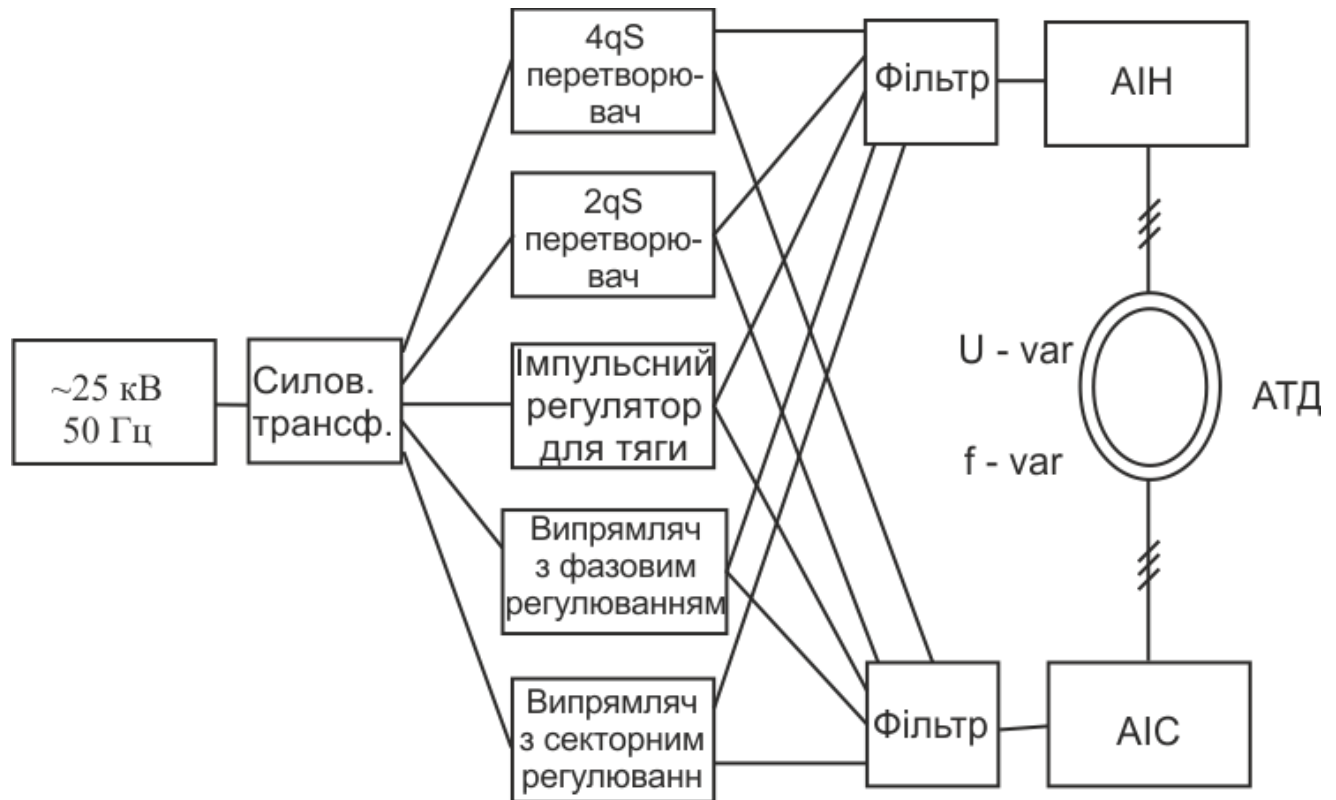
Функціональна схема – це гібрид структурної і принципової схем. Функціональна схема дозволяє зрозуміти всю логіку роботи пристрою, всі його відмінності від інших подібних пристроїв, але не дозволяє без додаткової самостійної роботи відтворити цей пристрій. У технічній документації обов'язково наводиться структурна або функціональна схема, а також обов'язково принципова схема зі специфікацією. У наукових статтях і книгах найчастіше обмежуються структурною або функціональною схемою, приводячи принципову тільки деяких вузлів.

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

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. 1.1 показані можливі варіанти силових схем статичних перетворювачів електричної енергії для вантажних електровозів [6].

Рисунок 1.1 – Варіанти структурних схем перетворювачів частоти та кількості фаз для живлення АТД



Виходячи з останньої структурної схеми можна зробити висновок, що при використанні АТД можливі 10 варіантів схем.

1.3 Вибір структурної схеми тягового перетворювача

Для живлення асинхронних двигунів з частотним керуванням використовують трифазні статичні перетворювачі, які називають автономними інверторами. На вхід таких перетворювачів завжди подають постійну згладжену напругу, а на виході інвертори формують трифазну змінну напругу регульованої величини і частоти.

Для регулювання величини діючої фазної напруги, прикладеної до обмотки статора асинхронного двигуна, використовують різні варіанти модуляції, суть яких зводиться до накладання на процес перемикання фаз інвертора додаткового про-

цесу імпульсного переривання підключення вхідної напруги інвертора U_d до фаз асинхронного двигуна.

Фазна напруга на виході інвертора – це чергування прямокутних імпульсів різних тривалості, полярності і амплітуди. При такій напрузі живлення струм в фазах асинхронного двигуна теж стає у великій мірі несинусоїдальним.

Головним же негативним результатом цього є збільшення втрат в двигуні і зниження його номінальної потужності.

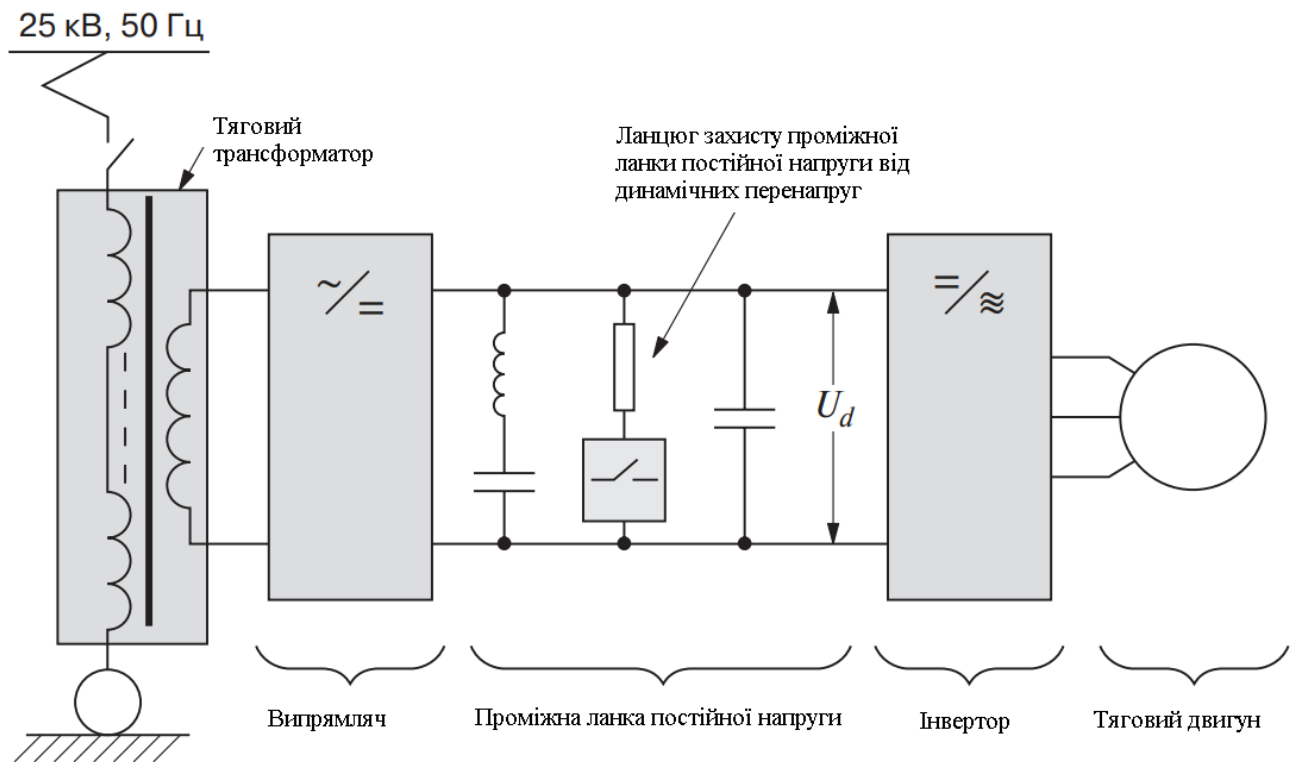
Вплив спотворень форми фазного струму на рівень втрат в асинхронному двигуні є найбільш важливою особливістю живлення асинхронного двигуна від статичного перетворювача. В цілому наблизити форму фазного струму асинхронного двигуна до синусоїдальної можна підвищенням частоти модуляції в інверторі. При цьому зменшуються втрати в двигуні, але істотно збільшуються втрати в перетворювачі. Тому при проектуванні статичних перетворювачів і асинхронних тягових двигунів принципово важливо завжди розглядати систему в цілому і вести комплексний пошук оптимуму, а не оптимальної конструкції кожного елемента системи окремо.

Для живлення асинхронного двигуна трифазною напругою регульованої величини і частоти необхідний статичний перетворювач, а саме інвертор, на вхід якого подають згладжену постійну напругу U_d . Такі інвертори використовують на всіх електровозах незалежно від роду струму на струмоприймачі.

На електровозах змінного струму згладжену постійну напругу для живлення інверторів отримують за допомогою керованого випрямляча і фільтра в проміжній ланці постійної напруги - коло, що з'єднує випрямляч і інвертор [3–5]. Дана структурна схема зображена на рис. 1.2

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

Рисунок 1.2 - Побудова силового кола електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами



Випрямлячі на електровозах змінного струму і імпульсні регулятори на електро-возах постійного струму узагальнено називають мережевими перетворювачами. В обох випадках мережеві перетворювачі забезпечують підтримку величини на-пруги на вході інвертора U_d на заданому стабільному рівні незалежно від вели-чини напруги в контактній мережі. Рівень номінальної напруги на вході інвер-тора U_d вибирають в залежності від типів використовуваних силових напівпрові-дникових приладів і параметрів тягового двигуна. У потужних перетворювачів для електровозів рівень номінальної напруги на вході інвертора зазвичай виби-рають в діапазоні від 1800 до 3600 В [3–5].

У схемі «прямого включення» неможлива підтримка величини напруги на вході інвертора U_d на заданому стабільному рівні незалежно від величини напруги в контактній мережі. У цьому випадку напруга на вході інвертора U_d завжди в се-редньому близька до поточної напруги на струмоприймачі електровоза. Це озна-чає, що конструкції перетворювача і двигуна повинні бути розраховані на мак-симальну напругу на вході інвертора близько 4000 В – гранична робоча напруга в системі тягового електропостачання постійного струму.

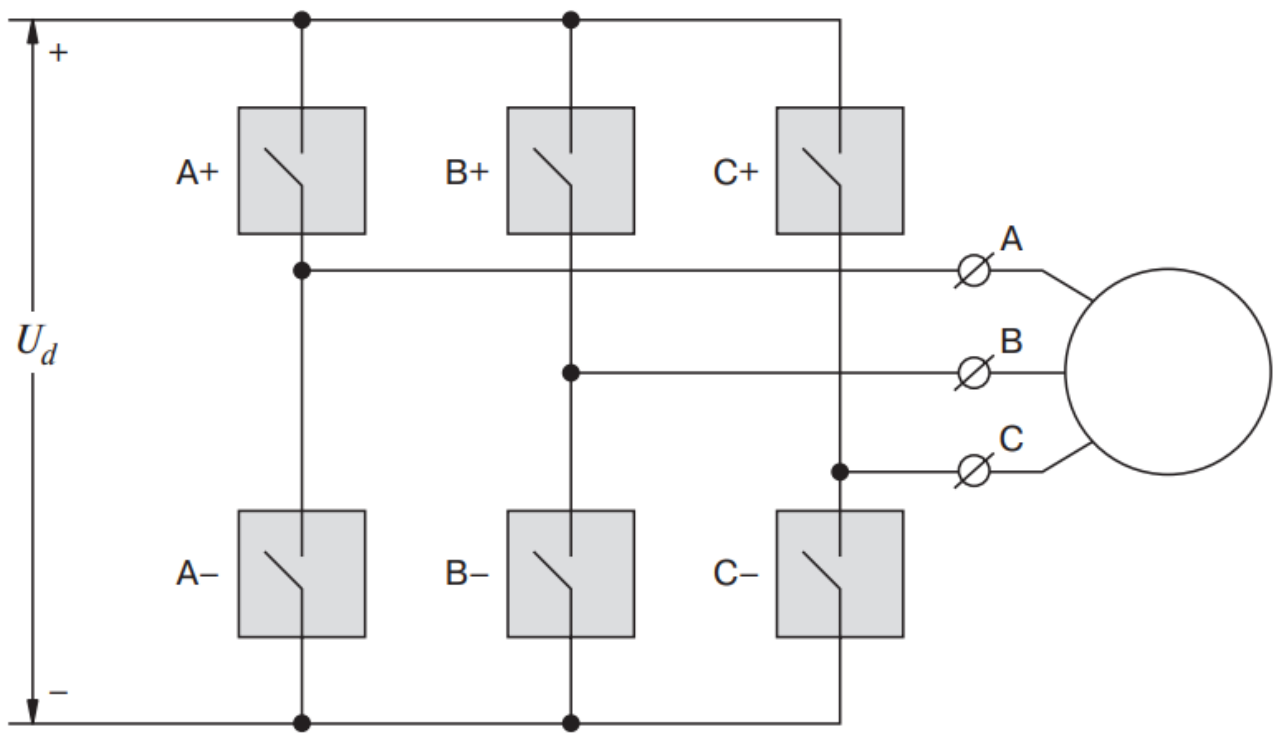


Рисунок 1.3 - Спрощена схема трифазного інвертора

При максимальній робочій напрузі на вході інвертора 4000 В найпростішу схему інвертора, показану на рис.1.3, можна використовувати, якщо силові напівпровідникові прилади мають граничну допустиму напругу 6500 В (65-го класу). Це обумовлено необхідністю певних запасів по напрузі в зв'язку з тим, що при вимкненнях на силовому напівпровідниковому приладі завжди виникають перенапруги, амплітуда яких не повинна перевищувати гранично допустиму напругу.

Силові напівпровідникові прилади IGBT-транзистори 65-го класу з'явилися тільки на початку ХХІ ст. Раніше, в 1990-і роки, були доступні тільки GTO-тиристри 45-го класу (на 4500 В). Щоб при використанні таких силових напівпровідникових приладів інвертор надійно працював при напрузі на вході 4000 В, необхідно послідовне з'єднання силових напівпровідникових вентилів. Але GTO-тиристри і IGBT-транзистори не допускають безпосереднього послідовного з'єднання, так як вмикаються і вимикаються дуже швидко. У ці короткі проміжки часу забезпечити рівномірний розподіл напруги між послідовно з'єднаними приладами технічно неможливо. У зв'язку з цим в 1990-і роки були розроблені спеціальні схеми інверторів, які забезпечують необхідні умови роботи силових напівпровідникових приладів по напрузі.

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

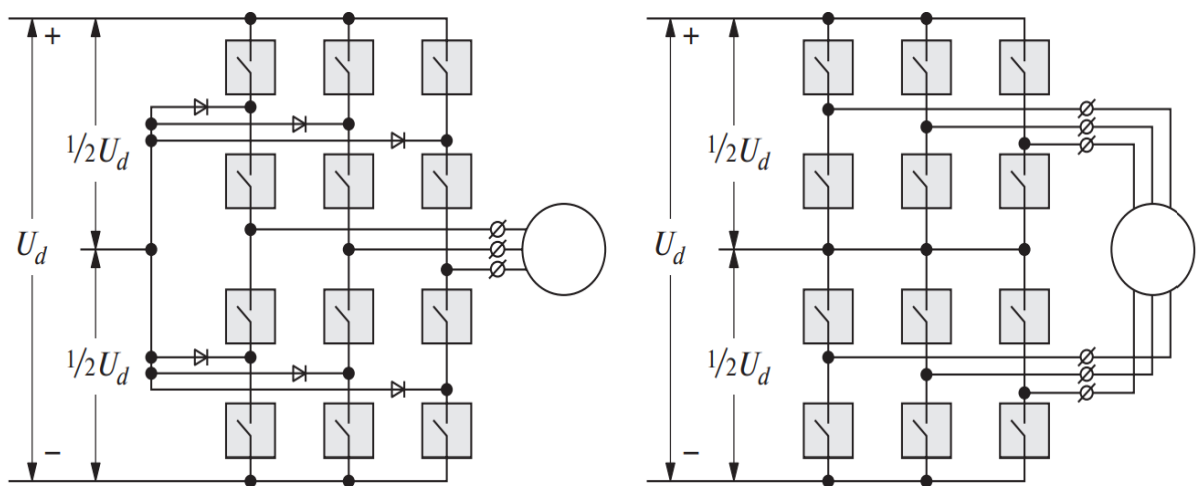


Рисунок 1.4 - Побудова схем інверторів «треточкова схема» (а) і «подвійна зірка» (б)

На рис. 1.4 показані дві схеми застосовуються на електровозах схеми інверторів, які отримали спрощені найменування «треточкова схема» і «подвійна зірка» [7]. Як видно з рис. 1.4, в обох схемах використовують 12 силових ключів замість 6. Характерною особливістю обох схем є розділена на дві половини проміжна ланка постійної напруги. Завдяки цьому поділу і забезпечується дотримання необхідних умов роботи силових ключів інвертора по напрузі: гранична середня напруга, прикладена до напівпровідникового приладу в таких схемах, завжди не перевищуватиме половини U_d (без урахування комутаційних перенапруг).

З точки зору роботи електромагнітної системи асинхронного двигуна схема «подвійна зірка» ідентична звичайній схемі обмоток. Управління обома інверторами здійснюють повністю синхронно. Завдяки цьому дві півобмотки кожної з фаз завжди підключаються до мережевої напруги послідовно. Це і забезпечує розподіл напруги навпіл. Тяговий двигун при цьому фактично виконує роль дільника напруги.

Як видно з рис. 1.2, в проміжній ланці постійної напруги присутній спеціальна вітка з резистором і електронним ключем для захисту проміжної ланки від динамічних перенапруг.

При скачках напруги в контактній мережі або різких зниженнях тягової потужності напруга в проміжній ланці U_d значно підвищується. Згладити це підвищення можна короткочасним додатковим відбором надлишкової енергії з проміжної ланки. Для цього до проміжної ланки підключають вітку з резистором, в якому надлишкова енергія розсіюється. В якості електронного ключа використовують такі ж силові прилади, як у випрямлячі або інверторі. Це дуже ефективний і швидкодіючий спосіб захисту від перенапруг, наявність якого дозволяє не закладати

в елементи занадто великі запаси по напрузі і оптимізувати завдяки цьому масо-габаритні показники і вартість перетворювача.

Якщо вимоги передбачають наявність на електровозі реостатного гальмування, функцію захисту від перенапруги в проміжну ланку виконує гальмівний резистор, який також підключають через силовий напівпровідниковий прилад, який одночасно грає роль гальмівного імпульсного регулятора. Якщо реостатного гальмування на електровозі немає, резистор необхідної потужності встановлюють всередині тягового перетворювача.

На рис. 1.4, а і б видно, що в трьоточковій схемі і схемі «подвійна зірка» використані два кола гальмівних резисторів окремо для кожної половини проміжної ланки постійної напруги. Це зроблено для того, щоб рівномірно ділити мережеву напругу між входами двох послідовно з'єднаних інверторів, коли силові напівпровідникові прилади інверторів знаходяться в закритому стані (в режимі вибігу або на стоянці).

При замкнених GTO-тиристорах або IGBT-транзисторах рівномірний розподіл напруги за рахунок дії інвертора і обмоток двигуна неможливий. В цьому режимі потенціал середньої точки може повільно зміщуватися або в сторону потенціалу контактної мережі, або в бік «землі» через різницю величини струму витоків фільтрових конденсаторів в половиних проміжної ланки. Для вирівнювання такого зміщення система управління періодично включає одну з кіл гальмівних резисторів на кілька десятків мікросекунд. Цього достатньо для вирівнювання напружень, щоб потенціал середньої точки підтримувати на рівні половини напруги з прийнятними відхиленнями.

Функції реостатного гальмування і захисту від перенапруг в таких схемах два кола гальмівних резисторів виконують також окремо, щоб можливість примусового вирівнювання розподілу напруги між двома половинами проміжної ланки була доступна в будь-який момент часу.

В цілому існує вже досить багато варіантів компонування силових кіл перетворювачів для живлення асинхронних двигунів, особливо для двосистемних електровозів. Але всі ці схеми засновані на базових принципах побудови, показаних на рис. 1.2.

Вибір схеми перетворювача для кожного конкретного проекту, як правило, визначається необхідною потужністю і параметрами доступних силових напівпровідникових приладів.

Проміжний контур сполучає вхідні випрямлячі з вихідними інвертуваннями. Напруга проміжного контура є постійною напругою, яка підтримується конденсатором проміжного контура. За допомогою постійного струму, який протікає в

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

проміжному контурі, здійснюється переміщення потоку енергії між входом і виходом тягового перетворювача. Потік енергії може бути направлений як від входу до виходу (режим тяги), так і у зворотному напрямі (режим рекуперації).

Потужність на виході тягового перетворювача повинна бути постійна в часі, проте потужність, одержувана від тягової мережі, пульсує з подвійною частотою мережі. Тому для накопичення енергії необхідний проміжний буфер, який присутній у вигляді контуру резонансу. Резонансна частота контуру відповідає подвійній частоті мережі.

Резонансний контур складається з конденсатора (C_{SK}), який вбудований в шафу тягового перетворювача, і дроселя (L_{SK}), який вбудований в тяговий трансформатор електровоза.

Імпульсне інвертування генерує з напруги проміжного контуру трифазну систему напруг. На виході тягового перетворювача знаходяться два вихідні Інвертування PWR до кожного з яких підключений тяговий двигун. За допомогою імпульсного інвертування можна регулювати вихідну напругу і частоту. Таким чином, PWR є регульованим джерелом напруги.

Імпульсне інвертування складається з трьох фазових модулів аналогічних фазовим модулям чотирьохквadrантного випрямляча. IGBT-транзистори фазних модулів імпульсного інвертування, виконуючи функцію потужного високочастотного перемикача, дозволяють три вихідні клеми з'єднувати з «+» або з «-» проміжного контуру згідно із законом, визначуваному системою управління. У тяговому режимі ці перемикачир виробляються із заданою регульованою частотою і фазою таким чином, що на вихідних клеммах тягового перетворювача встановлюється трифазна синусоїдальна напруга.

Оскільки зрушення по фазі і частота напруги довільно регульовані, то для тягового двигуна можливий також режим рекуперації. При цьому двигун працюватиме в режимі генератора. Імпульсне інвертування віддає енергію назад в проміжний контур, а через 4QS назад в контактну мережу.

Напруга, одержана від імпульсного інвертування не є синусоїдальною, а містить вищі гармоніки. Хоча струм і згладжується індуктивністю розсіювання тягового двигуна, він все ще володіє деякими пульсаціями, які викликають коливальні моменти і втрати в тяговому двигуні, викликані вищими гармоніками. За рахунок високої тактової частоти перемикачир автономного Інвертування напруги пульсація струму мінімізується.

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

1.4 Вибір структурної схеми джерела живлення допоміжних машин

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

Узагальнена структурна схема статичних перетворювачів сучасного ЕРС змінного струму представлена на рис. 1.5

Розглянемо структурні вузли структурної схеми (рис.1.5). 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.

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.

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;

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

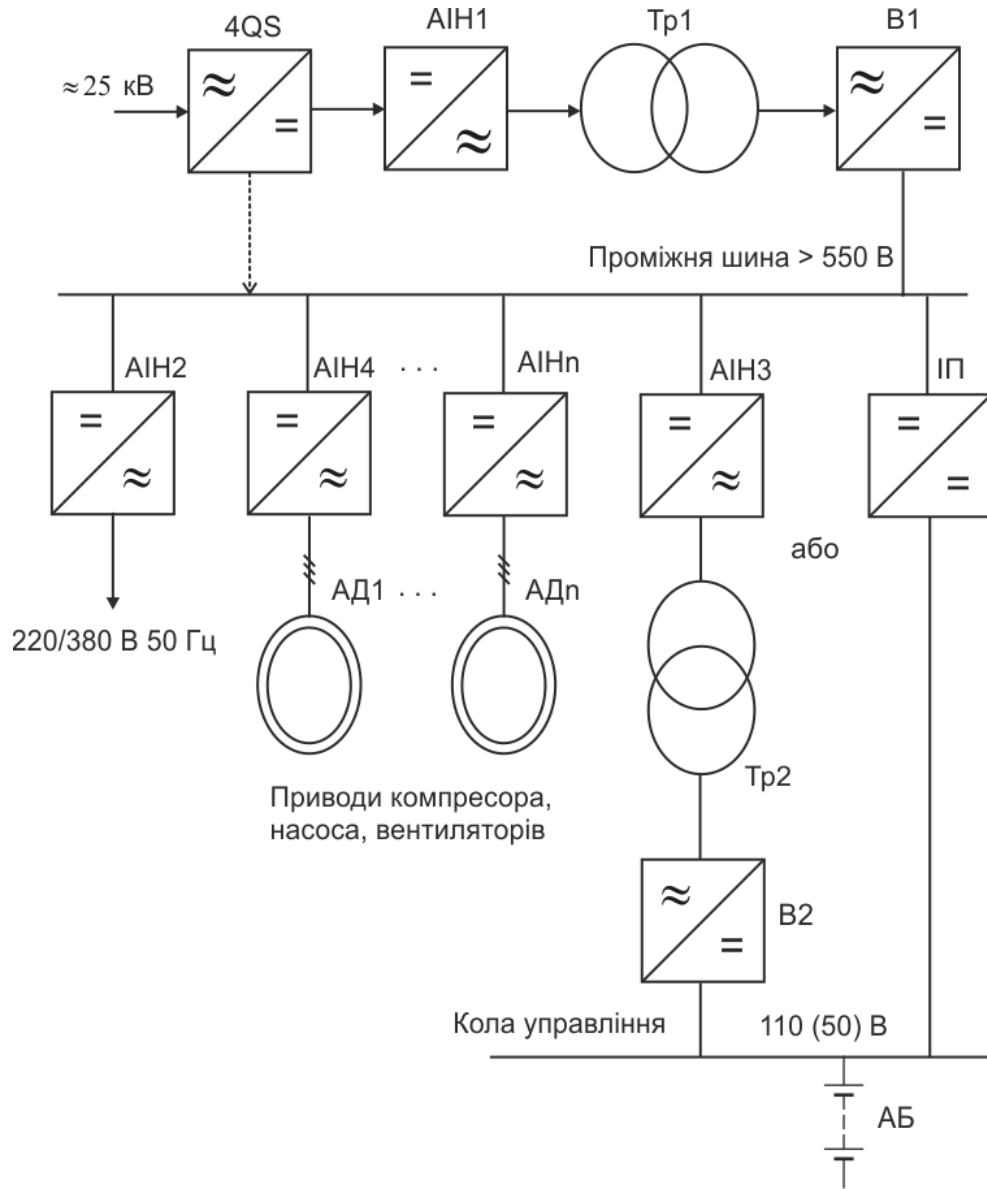
- б) можливість установки стандартних машин загальнопромислового призначення;
- в) можливість підвищити надійність роботи, зменшити габарити, вартість;
- г) поліпшені умови експлуатації машин, зв'язані зі стабільністю напруги на них, тому що ні колювання, ні кидки напруги на них практично не можливі 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 ІІ знижуючого типу (наприклад ВЛ11М6, ДЕ1). Рішення обговорюється під час формування технічного завдання на проектування електровозу.

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

Рисунок 1.5 – Структурна схема тягових перетворювачів допоміжних кіл сучасного ЕРС змінного струму.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2. Розробка силової схеми тягового перетворювача електровоза подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами

Головним вузлом будь-якого напівпровідникового перетворювача є силовий перетворювальний блок, який виконує основну функцію з перетворення параметрів електричної енергії шляхом періодичних перемикань. Для нього силовий перетворювальний блок містить силові напівпровідникові ключі СНК як основні елементи, а також, можливо, трансформатори і фільтри проміжних величин [4].

СНК виконує елементарну функцію періодичного замикання та розмикання електричного кола. Він може бути простим та складеним. Простий СНК містить тільки напівпровідникові прилади, складений СНК може мати пристрої комутаційного захисту (снабери) та вихідні пристрої керування (драйвери). Елементи складеного СНК часто поєднуються у силову інтегральну схему. Ключі СПБ звичайно поєднуються у комутатори. Комутатором називають сукупність напівпровідникових ключів, які виконують єдину перетворювальну функцію. Конструктивно комутатор може виконуватися як сукупність дискретних СНК, так і у вигляді силової інтегральної схеми.

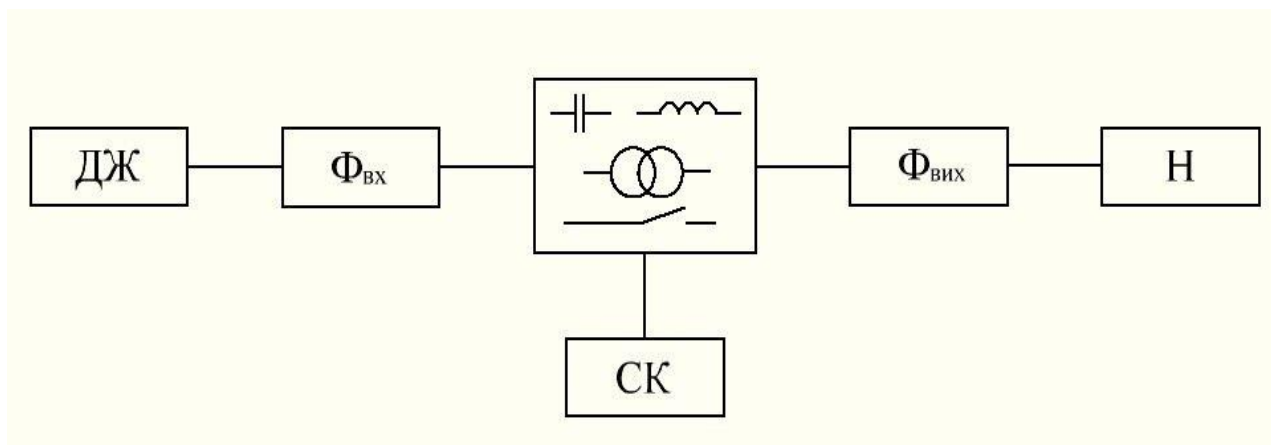
Ключовий режим роботи силових напівпровідникових приладів у СНК дозволяє одержати високий ККД, тому що у ввімкненому стані наближається до нуля напруга на ключі, а у вимкненому - струм ключа, і тому мала потужність втрат, оскільки вона є добутком цих величин.

Система керування задає тривалість інтервалів часу, коли ключі силового перетворювального блоку ввімкнені та вимкнені. Оскільки ключі комутатора діють шляхом перемикань, то напруги і струми на вході та виході СПБ мають форму імпульсів з великим вмістом гармонічних складових. За винятком основних гармонік, вони, як правило, не створюють корисного ефекту в джерелі живлення та навантаженні. Навпаки, вони створюють додаткові втрати енергії та перешкоди пристроям керування і зв'язку. Тому їх зазвичай послаблюють за допомогою вхідного і вихідного фільтрів.

Блоки верхнього ряду структурної схеми на рис. 2.1 утворюють силову схему перетворювача.

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

Рисунок 2.1- Структурна схема статичного перетворювача



2.1 Аналіз схеми тягових перетворювачів ЕП10

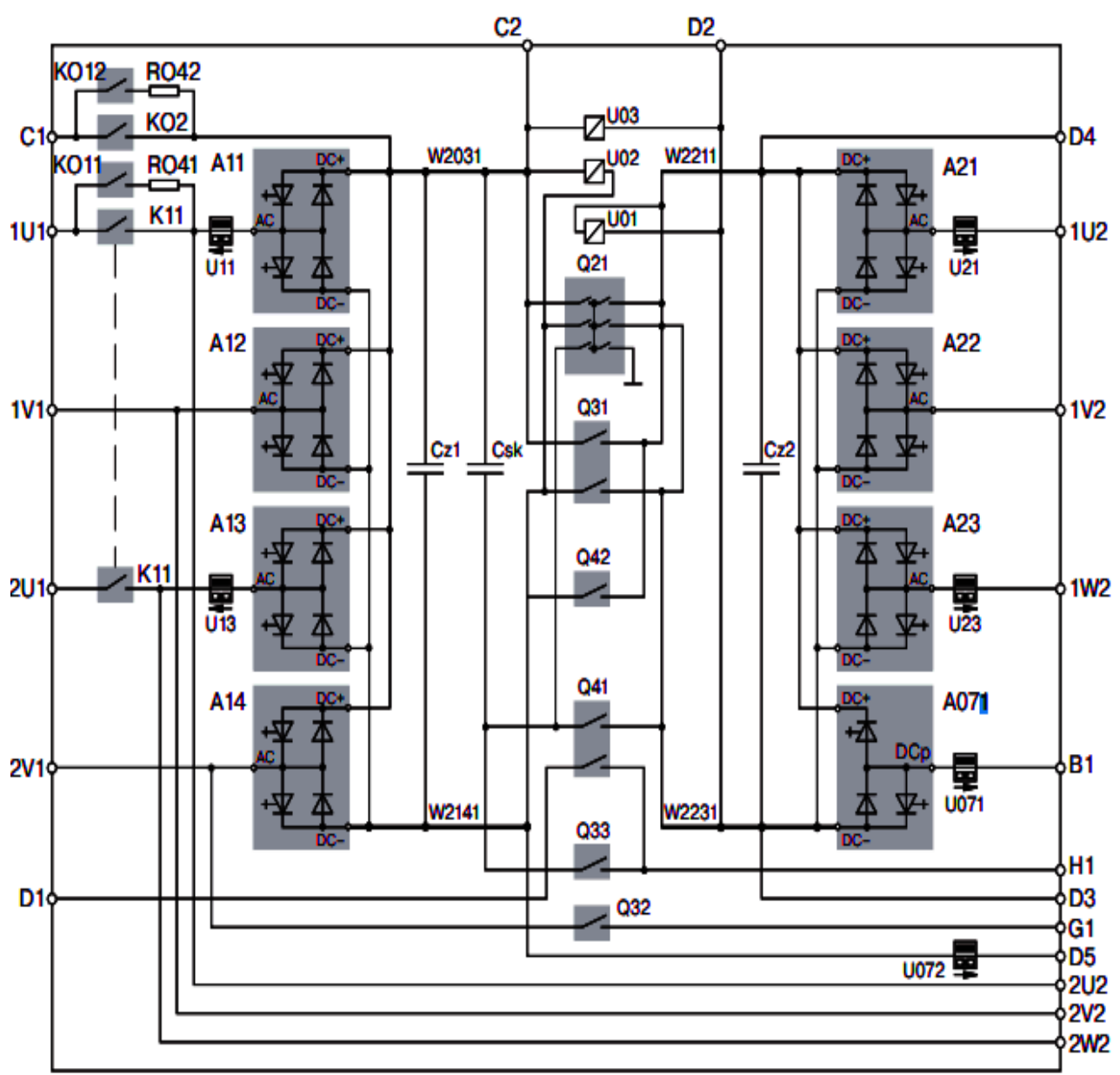
У всіх трьох тягових перетворювачів електровоза ЕП10 ці кола повністю ідентичні [7]. На схемах цього розділу і наступних, що відносяться до кіл одного візка, цифрові позначення елементів показані на прикладі перетворювача №1 (UZ1) Основу перетворювача складається з восьми силових модулів:

- чотири силових модуля типу ZV24-2830-U (A11, A12, A13, A14);
- три силових модуля типу ZV24-2830-L (A21, A22, A23);
- один силовий модуль типу BV24-2830-L (A071).

У силових модулях типу ZV24-2830-U і ZV24-2830-L встановлені по два GTO-тиристора, що утворюють два плеча півмоста: плюсове і мінусове.

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

Рисунок 2.2 - Схема силових кіл тягового перетворювача електровоза ЕП10



Ці модулі використовують в випрямлячах, інверторах і гальмівному регуляторі. У силовому модулі BV24- 2830-L встановлений лише один GTO-тиристор, і цей модуль використовують тільки в якості гальмівного регулятора.

У зв'язку з цим позначення вихідного затиску AC в цьому модулі (A071) замінено на позначення DCp. Силкові модулі A11, A12, A13, A14 утворюють два мостових випрямляча. Змінна напруга з двох тягових вторинних обмоток трансформатора через входні затиски змінного струму 1U1, 1V1, 2U1, 2V1 перетворювача і здвоєний лінійний контактор змінного струму K11 надходить на чотири однофазних входу змінного струму AC чотирьох фазових силових модулів - A11, A12, A13, A14.

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

Так само, від вхідного затиску змінного струму 1U1, напруга на вхід АС модуля А11 может бути подано через кіл попереднього заряду проміжної ланки, що складається з контактора К011 і резистора R041.

При підготовці перетворювача до роботи першим завжди включається контактор К011. Через цей кіл потужна батарея конденсаторів проміжної ланки постійної напруги плавно заряджається до амплітудного напруги вторинної тягової обмотки тягового трансформатора, а через кілька секунд включається лінійний контактор К11. Це дозволяє уникнути значного кидка зарядного струму. Виходи постійного струму DC + і DC- силових модулів А11, А12, А13, А14 відповідно підключені

до проміжного ланці постійної напруги, яке утворюють шини W2031 (плюсова) і W2141 (мінусова). До цих шинам підключена батарея фільтрових конденсаторів Cz1. Через двополюсний системний перемикач Q31 шини W2031 і W2141 з'єднані з шинами W2211 і W2231-продовженням проміжної ланки постійної напруги.

До цих шинам підключені:

- батарея фільтрових конденсаторів Cz2;
- входи постійного струму DC + і DC- силових модулів А21, А22, А23, які утворюють інвертор;
- входи постійного струму DC + і DC- силового модуля А071, який утворює регулятор кола гальмівного резистора R11.1.

Також до проміжного ланці постійної напруги між шинами W2031 і W2231 підключена коло резонансного LC-фільтра з власною частотою 100 Гц. Цей фільтр утворюють батарея конденсаторів Csk, системний перемикач Q33 і дросель L1.2. З виходів змінного струму АС силових модулів А21, А22, А23 через вихідні затискачі змінного струму 1U2, 1V2, 1W2 перетворювача напруга подається на кабелі, що з'єднують тяговий перетворювач з обмотками тягових двигунів, з'єднаних в «повну зірку».

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму, до цієї шини підключені плюсові затискачі постійного струму DC + силових модулів A11, A12, A13, A14, а мінусові затискачі постійного струму DC- силових модулів A11, A12, A13, A14 підключені до шині W2141.

Так само, від вхідного затиску постійного струму C1, напруга на шину W2031 может бути подано через кола попереднього заряду проміжної ланки, що складається з контактора K012 і резистора R042.

Шини W2031 і W2141 утворюють верхню половину здвоєного проміжної ланки постійної напруги, а шини W2211 і W2231- нижню половину здвоєного проміжної ланки, до якої підключені силові модулі A21, A22, A23 першого інвертора і силовий модуль A071 регулятора коло гальмівного резистора R11.1.

Таким чином, середню точку здвоєного проміжної ланки постійної напруги утворюють шини W2141 і W2211, з'єднані через системний перемикач Q42.

У цій схемі батарея конденсаторів Cz1 залишається підключеною до шин W2031 і W2141 і працює у верхній половині проміжного ланки.

2.2 Аналіз схеми тягових перетворювачів ЕП20

Пасажирський шестивісний електровоз ЕП20 подвійного роду струму з асинхронними тяговими двигунами (АТД) обладнаний принципово нової тягової системою. Її основу складають сучасні електромеханічні, силові напівпровідникові і електронні пристрої: тягові перетворювачі, тягові двигуни, допоміжний перетворювач, тяговий і допоміжні трансформатори, блок дроселів, блоки гальмівних резисторів (БТР), головний вимикач (ГВ), швидкодіючий вимикач (БВ), високовольтний та низьковольтні блоки. У них широко використовуються мікропроцесорні пристрої.

У тягової системі локомотива нового покоління втілені сучасні рішення в області електроприводу з асинхронними двигунами, регульованого допоміжного приводу. Так, на ньому застосовані високочастотні високовольтні IGBT-транзистори (від англ. Insulated-Gate Bipolar Transistor) - біполярні транзистори з ізольованим затвором, керовані мікропроцесорної системою з широкими функціями вбудованої (безрозбірної) діагностики компонентів.

Залежно від роду струму використовується відповідна конфігурація тягової системи. Такі компоненти як ГВ і тяговий трансформатор використовують при роботі на змінному струмі, БВ - на ділянках постійного струму.

Перелічимо основні функції тягової системи електровоза ЕП20:

- управління мережевим перетворювачем (4QS) для регулювання потоку електроенергії між контактною мережею і ланкою постійної напруги;

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- управління вихідною трифазною інвертором для регулювання потоку електроенергії між ланкою постійної напруги і тяговим двигуном;
- узгодження характеристик вхідного і вихідного перетворювачів, усунення автоколивань, стабілізація регульованих величин;
- забезпечення протибуксувального захисту. У разі буксування однієї або декількох колісних пар реалізує протибуксувальний алгоритм управління електровоза стосовно АТД осей.

Використання безколекторного тягового приводу на локомотиві ЕП20 відкрило нові можливості в конкурентній боротьбі залізниць з іншими видами пасажирського транспорту. Можна відзначити ряд вигідних відмінностей від застосування асинхронного тягового приводу на електровозі п'ятого покоління:

- Завдяки великій жорсткості характеристик АТД, що формуються тяговим перетворювачем, більш повно (на 5 - 10% вище, ніж на електровозах з колекторним приводом) і практично на межі по зчепленню реалізується тягове зусилля, що розвивається електровозом;
- Номінальна потужність АТД використана в усьому діапазоні швидкостей аж до конструкційної. Внаслідок цього локомотив стає універсальною рухомий одиницею, яка може мати різні передавальні числа тягового редуктора. Таким чином, можна розробляти локомотиви на різні максимальні швидкості. Зараз існують два виконання електровозів ЕП20 - на швидкості 200 км / год (основне виконання) і 160 км / год;
- В порівнянні з двигунами постійного струму серійних пасажирських електровозів потужність двигуна ДТА-1200А в тих же габаритах збільшена в 1,5 рази;
- В конструкції АТД використовували менше дорогих і екологічно шкідливих матеріалів: міді - в 2 рази, ізоляційних матеріалів - на 20%; повністю виключено застосування азбесту;
- Істотно зменшилася трудомісткість обслуговування і ремонту АТД (головним чином, через відсутність колекторно-щіткового вузла і ізольованою обмотки на роторі).

У силових колах електровоза органічно поєднуються дві схеми живлення устаткування від систем тягового електропостачання постійного і змінного струму. При розробці силової частини проектувальникам вдалося більш універсально використовувати основне устаткування, щоб оптимізувати масогабаритні показники і вартість комплексу необхідних електричних апаратів. Тягова система електровоза ЕП20 розроблена на основі принципу трансиверного, тобто використання більшості одних і тих же компонентів як на змінному, так і на постійному струмі.

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конфігурація на змінному струмі. В роботі знаходиться струмоприймач ХА1. Через включений ГВ напруга контактної мережі прикладається до первинної обмотці тягового трансформатора Т1. При цьому у вхідному ланцюзі в позитивний напівперіод утворюється наступне коло протікання струму в режимі тяги: струмоприймач ХА1, ГВ, первинна (мережева) обмотка тягового трансформатора Т1, струмоз'ємних пристроїв ХТ, рейок.

Напруга, прикладена до первинної обмотки трансформатора Т1, знижується на шести вторинних (тягових) обмотках до значення, відповідного нормальній роботі вхідних перетворювачів, конструктивно входять до складу тягових перетворювачів ТП1 - ТП3. Сьомий вторинною обмоткою трансформатора є обмотка енергозабезпечення вагонів (ООТ) з номінальною напругою 3000 В змінного струму.

До кожної тягової обмотки підключений вхідний перетворювач ТП, що забезпечує індивідуальне енергопостачання кіл харчування двигунів М1 – М6 за допомогою незалежно керованих тягових перетворювачів. Кожен з трьох блоків перетворювачів ТП1 - ТП3 містить в своєму складі (конструктиві) два перетворювача, кожен з яких індивідуально живить АТД.

Вхідні перетворювачі тягового блоку виконані за схемою так званого чотириквadrантний перетворювача (4QS). Вони перетворюють змінну напругу в напругу постійного струму 3000 В, значення якого вибрано для уніфікації з напругою на вході трифазних інверторів напруги.

При цьому вхідні перетворювачі забезпечують корекцію фази струму мережі з коефіцієнтом потужності електровоза, близьким до одиниці. Таке значення є одним з показників високої енергоефективності електровоза. Вхідний перетворювач через ланка постійної напруги підключений до трифазного автономному інвертору напруги.

Конфігурація на постійному струмі. При роботі на постійному струмі процес перетворення напруги зводиться до його регулювання на АТД за допомогою вихідного перетворювача АІН. При цьому тяговий трансформатор знаходиться поза колом перетворення енергії. Допоміжний перетворювач через комутаційні апарати підключений безпосередньо до контактної мережі. Його робоча напруга знаходиться в діапазоні 2200 ... 4000 В при номінальному значенні 3000 В.

На постійному струмі інвертори отримують живлення безпосередньо від вхідних високовольтних кіл електровоза через вхідний фільтр. Струм надходить в ланку постійної напруги з контактної мережі через струмоприймач постійного струму ХА2, швидкодіючий вимикач БВ, дросель L1 і далі - на тягові перетворювачі.

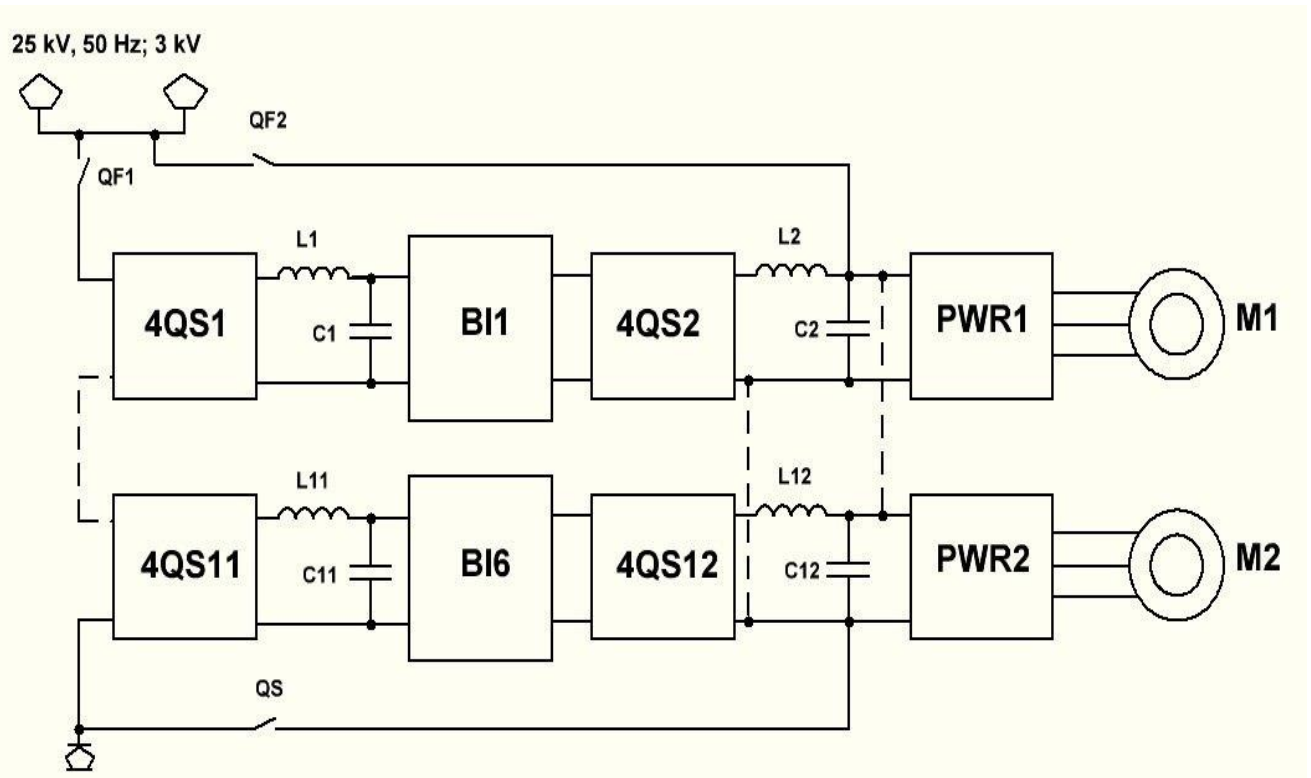
						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

За умовами стійкого електроживлення допоміжних навантажень застосовані чотири канали харчування (два - з фіксованою частотою харчування і два - з регульованою частотою і трьома ступенями напруги і частоти регулювання: 25, 40 і 50 Гц). Дані чотири канали одного допоміжного перетворювача підключені до ланкам постійної напруги тягових перетворювачів 2 – 5.

2.3 Аналіз схеми тягового чотирьохкватратного перетворювача електровоза «Узбекистан»

Чотирьохкватратний перетворювач 4Qs є два мости (однофазний і трьохфазний) з транзисторами і зворотними діодами, з'єднані між собою з боку постійної напруги. З боку змінного струму послідовно включений індуктивний фільтр. З боку постійної напруги паралельно ввімкнений ємнісний фільтр.

Рисунок 2.4 – Принципова схема чотирьохкватратного перетворювача електровоза «Узбекистан»



Принцип роботи чотирьохкватратного перетворювача розглянемо на прикладі рекуперації, коли відбувається однофазне інвертування. Робота однофазного моста в режимі інвертування: постійна напруга E_d на конденсаторі перетворюється в змінну напругу.

. При цьому відбувається чергування наступних режимів:

1. Відкрито два транзистора в протилежних плечах - VT1 і VT2.

Конденсатор розряджається на вторинну обмотку трансформатора зі збереженням полярності.

2. Відкрито два транзистора в суміжних плечах - VT1 і VT3

(Інтервали часу 2-3, 6-7, 10-11, 14-15, 18-19). Вторинна обмотка трансформатора закорочена в першому напівперіоді через VD3 і VT1, у другому напівперіоді - через VD1 і VT3. Струм наростає. Напряга на виході однофазного моста $U_a = 0$. Конденсатор заряджається від трифазного моста і відділений від однофазного, $i_d = 0$.

3. Відкрито два транзистора в протилежних плечах - VT3 і VT4. Конденсатор розряджається на вторинну обмотку трансформатора зі зміною полярності: $U_a = -E_d$.

4. Відкрито два тиристора в суміжних плечах - VT2 і VT4 (інтервали часу 0-1, 4-5, 8-9, 12-13, 16-17 і 20). Вторинна обмотка замкнута накоротко в першому напівперіоді - через VT2 і VD4, а в другому напівперіоді - через VT4 і VD2. Як і в випадку 2, конденсатор заряджається від трифазного моста і відділений від однофазного. Струм I_a наростає, $I_d = 0$.

Функцією чотирьохквadrантного випрямляча є перетворення змінної вхідної напруги (однофазної змінної напруги тягової обмотки трансформатора) в задану постійну напругу проміжного контура.

Випрямляч 4QS складається з двох паралельно включених фазних модулів. Фазний модуль містить силові напівпровідникові прилади (IGBT-транзистори), а також шунтуючі (захисні) діоди і розвантажувальні елементи.

IGBT-транзистор виконує функцію потужного вимикача, що дозволяє виконувати комутаційні операції з великою частотою. Розвантажувальні елементи служать для зменшення потужності втрат, які виникають в IGBT-транзисторах при кожному процесі включення і виключення.

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

Напряга проміжного контура вища, ніж амплітудне значення напруги вторинної обмотки трансформатора. Таким чином, чотирьохквadrантний випрямляч працює як випрямляч, що підвищує. Роль дроселя виконує індуктивність розсіюван-

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

ня головного трансформатора. Тому відносно напружено короткого замикання трансформатора (u_k) повинне бути порівняно високим.

Випрямляч 4QS працює таким чином, що вторинна обмотка трансформатора по черзі закорочується і підключається до проміжного контура. При цьому виникає пульсація струму з піковими значеннями струму. За рахунок високої індуктивності розсіювання трансформатора пульсація струму згладжується і, тим самим, зменшуються пікові значення струму. Пульсації струму також передаються і на первинну сторону трансформатора. Внаслідок цього виникають пульсації в контактних дротах і рейкових колах. Відомо, що рейкові нитки одночасно використовують як в системах автоблокування і автоматичної сигналізації (АЛС), так і для пропуску зворотного струму на електрифікованих залізницях і метрополітенах, і тому піддаються постійній дії перешкод з боку тягового електропостачання.

Перешкоди, що виникають в тяговій мережі, можуть з'явитися і на вході приймачів приладів СЦБ гальванічним шляхом або індуктивно.

На підставі експериментальних даних зафіксований спектр таких частот в рейкових нитках при електротязі постійного струму: 50, 75, 100, 150 Гц. Найбільш небезпечною серед згаданих є частота 50 і 100 Гц, оскільки вона співпадає з кодовою несучою частотою рейкових кіл, використовуваних при електричній тязі постійного струму.

Якщо електровоз генерує змінні струми в діапазоні звукових частот (струми високих гармонік), то вони не повинні перевищувати певних значень, щоб не діяти на рейкові кола. Висока відносна напруга короткого замикання трансформатора (і тим самим висока індуктивність розсіювання) зменшує значення цих вищих гармонік. Чим вище відносна напруга короткого замикання трансформатора, тим сильніше пригнічуються вищі гармоніки.

Тяговий перетворювач мінімізує паразитні струми додатково тим, що всі чотирьохквADRантні випрямлячі електровоза тактуються із зсувом.

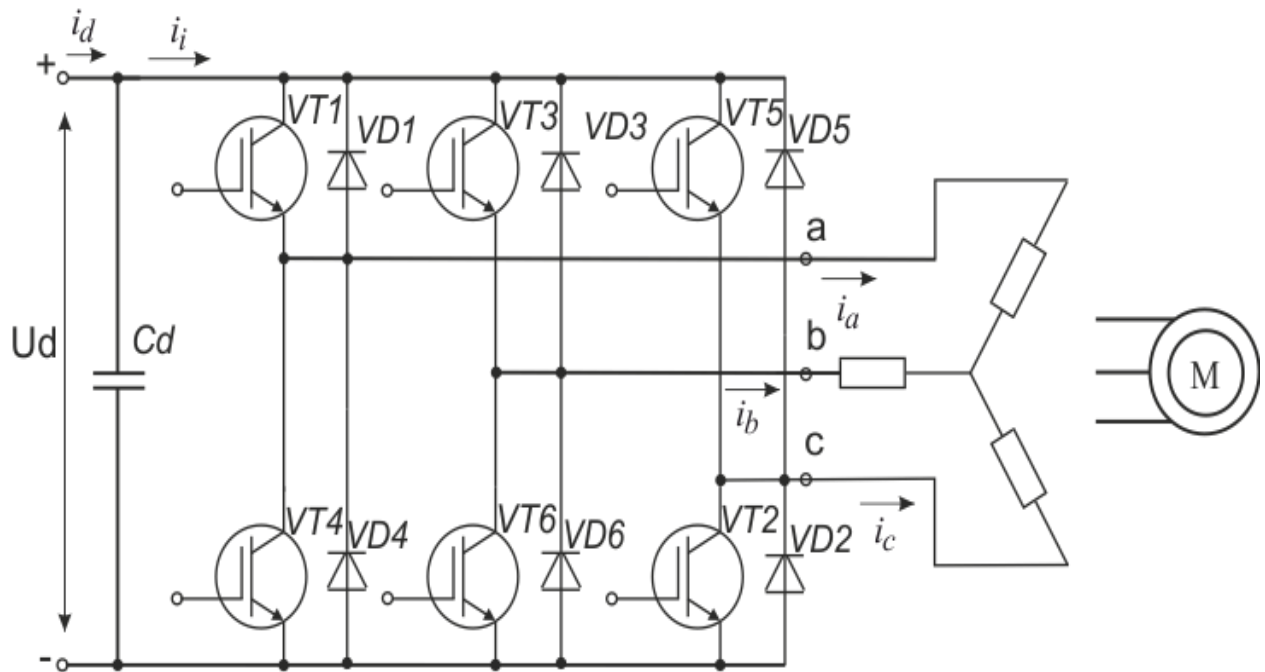
2.4 Розрахунок елементів автономного інвертора напруги

Принцип роботи автономних інверторів напруги.

Трифазні АІН призначені для живлення трифазних споживачів (асинхронних та синхронних двигунів) [4–6, 8].

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Рисунок 2.5 – Схема трифазного мостового інвертора напруги



Силкові транзистори в схемах працюють як ключі, отримуючи сигнали управління по колу бази від схеми управління СУ, побудованої на основі генератора прямокутних імпульсів.

Схеми та діаграми автономного інвертора при роботі на активну (а) і на активно-індуктивне (б) навантаження надходять на транзистори VT1 і VT2, не збігаються за часом, що усуває появу наскрізного струму джерела живлення E. Сигнали від СУ надходять по черзі так, що один транзистор відкривається в той момент, коли інший закривається. У схемах не потрібно додаткових комутуючих пристроїв, так як транзистори мають властивість повної керованості, і для включення і виключення досить управляти струмом їх базових кіл. В реальних схемах навантаження носить, як правило, активно-індуктивний характер. Під час перемикання транзисторів в такій схемі виникають умови, які можуть привести до великих перенапруги, оскільки струм в ланцюзі з індуктивним елементом не може миттєво змінити напрям. Отже, для попередження перенапруження в схемі повинна бути передбачена гілка струму навантаження на інтервалах t_2-t_3 після перемикання транзистора.

2.5 Вибір силових елементів автономного інвертора з амплітудною модуляцією ($\lambda=180^\circ$)

При розрахунках братимемо до уваги лише перші гармоніки вихідних напруги та струмів. Похибка при цьому не перевищує 5%.

Відповідно до завдання нам потрібно буде розрахувати перетворювачі для

формування напруги двох типів двигунів. Параметри першого двигуна є аналогом двигуна АД-914. При розрахунку другого двигуна задаємося довільними параметрами двигуна.

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

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

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 $U_{\text{фном}} = 990$ В та струм $I_{\text{фном}} = 459$ А асинхронного двигуна АД-914. Для другого двигуна обираємо довільні параметри $U_{\text{фном}} = 460$ В та номінальний струм $I_{\text{фном}} = 984$ А. Потужність залишається незмінною $P_{\text{год}} = 1200$ кВт. Пусковий струм $I_{\text{дв.п}}$ одного асинхронного двигуна.

$$I_{\text{дв.п}} = 1,25 I_{\text{фном}} \quad (2)$$

де 1,25 – запас на підвищення струму;

$I_{\text{фном}}$ – номінальний фазний струм

$$I_{\text{дн1}} = 1,25 \cdot 459 = 573 \text{ А} \quad (3)$$

$$I_{\text{дн2}} = 1,25 \cdot 984 = 1230 \text{ А} \quad (4)$$

Середні струми ключа та зворотного діода

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{VS} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2\pi}} (1 + \cos \varphi_H), \quad (5)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2\pi}} (1 - \cos \varphi_H), \quad (6)$$

$$I_{VS1} = \frac{573}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 + 0.88) = 242 A, \quad (7)$$

$$I_{VD1} = \frac{573}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 - 0.88) = 15 A, \quad (8)$$

$$I_{VS2} = \frac{1230}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 + 0.88) = 520 A, \quad (9)$$

$$I_{VD2} = \frac{1230}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 - 0.88) = 33 A. \quad (10)$$

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

$$I_{d_{ном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\partial n} \cos \varphi_H, \quad (11)$$

$$I_{d_{ном1}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 573 \cdot 0.88 = 681 A, \quad (12)$$

$$I_{d_{ном2}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 1230 \cdot 0.88 = 1462 A \quad (13)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Середнє значення напруги на вході автономного інвертора при номінальному режимі навантаження. Виходячи з рівняння балансу потужності [8]

$$U_{d\text{НОМ}} = \frac{3U_{1\text{НОМ}}I_{1\text{НОМ}} \cos \phi_H}{I_{d\text{НОМ}}} \quad (14)$$

$$U_{d\text{НОМ}1} = \frac{3 \cdot 990 \cdot 459 \cdot 0,88}{681} = 1762 \text{ В},$$

$$U_{d\text{НОМ}2} = \frac{3 \cdot 460 \cdot 984 \cdot 0,88}{1462} = 817 \text{ В}. \quad (15)$$

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діодах:

$$U_{VS} = U_{d\text{НОМ}} k_{3U1} k_{3U2}, \quad (16)$$

де $k_{3U1}=1,15$ – коефіцієнт запасу що враховує можливе підвищення напруги живильної мережі на 15%;

$k_{3U2}=1,3 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу на можливі перенапруги в схемі.

$$U_{VS1} \geq 1762 \cdot 1,16 \cdot 1,35 = 2759,2 \text{ В}, \quad (17)$$

$$U_{VS2} \geq 817 \cdot 1,16 \cdot 1,35 = 1279 \text{ В}. \quad (18)$$

Для кінцевого вибору напруги джерела постійного струму використовуємо співвідношення [5, 8]

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{d\text{ном}} = U_{1\phi\text{ном}} / 0,45 \quad (19)$$

Для живлення високовольтного двигуна необхідна напруга джерела

$$U_{d\text{ном}1} \geq 990 / 0,45 = 2200 \text{ В.} \quad (20)$$

Для живлення низьковольтного двигуна необхідна напруга джерела

$$U_{d\text{ном}1} \geq 460 / 0,45 = 1022 \text{ В.} \quad (21)$$

Для подальшого аналізу приймаємо та використовуємо значення напруги мережі постійного струму 2200 В та 1100 В.

2.6 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з ШІМ модуляцією.

Широтне-імпульсну модуляцію використовуємо під час пуску до деякого значення пускової швидкості. Це дозволяє виключити амплітуди вищих гармонік та знизити нагрівання двигуна під час роботи з максимальним струмом. Однак, загалом відомо, що використання можливостей джерела живлення автономного інвертора напруги не повне.

Приймаємо максимальний коефіцієнт модуляції під час широтне-імпульсного регулювання напруги $\mu_m = 0,998$ та частоту модуляції $f_m = 400$ Гц.

Найбільше значення середнього вхідного струму

$$I_d = 3\sqrt{2}\mu_m k_{\text{вн}} I_{\text{дП}} \cos \phi_{\text{н}}, \quad (22)$$

де $k_{\text{вн}} = 0,5$ – коефіцієнт використання напруги джерела живлення [8]

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{d1} = 3\sqrt{2} \cdot 0,998 \cdot 0,5 \cdot 573 \cdot 0,88 = 1067 \text{ A}, \quad (23)$$

$$I_{d2} = 3\sqrt{2} \cdot 0,998 \cdot 0,5 \cdot 1230 \cdot 0,88 = 2291 \text{ A}. \quad (24)$$

Середній струм ключів та діодів

$$I_{VT} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos\phi_H \right), \quad (25)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos\phi_H \right). \quad (26)$$

Для живлення інверторів необхідні параметри ключів за струмом:

$$I_{VT1} = \frac{573}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{0,998\pi}{4} 0,88 \right) = 218 \text{ A}, \quad (27)$$

$$I_{VT2} = \frac{1230}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{0,998\pi}{4} 0,88 \right) = 467 \text{ A}, \quad (28)$$

$$I_{VD1} = \frac{573}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{0,998\pi}{4} 0,88 \right) = 40 \text{ A}, \quad (29)$$

$$I_{VD2} = \frac{1230}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{0,998\pi}{4} 0,88 \right) = 86 \text{ A}. \quad (30)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Максимальна фазна напруга, яка може бути сформована за законом широтне-імпульсної модуляції

$$U_{\phi} = \frac{U_d \mu_m k_{BH}}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

Для високовольтного двигуна

$$U_{\phi 1} = \frac{2200 \cdot 0,998 \cdot 0,5}{\sqrt{2}} = 776B. \quad (32)$$

Для низьковольтного двигуна

$$U_{\phi 2} = \frac{1100 \cdot 0,998 \cdot 0,5}{\sqrt{2}} = 388B. \quad (33)$$

На основі проведених розрахунків вибираємо для автономного інвертора напруги високовольтного двигуна IGBT-модуль типу FF400R33KF2CNOSA1 фірми Infineon [9]

Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-колектор, В – 3300;

максимальний струм колектора, А – 660;

структура: півмост;

Час включення – 28 нс;

Час виключення – 155 нс;

напруга насичення при максимальному струмі, В – 3,4;

потужність, що розсіюється, кВт – 4,8;

діапазон температур, °С – (-40...+150).

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд IGBT- модуля типу FF400R33KL2

Для автономного інвертора напруги низьковольтного двигуна IGBT-модуль типу FF650R17IE4P фірми Infineon [10]

Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-колектор, В – 1700;

максимальний струм колектора, А – 650;

структура: півмост;

Час включення – 55 нс;

Час виключення – 100 нс;

напруга насичення при максимальному струмі, В – 2,00;

потужність, що передається, кВт – 650;

діапазон температур, °С – (-40...+150)

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд IGBT- модуля типу FF650R17IE4P

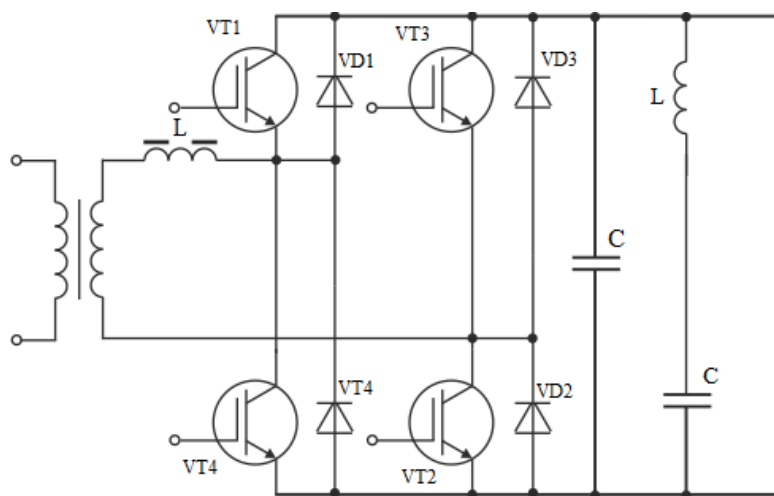
2.7 ЧотириквADRантний перетворювачі змінно-постійного напруги типу 4qS

ЧотириквADRантний перетворювачі змінно-постійного напруги типу 4QS використовуються на залізничному транспорті, наприклад, при харчуванні приводів від однофазної контактної мережі змінного напруги. Ці перетворювачі можна віднести до активних випрямлячів. Перетворювачі 4QS вирішують наступні завдання [3–6]:

- перетворення однофазного напруги контактної мережі, що змінюється в широким межах, в стабілізовану постійну напругу;
- підтримка синусоїдальної форми струму контактної мережі;
- забезпечення роботи приводу з заданим коефіцієнтом потужності мережі;
- передача енергії навантаженні в режимах тяги, повернення енергії в мережу при гальмуванні.

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 2.8 – Принципова схема 4qS перетворювача



Резонансний фільтр розраховується на частоту, рівну подвоєною частотою напруги мережі живлення. При частоті мережі 50 Гц, фільтр розраховується на резонансну частоту 100 Гц. Саме таку частоту мають основні вищі гармонійні складові випрямленої напруги однофазного моста.

Для цих складових опір резонансного фільтра дорівнює 0 (якщо не враховуються активні опори), і для них вихідна кола випрямляча замкнута коротко. Тому для обмеження струмів на вході випрямлячів використовуються дроселі зі значною індуктивністю. Інші вищі гармонійні випрямленої напруги обмежуються конденсаторним фільтром.

В силових схемах цих електровозів застосовується чотирьох квадрантний випрямляч який являє собою з'єднувальне коло тягового перетворювача з контактною мережею через головний трансформатор.

Напруга проміжного контуру вище, ніж напруга вторинної обмотки трансформатора. Це досягається почерговим замиканням вторинної обмотки трансформатора силовими IGBT-транзисторами і підключенням проміжного контуру до конденсаторів. При цьому виникають пульсації струму з піковими значеннями. За рахунок високої індуктивності розсіювання трансформатора і частоти пульсація струму згладжується і, тим самим, зменшуються пікові значення струму. Ці пульсації струму передаються, через трансформатор, в рейкові кола. Тяговий перетворювач 4QS зменшує паразитні струми додатково тим, що усі 4QS тактуються зі зміщенням.

На початку розрахунку встановимо відомі дані. У якості дослідження візьмем два рівні напруги. Так, до відомих даних відносяться необхідна напруга на вході ав-

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

тономного інвертора з АІМ модуляцією $U_d = 2200$ В та струм широтне-імпульсної модуляції $I_d = 1067$ А. У другому варіанті напруга на вході автономного інвертора з АІМ $U_d = 1100$ В та струм $I_d = 2291$ А.

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

Необхідне значення діючої напруги на вході 4qS перетворювача

$$U_{2max} = \mu U_d \cos \phi \quad (34)$$

$$U_{2max} = 0,7 \cdot 2200 \cdot 0,95 = 1463 \text{ В}, \quad (35)$$

$$U_{2max1} = 0,7 \cdot 1100 \cdot 0,95 = 732 \text{ В}. \quad (36)$$

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

$$L_{1max} = \frac{U_{2max}^2}{2\omega P_{dmax}} \quad (37)$$

де ω – кутова частота напруги мережі живлення.

P_{dmax} – потужність споживачів.

Потужність споживачів P_{dmax} 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.

$$P_{dmax} = P_{\epsilon 1} + \dots + P_{\epsilon n} + P_n + P_k + 4P_{\delta \epsilon},$$

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

де $P_{\partial 1} + \dots + P_{\partial n}$ – потужність вентиляторів. Приймаємо чотири вентилятори по 30 кВт;

P_H – потужність насоса трансформатора. Приймаємо: 15 кВт;

P_K – потужність компресора. Приймаємо: 15 кВт.

$$P_{d \max} = 4 \cdot 30 + 15 + 15 + 4 \cdot 1200 = 4950 \text{ кВт}. \quad (38)$$

Потужність, що розрахована є занадто високою. На ЕРС використовують розподілення потужності шляхом включення двох 4qS-перетворювачів паралельно. Тобто потужність, що приходить на один перетворювач у двічі менша і дорівнює 2475 кВт.

$$L_{1 \max 1} = \frac{1463^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2475000} = 0,137 \text{ Гн} \quad (39)$$

$$L_{1 \max 2} = \frac{732^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2475000} = 0,034 \text{ Гн} \quad (40)$$

Середній струм навантаження 4qS перетворювача

$$I_d = \frac{0,5 P_{d \max}}{U_d},$$

$$I_{d1} = \frac{2475000}{2200} = 1125 \text{ А}, \quad (41)$$

$$I_{d2} = \frac{2475000}{1100} = 2250 \text{ А}. \quad (42)$$

						Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струм вентиляної групи в режимі випрямляча

$$I_a = I_d / 2 ,$$

$$I_{a1} = 1125 / 2 = 563 \text{ A}, \quad (43)$$

$$I_{a2} = 2250 / 2 = 1125 \text{ A}. \quad (44)$$

Повний струм транзистора в режимі перетворювача, що підвищує напругу

$$I_{VT} = I_a + \frac{E_d}{2L_1} t_T ,$$

де E_d – середнє значення напруги на виході некерованого випрямляча, $E_d = 0,9U_2$. Для варіантів, що аналізується:

$$E_{d1} = 0,9 \cdot 1463 = 1317 \text{ В}, \quad (45)$$

$$E_{d2} = 0,9 \cdot 732 = 659 \text{ В}. \quad (46)$$

t_T – час відкритого стану транзистора.

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 4qS перетворювача $f_m = 400$ Гц ($T_m = 0,0025$ с).

Середнє значення коефіцієнта заповнення визначаємо з виразу [11, 12]

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

$$U_d = E_d \frac{1}{1-\lambda},$$

звідки,

$$\lambda = 1 - \frac{E_d}{U_d},$$

$$\lambda_1 = 1 - \frac{1463}{2200} = 0,335, \quad (47)$$

$$\lambda_2 = 1 - \frac{732}{1100} = 0,334. \quad (48)$$

Час відкритого стану транзистора:

$$t_T = \lambda T_M,$$

$$t_{T1} = 0,335 \cdot 0,0025 = 0,0008375 \text{ с} \quad (49)$$

$$t_{T2} = 0,334 \cdot 0,0025 = 0,000835 \text{ с} \quad (50)$$

Кінцеві струми, що необхідні для забезпечення живлення мережі постійного струму:

$$I_{VT1} = 563 + \frac{1317}{2 \cdot 0,137} \cdot 0,0008375 = 567 \text{ А}, \quad (51)$$

$$I_{VT2} = 1125 + \frac{659}{2 \cdot 0,034} \cdot 0,000835 = 1133 \text{ А}. \quad (52)$$

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

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 [13]

$$C_d = \frac{I_d}{8f_M \Delta U_{C \max}},$$

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

$$\Delta U_{C \max} = 0,1U_d = 220 \text{ В},$$

$$\Delta U_{C \max} = 0,1U_d = 110 \text{ В}.$$

$$C_{d1} = \frac{1125}{8 \cdot 400 \cdot 220} = 0,0015 \text{ Ф},$$

$$C_{d1} = \frac{2250}{8 \cdot 400 \cdot 110} = 0,0063 \text{ Ф}.$$

Ємність конденсатора C_P для шунтування гармоніки 100 Гц визначається [13]

$$C_P = \frac{k_n I_d}{628 \Delta U_{C \max}},$$

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$C_{P1} = \frac{0,057 \cdot 1125}{628 \cdot 220} = 0,000464 \quad \Phi;$$

$$C_{P2} = \frac{0,057 \cdot 2250}{628 \cdot 110} = 0,00185$$

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

$$L_P = \frac{1}{16\pi^2 f_M^2 C_P},$$

$$L_{P1} = \frac{1}{16 \cdot 3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,000464} = 0,0054 \text{ мГн},$$

$$L_{P2} = \frac{1}{16 \cdot 3,14^2 \cdot 50^2 \cdot 0,00185} = 0,00137 \text{ мГн}.$$

де f_M – частота живлячої мережі.

Фазний модуль є базисним елементом тягового перетворювача (SR). Фазний модуль призначений для почергового з'єднання навантаження на виході (L) або з позитивною (P), або з негативною шиною проміжного контуру (N). Перемикання здійснюється в тяговому режимі з швидким чергуванням.

Чотириквadrантний випрямляч (4QS) і інвертор тягового перетворювача виконані в з однакових фазних модулів. Фазний модуль крім силових напівпровідникових приладів (силових IGBT-транзисторів) містить також шунтуючі (захисні) діоди і розвантажувальні елементи.

Розвантажувальні елементи служать для зменшення потужності втрат, які виникають в IGBT-транзисторах при кожному процесі включення і виключення.

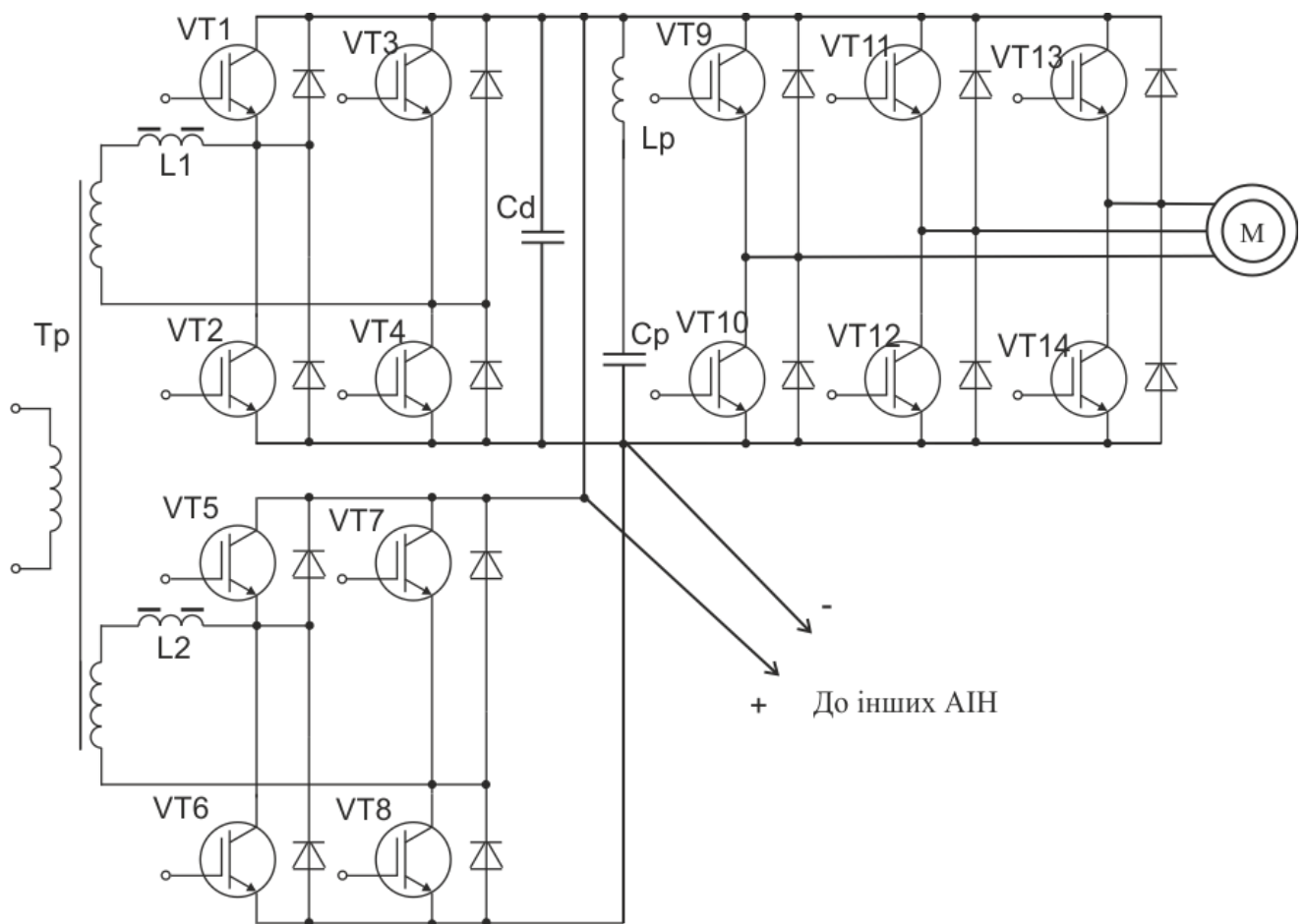
В якості транзисторних ключів VT1–VT4 обираємо IGBT-модулі. Для живлення високовольтного двигуна IGBT-модулі Infineon типу FZ1000R33HL3. Для живлення низьковольтного двигуна IGBT-модулі Infineon типу FF1200R17IE4 [14]. Технічні дані модулів подані у таблиці 3.1:

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

Таблиця 3.1 – Технічні параметри модулів для плечей 4QS перетворювача

Тип модуля	FZ1000R33HL3	FF1200R17IE4
Максимальна напруга між виводами емітер-колектор, В	3300	1700
Максимальний струм колектора, А	1000	1200
Напруга насичення при максимальному струмі, В	2,4	2,0
Час включення, нс	50	27
Час виключення, нс	410	64
Діапазон температур, °С	-55...150	

Рисунок 2.9 - Повна схема перетворювача секції



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

3 Аналіз втрат потужності в силовому тяговому перетворювачі

Відомо, що тяговий привод ЕРС, до якого входить і статичний перетворювач, повинен забезпечити максимальне можливе зчеплення коліс локомотива з рейками при любых кліматичних умовах і будь-якому стані контактних поверхонь. Тяговий статичний перетворювач призначено для забезпечення живлення тягових двигунів ЕРС. З метою економії напівпровідникових приладів та іншої електротехнічної апаратури прийнято використовувати групову схему підключення тягових двигунів до перетворювача [15].

Для оцінки енергетичної ефективності будь-якої електротехнічної, електромеханічної системи використовують у першу чергу коефіцієнт корисної дії (ККД). До складу енергетичної системи електрифікованих залізниць входять: електростанції, розподільні електромережі, тягові підстанції, тягові електричні мережі та електрорухомий склад. Останні три елемента відносяться до енергетичної системи електрифікованих залізниць.

Низьке значення ККД тягового приводу електровозу змінного струму з асинхронними тяговими двигунами обумовлено наявністю додаткового елемента – інвертора та низьким ККД асинхронного тягового двигуна.

Тяговий привод сучасних електровозів європейського виробництва, в яких використовуються чотирьохкватратні перетворювачі та асинхронні тягові двигуни, мають структуру: «трансформатор – перетворювач частоти з ланкою постійного струму – тягова зубчаста передача – асинхронний тяговий двигун». Втрати потужності у тяговому трансформаторі та дроселі складають приблизно 3% ; перетворювачі частоти з ланкою постійного струму 7,75%; в асинхронному тяговому двигуні 3,5%; втрати у тяговій зубчастій передачі 1,25%.

3.1 Визначення втрат потужності в напівпровідникових елементах перетворювача.

3.1.1 Втрати потужності в автономних інверторах напруги.

Визначним для розрахунку параметрів системи охолодження є режим з ШІМ модуляцією. За розрахункові параметри приймаємо два варіанти живлення живлення автономного інвертора напруги від 4qs-перетворювача напругою рівня 2200 В та 1100 В.

Динамічні втрати в керованому ключі [11, 12, 16].

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

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

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

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

$$E_{\text{вкл}} = \frac{I_{\text{VT}} \cdot E \cdot t_{\text{вкл}}}{2}, \quad (2)$$

де I_{VT} – середнє значення струму, що комутується при ШІМ модуляції;

E – напруга на зачиненому ключі;

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

$$E_{\text{вкл1}} = \frac{218 \cdot 2200 \cdot 28 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,0067 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (3)$$

$$E_{\text{вкл2}} = \frac{467 \cdot 1100 \cdot 55 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,014 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (4)$$

$$E_{\text{викл}} = \frac{I_{\text{VT}} \cdot E \cdot t_{\text{викл}}}{2}, \quad (5)$$

де $t_{\text{викл}}$ – час виключення приладу.

$$E_{\text{викл1}} = \frac{218 \cdot 2200 \cdot 155 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,037 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (6)$$

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

$$E_{\text{вкл}2} = \frac{467 \cdot 1100 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,025 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (7)$$

$$P_{\text{вкл}1} + P_{\text{вимк}1} = (0,0067 + 0,037) \cdot 400 \cdot \frac{1}{3,14} = 5,56 \text{ Вт}, \quad (8)$$

$$P_{\text{вкл}2} + P_{\text{вимк}2} = (0,014 + 0,025) \cdot 400 \cdot \frac{1}{3,14} = 4,96 \text{ Вт}. \quad (9)$$

Статичні втрати в керованому ключі [16]:

$$P_{\text{стVT}} = I_{\phi m} \cdot U_{\text{вкл}} \cdot \left(0,125 + \frac{\mu}{3\pi} \cdot \cos\varphi_H \right), \quad (10)$$

де $I_{\phi m}$ – номінальний фазний струм;

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

μ – коефіцієнт модуляції АІН;

$\cos\varphi_H$ – коефіцієнт потужності двигуна.

$$P_{\text{стVT1}} = 459 \cdot 3,4 \cdot \left(0,125 + \frac{0,998}{3\pi} \cdot 0,88 \right) = 340 \text{ Вт}, \quad (11)$$

$$P_{\text{стVT2}} = 984 \cdot 2 \cdot \left(0,125 + \frac{0,998}{3\pi} \cdot 0,88 \right) = 429 \text{ Вт}, \quad (12)$$

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

Статичні втрати в зворотному діоді.

$$P_{стVD} = I_{\phi m} \cdot U_{вкл} \cdot \left(0,125 - \frac{\mu}{3\pi} \cdot \cos\varphi_H \right) \quad (13)$$

$$P_{стVD1} = 459 \cdot 1,9 \cdot \left(0,125 - \frac{0,998}{3\pi} \cdot 0,88 \right) = 27 \text{ Вт} \quad (14)$$

$$P_{стVD2} = 984 \cdot 1,9 \cdot \left(0,125 - \frac{0,998}{3\pi} \cdot 0,88 \right) = 59 \text{ Вт} \quad (15)$$

Загальні втрати в приладі

$$P_{заг} = P_{вкл} + P_{вцмк} + P_{стVT} + P_{стVD} \quad (16)$$

$$P_{заг1} = 5,5 + 340 + 27 = 372,5 \text{ Вт}, \quad (17)$$

$$P_{заг2} = 5 + 429 + 59 = 493 \text{ Вт}. \quad (18)$$

Загальні втрати в автономному інверторі напруги

$$P_{АН} = \sum_1^6 P_{заг}$$

$$P_{АН1} = 6 \cdot 372,5 = 2235 \text{ Вт}, \quad (19)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$P_{АН2} = 6 \cdot 493 = 2958 \text{ Вт} \quad (20)$$

Загальні втрати в 4-х автономних інверторах напруги: $P_{АН1} = 8940 \text{ Вт}$.
 $P_{АН2} = 11832 \text{ Вт}$.

3.1.2 Втрати потужності 4qs-перетворювача.

Методика розрахунку втрат потужності в напівпровідникових елементах 4qs-перетворювача аналогічна попередньому. За розрахункові параметри приймаємо комутацію струму 123 А та напруги 2200 В та 1100 В.

$$E_{ВКЛ1} = \frac{563 \cdot 1317 \cdot 50 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,018 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (21)$$

$$E_{ВКЛ2} = \frac{1125 \cdot 659 \cdot 27 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,01 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (22)$$

$$E_{ВИКЛ1} = \frac{563 \cdot 1317 \cdot 410 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,15 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (23)$$

$$E_{ВИКЛ2} = \frac{1125 \cdot 659 \cdot 64 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,023 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (24)$$

$$P_{ВКЛ1} + P_{ВИКЛ1} = (0,018 + 0,15) \cdot 400 \cdot \frac{1}{3,14} = 22 \text{ Вт}, \quad (25)$$

						Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{вкл}2} + P_{\text{вимк}2} = (0,01 + 0,023) \cdot 400 \cdot \frac{1}{3,14} = 4 \text{ Вт.} \quad (26)$$

Статичні втрати в керованому ключі.

$$P_{\text{стVT1}} = 563 \cdot 2,4 \cdot \left(0,125 + \frac{0,335}{3\pi} \cdot 0,95 \right) = 215 \text{ Вт} \quad (27)$$

$$P_{\text{стVT2}} = 1125 \cdot 2 \cdot \left(0,125 + \frac{0,334}{3\pi} \cdot 0,95 \right) = 357 \text{ Вт} \quad (28)$$

Статичні втрати в зворотному діоді.

$$P_{\text{стVD1}} = 563 \cdot 1,9 \cdot \left(0,125 - \frac{0,335}{3\pi} \cdot 0,95 \right) = 97 \text{ Вт} \quad (29)$$

$$P_{\text{стVD2}} = 1125 \cdot 1,9 \cdot \left(0,125 - \frac{0,334}{3\pi} \cdot 0,95 \right) = 195 \text{ Вт} \quad (30)$$

Загальні втрати в приладі

$$P_{\text{заг1}} = 22 + 215 + 97 = 334 \text{ Вт} \quad (31)$$

$$P_{\text{заг2}} = 4 + 357 + 195 = 556 \text{ Вт} \quad (32)$$

Загальні втрати в напівпровідниковому перетворювачі

$$2P_{4qs} = 2 \sum_1^4 P_{\text{заг}}$$

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$2P_{4qs1} = 2 \cdot (4 \cdot 334) = 2 \cdot 1336 = 2672 \text{ Вт} \quad (33)$$

$$2P_{4qs2} = 2 \cdot (4 \cdot 556) = 2 \cdot 2224 = 4448 \text{ Вт} \quad (34)$$

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків втрат потужності в напівпровідникових елементах перетворювача для двох типів двигунів

Складова втрат потужності	Втрати в АІН1/ АІН2, Вт	Втрати 4QS1/4QS2, Вт
$P_{\text{вкл}} + P_{\text{вимк}}$	5,5/5	22/4
$P_{\text{стVT}}$	340/429	215/357
$P_{\text{стVD}}$	27/59	97/195
$P_{\text{заг}}(1 \text{ модуль})$	372,5/493	334/556
$P_{\text{заг}}(\text{перетворювач})$	2235/2958	1336/2224
$P_{\text{заг}}(\text{секція})$	8940/11832	2672/4448
Загальні втрати в напівпровідникових елементах перетворювача однієї секції електровоза: 11,6 / 16,3 кВт		

3.2 Тепловий режим силових напівпровідникових приладів.

Визначення значення максимальної температури напівпровідникової структури силових діодів та тиристорів у заданому струмі навантаження є завжди актуальним, бо надійність роботи цих приладів в значній мірі залежить від значення цієї температури.

При роботі діодів і тиристорів в режимі випрямляча (тобто при навантаженні імпульсами струму) на відносно низькій частоті (на частоті 50 Гц та нижче), температура напівпровідникової структури приладу зазнає значних коливань. Ці коливання температури напівпровідникової структури приладу відбуваються на фоні сталого значення температури. Слід відзначити, не усі виробники силових напівпровідникових приладів для своїх приладів надають значення то лише для кутів провідності 180° , 120° , 60° для роботи на частоті 50 Гц. Між тим, може виникну-

ти потреба застосування приладів, на які не надано цей додаток, або у спеціальних перетворювачах застосовані інші кути провідності і знижена частота. Ось чому розробка методики визначення додаткової частини теплового опору приладу при імпульсному навантаженні є актуальним.

Тривалість протікання струму у відкритому стані приладу достатньо велика, щоб суттєво нагріти напівпровідникову структуру вище середнього значення температури, а пауза між імпульсами струму достатньо велика, щоб вона встигла охолотитися нижче середнього рівня температури.

В зв'язку з цим, є певний інтерес до визначення додатку для корегування теплового опору, за допомогою якого, знаючи значення середньої температури напівпровідникової структури, можна визначити максимальне значення температури.

3.3 Системи охолодження тягових перетворювачів

Тяговий перетворювач для електровозів, складається з відсіку охолодження, що містить вентилятор, що роздає і збирає колектори, а так само силового відсіку, що містить з'єднані патрубками з роздає і збирає рідинними колекторами однакові рідинні охолоджувачі [4, 7]. На охолоджувачах встановлені перемикачі IGBT модулів, за допомогою низько індуктивної ошиновки утворюють фази двох трифазних автономних інверторів, призначених для підключення до фазних виводів двох трифазних електродвигунів і два гальмівних регулятора, призначених для підключення до гальмівним резисторам. У відсіку охолодження містяться один повітряно-рідинний теплообмінник і один гідронасос. На шести рідинних охолоджувачах розташоване по чотири перемикаючих IGBT модуля. На двох рідинних охолоджувачах розташоване по два перемикаючих IGBT модуля і по одному діодному модулю. Технічним результатом корисної моделі є створення компактного асинхронного тягового електроприводу для електровозів з живленням від контактної мережі постійного струму зі зменшенням габаритів, маси і ціни виробу, зменшення обсягу демонтажу, монтажу і часу при заміні перемикаючого IGBT модуля, підвищення ремонтпридатності тягового перетворювача, розширення арсеналу технічних засобів в області тягового електрообладнання на рухомому складі.

Недоліками відомого трифазного інвертора є: його великі масо-габаритні показники, обумовлені застосуванням природної вентиляції з використанням теплових труб з низькою механічною міцністю теплових труб, обумовленої консольним кріпленням їх щодо радіаторних панелей. Через віддаленого розташування від IGBT-модулів силових конденсаторів конструкція інвертора не забезпечує низьку індуктивність, тому для виключення перенапруг на IGBT-модулях при відк-

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

люченні струмів короткого замикання через великий індуктивності ошиновки в схемі встановлюють додаткові дорогі конденсатори і низько індуктивні резистори, які також збільшують габаритні розміри інвертора.

Крім того, недоліком відомого тягового перетворювача є низька ремонтпридатність, тому що для заміни одного перемикаючого IGBT модуля потрібен демонтаж всього охолоджувача, що містить 12 перемикаючих IGBT модулів, всіх 12 модулів і трьох підвідних кабелів.

Технічним результатом корисної моделі є створення компактного асинхронного тягового електроприводу для електровозів з живленням від контактної мережі постійного струму зі зменшенням габаритів, маси і ціни виробу, зменшення обсягу демонтажу, монтажу і часу при заміні перемикаючого IGBT модуля, підвищення ремонтпридатності тягового перетворювача, розширення арсеналу технічних засобів в області тягового електрообладнання на рухомому складі.

Зазначений технічний результат досягається тим, що в тяговому перетворювачі для електровоза, що складається з відсіку охолодження, що містить вентилятор, що роздає і збирає колектори, а так само силового відсіку, що містить з'єднані патрубками з роздає і збирає колекторами однакові рідинні охолоджувачі з перемикаючими модулями, з'єднаними попарно паралельно і попарно послідовно й утворюють фази двох трифазних автономних інверторів, входами «+» і «-» і підключених до відповідних висновки батареї конденсаторів, забезпеченою затисками для зв'язку контактною мережею, виходи яких призначені для підключення до фазним висновків двох трифазних електродвигунів і два гальмівних регулятора, входами «+» і «-» підключених до відповідних висновків батареї конденсаторів, виходи яких призначені для підключення до гальмівним резисторам . У відсіку охолодження містяться один повітряно-рідинний теплообмінник і один гідронасос. У силовому відсіку на шести рідинних охолоджувачах розташоване по чотири перемикаючі модуля, що утворюють фази інверторів, а на двох рідинних охолоджувачах розташоване по два перемикаючих модуля і по одному діоду утворюють гальмівні регулятори.

Відведення від напівпровідникових приладів потужності нагрівання, що досягає сотень ват і навіть кількох кіловат, здійснюється системою охолодження, в яку входять охолоджувач і охолоджуючий прості. В якості охолоджуючого простору використовується повітря, масло або вода.

Порівняльна теплопередача системи, в якій використовується в якості охолоджуючої середовища повітря, масло, вода, характеризується співвідношенням 1: 10: 100, тобто, найкраще відведення теплоти досягається при передачі від металу охолоджувача до охолоджувальної води.

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

Передача теплоти (в газах, рідинах і твердих тілах) відбувається від молекули до молекули. При конвекції передача теплоти відбувається в результаті взаємодії мас матеріальних частинок. Розрізняють вільну і примусову конвекцію. В примусовій конвекції охолоджуюче середовище (повітря або рідина) переміщається за допомогою вентилятора або насоса. При тепловому випромінюванні теплота передається завдяки поширенню електромагнітних хвиль в області інфрачервоного спектру. Випромінювання є видом передачі теплоти, яка може здійснюватися в тому числі і в вакуумі.

Залежно від виду охолоджуючого середовища системи охолодження прийнято розділяти на повітряні, рідинні і випарні.

Способи охолодження напівпровідникових приладів різноманітні і можуть ґрунтуватися на їх прямій (безпосередній) взаємодії з зовнішнім охолоджуючим середовищем або на застосуванні проміжного контуру з теплоносієм. Залежно від реалізації руху охолоджуючої середовища щодо охолоджувача, розрізняють природне і примусове охолодження.

Повітряне природне і примусове охолодження. Природне охолодження досягається завдяки конвекції і випромінювання при вільному русі повітряного потоку вздовж поверхонь охолоджувача і самого приладу.

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

4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ МАШИН

4.1 Вибір основних допоміжних машин.

На електрорухомому складі країн СНД у якості перетворювачів власних потреб у цей час в основному застосовуються малоефективні електромашинні перетворювачі, які мають наступні недоліки [1, 2]:

- наявність обертових елементів і колекторне-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 напруги і родів струму контактної мережі;
- високі масо-габаритні показники, які не дозволяють продуктивно використовувати простір під вагоном;
- низький ККД (50–60 %) – для всієї системи передачі енергії від струмоприймача локомотива через тяговий привод і колісні пари до генераторів під вагоном;
- можливість заклинювання колісної пари при несправності в механічній передачі «колісна пара – генератор під вагоном»;
- зниження тяги поїзд через витрату енергії, переданій колісній парі на обертання генератора під вагоном;
- генерація номінальної потужності тільки при швидкості понад 35 – 40 км/год. Ця обставина вимагає збільшення необхідної ємності резервного джерела живлення вагона – акумуляторної батареї й обмеження потужності споживачів вагона при русі на низьких швидкостях або стоянках.

Статичні перетворювачі у порівнянні з електромашинними мають наступні переваги:

- відсутність механічних частин обертового типу, що значно підвищує надійність системи;
- використання високочастотного 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 схеми технічних рішень;

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

– для забезпечення високої ремонтпридатності використовується спосіб побудови конструкції у вигляді блоків та з мікропроцесорною системою діагностики;

– можливість компанувати блоки в ящику під вагонами, завдяки чому, простір під вагонами використовується більш продуктивне.

До основних допоміжних приводів електровоза, що проектується, відносно привод компресора та привод вентиляторів.

Відповідно до завдання на магістерську роботу особливих вказівок до використання конкретного компресора або вентилятора відсутнє. Тому приймаємо машини, що використовувалися на електровозі ДСЗ [17], які достатньо гарно зарекомендували себе в експлуатації цього електровозу в пасажирському та вантажному русі.

Двигун асинхронний А180L6Э02 призначено для приводу мотор-компресора. Приймаємо аналогічний за параметрами двигун загальнопромислового призначення типу АИР160М6 [18].

Технічні параметри двигуна:

струм	змінний;
потужність, кВт	15;
напруга, В	380/660;
частота, Гц.....	50;
пар полюсів	3;
частота обертів, об/хв.....	970;
ККД, %.....	89,0;
коефіцієнт потужності	0,88;
відношення пускового струму до номінального	7,0;
відношення пускового моменту до номінального	2,0;
відношення максимального моменту до номінального	2,1;
вага, кг	157,3.

Двигун асинхронний А200L4Э02 призначено для приводу відцентрового вентилятора охолодження тягового двигуна . Приймаємо аналогічний за параметрами двигун загальнопромислового призначення типу АИР180М4 [18].

Технічні параметри двигуна:

струм	змінний;
потужність, кВт	30;
напруга, В	380/660;
частота, Гц.....	50;
пар полюсів	2;

частота обертів, об/хв.....	1475;
номінальний струм, А.....	57,6;
ККД, %.....	91,4;
коефіцієнт потужності.....	0,9;
відношення пускового струму до номінального.....	7,2;
відношення пускового моменту до номінального.....	2,2;
відношення максимального моменту до номінального.....	2,3;
вага, кг.....	190.

Структурна схема системи живлення допоміжних машин описана у попередніх розділах.

У даному розділі виконуємо перевірку можливості живлення автономних інверторів напруги допоміжних приводів від виходу 4QS перетворювача.

4.2 Вибір силових елементів автономного інвертора напруги з широтне-імпульсною модуляцією

Потрібна напруга ланки постійного струму для живлення схеми автономного інвертора напруги за алгоритмом широтне-імпульсної модуляції [8]:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_{\phi n}}{\mu_m k_{\text{вн}}}$$

де $U_{\phi n}$ – номінальна фазна напруга двигуна;

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

$U_{\text{дн}} = 380$ В – номінальна напруга двигуна;

μ_m – максимально-можливий коефіцієнт модуляції. Приймаємо 0,99.

$$U_d = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{0,99 \cdot 0,5} = 1085 \text{ В.}$$

Автономні інвертори напруги для двигунів компресора та вентилятора отримує живлення від 4QS перетворювача. Пропонувалася раніш схема з проміжним контуром змінної напруги та подальшим випрямленням. Однак, прийняті асинхронні двигуни з лінійними напругами 660 В. Тому виконуємо можливість прямого живлення таких двигунів від мережі, яку формує 4QS перетворювач.

Під час розрахунку силової частини перетворювача було прийнято напруга мережі постійного струму для силового інвертора одного двигуна то $U_d =$

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

1100 В, а другого 2200 В. Отже знаючи напругу на вході АІН та номінальну напругу двигуна потрібно розрахувати глибину модуляції у кожному випадку:

$$\mu = \frac{\sqrt{2}U_{\text{дн}}}{U_d k_{\text{вн}}},$$

Для напруги виходу 4QS перетворювача $U_d = 1100$ В

$$\mu_1 = \frac{\sqrt{2} * 380}{1100 * 0,5} = 0,977$$

Для напруги виходу 4QS перетворювача $U_d = 2200$ В

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{2} * 380}{2200 * 0,5} = 0,488$$

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діоди

$$U_{\text{VS}} = U_d k_{\text{зU1}} k_{\text{зU2}},$$

де $k_{\text{зU1}}=1,15$ – коефіцієнт запасу що враховує можливе підвищення напруги живильної мережі на 15%; $k_{\text{зU2}}=1,3 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу на можливі перенапруги в схемі.

$$U_{\text{VS1}} \geq 1100 * 1,15 * 1,3 = 1644 \text{ В.}$$

$$U_{\text{VS2}} \geq 2200 * 1,15 * 1,3 = 3289 \text{ В.}$$

Найбільше значення середнього вхідного струму. З метою вибору єдиного автономного інвертора напруги вибір за струмом виконуємо для найбільш потужного двигуна типу АІР180М4.

$$I_d = 3\sqrt{2}\mu_m k_{\text{вн}} I_{\text{д}} \cos \varphi_{\text{н}},$$

$$I_{d1} = 3\sqrt{2} * 0,977 * 0,5 * 57,6 * 0,9 = 107 \text{ А.}$$

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

$$I_{d2} = 3\sqrt{2} * 0,488 * 0,5 * 57,6 * 0,9 = 53,6 \text{ A.}$$

Середній струм ключів та діодів. Далі виконуємо розрахунок параметрів ключа на більший струм мережі

$$I_{VS} = \frac{I_d}{\pi\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos \varphi_H \right),$$

$$I_{VD} = \frac{I_d}{\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos \varphi_H \right),$$

$$I_{VS} = \frac{57,6}{\pi\sqrt{2}} \left(1 + \frac{0,977 * \pi}{4} 0,9 \right) = 22 \text{ A,}$$

$$I_{VD} = \frac{57,6}{\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{0,977 * \pi}{4} 0,9 \right) = 4 \text{ A}$$

Ємність конденсатора на вході АІН з ШІМ

$$C \geq \frac{\sqrt{3}\mu_m I_d}{\sqrt{2}f_m \Delta U_d} \sin^2 \frac{\varphi_H - \frac{\pi}{6}}{2},$$

Де ΔU_d – допустимі коливання випрямленої напруги. Приймаємо

$$\Delta U_d = 0,05U_d \text{ В.}$$

$\varphi_H = \arccos(\cos \varphi_H)$, $\varphi_H = \arccos(0,9) = 25,8$ гр. електричних.

f_m – частота модуляції. Приймаємо 400 Гц.

$$C \geq \frac{\sqrt{3} * 0,977 * 57,6}{\sqrt{2} * 400 * 0,05 * 1100} \sin^2 \frac{25,8 - \frac{\pi}{6}}{2} = 3,34 * 10^{-6} \text{ Ф,}$$

Обираємо IGBT модуль типу IXGT16N170 з основними технічними характеристиками [19]:

Максимальна напруга колектор-емітер – 1700 В;

Струм колектору – 32 А;

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

Напруга насичення – 3,5 В;
Час включення. – 45 нс;
Час вимкнення – 400 нс;
Потужність розсіювання – 190 Вт;
Заряд затвора – 78 нКл;
Діапазон температур -50...150 °С;
Корпус типу – ТО2683.

Останній вибір без розрахунку вказує на перевагу більш низьковольтного виходу тягового перетворювача, за собою веде до вибору більш низьковольтних приладів і для перетворювачів допоміжних машин.

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

ВИСНОВОК

В результаті виконання дипломної роботи стає можливим зробити наступні висновки:

1. Роботи з проектування та розробки сучасного ЕРС з асинхронним тяговим приводом є актуальними.
2. В якості тягових двигунів використовуються не типові асинхронні машини промислового ряду. Тому доцільно проводити детальний аналіз з визначення проектних параметрів тягових двигунів з куту зору втрат потужності в елементах перетворювача.
3. В роботі виконано аналіз втрат потужності в елементах перетворювача виходячи з того, що можливо мати двигуни з низькою фазною напругою. Низька фазна напруга може бути використана для електровозів та електропоїздів змінного струму, оскільки є можливість зниження напруги мережі живлення тяговим трансформатором.
4. Для порівняння прийнято два двигуни однакової потужності (1200 кВт), але з різними фазними напругами (990 В та 460 В). Значення такої фазної напруги дає напруги мережі постійного струму з метою живлення АІН – 2200 та 1100 В відповідно.
5. Порівняльний аналіз проектних параметрів перетворювача вказав на наступні переваги:
 - 5.1 Біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) автономного інвертора напруги високовольтного двигуна повинні вибиратися на напругу не менш 2759 В, що вимагає використання модулів з напругою 3300 В (сучасні модулі випускаються на напруги 1200, 1700, 2500, 3300, ...В). Для АІН низьковольтного двигуна напруга складає 1279 В, що дозволяє використовувати модулі на 1700 В. Ринкова вартість таких модулів значно менша.
 - 5.2 Для вхідного перетворювача, в якості котрого використано не-

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

керований випрямляч з широтне-імпульсним регулюванням (4qs), вплив на напруги перетворювальних модулів є аналогічним.

6. Аналіз втрат потужності в елементах перетворювача показав на перевагу високовольтного варіанту виконання асинхронного двигуна. Однак аналіз було проведено лише для двох значень напруги.
7. В якості машин допоміжних кіл (привод компресора та вентиляторів) вибрано асинхронні двигуни загальнопромислові серії АИР. Аналіз показав, що при використанні більш високовольтних машин (напруга фазна/лінійна – 380/660 В) цілком можливо вибрати необхідні модулі для автономних інверторів. Крім того, автономні інвертори напруги з ШІМ повністю забезпечені необхідними значеннями напруги живлення без проміжних перетворювачів від 4qs-перетворювача і забезпечують широкий діапазон регулювання швидкості обертання у випадку вентиляторів.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования: учебник [для студ. вузов]/ Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
3. Солодунов А. М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями./ Солодунов А. М., Иньков Ю. М. и др. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
4. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
5. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Бурков А. Т. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
6. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография / Ю. А. Бахвалов и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
7. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / Под ред. С. В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. — 356 с.
8. М. М. Казачковський. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посібник для студ. вузів. – Д. : НГА України, 2000. – 196 с.
9. Каталог. [Електрон. ресурс] – Режим доступа: https://www.arrow.com/en/products/ff400r33kf2cnosa1/infineon-technologies-ag?utm_source=FindChips&utm_medium=buyNow.
10. Пятое поколение IGBT-модулей Infineon – новая эпоха в силовой электронике. [Електрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/96417>.
11. Б. Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 416 с.

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

12. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

13. 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.: ДІТ, 2009. – 23 с.

14. IGBT-модули большой мощности для тяговых преобразователей производства компании Infineon [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://power-e.ru/components/igbt-moduli-infineon/>.

15. Гетьман Г. К.: Теория электрической тяги: Монография: в 2 т. / Г. К. Гетьман – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1. – 456 с.

16. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / Воронин П. А.– М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.

17. Электровоз магистральный ДСЗ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Описание и работа – Д.: УЭЛНИИ, 2002. – 128 с.

18. КАТАЛОГ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ АИР. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodvigateli_air/.

19. Компел. Электронный каталог [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.compel.ru/infosheet/IXYS/IXGT16N170>.

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