

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра _____ «Електрорухомий склад залізниць»
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Г.К.Гетьман
(підпис) (ПІБ)

2020 р. _____ «___»

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

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

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

Спеціалізація _____ «Електричний транспорт»
(повна назва)

Тема _____ Розробка уніфікованих асинхронних допоміжних
приводів електровозів ЧС2 та ЧС7.

Theme _____ Development of compatible
asynchronous auxiliary occasions of electric
locomotives of CHS2 and CHS7

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

Студент групи _____ ЕТ1921 _____ Сівоча Д. С.
(група) (підпис) (П. І. Б.)

Student _____ Sivokha Denys
(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

Сівоха Деніс Сергійович

(П. І. Б.)

1 Тема магістерської роботи: _____

Розробка уніфікованих асинхронних

допоміжних приводів електровозів ЧС2 та ЧС7

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

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

3 Вихідні дані до магістерської роботи: Кола приводу вентиляторів та компресора

електровозів ЧС2 та ЧС7. Привід, що пропонується – промислові асинхронні двигуни.

Напруга контактної мережі 2,4 – 4,0 кВ. Для заміни приводів вентиляторів та компресорів

вибрати за потужністю асинхронні двигуни. Розрахувати автономні трифазні інвертори

напруги для управління вибраними двигунами. Базовий алгоритм управління автономних

інверторів напруги – амплітудноімпульсна модуляція АІМ 180 град. ел.. Інвертор

перетворення напруги контактної мережі однофазний стабілізований. Базова структура

перетворювача: однофазний автономний інвертор напруги – трансформатор – випрямляч –

автономні інвертори приводів. В якості елементної бази – біполярні транзистори

з ізолюваним затвором.

4 Розділи магістерської роботи та терміни виконання.

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %	Кількість демонстраційних листів	Рекомендована література
Вступ, реферат, зміст, висновки.	04.11–13.12	5		
1 Аналіз систем живлення	09.09–27.09			
доп. машин електровозів ЧС2 та ЧС7		20	1	1, 2
2 Розробка функціональної схеми перетворювача	28.09–11.10	10	1	3
3 Проектування силової схеми перетворювача	12.10–08.11	25	5	3–5
4 Розробка системи керування силовими приладами перетворювача	08.11–29.11	30	1	6–8
Оформлення	02.11–13.12	10		

5 Рекомендована література

- 1 Раков В. А. Пассажирский электровоз ЧС2/ В. А. Раков – М.: Транспорт, 1976. – 320 с.
- 2 Карасев И. И. Локомотивной бригаде об электровозе ЧС7. / И. И. Карасев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 223 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 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 Бирюков С.А. Применение цифровых микросхем серий ТТЛ и КМОП.–М.:ДМК,2000.–240 с.
- 7 Ю. А. Браммер, И. Н. Пашук. Импульсные и цифровые устройства: Учебник для студентов электрорадиоприборостроительных специальностей – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 351 с.
- 8 Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

Дата видачі завдання: « 09 » вересня 2020 р.

Керівник магістерської роботи:

(підпис)

Білухін Д. С.

(П. І. Б.)

Консультант:

(підпис)

(П. І. Б.)

Завдання прийняв до виконання:

(підпис)

Сивоха Д. С.

(П. І. Б.)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: «Розробка уніфікованих асинхронних допоміжних приводів електровозів ЧС2 та ЧС7» виконана на 94 сторінках і містить: таблиць – 2, ілюстрацій – 23, джерел – 24, додатків – 1. Робота складається з чотирьох розділів.

В першому розділі роботи виконаний аналіз допоміжного обладнання електровозів ЧС2 та ЧС7, представлені технічні характеристики, сформовані проектні данні до розрахунку перетворювача.

В другому розділі виконано аналіз способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів, вибрано регулювання від частотного перетворювача, розроблено функціональну схему.

В третьому розділі вибрані асинхронні двигуни для приводу вентиляторів та компресорів з використанням законів частотного керування. Для асинхронного приводу вибрано та спроектована схема автономного інвертора напруги та система живлення на основі однофазного автономного інвертора, трансформатора та випрямляча. В якості силових ключів інверторів застосовані біполярні транзистори з ізольованим затвором.

В четвертому розділі вибрано елементи системи керування автономними трифазними інверторами.

Ключові слова: асинхронний двигун, інвертор, випрямляч, фільтр, трансформатор.

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

ЗМІСТ

стор.

Вступ	6
1 Аналіз системи живлення допоміжних машин електровозів ЧС2 та ЧС7.....	8
1.1 Особливості електровоза ЧС2	8
1.2 Допоміжні машини електровоза ЧС2	12
1.3 Особливості електровозу ЧС7	16
1.4 Допоміжні машини електровоза ЧС7	22
1.5 Проектні дані до розрахунку перетворювача	25
2 Розробка функціональної схеми перетворювача.....	27
2.1 Задачі статичного перетворювача.....	27
2.2 Аналіз способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів	29
2.3 Системи живлення асинхронних двигунів електрорухомого складу.....	34
2.4 Розробка функціональної схеми.....	37
3 Проектування силової схеми перетворювача	40
3.1 Частотне регулювання частоти обертання асинхронного двигуна	40
3.2 Вибір асинхронних двигунів допоміжних приводів	42
3.2.1 Вибір асинхронного двигуна приводу компресорів.....	42
3.2.2 Вибір асинхронного двигуна приводу вентиляторів	43
3.2.3 Розрахунок механічних характеристик асинхронних двигунів.....	46
3.2.4 Аналіз механічних характеристик приводів	51

					Розробка уніфікованих асинхронних допоміжних приводів електровозів ЧС2 та ЧС7								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Сівоха Д. С.			Розрахунково-пояснювальна записка				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Білухін Д.С.									4	94	
Реценз.									ДНУЗТ ст. гр. ЕТ1921				
Н. Контр.		Білухін Д.С.											
Затверд.		Гетьман Г.К.											

3.3	Вибір схеми трифазного автономного інвертора.....	54
3.4	Розрахунок силових приладів автономного інвертора допоміжного приводу.....	57
3.5	Розрахунок випрямляча.....	61
3.6	Вибір елементів однофазного автономного інвертора напруги	66
3.7	Силова схема перетворювача.....	70
4	Розробка системи керування силовими приладами перетворювача	72
4.1	Вимоги до системи керування	72
4.2	Система керування автономним трифазним інвертором приводу компресору	73
4.3	Система керування автономним трифазним інвертором приводу вентиляторів	75
	Висновки.....	80
	Список використаних джерел.....	82
	Перелік графічних робіт	84
	Додатки	85
	Додаток А. Демонстраційні матеріали до захисту проекту «Розробка уніфікованих асинхронних допоміжних приводів електровозів ЧС2 та ЧС7».....	86

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

ВСТУП

Залізниці України мають велику роль в перевезенні вантажів та пасажирів. На ділянках, що електрифіковано постійним струмом здійснюється майже половина вантажообігу і пасажирообороту.

На залізницях, які електрифіковано постійним струмом для перевезення вантажів використовуються електровози серії ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ11М5, ВЛ11М6, ДЕ1, а для перевезення пасажирів ЧС2 і ЧС7. Значна кількість електровозів вже давно введені в експлуатацію і відслужили встановлений ресурс.

Відновлювання фізично та морально застарілого парку електровозів потребує значних фінансових витрат для закупівлі їх за границею або освоєння виробництва заводами України, що в нашій економічній ситуації дуже непросто. Тому деякі електровози проходять капітально-відновлювальні ремонти та продовжують знаходитися в експлуатації.

В нинішній час попит на пасажиропотік пасажирськими поїздами не зменшується, так як він залишається самим дешевшим видом транспорту.

На даному етапі капітально-відновлювальний ремонт рухомого складу є одним із напрямків продовження терміну служби. Це пояснюється тим, що ремонт одиниці дещо дешевший, ніж її придбання. Після капітального ремонту термін служби електровоза та електропоїзда може бути подовжений на 10..15 років.

Під час капітально-відновлювального ремонту доцільно виконання і модернізації електричного обладнання. В даній роботі пропонується замінити існуючий колекторний привід компресорів та вентиляторів електровоза ЧС2 на асинхронні двигуни з еквівалентними параметрами за потужністю, частотою обертів.

Використання асинхронного двигуна дає переваги в тому, що він більш надійний та вимагає менших втрат часу та коштів на своє обслуговування. Крім того, в колах приводів постійного струму компресорів та вентиляторів електровозів ЧС2 та ЧС7 постійно ввімкнені реостати на яких втрачається потужність без виконання ефективної роботи.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

Основною проблемою, яка існувала нещодавно при використанні допоміжних приводів від асинхронних двигунів, було отримання трьохфазної змінної напруги на електрорухомому складі постійного струму. Для вирішення цієї проблеми використовувалося два шляхи. Перший шлях, який використовується на електропоїздах – синхронний генератор. В якості приводу синхронного генератора використовується електричний двигун постійного струму з обмотками послідовного та незалежного збудження. Крім характерних недолік для колекторної високовольтної машини ще додається необхідність постійної готовності такої системи до використання. Тому що, компресор вмикається в будь який момент і трьохфазна напруга повинна знаходитися в мережі.

Другий шлях – це використання статичного перетворювача для отримання трьохфазної напруги. До переваг відносимо відсутність обертових механізмів, що виключає шум та вібрації в салоні електропоїзда, система завжди готова до роботи та вмикається за сигналом від реле тиску. До недавнього минулого виконання таких систем було обмеженим, оскільки їх розробляли на основі тиристорів з усіма необхідними елементами корекції робочих режимів, що впливало на зниження надійності таких систем.

Останні 15-20 років в промисловості використовуються частотно-регульовані асинхронні приводи на основі біполярних транзисторів з ізольованим затвором. Клас напруг та струми на які випускаються промисловістю такі прилади вже відповідають можливості їх використання на залізничній техніці. Однак, закупівля готових частотно-регульованих перетворювачів вимагає суттєвих капітальних вкладень, тому що всі вони виробляються за кордоном. Виробництво таких перетворювачів власними силами та закупівля для них окремої елементної бази дещо знижує вартість та дає опит в проектуванні, виробництві та впровадженні таких пристроїв.

Крім того, впровадження частотно-керованого асинхронного приводу вентиляторів дає економію електричної енергії, яка споживається тяговими електричними двигунами.

						Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЧС2 ТА ЧС7

1.1 Особливості електровоза ЧС2

Магістральний пасажирський електровоз постійного струму ЧС2 будувався на заводах Шкода з 1958 по 1973 рік для залізниць Радянського Союзу. Усього заводом було побудовано 1064 одиниці електровозів цієї серії [1–3].

Електровози ЧС2 з №003 мають наступні основні технічні дані:

осьова характеристика..... 3_0-3_0 ;
потужність годинного режиму на валу тягових двигунів, кВт 4200;
потужність тривалого режиму на валу тягових двигунів, кВт 3708;
сила тяги в годинному режимі, кгс 16500;
сила тяги тривалого режиму, кгс..... 13700;
швидкість годинного режиму, км/год..... 91,5;
швидкість тривалого режиму, км/год. 96,9;
максимальна швидкість, км/год..... 160;
діаметр коліс за колом катання, мм 1250;
загальна колісна база, мм 13000;
висота електровоза від полоза опущеного струмоприймача до головок рейок, мм 5100;
ширина кузова електровозу, мм 3030;
мінімальний радіус кривої в експлуатації, м 125;
кількість та тип тягових двигунів..... 6, AL-4846eT;
потужність годинного режиму тягового двигуна, кВт 700;
потужність тривалого режиму тягового двигуна, кВт 618.

Кузов електровоза зварної конструкції являє собою одну просторову ферму, що включає в себе й нижню головну раму. Візки електровоза тривісні. Гальмове й тягове зусилля від візків до кузова передається через шворні, жорстко укріплені в рамі кузова, взаємодіючи з кульовими зчленуваннями, поміщеними в балках візків. Передбачене вільне поперечне переміщення візків щодо кузова на 60 мм. Вага кузова передається на візки через чотири бокові опори. Від рами візка на колісні пари вага передається через гумові сайлентблоки, встановлені по кінцях листових підбуксових ресор. Букси електровоза мають по одному сферичному дворядному підшипнику, в отвори букс входять стрижні (цапфи), запресовані в раму візки – через них передаються горизонтальні зусилля. Ресори другої і третьої

						Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

колісних пар першого візка з'єднуються між собою поздовжніми балансирами; на другому візку з'єднані балансирами четверта, п'ята й шоста колісні пари. Між собою візки з'єднуються зчленуванням із пружинним обладнанням, яке повертається не перешкоджаючи поздовжньому переміщенню візків. Для кращого вписування в криві товщина гребенів 2-ї і 5-ї колісних пар була зменшена на 10 мм.

Тягові електродвигуни електровоза можуть з'єднуватися послідовно, послідовно-паралельно і паралельно. На ходових позиціях кожного з'єднання передбачено 5 позицій ослаблення збудження: 80 %, 65 %, 50 %, 40 %, 35 %. Перехід з одного з'єднання тягових електричних двигунів на інше здійснюється методом шунтування електродвигунів резисторами.

Головний перемикач електровоза має 39 контакторних елементів, розташованих у два ряди, по обидві сторони від кулачкових валів. Привод головного перемикача здійснюється пневмодвигуном системи Skoda. Перемикач має нульову, підготовчу (X), 40 робочих і 6 перехідних позицій. Ходові позиції (тобто позиції, на яких допускається тривала їзда) – 22, 33, 40. Ослаблення збудження здійснюється за допомогою окремого шестипозиційного перемикача з 20 контакторними елементами, схожого по конструкції на головний перемикач, але з одним рядом контакторних елементів.

Високовольтні кола від струмів короткого замикання й перевантажень захищають швидкодіючий вимикач, диференційні реле (№ 015 у силовому колі й № 201 у допоміжному), реле перевантаження тягових електричних двигунів і теплові реле допоміжних двигунів. Включення двигунів допоміжних машин і калориферів опалення кабін здійснюється електромагнітними контакторами.

Для охолодження тягових електродвигунів і пуско-гальмових резисторів на електровозі встановлено два відцентрові мотор-вентилятори з електродвигунами постійного струму, розрахованими на номінальну напругу 3000 В. Мотор-вентилятори мають два режими роботи: мала швидкість (зимовий режим) і висока швидкість (літній режим). Для створення запасу стислого (0,75-0,9 МПа) повітря на електровозі встановлено два мотор-компресори з електродвигунами постійного струму, розрахованими на номінальну напругу 3000 В. Мотор-компресори мають два режими роботи: автоматичний і ручний.

При діаметрі коліс 1250 мм, передаточному числі 1,951 і напрузі на тягових електричних двигунах 1500 в, електровози розвивають в годинному

						Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

режимі силу тяги 17,3 тс і швидкість 72,4 км/год.; у тривалому режимі силу тяги 14,3 тс і швидкість 76,1 км/ч. Максимальна припустима швидкість для дослідних електровозів була встановлено 140 км/год., при конструкційній швидкості 160 км/ч.

Регулювання частоти обертання тягових двигунів на електровозі ЧС2 здійснюють так само, як і па всіх електровозах постійного струму, тобто зміною напруги на затискачах двигунів і зміною (регулюванням) збудження [1, 7, 8].

При шести тягових двигунах, розрахованих на робочу напругу на колекторі 1500 В і напрузі в контактній мережі 3000 В для регулювання швидкості на електровозах ЧС2 застосовуються наступні з'єднання:

- послідовне, коли всі шість двигунів з'єднані послідовно між собою; напруга на затисках кожного двигуна складає 500 В;
- послідовно-паралельне, коли двигуни з'єднані в два паралельні кола але три двигуни, послідовно з'єднаних в кожному колі; напруга на затисках кожного двигуна складає 1000 В;
- паралельне, коли двигуни з'єднані в три паралельні кола по два двигуни, послідовно з'єднаних в кожній; напруга на затисках кожного двигуна складає 1500 В.

Відповідно напрузі при однаковому струмі тягового двигуна швидкість руху електровоза складає при послідовно-паралельному з'єднанні $2/3$ і при послідовному $1/3$ швидкості паралельного з'єднання, причому при великих струмах тягового двигуна це співвідношення не витримується.

Збудження полюсів тягового двигуна змінюється приєднанням паралельно обмоткам їх головних полюсів шунтуючого резистора. Електровози ЧС2 мають на кожному з'єднанні один ступінь з нормальним збудженням і п'ять ступенів з ослабленим, тобто 18 ступенів швидкості.

При переході з повного збудження на ослаблене зменшується величина магнітного потоку головних полюсів, а отже, при незмінній швидкості і проти-е.р.с. якоря. Це веде до збільшення струму, тобто потужності, що розвивається тяговим двигуном. Струм зростає до тих пір, поки магнітний потік не досягне колишньої величини, тобто не наступить рівновага між проти-е.р.с. якоря і прикладеною до нього напругою.

Тому ослаблення збудження супроводжується збільшенням струму якоря при збереженні величини магнітного потоку і, отже, збільшенням моменту двигуна і сили тяги електровоза. Це зазвичай приводить до

						Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

збільшення швидкості руху і зменшення струму і магнітного потоку, головних полюсів. Зазвичай ступінь ослаблення збудження характеризується відношенням струму збудження до струму якоря, вираженим у відсотках. Для електровоза ЧС2 ці величини складають 85, 70, 57.5, 47.5, 40 % та відповідно з 1-ї до 5-го ступеню збудження.

Пуск в хід. Для обмеження струму при пуску в коло двигунів вводиться додатковий омічний опір, який значно збільшує загальний опір кола. Пусковий струм

$$I_n = \frac{U}{6r + R}, \quad (1.1)$$

де $r = 0.09$ Ом – опір обмоток тягового двигуна AL-4846eT;

R – опір реостатів.

Якщо $R = 12.063$ Ом (опор пускових реостатів електровоза ЧС2 на першій позиції), то пусковий струм має значення $I_n \approx 240$ А.

Якщо обертового моменту, відповідного цьому струму, недостатньо для початку руху електровоза зі складом, то можна зменшити величину R замиканням накоротко окремих секцій реостатів. Так, при $R = 8.017$ Ом пусковий струм буде 340 А, при $R = 6.19$ Ом струм буде 450 А і т.д. Як тільки електровоз зрушиться з місця, тобто якорі двигунів почнуть обертатися, в провідниках обмотки останніх з'явиться е.р.с., яка направлена проти напруги, що підводиться до двигунів. Величина проти-е.р.с., як відомо, збільшується із зростанням частоти обертання двигуна. При незмінному опорі реостатів R і постійній напрузі контактної мережі U із збільшенням проти-е.р.с. E , тобто із збільшенням швидкості руху електровоза, струм падає. При зменшенні струму зменшується і сила тяги.

Щоб зберегти постійною силу тяги при пуску (розгоні) електровоза, необхідно підтримувати постійну величину струму. Для цього слід постійно зменшувати пусковий опір. Здійснити плавне зменшення опору практично складно. Тому зменшення опорів проводять замиканням накоротко частин реостатів (секцій) і їх перемиканням, що приводить до ступінчастого коливання пускового струму, а отже, і тягового зусилля при розгоні. На електровозі ЧС2 є 19 реостатних позицій при послідовному з'єднанні двигунів, 12 – при послідовно-паралельному і 8 – при паралельному.

У електричних колах електровозів окремі секції пускових резисторів в кількості п'яти або три підключають між собою послідовно і утворюють групу або гілку. На електровозах до № 305 групи пускових резисторів, які

						Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

складаються тільки з п'яти секцій, включають між собою послідовно, послідовно-паралельно і паралельно. На електровозах з № 305 дві групи, що складаються з п'яти секцій, включають послідовно і паралельно. На цих електровозах є ще дві групи, що складаються з трьох секцій, які використовують і як пускові резистори, і як перехідні.

Різне включення груп і секцій в групах дає можливість більш рівномірно навантажувати секції резисторів при різному з'єднанні двигунів і забезпечувати найбільше число ступенів резисторів при найменшому числі окремих секцій.

Перехід з одного з'єднання двигуна на інше па електровозах 34Е, як і на більшості електровозів постійного струму, здійснюється методом шунтування, який дозволяє під час переходу зберегти тягове зусилля частини двигунів. Перехід з одного з'єднання двигуна на інше па електровозах 54Е здійснюється по мостовій схемі.

1.2 Допоміжні машини електровоза ЧС2

На електровозах ЧС2 встановлені наступні допоміжні машини:

- два мотор-компресори з електродвигунами постійного струму напругою 3000 В, які подають повітря в гальмівну й пневматичну системи електровоза;
- один допоміжний мотор-компресор з електродвигуном постійного струму напругою 50 В, що одержують живлення від акумуляторної батареї. Компресор подає стиснене повітря для підйому струмоприймачів і включення швидкодіючого вимикача під час запуску електровоза;
- два мотор-вентилятори з електродвигунами постійного струму напругою 3000 В для охолодження тягових двигунів та пускових реостатів;
- два мотор-вентилятори калориферів кабін машиніста з електродвигунами постійного струму напругою 50 В;
- два генератори живлення кіл керування, що виробляють постійний струм напругою 50 В для кіл керування, освітлення й сигналізації, а також для зарядки акумуляторної батареї.

Відповідно до завдання необхідно виконати заміну існуючого приводу вентиляторів та компресорів на асинхронні двигуни промислового ряду. Тому далі не розглядаємо допоміжний мотор-компресор та мотор-вентилятори калориферів.

На електровозах ЧС2 встановлене по два поршневі двоступінчасті трициліндрові компресори типу К2, які приводяться в рух електродвигунами

						Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

типу 1А-3432/4, з електровоза № 305 – типу 6А-3432/4, а на електровозах більш пізніх випусків – типу 9А-3432/4. Компресор і електродвигуни встановлені на спільній фундаментній плиті.

Вал компресора за допомогою зубчастої передачі з'єднано з валом електродвигуна 1А-3432/4, 6А-3432/4 або 9А-3432/4. Зубчастий привод має передаточне число 1:2,13 (66:31 зубів). При частоті обертання вала 720 об/хв компресор подає 2,5–2,7 м³/хв повітря, стислого до тиску 9 кгс/см² (при надходженні в компресор повітря температурою +20°С). Хід поршня становить 120 мм, середня швидкість його переміщення 2,88 м/с. Об'єм мастила в картері рівний 4,5 л. Тиск мастила в працюючому компресорі складає 3-5 кгс/см², вага компресора 360 кг, висота 911 мм, довжина 1043 мм і ширина 652 мм.

Електродвигун 1А-3432/4 розраховано на номінальну напругу 3000 В, у його коло постійно включений резистор опором 19,5 Ом, електродвигун розвиває тривалу потужність 17 кВт при струмі 7,15 А; частота обертання якоря 1350 об/хв. Під час випробування ізоляції на обмотки подають напругу 8750 В протягом 1 хв. Двигун випробовують при максимальній частоті обертання якоря 2600 об/хв. Разом з фундаментною плитою електродвигун важить 930 кг.

Електродвигун 6А-3432/4 розраховано на номінальну напругу 3000 В, у його коло включений резистор 20 Ом. Тривала потужність електродвигуна 21 кВт при струмі 8,3 А и частоті обертання якоря 1700 об/хв. Разом із плитою електродвигун важить 950 кг, електродвигун 9А-3432/4 має ті ж електричні параметри; вага його рівна 875 кг.

Відцентрові вентилятори приводяться в обертання електродвигунами високої напруги з послідовним збудженням. На електровозах 53Е (ЧС2Т) установлені двоступінчасті вентилятори, на електровозах 34Е (ЧС2) – одноступінчасті.

На електровозах 34Е відцентровий вентилятор складається з кожуха, що має форму спіралі і колеса з лопатками в ньому, що приводиться в рух електродвигуном. Для привода вентиляторів використовуються електродвигуни 2А-3432/4, 3А-3432/4 або 8А-3432/4. Конструкція цих електродвигунів незначно відрізняється від конструкції електродвигуна компресора.

Електродвигун 2А-3432/4 розраховано на номінальну напругу 3000 В, в коло електродвигуна постійно включений резистор опором 19,5 Ом. При

						Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

тривалому режимі електродвигун розвиває потужність 24 кВт (при частоті обертання 1500 об/хв і струмі 9,6 А). Вага електродвигуна рівна 800 кг, якоря – 260 кг.

Електродвигуни 3А-3432/4 при напрузі 3000 В и опорі 20 Ом, включеному в їхнє коло, розвивають тривалу потужність 28 кВт (при частоті обертання 1650 об/хв і струмі 11,5 А). Вага електродвигуна рівна 760 кг.

Двоступінчастий вентилятор при частоті обертання 1295 об/хв (послідовне включення двох електродвигунів вентиляторів) подає 5,5 м³/хв повітря, при 1790 об/хв – 8,3 м³/хв. Одноступінчасті вентилятори при частоті обертання 1500 об/хв подають у канали по 9 м³/хв повітря тиском 180 мм вод. ст.

Для перемикання електродвигунів вентиляторів з великої на малу частоту обертання й назад служить перемикач мотор-вентиляторів 38БС.

На електровозі встановлено два генератори струму керування 3А-1731/4 або 4А-1731/4 (з № 305), укріплені на електродвигунах вентиляторів. Двигуни обертають якоря генераторів за допомогою клинових ременів. При частоті обертання якоря генератора 2600 об/хв, напрузі на його затисках 60 В и струмі 83,5 А генератор розбудовує номінальну потужність 5 кВт.

Схема живлення силових кіл представлена на рисунку 1.1.

Допоміжні машини та печі опалення отримують електричну енергію через швидкодіючий вимикач, котушку диференційного реле 201 та провід 200. Від останнього, після замикання електромагнітних контакторів 208 та 206 струм проходить через резистор демпфування 202, плавкий запобіжник 204 та далі по двом колам: 1) контактор 208, секції А-С та С-В резистора 217, електродвигун компресора 222, теплове реле 231, провід 297;

2) контактор 206, секції А-С та С-В резистора 216, електродвигун компресора 221, теплове реле 230, провід 297.

Далі є загальне для всіх допоміжних кіл та опалення коло: диференційне реле 201, обмотка лічильника, пристрій відводу струму, рейки.

Після пуску мотор-компресора замикаються контактори 209 та 207, що виводить з кола електричних машин секції А-С додаткових резисторів 217 та 216 (по 78 Ом). В колах двигунів залишаються секції С-В додаткових резисторів, опір кожної з яких дорівнює 5 Ом.

						Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

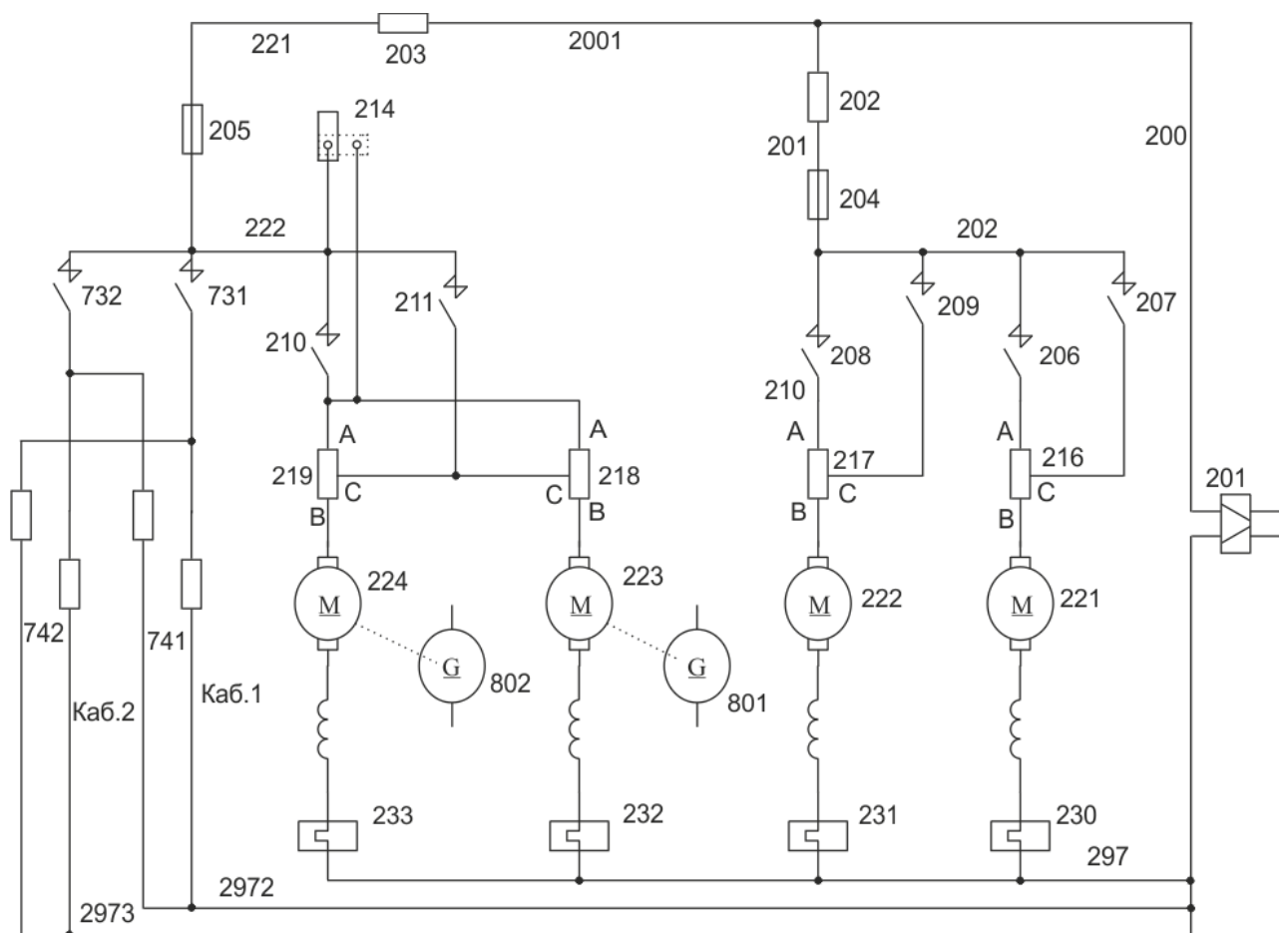


Рисунок 1.1 – Силове коло допоміжних машин.

Кола двигунів 224 та 223 приводу вентиляторів та електричні печі калориферів 742 та 741 кабін машиніста живляться від проводу 200 через резистор демпфування 203 та плавкий запобіжник 205.

На відміну від кіл електричних двигунів компресорів в колах електричних двигунів 223 та 224 вентиляторів резистори постійно з'єднані паралельно. В їх колі є в наявності клемова рейка 214, яка дозволяє при розрядженій акумуляторної батареї або при пошкодженні контактора 210 подавати напругу до затисків А резисторів 219 та 218 минаючи контактор 210.

Після підняття одного зі струмоприймачів починають працювати електричні двигуни 224 та 223 вентиляторів, а відразу й генератори управління 801 та 802. Відразу появляється напруга в колах управління.

Елементи калориферів обігріву кабін машиніста ввімкненні по шість послідовно. В кожній кабіні встановлено по 12 елементів, які розділюються на дві групи, що вмикаються електромагнітними контакторами 732 та 731.

1.3 Особливості електровозу ЧС7

Магістральний пасажирський електровоз постійного струму ЧС7 будувався на заводах Шкода з 1983 по 1999 рік для залізниць Радянського Союзу, а далі для Росії та України. Це найбільш потужним пасажирським електровозом, які використовуються в державах колишнього СРСР. Усього заводом було побудовано 321 одиниця електровозів цієї серії [4–6].

Електровози ЧС7 мають наступні основні технічні дані:

осьова характеристика.....	2(2 ₀ -2 ₀);
потужність на валу тягових двигунів, кВт	6160;
потужність реостатного гальмування в тривалому режимі, кВт	6500;
діапазон швидкостей ефективного використання реостатного гальмування, км/год	40-160;
сила тяги тривалого режиму на ободі колеса, кН.....	246,8;
швидкість тривалого режиму, км/год.	87,8;
максимальна швидкість, км/год.....	160;
діаметр коліс за колом катання, мм	1250;
струм тягового двигуна тривалого режиму, А	545;
припустимий струм під час розгону, А	800;
передатне відношення тягового редуктора	1,733;
маса електровоза з 2/3 запасу піску, т.....	172;
номінальне навантаження від колісної пари на рейки, кН	210,9;
довжина між осями автосцепки, мм.....	34040;
висота електровоза від полоза опущеного струмоприймача до головок рейок, мм	5120;
ширина кузова електровозу, мм	3000;
мінімальний радіус кривої в експлуатації, м	125;
кількість та тип тягових двигунів.....	8, 1L-4846eT;
потужність годинного режиму тягового двигуна, кВт	700;
потужність тривалого режиму тягового двигуна, кВт	618.

Електровоз ЧС7 складається з двох однакових секцій. Основа кожної секції – кузов вагонного типу з несучою рамою. Через шкворневі для передачі тягово-гальмівних зусиль і люлькову пружинну підвіску для передачі ваги рама пов'язана з двома двовісними візками. З рами візка на букси вага передається через гвинтові пружини (гвинтові ресори) , що спираються на крила (припливи) букс, а тягово-гальмівні зусилля через циліндричні цапфи, що проходять всередині пружин і що входять до отвору

припливів букс. Листові ресори з конструкції ходової частини ЧС7 виключені. Паралельно пружинам в люльковому і в буксовому підвішуванні встановлені гідравлічні гасники. У перші роки експлуатації це нововведення проявляло себе не з кращого боку – в локомотивних депо не було оснастки, персоналу і навіть технології ремонту гідро гасників, але пізніше проблеми припинилися. Кожна колісна пара має двостороннє гальмування, силою гальмівних циліндрів (по два на візок) з двох сторін до кожного колеса притискаються по дві гальмівні колодки. Також на електровозі маються пневматичні пісочниці, підсипають під передню по ходу руху колісну пару кожного візка пісок для поліпшення зчеплення. Управляються вони правою педаллю машиніста або автоматично при спрацьовуванні реле боксування, а також при екстреному гальмуванні. З метою довантаження першої та п'ятої по ходу руху колісних пар кожної секції встановлені проти розвантажувальні пристрої (ПРП) – циліндри, через важелі і троси піднімають задню частину переднього візка. Включаються ПРП натисканням кнопки в правій частині пульта машиніста. На деяких електровозах кнопка замінена перемикачем для тривалого включення ПРУ.

Тягові електродвигуни електровоза можуть з'єднуватися послідовно, послідовно-паралельно і паралельно. На ходових позиціях кожного з'єднання передбачено 5 позицій ослаблення збудження: 85%, 70%, 57,5%, 47,5%, 40%. Перехід з одного з'єднання тягових електричних двигунів на інше здійснюється методом мостового переходу.

Всі перемикання з'єднань, пуск-гальмівних реостатів (ПГР) і шунтів тягових двигунів ведуться електропневматичними контакторами, керованими контролером машиніста. Він складається з двох частин – одна, стандартний контролер машиніста 21KR, встановлена в кабіні, її реверсивний вал і вал ослаблення збудження керують безпосередньо відповідно реверсорами і контакторами ослаблення збудження, а головний вал управляє чотирициліндровим пневматичним двигуном проміжного барабана контролера (ПБК), встановленого в машинному відділенні.

ПБК – низьковольтний груповий перемикач, що має 54 контакторних елемента – за кількістю керованих ПБК контакторів. ПБК є в кожній секції і управляє контакторами обох секцій відразу. При виході з ладу ПБК передній по ходу секції можна перейти на управління від ПБК задньої секції. При згорянні будь-якого контактора можна перемиканням кабелів зібрати аварійну схему. Цим забезпечується висока надійність електровоза.

						Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПБК має 57 фіксованих позицій – нульову, на якій всі контактори вимкнені та 56 робочих. На першій позиції відкриваються жалюзі блоку ПГР і збирається коло серієсного з'єднання з повністю введеними ПГР. При переміщенні ПБК до 20-й позиції по черзі виводяться секції резисторів, і на 20-й ПГР виводяться повністю – це без реостатна позиція С з'єднання. Далі слідує перехідна позиція 21, на якій в коло знову вводяться ПГР і переключається з'єднання двигунів (за так званою схемою моста, що виключає провал сили тяги), і перша реостатна позиція СП з'єднання – 22. Без реостатна позиція СП – 38, далі йде 39-а перехідна (також з мостовим переходом) і перша реостатна паралельного з'єднання – 40. На режим без реостатного паралельного з'єднання електровоз виходить на 56-й позиції ПБК.

Управління пневматичним двигуном ПБК за допомогою контролера машиніста 21KR цілком звичайне, ослаблення збудження можливо на будь-якій позиції ПБК. Є одна додаткова кнопка «СП-С», встановлена зліва від контролера машиніста. З будь-якої позиції П з'єднання вона скидає ПБК на позицію 38, з будь-якої позиції СП з'єднання на 20-ту, з будь-якої позиції С – на нульову. Цією кнопкою зручно користуватися для більш плавного ведення поїзда, при переході з вищого з'єднання на нижче з ослабленим збудженням (наприклад, з П без шунтів на СП з усіма шунтами). Натискається кнопка «СП-С», і поки ПБК рухається до без реостатної позиції – плавно по черзі включаються секції шунтів. Перехід виходить плавніше, ніж він був би при скиданні позицій ПБК і наступному включенні шунтів тільки штурвалом, без сильного провалу сили тяги.

Високовольтні кола від струмів короткого замикання й перевантажень захищають швидкодіючий вимикач, диференційні реле у силовому й допоміжному колах, реле перевантаження тягових електричних двигунів і теплові реле допоміжних двигунів. Включення двигунів допоміжних машин і калориферів опалення кабін здійснюється електромагнітними контакторами.

На кожній секції електровоза ЧС7 встановлено три високовольтні допоміжні машини – два мотор-вентилятора (МВ) тягових двигунів і один мотор-компресор (МК). Кожен з мотор-вентиляторів встановлений вертикально і складається з високовольтного двигуна, двох вентиляторних коліс (одне закріплено на верхньому кінці валу двигуна, інше на нижньому) і розташованого збоку на корпусі вентилятора колекторного генератора управління. Генератор управління приводиться до обертання від двигуна

						Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

вентилятора через ремінну передачу і виробляє постійний струм напругою 50 В для живлення кіл управління та освітлення електровоза.

Двигуни вентиляторів розраховані на напругу 1500 В і тому вентилятори кожної секції електровоза постійно з'єднані послідовно. Між собою вентилятори секцій можуть з'єднуватися послідовно (режим низької швидкості) і паралельно (режим високої швидкості) за допомогою розташованих у кожній з секцій перемикачів вентиляторів з пневматичним приводом. У колі вентиляторів є додаткові резистори. При включенні в коло вводиться резистор опором 160 Ом, це забезпечує плавний розгін двигунів. Через 3 секунди спрацьовує реле часу і значна частина опору виводиться, в колі залишається лише 25 Ом. Включається та чи інша швидкість перемикачем на пульті машиніста.

Мотор-компресор призначений для нагнітання запасу повітря в головних резервуарах, використовуваного для роботи гальм, звукових сигналів, пісочниць, склоочисників, електроапаратів з пневматичним приводом. Він розташований горизонтально, складається з високовольтного двигуна і трьох циліндрового компресора K2-Lok1. Забір повітря для компресора – зовні електровоза. Пуск компресора може бути як автоматичний, по сигналу реле тиску, що спрацьовує при тиску в головних резервуарах менш 7,5 Атм, так і ручний – це вибирається перемикачем на пульті машиніста. Також в картері компресора встановлений електричний нагрівач для обігріву мастила після тривалої стоянки взимку, він включається тим же перемикачем в кабіні. Запуск компресора, як і вентиляторів, реостатний. При включенні в коло вводиться додатковий резистор опором 69 Ом, і по закінченні 2 секунд, якщо тиск у головних резервуарах більше 3 атмосфери (при меншому тиску навантаження на компресор мала і частота обертання може підвищитися понад межі) майже весь резистор закорочений. Для опалення в кожній кабіні встановлено два калорифера. Самі калорифери отримують живлення високою напругою, а двигуни їх вентиляторів – напругою 50 В.

Напруга в низьковольтних колах – 50 В. Воно виробляється генераторами управління (по два в секції), а при їх зупинці – акумуляторною батареєю, одній на кожну секцію. Діляться низьковольтні кола на дві основні групи – кола управління і освітлення. Кола управління дуже великі і включають різні реле, контролери, котушки вентилів і контакторів. Кола освітлення простіші, складаються з освітлювальних приладів та їх вимикачів.

						Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На лобовій частині кожної кабіни знаходиться один прожектор і два двобарвних буферних ліхтаря, над візками – світильники освітлення ходових частин, в машинному відділенні – світильники освітлення машинного відділення. Від мережі 50 В отримують живлення різні перетворювачі – живлення приладів безпеки, електропневматичних гальм. Також у кожній секції є допоміжний компресор, використовуваний для підйому струмоприймача і включення швидкодіючого вимикача при відсутності повітря в головних резервуарах. Він має ручний привід та електропривод.

Регулювання частоти обертання тягових двигунів на електровозі ЧС7 здійснюють так само, як і па всіх електровозах постійного струму, тобто зміною напруги на затискачах двигунів і зміною (регулюванням) збудження [4, 7, 8].

При шести тягових двигунах, розрахованих на робочу напругу на колекторі 1500 В і напрузі в контактній мережі 3000 В для регулювання швидкості на електровозах ЧС7 застосовуються наступні з'єднання:

- послідовне, коли всі вісім двигунів з'єднані послідовно між собою; напруга на затисках кожного двигуна складає 375 В;
- послідовно-паралельне, коли двигуни з'єднані в два паралельні кола але чотири двигуни, послідовно з'єднаних в кожному колі; напруга на затисках кожного двигуна складає 750 В;
- паралельне, коли двигуни з'єднані в чотири паралельні кола по два двигуни, послідовно з'єднаних в кожній; напруга на затисках кожного двигуна складає 1500 В.

Відповідно напрузі при однаковому струмі тягового двигуна швидкість руху електровоза складає при послідовно-паралельному з'єднанні $2/3$ і при послідовному $1/3$ швидкості паралельного з'єднання.

Збудження полюсів тягового двигуна змінюється приєднанням паралельно обмоткам їх головних полюсів шунтуючого резистора. Електровози ЧС7 мають на кожному з'єднанні один ступінь з нормальним збудженням і п'ять ступенів з ослабленим, тобто 18 ступенів швидкості.

При переході з повного збудження на ослаблене зменшується величина магнітного потоку головних полюсів, а отже, при незмінній швидкості і проти-е.р.с. якоря. Це веде до збільшення струму, тобто потужності, що розвивається тяговим двигуном. Струм зростає до тих пір, поки магнітний потік не досягне колишньої величини, тобто не наступить рівновага між проти-е.р.с. якоря і прикладеною до нього напругою.

						Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тому ослаблення збудження супроводжується збільшенням струму якоря при збереженні величини магнітного потоку i , отже, збільшенням моменту двигуна і сили тяги електровоза. Це зазвичай приводить до збільшення швидкості руху і зменшення струму і магнітного потоку, головних полюсів. Зазвичай ступінь ослаблення збудження характеризується відношенням струму збудження до струму якоря, вираженим у відсотках. Для електровоза ЧС7 ці величини складають 85, 70, 57.5, 47.5, 40 % та відповідно з 1-ї до 5-го ступеню збудження.

Пуск в хід. Для обмеження струму при пуску в коло двигунів вводиться додатковий омичний опір, який значно збільшує загальний опір кола. Пусковий струм

$$I_n = \frac{U}{8r + R}, \quad (1.2)$$

де $r = 0.09$ Ом – опір обмоток тягового двигуна 1L-4846eT;

R – опір реостатів.

Якщо $R = 20$ Ом (опір пускових реостатів електровоза ЧС7 на першій позиції), то пусковий струм має значення $I_n \approx 150$ А.

Якщо обертового моменту, відповідного цьому струму, недостатньо для початку руху електровоза зі складом, то можна зменшити величину R замиканням накоротко окремих секцій реостатів. Як тільки електровоз зрушиться з місця, тобто якорі двигунів почнуть обертатися, в провідниках обмотки останніх з'явиться е.р.с., яка направлена проти напруги, що підводиться до двигунів. Величина проти-е.р.с., як відомо, збільшується із зростанням частоти обертання двигуна. При незмінному опорі реостатів R і постійній напрузі контактної мережі U із збільшенням проти-е.р.с. E , тобто із збільшенням швидкості руху електровоза, струм падає. При зменшенні струму зменшується і сила тяги.

Щоб зберегти постійною силу тяги при пуску (розгоні) електровоза, необхідно підтримувати постійну величину струму. Для цього слід постійно зменшувати пусковий опір. Здійснити плавне зменшення опору практично складно. Тому зменшення опорів проводять замиканням накоротко частин реостатів (секцій) і їх перемиканням, що приводить до ступінчастого коливання пускового струму, а отже, і тягового зусилля при розгоні.

У електричних колах електровозів окремі секції пускових резисторів в кількості п'яти або три підключають між собою послідовно і утворюють групу або гілку. Різне включення груп і секцій в групах дає можливість більш

						Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

рівномірно навантажувати секції резисторів при різному з'єднанні двигунів і забезпечувати найбільше число ступенів резисторів при найменшому числі окремих секцій.

1.4 Допоміжні машини електровоза ЧС7

Тягові двигуни кожного візка охолоджуються одним двоступеневим вентилятором. Повітря надходить через всмоктувальні жалюзі, які знаходяться на даху електровоза, і по розподільному каналу проходить в два тягові двигуни з боку, протилежного колектору. Двигуни вентиляторів обертають також вал якоря генератора управління за допомогою клинових ременів. Охолодження пуск гальмових резисторів кожної секції виконується двома аксіальними одноступінчастими вентиляторами. Мотор-вентилятори та пуск гальмові резистори перебувають у камері резисторів, яка розташована на даху електровоза. Повітря охолодження надходить в камеру через всмоктувальні жалюзі. Нагріте повітря випускається вихлопними жалюзіями. Відкриття жалюзі забезпечує пневматичний привід. Охолодження тиристорного збудника електродинамічного гальма забезпечується повітрям надлишкового тиску, що відбираються з розподільного каналу охолодження тягових двигунів відповідного візка, Повітря проходить через шафу збудника електродинамічного гальма і викидається в машинне відділення.

В кожній секції електровоза ЧС7 встановлені наступні допоміжні машини:

- мотор-компресор з електродвигунами постійного струму 13А-3432/4 напругою 3000 В, які подають повітря в гальмівну й пневматичну системи електровоза;

- один допоміжний мотор-компресор з електродвигуном постійного струму напругою 50 В, що одержують живлення від акумуляторної батареї. Компресор подає стиснене повітря для підйому струмоприймачів і включення швидкодіючого вимикача під час запуску електровоза;

- два мотор-вентилятори з електродвигунами постійного струму 2А-2839/4 напругою 1500 В для охолодження тягових двигунів;

- мотор-вентилятор калориферів кабіни машиніста з електродвигунами постійного струму напругою 50 В;

- два генератори живлення кіл керування 1-3А-1731/4, що виробляють постійний струм напругою 50 В для кіл керування, освітлення й сигналізації, а також для зарядки акумуляторної батареї;

						Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

– два аксіальні вентилятори для охолодження пуск гальмівних реостатів з двигунами 2AV-2732, які отримують живлення від секцій гальмових резисторів.

Відповідно до завдання необхідно виконати заміну існуючого приводу вентиляторів та компресорів, які отримують живлення від мережі 3 кВ на асинхронні двигуни промислового ряду. Тому далі не розглядаємо допоміжний мотор-компресор та мотор-вентилятори калориферів, аксіальні вентилятори охолодження реостатів.

На електровозах ЧС7 установлене по два поршневі двоступінчасті трициліндрові компресори типу K2, які приводяться в рух електродвигуном 13A-3432/4. Компресор і електродвигуни встановлені на спільній фундаментній плиті.

Вал компресора за допомогою зубчастої передачі з'єднано з валом електродвигуна. Зубчастий привод має передаточне число 1:2,13 (66:31 зубів). При частоті обертання валу 720 об/хв компресор подає 2,5–2,7 м³/хв повітря, стислого до тиску 9 кгс/см² (при надходженні в компресор повітря температурою +20°C). Хід поршня становить 120 мм, середня швидкість його переміщення 2,88 м/с. Об'єм мастила в картері рівний 4,5 л. Тиск мастила в працюючому компресорі складає 3-5 кгс/см², вага компресора 360 кг, висота 911 мм, довжина 1043 мм і ширина 652 мм.

Електродвигун 13A-3432/4 розраховано на номінальну напругу 3000 В, у його коло постійно включений резистор опором 19,5 Ом, електродвигун розвиває тривалу потужність 17 кВт при струмі 7,15 А; частота обертання якоря 1350 об/хв. Під час випробування ізоляції на обмотки подають напругу 8750 В протягом 1 хв. Двигун випробовують при максимальній частоті обертання якоря 2600 об/хв. Разом з фундаментною плитою електродвигун важить 930 кг.

Відцентрові вентилятори приводяться в обертання електродвигунами високої напруги з послідовним збудженням. На електровозах 83Е (ЧС7) установлені двоступінчасті вентилятори. Відцентровий вентилятор складається з кожуха, що має форму спіралі і колеса з лопатками в ньому, що приводиться в рух електродвигуном 2A-2839/4.

Двигуни вентиляторів розраховані на напругу 1500 В і тому вентилятори кожної секції електровоза постійно з'єднані послідовно. Між собою вентилятори секцій можуть з'єднуватися послідовно (режим низької швидкості) і паралельно (режим високої швидкості) за допомогою

						Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

розташованих у кожній з секцій перемикачів вентиляторів з пневматичним приводом. В колі вентиляторів є додаткові резистори. При включенні введений резистор опором 160 Ом, це забезпечує плавний розгін двигунів. Через 3 секунди спрацьовує реле часу і значна частина опору виводиться, в колі залишається лише 25 Ом. Включається та чи інша швидкість перемикачем на пульті машиніста.

Електродвигун 2А-2839/4 розраховано на номінальну напругу 1500 В. При тривалому режимі електродвигун розвиває потужність 22 кВт. Вага електродвигуна рівна 800 кг, якоря – 260 кг.

Для перемикання електродвигунів вентиляторів з великої на малу частоту обертання й назад служить перемикач мотор-вентиляторів.

На електровозі встановлено два генератори струму керування 13А-1731/4, укріплені на електродвигунах вентиляторів. Двигуни обертають якоря генераторів за допомогою клинових ременів. При частоті обертання якоря генератора 2600 об/хв, напрузі на його затисках 60 В и струмі 83,5 А генератор розбудовує номінальну потужність 5 кВт.

Схема живлення силових кіл електровоза ЧС7 представлена на рисунку 1.2.

Допоміжні машини та печі опалення отримують електричну енергію через швидкодіючий вимикач, котушку диференційного реле 2011. Від останнього струм проходить по чотирьох паралельних колах:

- 1) запобіжник 2021, контактор 2031, секції А1-А1 та А2-А3 резистора 2051, електродвигун компресора 2271, теплове реле 2081;
- 2) запобіжник 2091, контактор 2111, секції А-С та С-В резистора 2131, електродвигун компресора 2141, електродвигун компресора 2151, теплове реле 2171, перемикач швидкості обертання вентиляторів 2101;
- 3) запобіжник 2191, контактори 2201 та 2211, печі нагрівання 2221;
- 4) запобіжник 2161, перемикач швидкості обертання вентиляторів 2101, між секційне з'єднання 7, вентилятори другої секції електровоза, між секційне з'єднання 8.

Далі є загальне для всіх допоміжних кіл та опалення коло: диференційне реле 2011, обмотка лічильника, пристрій відводу струму, рейки.

						Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

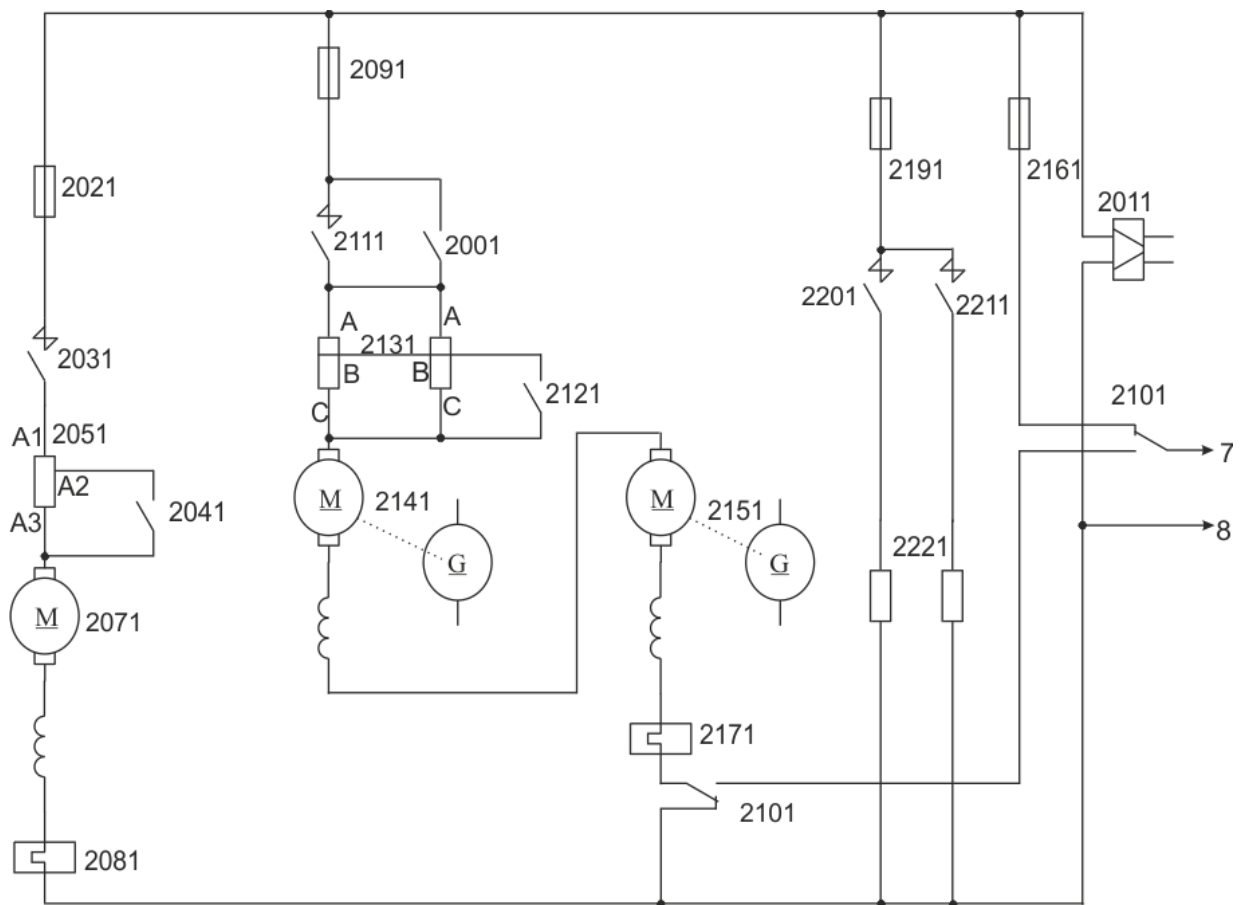


Рисунок 1.2 – Силове коло допоміжних машин електровоза ЧС7.

Після пуску мотор-компресора через 2 с спрацьовує контактор 2041, який шунтує частину пускового резистора 2051 між затисками А2 та А3.

Робота мотор-вентиляторів можлива в двох режимах: при послідовному з'єднанні всіх 4-х вентиляторів двох секцій електровоза – низька частота обертання; при послідовно-паралельному з'єднанні, коли два приводи вентиляторів в своїй секції ввімкнене послідовно, а секції отримають живлення паралельно через кола диференційного реле 2011.

1.5 Проектні дані до розрахунку перетворювача

З аналізу який проведено вище можна призначити основні властивості статичного перетворювача. По перше, в якості елементної бази на цей час можна застосувати біполярні транзистори з ізольованим затвором. На перевагу від тиристорів, така елементна база має більш високі робочі частоти, має більш прості та уніфіковані елементи систем керування. В даному випадку маються на увазі елементи, які відповідають за формування сигналу управління на силовому приладі.

Першим приводом до уніфікації приймаємо привід компресора К2, який є єдиним для електровозів ЧС2 та ЧС7, але приводиться до руху

різними електричними двигунами. Для приводу компресорів, в якості базового приймаємо привід на основі двигуна 6А-3432/4 з потужністю 21 кВт та частотою обертання 1700 об/хв..

Для приводу вентилятора приймаємо в якості розрахункового привід на основі електричного двигуна 3А-3432/4 з потужністю 28 кВт та частотою обертання 1650 об/хв..

Відносно необхідної потужності визначним є значення потужностей приводу компресора та вентилятора.

При виборі силових напівпровідникових приладів необхідно знати діапазон напруги перетворювача. Приймаємо живлення перетворювача від контактної мережі при напрузі 2400...4000 В відповідно до завдання на роботу. Струми навантаження будуть визначені під час розрахунків силовій частини перетворювача. Захисні пристрої кіл власних потреб залишаємо без змін, оскільки необхідна потужність для роботи компресора та вентиляції залишається не змінна.

						Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Задачі статичного перетворювача

При розробці статичного перетворювача слід враховувати деякі особливості розробки автономних інверторів, визначення струмів навантаження, вибору напівпровідникової елементної бази, особливості кіл електровозів ЧС2 та ЧС7, загальний світовий досвід в напрямку проектування та розробки перетворювачів власних потреб електровозів, електропоїздів, пасажирських вагонів.

На електрорухомому складі країн СНД у якості перетворювачів власних потреб у цей час в основному застосовуються малоефективні електромашинні перетворювачі, які мають наступні недоліки [7, 8]:

- наявність обертових елементів і колекторно-щіткового вузла, що обумовлює низьку надійність і високі витрати на проведення ремонту й обслуговування;
- низький загальний ККД електромеханічного перетворення енергії;
- складність забезпечення живлення від декількох значень напруг і родів струму контактної мережі;
- високі масо-габаритні показники, які не дозволяють продуктивно використовувати підвагоний простір;
- низький ККД (50–60 %) – для всієї системи передачі енергії від струмоприймача локомотива через тяговий привод і колісні пари до підвагонних генераторів;
- можливість заклинювання колісної пари при несправності в механічній передачі «колісна пара – підвагонний генератор»;
- зниження тяги поїзд через витрату енергії, переданій колісній парі на обертання підвагонного генератора;
- 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:

						Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

– 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 схемотехнічних рішень;

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

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

З огляду на останні переваги статичних перетворювачів виключаємо для електровозів ЧС2 та ЧС7 функцію живлення від двох родів струму, оскільки не передбачено в завданні живлення від мережі змінного струму.

Вимоги до статичного перетворювача:

– можливість використання існуючих монтажних з'єднань в електровозі без зміни маркірування провідників, їх розміщення та порядок включення органів керування;

– забезпечення необхідної потужності, для живлення приводу вентиляторів для подачі необхідного обсягу повітря охолодження тягових двигунів;

– забезпечення надійної гальванічної розв'язки між високою та низькою напругою;

– забезпечення готовності до роботи перетворювача до підняття струмоприймача.

Відповідно до завдання пропонується виконати заміну існуючого приводу з двигунами постійного струму послідовного збудження на систему у складі: однофазний автономний інвертор напруги – трансформатор – випрямляч – імпульсний стабілізатор

						Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

напруги – автономний трифазний інвертор напруги – асинхронний двигун.

Розглянемо доцільність використання автономних інверторів напруги для живлення асинхронних двигунів.

2.2 Аналіз способів регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

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

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

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

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

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

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

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

Відносна різниця частот обертання поля статора і ротора називається ковзанням:

						Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

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

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

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

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

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

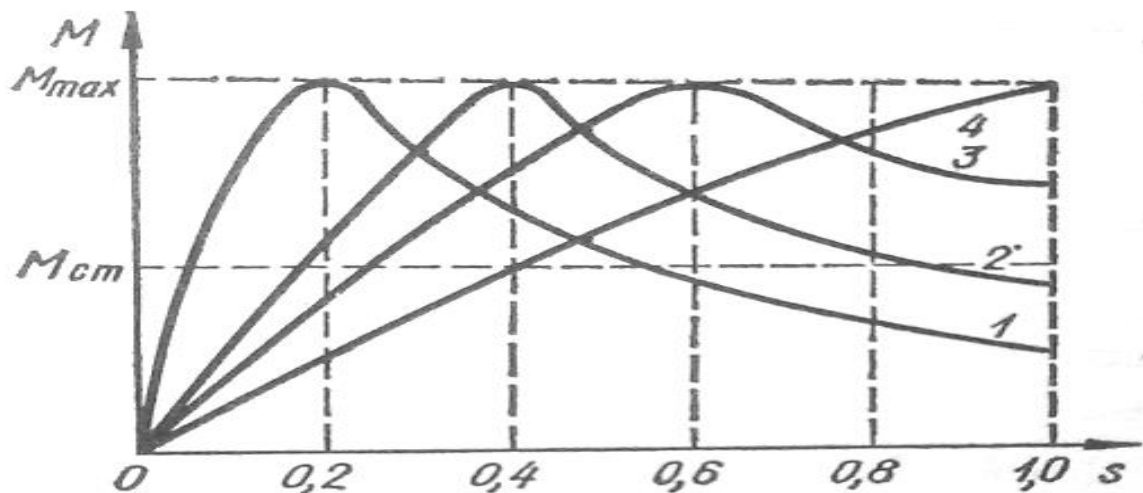


Рисунок 2.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних величинах опору кола ротора

Один з поширених способів регулювання швидкості, струму і моменту АД з фазним ротором пов'язаний із введенням і зміною додаткових резисторів у коло його ротора (зміни величини ковзання S). При збільшенні опору резистора збільшуються електричні втрати $p_{ем2}$ і, частота обертання n зменшується. При заданому статичному моменті $M_{ст}$ відбувається перехід з

характеристики 1 на характеристику 2, 3 і т.д. із збільшенням ковзання (рисунок 2.1). Цей спосіб дозволяє змінювати частоту обертання в широкому діапазоні.

Основні недоліки цього способу:

1. Електричні втрати в роторному колі $p_{\text{ем}2}$, які ще називаються втратами ковзання. Чим більше ковзання S , тим більше втрати в роторному ланцюзі, тому реалізація великого діапазону регулювання швидкості призводить до значних втрат енергії і зниження ККД електропривода.

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

3. Неможливо плавно регулювати частоту обертання.

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

В даному дипломному проєкті ми не можемо застосувати цей спосіб регулювання частоти, так як на електровозі ВЛ80^Т асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

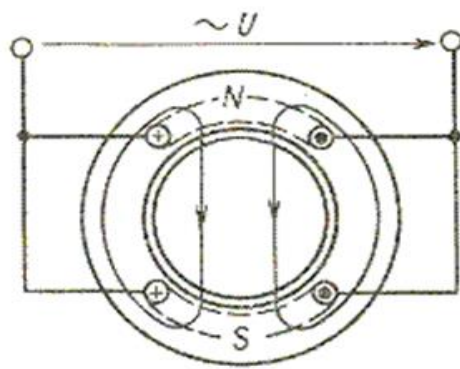
2.2.2 Регулювання частоти обертання АД зміною числа пар полюсів.

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

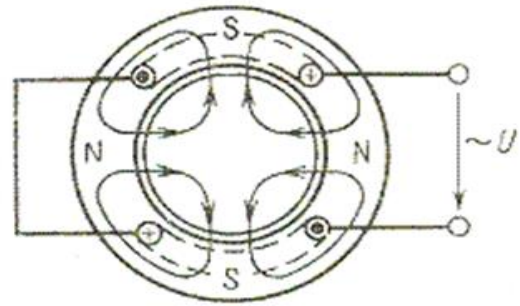
Іноді на статорі укладають дві обмотки, які переключаються, і тоді виходить чотиришвидкісна машина. Наприклад, двигун з двома перемикаючими обмотками на $p = 2$ і 4 , $p = 3$ і 6 при $f_1 = 50$ Гц має синхронну частоту обертання 1500/1000/750/500 об/хв. (рисунок 2.2).

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

						Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



а) $p = 1$; $n = 3000$ об/хв



б) $p = 2$; $n = 1500$ об/хв

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

При перемиканні числа пар полюсів змінюється і магнітний потік в зазорі, що призводить до зміни критичного моменту $M_{кр}$ (рисунок 2.3, б). Якщо при зміні числа пар полюсів одночасно змінювати і підведену напругу, то критичний момент може залишитися незмінним (рисунок 2.3, а). Тому при цьому способі регулювання можуть бути отримані два види сімейства механічних характеристик.

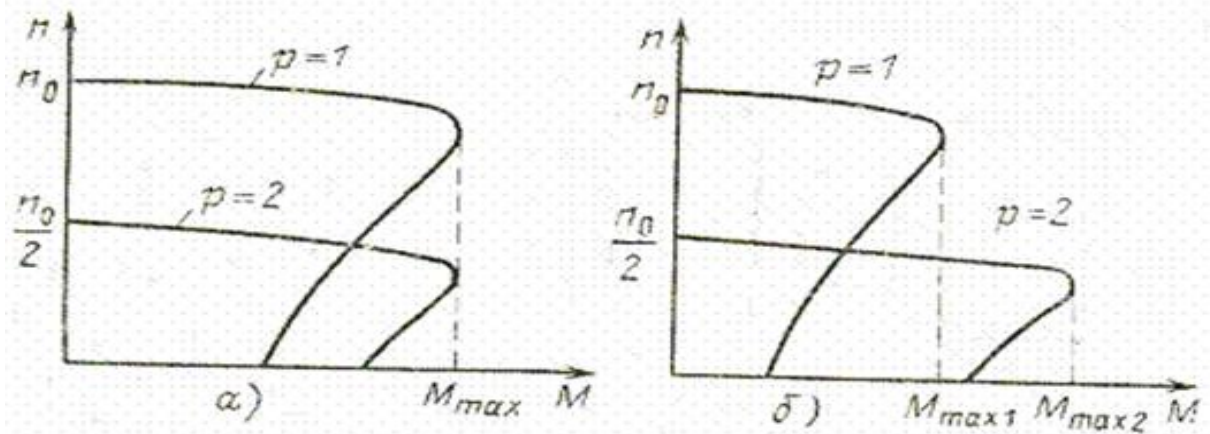


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні числа пар полюсів.

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

В даному випадку ми не можемо застосувати цей спосіб регулювання частоти, тому що на електровазі встановлені

асинхронні двигуни в яких не передбачена можливість переключання числа пар полюсів, а заміна цих двигунів на нові економічно не вигідно.

2.2.3 Частотне регулювання частоти обертання АД .

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

В якості таких джерел живлення в даний час почали знаходити застосування перетворювачі частоти (ПЧ), що виконуються на потужних напівпровідникових приладах - тиристорах. З рівняння трансформаторної електрорушійної сили $U_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot f \cdot \Phi$ випливає, що для збереження незмінним магнітного потоку, тобто для збереження перевантажувальної здатності двигуна, необхідно разом з частотою змінювати і діюче значення підведеної напруги. При виконанні співвідношення, критичний момент не змінюється і виходить сімейство механічних характеристик (рисунку 2.4).

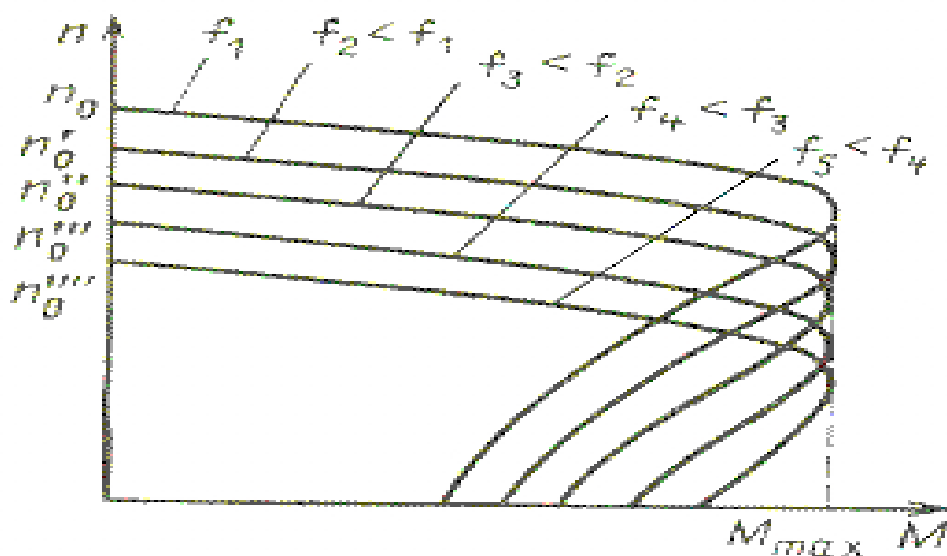


Рисунок 2.4 – Приведені механічні характеристики при частотному регулюванні.

Основний закон частотного регулювання виражений М. П. Костенко наступною формулою [9]:

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

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

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

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

2.3 Системи живлення асинхронних двигунів електрорухомого складу

Сучасний електрорухомий склад містить різні перетворювачі, побудовані на базі сучасних напівпровідникових приладів. Удосконалюються схеми силових, а також допоміжних кіл електрорухомого складу, в трьох напрямках: створення економічних, надійніших і зручніших в експлуатації перетворювачів [10].

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

а) безпосередньо від контактної мережі (сучасний рухомий склад постійного струму);

б) від перетворювача фаз, що обертається (сучасний рухомий склад змінного струму);

в) від безпосереднього перетворювача частоти (на електровозах змінного струму з асинхронними допоміжними машинами);

г) від трифазного автономного інвертора (асинхронні машини на електровозах постійного струму);

д) від перетворювача «автономний однофазний інвертор трансформатор - керовані випрямлячі» (на електровозах постійного струму).

Можливі інші схеми живлення допоміжних машин, не перераховані вище.

Перетворювачі в силових колах електровозів і електропоїздів використовують для наступних цілей: випрямлення змінного струму (випрямлячі), перетворення постійного струму в змінні (інвертори), імпульсного регулювання напруги (імпульсні перетворювачі), перетворення однофазного змінного струму в трифазний і зміни частоти напруги джерела живлення (перетворювачі ПЧФ). Всі ці перетворювачі виконані на напівпровідникових приладах (діодах і тиристорах). За типом використання напівпровідникових приладів перетворювачі підрозділяють на основі діодів, діод - тиристорні і тиристорні, за системою охолодження діодів і тиристорів з примусовим і природним охолодженням.

Для електрорухомого складу змінного струму система живлення асинхронних двигунів виконується зазвичай з проміжною ланкою випрямленого струму [7, 10].

Можливі системи живлення асинхронних двигунів на електрорухомому складі змінного струму приведені на рисунку 2.5.

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

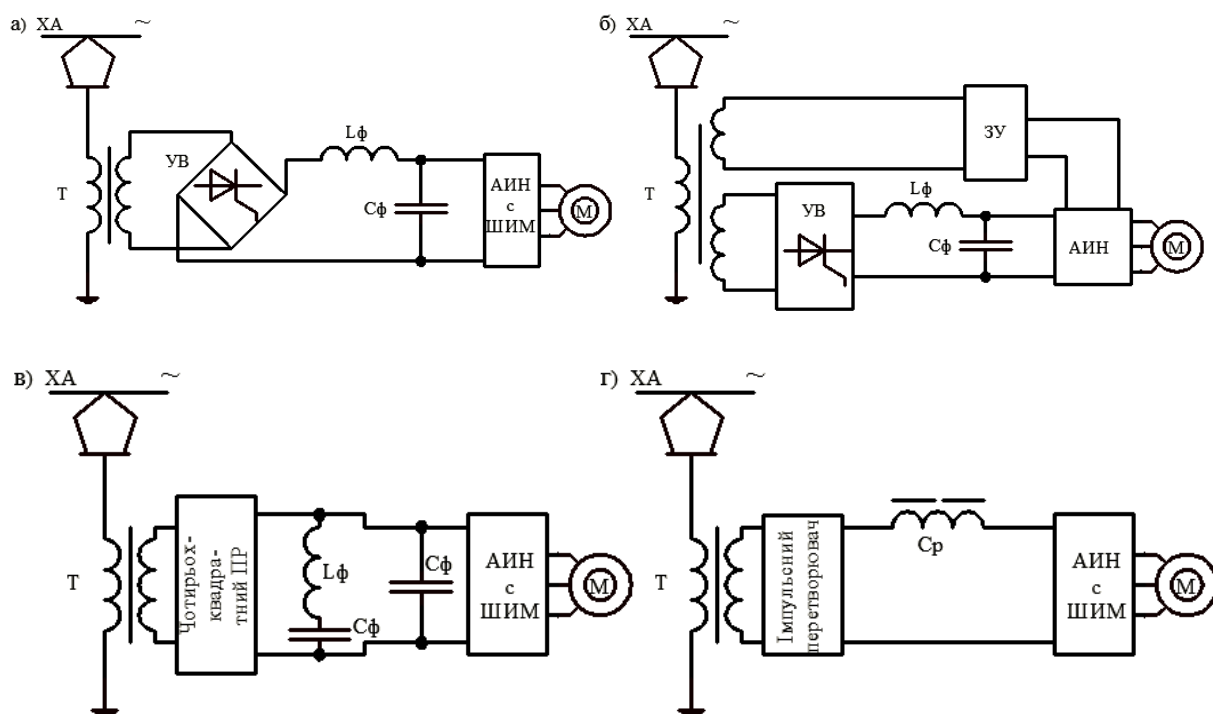
Якщо не передбачене рекуперативне гальмування, в системі, яка зображена на рисунку 2.5а, можна застосувати некерований випрямляч.

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

Автономні інвертори струму характеризуються своєю відносною простотою (він має всього 6 тиристорних плечей) і відсутністю допоміжних комутуючих тиристорів. В колі АІТ не потрібен фільтровий конденсатор і на вході АІТ достатньо ввімкнути згладжувальний конденсатор C_p . Так перевагою АІТ є

						Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

можливість використання тиристорів з відносно великим часом включення, як мають більш високий клас по напрузі.



Керований випрямляч (КВ), фільтр (L_ϕ , C_ϕ), автономний інвертор напруги (АИН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ), асинхронний двигун (АД) (а); керований випрямляч (КВ), фільтр (L_ϕ , C_ϕ), автономний інвертор напруги (АИН), асинхронний двигун (АД) (б); чотирьохквадратний перетворювач, фільтр (L_ϕ , C_ϕ), автономний інвертор напруги (АИН), асинхронний двигун (АД) (г); імпульсний випрямляч, згладжувальний випрямляч (C_p), автономний інвертор струму (АІТ), асинхронний двигун (АД).

Рисунок 2.5 - Можливі системи живлення асинхронних двигунів

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

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

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

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

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

Враховуючи сказане, а також специфіку електроприводу (важкі пуски, широкий діапазон зміни частоти і так далі), на електрорухомому складі в основному застосовані автономні інвертори напруги.

2.4 Розробка функціональної схеми

Функціональна схема – документ, що роз'ясняє процеси, які протікають в окремих функціональних ланках виробу (установки) або виробу (установки) у цілому. Функціональна схема є поясненням окремих видів процесів, що протікають у цілісних функціональних блоках і ланках пристрою.

Функціональна схема – вид графічної моделі виробу. Їхнє використання й побудова дозволяє наочно відобразити пристрій функціональних змін. Оскільки функціональні схеми не мають власної системи умовних позначок, їх побудова допускає комбінацію кінематичних, електричних і алгоритмічних позначень.

Функціональна схема статичного перетворювача представлена на рисунку 2.6.

						Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Джерелом живлення статичного перетворювача є контактна мережа. На вході силових приборів, які працюють в імпульсному режимі, як правило, встановлюється вхідний фільтр [7, 10, 11].

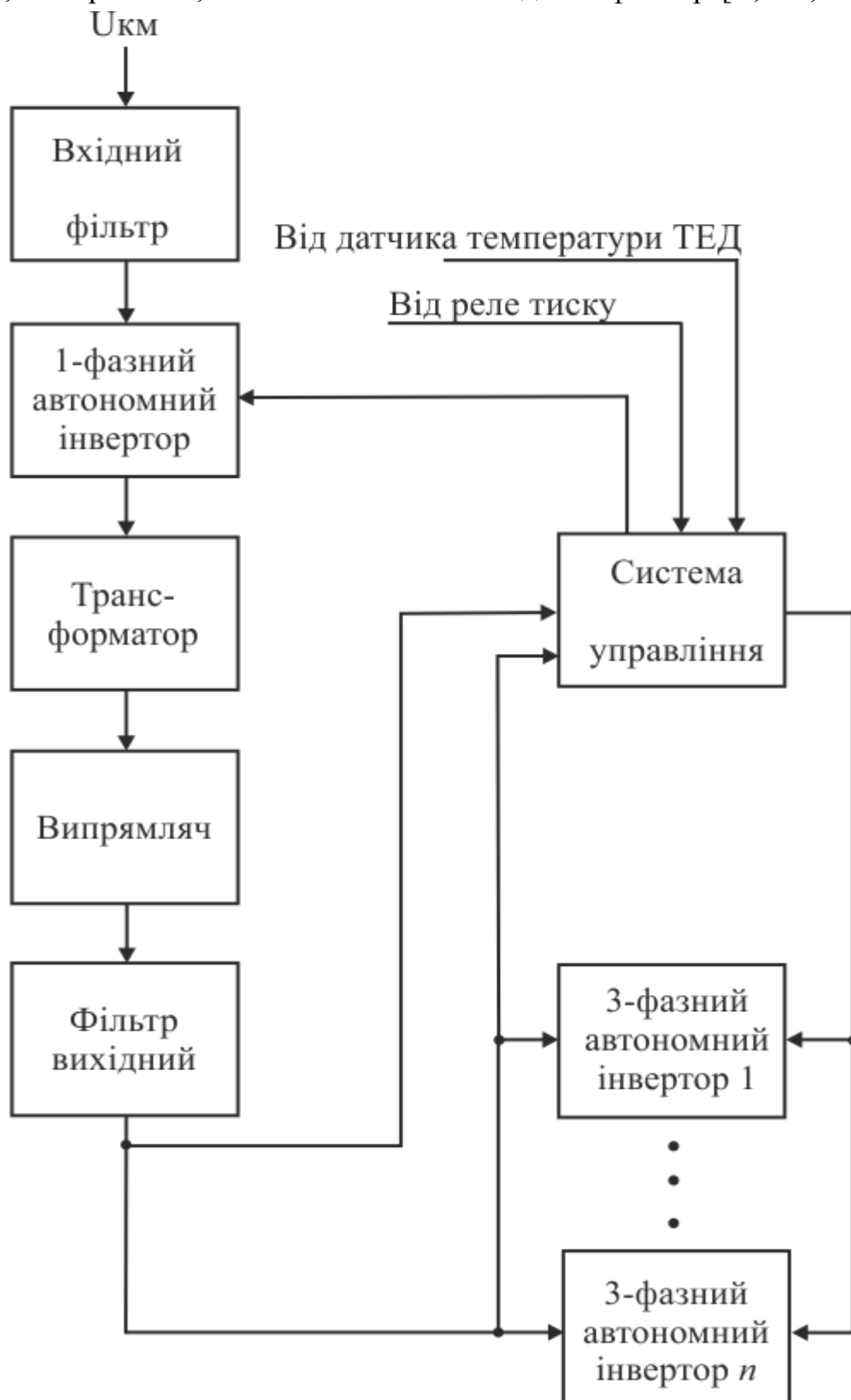


Рисунок 2.6 – Функціональна схема перетворювача

До виходу фільтру приєднано автономний однофазний інвертор напруги. До його задач входять: перетворення постійної напруги в змінну; гальванічний розв'язок високої напруги первинної мережі від напруги, необхідної для живлення автономних інверторів асинхронного приводу. Інвертор виконує стабілізацію напруги виходу, під час коливань напруги мережі живлення від 2,4 до 4,0 кВ. Стабілізація відбувається шляхом зміни коефіцієнта заповнення кожного плеча схеми.

Наступним блоком схеми є трансформатор. До функцій трансформатора входить передача енергії від автономного інвертора до каналів живлення кіл асинхронних двигунів компресорів та вентиляторів.

Випрямляч виконує типову функцію перетворення змінної напруги прямокутної форми в постійну. До виходу випрямляча приєднано фільтр, що згладжує. Традиційно використовується для зменшення пульсацій струму та напруги. Крім того, в даному випадку, використання фільтру необхідне для виключення комутаційних перенапружень при роботі імпульсного ключа, який приєднано послідовно.

Навантаженням послідовного каскаду є 4 автономні трифазні інвертори напруги для живлення асинхронних двигунів, які є приводом одного або двох компресорів та двох вентиляторів електровоза.

Система управління подає імпульси керування на автономні інвертори. Отримує сигнал зворотного зв'язку з виходу фільтру та сигнали від реле тиску. Додатково передбачено подача інформаційних сигналів від датчика температури двигуна, що символізує собою необхідність зміни швидкості вентиляторів.

						Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1 Частотне регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

Частотний перетворювач у комплекті з асинхронним електродвигуном дозволяє замінити електропривод постійного струму. Системи регулювання швидкості двигуна постійного струму досить прості, але слабким місцем такого електропривода є електродвигун. Він дорогий і ненадійний. При роботі відбувається іскріння щіток, під впливом електроерозії зношується колектор. Такий електродвигун не може використовуватись в запиленому й вибухонебезпечному середовищі.

Керування асинхронним електродвигуном у частотному режимі донедавна було великою проблемою, хоча теорія частотного регулювання була розроблена ще в тридцятих роках. Розвиток частотне-регульованого електропривода стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Поява силових схем з IGBT-транзисторами, розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем керування дозволило різним фірмам Європи, США і Японії створити сучасні перетворювачі частоти доступної вартості.

Відомо, що регулювання частоти обертання виконавчих механізмів можна здійснювати за допомогою різних пристроїв: механічних варіаторів, гідравлічних муфт, що вводять додатково в статор або ротор резисторами, електромеханічними перетворювачами частоти, статичними перетворювачами частоти.

Застосування перших чотирьох пристроїв не забезпечує високої якості регулювання швидкості, не економічно, вимагає більших витрат при монтажі й експлуатації.

Статичні перетворювачі частоти є найбільш удосконаленими пристроями керування асинхронним приводом у наш час.

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому що, змінюючи частоту f_1 живлячої напруги, можна відповідно до формули незмінному числу пар полюсів p змінювати кутову швидкість магнітного поля статора:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}. \quad (3.1)$$

Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики мають високу жорсткість.

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

Регулювання швидкості при цьому не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні невеликі.

Основний закон частотного регулювання виражений М. П. Костенко наступною формулою [11]:

$$\frac{U_1}{U_{ном}} = \frac{f_1}{f_{ном}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_{ном}}} \quad (3.2)$$

де $U_{ном}$, $f_{ном}$, $M_{ном}$ – номінальні діюче значення напруги, частоти та моменту асинхронного двигуна;

U_1 , f_1 , M_1 – поточні значення напруги, частоти і обертового моменту.

Для одержання високих енергетичних показників асинхронного двигуна – коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності – необхідно одночасно із частотою змінювати і величину напруги.

Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження M_{on} . При постійному моменті навантаження $M_{on}=const$ напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно частоті:

$$\frac{U_1}{f_1} = const. \quad (3.3)$$

Для вентиляторного характеру моменту навантаження цей стан має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (3.4)$$

При моменті навантаження, обернено пропорційної швидкості:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const. \quad (3.5)$$

Таким чином, для плавного безступінчастого регулювання частоти обертання валу асинхронного електродвигуна, перетворювач частоти повинен забезпечувати одночасне регулювання частоти й напруги на статорі асинхронного двигуна.

Вказані вираження дозволяють виконати вибір асинхронних двигунів на заміну колекторних машин постійного струму та виконати деяку уніфікацію за показником єдиної потужності для декількох різноманітних приводів.

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

3.2 Вибір асинхронних двигунів допоміжних приводів

3.2.1 Вибір асинхронного двигуна приводу компресорів.

Виходячи з аналізу, що проведено у першому розділі роботи можна було бачити, що в якості компресора для електровозів ЧС2 та ЧС7, використовується єдиний тип – К2. Привідним двигуном використовується декілька машин. Тому слід визначити необхідні параметри за частотою обертання машини та потужністю. За частотою обертання будемо орієнтуватися на необхідну номінальну частоту обертання компресора 720 об/хв та передатне відношення редуктора 2,13. Тобто необхідний двигун з частотою обертання $720 \times 2,13 = 1533$ об/хв. За опорною потужністю приймаємо еквіваленту машину, керуючись наступними міркуваннями. Є два двигуни, які постачають обертовий момент компресору, при чому один двигун при частоті обертання 1350 об/хв розвиває потужність 17 кВт, а другий 21 кВт, 1700 об/хв. Виходячи з цього, приймаємо, що необхідна потужність знаходиться на прямій лінії, та при частоті 1533 об/хв буде необхідним двигун потужністю 17,5 кВт.

З цифри необхідної частоти обертання приводу можна бачити, що ні жоден з більшості промислових двигунів не може мати такої частоти обертання, тому що синхронні частоти мають найближчі значення 1500 або 3000 об/хв, а з врахуванням ковзання трохи нижче. Тому виконуємо вибір двох двигунів з вказаними синхронними частотами обертання та виконуємо перерахунок механічних характеристик двигунів. Перший двигун з синхронною частотою обертання 1500 об/хв будемо використовувати в режимі форсованої частоти живлення (більш 50 Гц), а другий зі зниженою частотою.

Достатній номінальний момент для приводу компресора [9]

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H}, \quad (3.6)$$

де P_H – номінальна потужність електричного двигуна, Вт;

n_H – номінальні оберти валу двигуна, об/хв..

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{17500}{1533} = 109 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вибираємо асинхронні двигуни типу АИР160М2 та АИР160М4. Двигуни відносяться до двигунів асинхронних трифазних з короткозамкненим ротором. Використовується в різних галузях

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

промисловості та сільському господарстві для приводу верстатів, насосів, компресорів, вентиляторів, млинів, транспортних механізмів й т. і., роблять від мережі змінного струму напругою 380, 660 В частотою 50 Гц.

Технічні параметри двигуна АИР160М2:

струм..... змінний;
 потужність, кВт 18,5;
 напруга, В..... 380/660;
 частота, Гц 50;
 пар полюсів..... 1;
 частота обертів, об/хв. 2930;
 ККД, % 90;
 коефіцієнт потужності..... 0,88;
 відношення пускового струму до номінального 7,5;
 відношення пускового моменту до номінального..... 2,0;
 відношення максимального моменту до номінального 2,3;
 вага, кг 130.

Технічні параметри двигуна АИР160М4:

струм..... змінний;
 потужність, кВт 18,5;
 напруга, В..... 380/660;
 частота, Гц 50;
 пар полюсів..... 2;
 частота обертів, об/хв. 1460;
 ККД, % 90;
 коефіцієнт потужності..... 0,86;
 відношення пускового струму до номінального 7,0;
 відношення пускового моменту до номінального..... 2,2;
 відношення максимального моменту до номінального 2,3;
 вага, кг 142.

3.2.2 Вибір асинхронного двигуна приводу вентиляторів

Привід вентилятора електровоза ЧС2 з двигуном 3А-3432/4 розвиває потужність 28 кВт при частоті обертання валу 1650 об/хв. Привід вентилятора електровоза ЧС7 з двигуном 2А-2839/4 розвиває потужність 22 кВт при частоті обертання валу 1800 об/хв. Вказана частоти обертів значно віддалені від типових значень частот обертання асинхронних двигунів від мережі частотою 50 Гц (синхронні частоти при живленні 3000, 1500, 1000

об/хв. і т. д.). Тому приймаємо для вибору синхронну частоту 3000 об/хв з подальшим зниженням частоти живлення асинхронних двигунів від автономного інвертора напруги залежно від електровоза. А двигун вибираємо єдиний.

Для приводу вентилятора вибираємо асинхронний двигун типу АИР180М2 [12]. Вибраний двигун відноситься до двигунів асинхронних трифазних з короткозамкненим ротором. Використовується в різних галузях промисловості та сільському господарстві для приводу верстатів, насосів, компресорів, вентиляторів, млинів, транспортних механізмів й т. і., роблять від мережі змінного струму напругою 220, 380, 660 В частотою 50 Гц. Має наступні технічні параметри:

струм..... змінний;
 потужність, кВт 30;
 напруга, В..... 380/660;
 частота, Гц 50;
 пар полюсів 1;
 частота обертів, об/хв. 2940;
 ККД, % 90,7;
 коефіцієнт потужності 0,9;
 відношення пускового струму до номінального 7,3;
 відношення пускового моменту до номінального 2,1;
 відношення максимального моменту до номінального 2,5;
 вага, кг 170.

Необхідний момент обертання для вентилятора електровоза ЧС2 з двигуном типу 2А-3432/4

$$M_{OP} = 9,55 \cdot \frac{24000}{1500} = 152,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Необхідний момент обертання для вентилятора електровоза ЧС2 з двигуном типу 3А-3432/4

$$M_{OP} = 9,55 \cdot \frac{28000}{1650} = 162 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Необхідний момент обертання для вентилятора електровоза ЧС7

$$M_{OP} = 9,55 \cdot \frac{22000}{1800} = 116,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Розрахуємо необхідну потужність двигуна для різних законів регулювання на прикладі вентилятора, що приводиться до руху двигуном ЗА-3432/4.

Необхідна частота роботи інвертора для отримання частоти обертання вентилятора $n_1=1800$ об/хв

$$f_1 = \frac{n_1}{n_{ном}} \cdot f_{ном}, \quad (3.7)$$

$$f_1 = \frac{1800}{2940} \cdot 50 = 28 \text{ Гц}$$

Необхідна напруга за законом постійного моменту опору

$$U_1 = U_{ном} \cdot \frac{f_1}{f_{ном}}, \quad (3.8)$$

$$U_1 = 380 \cdot \frac{28}{50} = 213 \text{ В}$$

Необхідна напруга за законом вентиляторного моменту опору

$$U_1 = U_{ном} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{ном}} \right)^2, \quad (3.9)$$

$$U_1 = 380 \cdot \left(\frac{28}{50} \right)^2 = 119 \text{ В.}$$

Необхідна напруга за законом гіперболічного моменту опору

$$U_1 = U_{ном} \cdot \sqrt{\frac{f_1}{f_{ном}}}, \quad (3.10)$$

$$U_1 = 380 \cdot \sqrt{\frac{28}{50}} = 284 \text{ В.}$$

Необхідний номінальний момент асинхронного двигуна для виконання регулювання приводу

$$M_{ном} = M_{ОП} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{ном}} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_1} \right)^2, \quad (3.11)$$

$$M_{ном} = 162 \cdot \left(\frac{28}{50} \right)^2 \cdot \left(\frac{380}{119} \right)^2 = 518 \text{ Н·м.}$$

Потужність асинхронного двигуна з номінальними параметрами мережі

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

$$P_{ном} = 518 \cdot \frac{2940}{9550} = 159,4 > 160 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунків для інших законів регулювання та вентиляторів зводимо до таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Вибір параметрів регулювання асинхронний приводів вентиляторів електровозів ЧС2 та ЧС7

Показник		Закон регулювання		
		U_1/f_1	U_1/f_1^2	$U_1/\sqrt{f_1}$
f_1 , Гц	ЧС2 з 2А-3432/4	25,4		
	ЧС2 з 3А-3432/4	28		
	ЧС7 з 2А-2839/4	31		
U_1 , В	ЧС2 з 2А-3432/4	193	98	271
	ЧС2 з 3А-3432/4	213	119	284
	ЧС7 з 2А-2839/4	233	143	297
$P_{дв}$, кВт	ЧС2 з 2А-3432/4	>47	>95	>22
	ЧС2 з 3А-3432/4	>50	>160	>28
	ЧС7 з 2А-2839/4	>36	>183	>24

З аналізу таблиці можна бачити, що виконання регулювання за залежністю вентиляторного опору вимагає вибору в якості єдиного двигуна потужністю більш 183 кВт. Такий двигун більш двигунів, що використовуються на електровозах і є не раціональною заміною за показниками маси та використання потужності, швидкості обертання у всьому діапазоні. Для вибраного двигуна, якщо вибирати двигун за найменшою потужністю, найбільш підходить закон зміни опору за гіперболою. Однак, слід зауважити, що двигун в такому випадку може мати частоту живлення не більш 28 Гц для електровозу ЧС2 та 31 Гц для ЧС7.

Остаточню про можливість використання вибраного двигуна можна міркувати після побудови механічних характеристик.

3.2.3 Розрахунок механічних характеристик асинхронних двигунів.

Для аналізу можливості використання вибраних асинхронних двигунів (АД) виконуємо розрахунок механічних характеристик за формулою

$$M = \frac{3 \cdot p \cdot (U_{\Phi ном} \cdot \gamma_U)^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega_0 f \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left((x_1 + x_2) \cdot \alpha_f \right)^2 \right]}, \quad (3.12)$$

де $\omega_0 f = \omega_0 \cdot \alpha_f$ – синхронна кутова частота для не номінальної частоти живлення АД;

ω_0 – синхронна кутова частота для номінальної частоти живлення АД;

$\alpha_f = f_v / f_{\text{ном}}$ – відносна частота;

f_v та $f_{\text{ном}}$ – вільна та номінальна частоти живлення;

r_1, r_2, x_1, x_2 – параметри Т-образної схеми заміщення АД;

$\gamma_U = \frac{U_{\Phi V}}{U_{\Phi \text{ном}}}$ – відносна напруга статора;

$U_{\Phi V}$ – фазна напруга, яка необхідна для забезпечення необхідного закону управління;

$U_{\Phi \text{ном}}$ – номінальна фазна напруга.

Визначаємо параметри схеми заміщення асинхронного двигуна на прикладі АИР180М2.

Струм намагнічування

$$I_0 = I_H \left(\sin \phi_H - \frac{S_H}{S_{\text{кр}}} \cos \phi_H \right), \quad (3.13)$$

де номінальне ковзання

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}; \quad (3.14)$$

$$S_H = \frac{3000 - 2940}{3000} = 0,02$$

критичне ковзання

$$S_{\text{кр}} = S_H \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right); \quad (3.15)$$

$$S_{\text{кр}} = 0,02 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,095$$

$$\sin \phi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \phi_H}. \quad (3.16)$$

$$\sin \phi_H = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,435$$

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

$$I_0 = 29,2 \left(0,435 - \frac{0,02}{0,095} \cdot 0,9 \right) = 7,25 \text{ A.}$$

Номінальний струм ротора

$$I'_{2H} = I_H \sqrt{1 + \left(\frac{I_0}{I_H} \right)^2 - 2 \left(\frac{I_0}{I_H} \right) \sin \phi_H}, \quad (3.17)$$

$$I'_{2H} = 29,2 \sqrt{1 + \left(\frac{7,25}{29,2} \right)^2 - 2 \left(\frac{7,25}{29,2} \right) \cdot 0,435} = 26,8 \text{ A.}$$

Синхронна кутова частота обертання поля статора

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}, \quad (3.18)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с.}$$

Номінальний та критичний моменти

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H}, \quad (3.19)$$

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{30000}{2940} = 97,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичний момент

$$M_{KH} = \lambda_M M_H, \quad (3.20)$$

$$M_{KH} = 2,5 \cdot 97,4 = 243,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Активний опір кола ротора

$$r'_2 = \frac{M_H \omega_0 s_H}{3 \left(I'_{2H} \right)^2}, \quad (3.21)$$

$$r'_2 = \frac{97,4 \cdot 314 \cdot 0,02}{3 \cdot (26,8)^2} = 0,282 \text{ Ом.}$$

Повний опір короткого замкнення

$$Z'_{K3H} = \frac{U_\phi}{I_H \left(k_i - \frac{I_0}{I_H} \right)}, \quad (3.22)$$

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

$$Z'_{K3H} = \frac{380}{26,8 \left(7,3 - \frac{7,25}{26,8} \right)} = 1,84.$$

Коефіцієнт потужності під час пуску

$$\cos \phi_{\Pi} = \cos \phi_H \left[\frac{k_{\Pi}}{k_m} \cdot \frac{\eta_H}{1 - S_H} + k_i g (1 - \eta_H) \right], \quad (3.23)$$

$$g = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_H} \approx 0,33; \quad (3.24)$$

де k_{Π}, k_m, k_i – кратності пускового та максимального моментів, пускового струму.

$$\cos \phi_{\Pi} = 0,9 \left[\frac{2,1}{2,5} \cdot \frac{0,9}{1 - 0,02} + 7,3 \cdot 0,33 (1 - 0,9) \right] = 0,901.$$

Коефіцієнт первинного розсіювання

$$\delta_1 = 1 + \frac{I_0}{2I_{\Pi}}, \quad (3.25)$$

$$\delta_1 = 1 + \frac{7,25}{2 \cdot 213,45} = 1,0169.$$

Пусковий струм ротора

$$I'_{2\Pi} = I_H \left(k_i - \frac{I_0}{I_H} \right) \text{ А.} \quad (3.26)$$

$$I'_{2\Pi} = 26,88 \left(7,3 - \frac{7,25}{26,88} \right) = 188,99 \text{ А.}$$

Активний опір ротора під час пуску

$$r'_{2\Pi} = \frac{k_{\Pi} M_H \omega_0}{3 \left(I'_{2\Pi} \right)^2}, \quad (3.27)$$

$$r'_{2\Pi} = \frac{2,1 \cdot 97,44 \cdot 314}{3 \cdot (188,99)^2} = 0,599 \text{ Ом.}$$

Активний опір статора

$$r_1 = Z'_{K3H} \cdot \cos \phi_{\Pi} - \delta_1 r'_{2\Pi}, \quad (3.28)$$

$$r_1 = 1,842 \cdot 0,901 - 1,0169 \cdot 0,599 = 1,0511 \text{ Ом}$$

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

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри вибраних двигунів приводу компресора

№	Розрахунковий параметр	Двигун	
		АИР160М2	АИР160М4
1	$S_{\text{ном}}$	0,023	0,026
2	$S_{\text{кр}}$	0,101	0,116
3	$\sin\varphi_{\text{ном}}$	0,4749	0,51
4	$I_{\text{ном}}, \text{А}$	18,44	18,87
5	$I_0, \text{А}$	5,04	5,916
6	$I'_{2H}, \text{А}$	16,64	16,64
7	$M_{\text{ном}}, \text{Нм}$	60,29	121
8	$M_{\text{кр}}, \text{Нм}$	138,68	278
9	$r'_2, \text{Ом}$	0,531	0,609
10	$Z'_{K3H}, \text{Ом}$	2,85	3,011
11	$\cos\varphi_{\text{пуск}}$	0,92	0,959
12	$I_{\text{пуск}}, \text{А}$	138	132
13	δ_1	1,018	1,022
14	$I'_{2П}, \text{А}$	119,8	110
15	$r'_{2П}, \text{Ом}$	0,879	1,138
16	$r_1, \text{Ом}$	1,736	1,725
17	$x_{\text{кн}}, \text{Ом}$	2,732	2,733
18	$x_1, \text{Ом}$	1,366	1,366
19	$x'_2, \text{Ом}$	1,366	1,366
20	$x_{\mu}, \text{Ом}$	75,3	64,22

Індуктивні опори двигуна

$$x_{\text{кн}} = \sqrt{\left(\frac{3U_{\phi}^2}{2M_{\text{кн}}\omega_0} - r_1 \right)^2} - r_1^2, \quad (3.29)$$

$$x_{\text{кн}} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 243,62 \cdot 314} - 1,0511 \right)^2} - 1,0511^2 = 1,436 \text{ Ом}$$

$$x_1 = x'_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{2} = 0,718 \text{ Ом}; \quad (3.30)$$

$$x_{\mu} = \frac{U_{1\phi H}}{I_0} = \frac{380}{7,25} = 52,39 \text{ Ом.} \quad (3.31)$$

3.2.4 Аналіз механічних характеристик приводів

Для аналізу можливості використання приводів компресорів було вибрано два двигуни: АИР160М2 та АИР160М4. При чому, двигун АИР160М2 має регулювання зі зниженою частотою до 26 Гц, щоб обертання валу компресора мало номінальну частоту обертів 1533 об/хв та номінальному моменті 109 Н·м. Механічну характеристику для двигуна АИР160М2 будемо за виразом

$$M = \frac{3 \cdot (380 \cdot \gamma_U)^2 \cdot 0,531 / S}{\omega_0 f \left[\left(1,736 + 0,531 / S \right)^2 + \left((1,366 + 1,366) \cdot \alpha_f \right)^2 \right]}.$$

Характеристику будемо для трьох типових законів регулювання при частоті джерела 26 Гц та відповідними фазними напругами, що розраховано за виразами (3.8) – (3.10): для пропорційного закону регулювання – 198 В, вентиляторного – 103 В, гіперболічного – 274 В. На рисунку 3.1 представлено механічні характеристики асинхронного двигуна для номінального режиму та розрахункових, які суміщено з механічною характеристикою компресора.

З аналізу механічних характеристик, які побудовано для різних режимів, можна побачити, що ні жодна з характеристик двигуна АИР160М2 для не номінальних режимів не задовольняє забезпеченню нормальної роботи компресора. Як проводився раніш аналіз для вибору двигуна вентилятора, то необхідна потужність двигуна для приводу компресора з номінальною синхронною частотою та пропорційним законом регулювання буде більш 36 кВт.

Механічну характеристику для двигуна АИР160М4 будемо за виразом

$$M = \frac{3 \cdot 2 \cdot (380 \cdot \gamma_U)^2 \cdot 0,609 / S}{\omega_0 f \left[\left(1,725 + 0,609 / S \right)^2 + \left((1,366 + 1,366) \cdot \alpha_f \right)^2 \right]}.$$

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

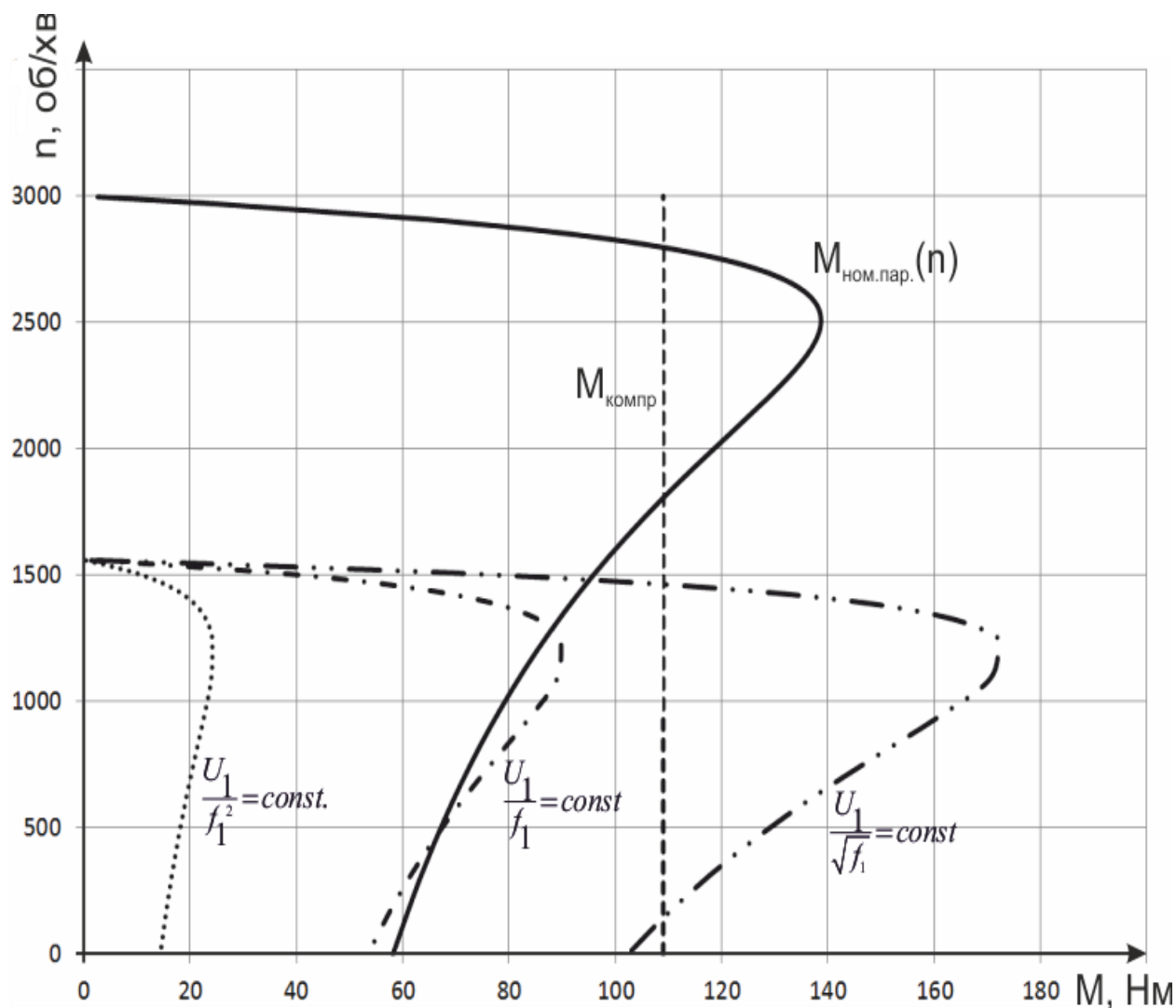


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна АІР160М2.

На рисунку 3.2 представлено механічні характеристики асинхронного двигуна для номінального режиму та режиму підвищеної частоти до 52,5 Гц при збереженні напруги 380 В, які суміщено з механічною характеристикою компресора.

Механічну характеристику для двигуна АІР180М2 будуємо за виразом

$$M = \frac{3 \cdot (380 \cdot \gamma_U)^2 \cdot 0,282 / S}{\omega_0 f \left[\left(1,0511 + 0,282 / S \right)^2 + \left((0,718 + 0,718) \cdot \alpha_f \right)^2 \right]}.$$

На рисунку 3.3 представлено механічні характеристики асинхронного двигуна АІР180М2 для номінальних параметрів та розрахункового (31 Гц та 297 В). Також представлено механічні характеристики вентиляторів

електровозів ЧС2 та ЧС7. Характеристика розрахункового режиму перетинає вентиляторні характеристики у зоні стійкості, що підтверджує попередні розрахунки.

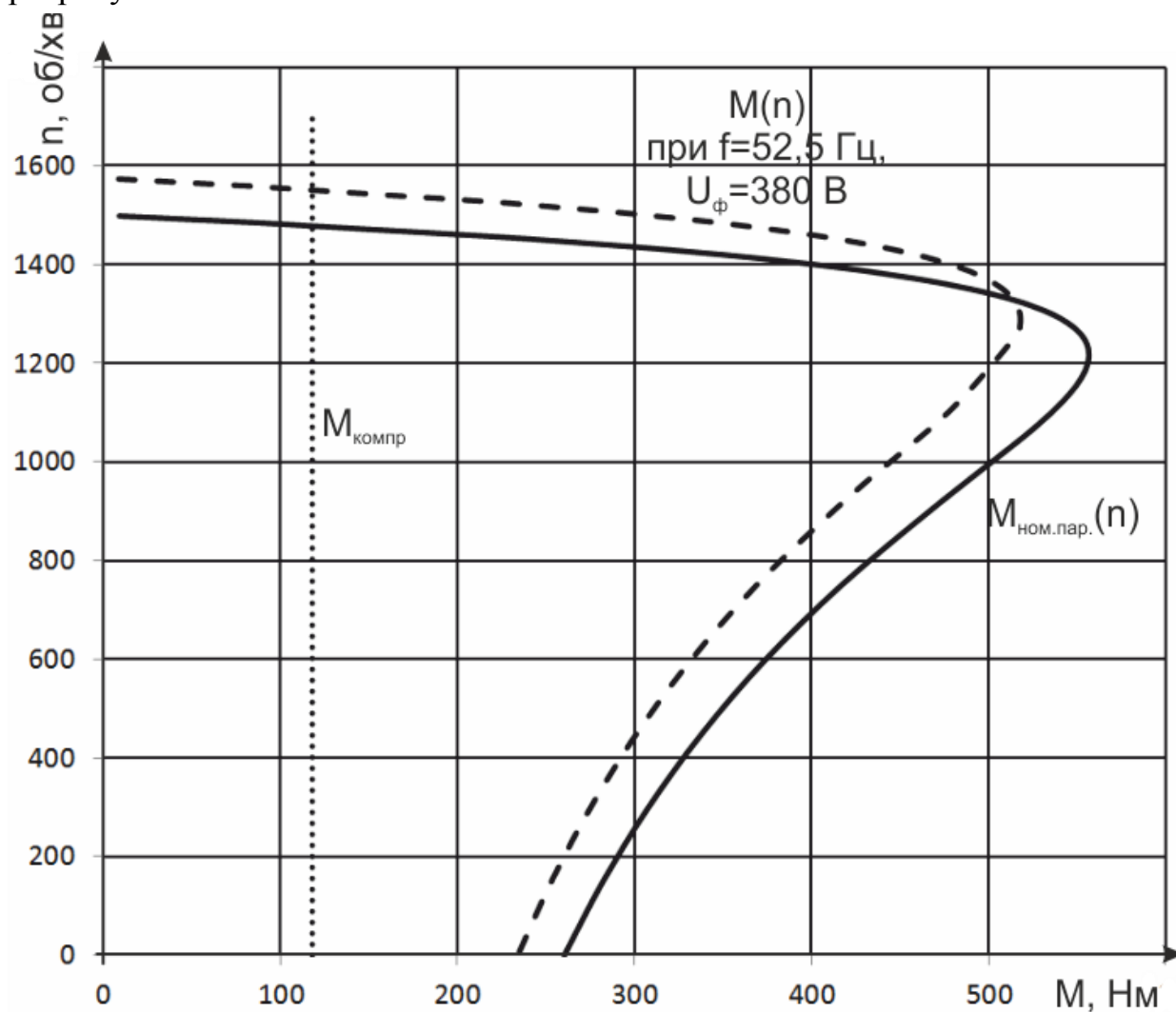


Рисунок 3.2 – Механічні характеристики асинхронного двигуна АИР160М4.

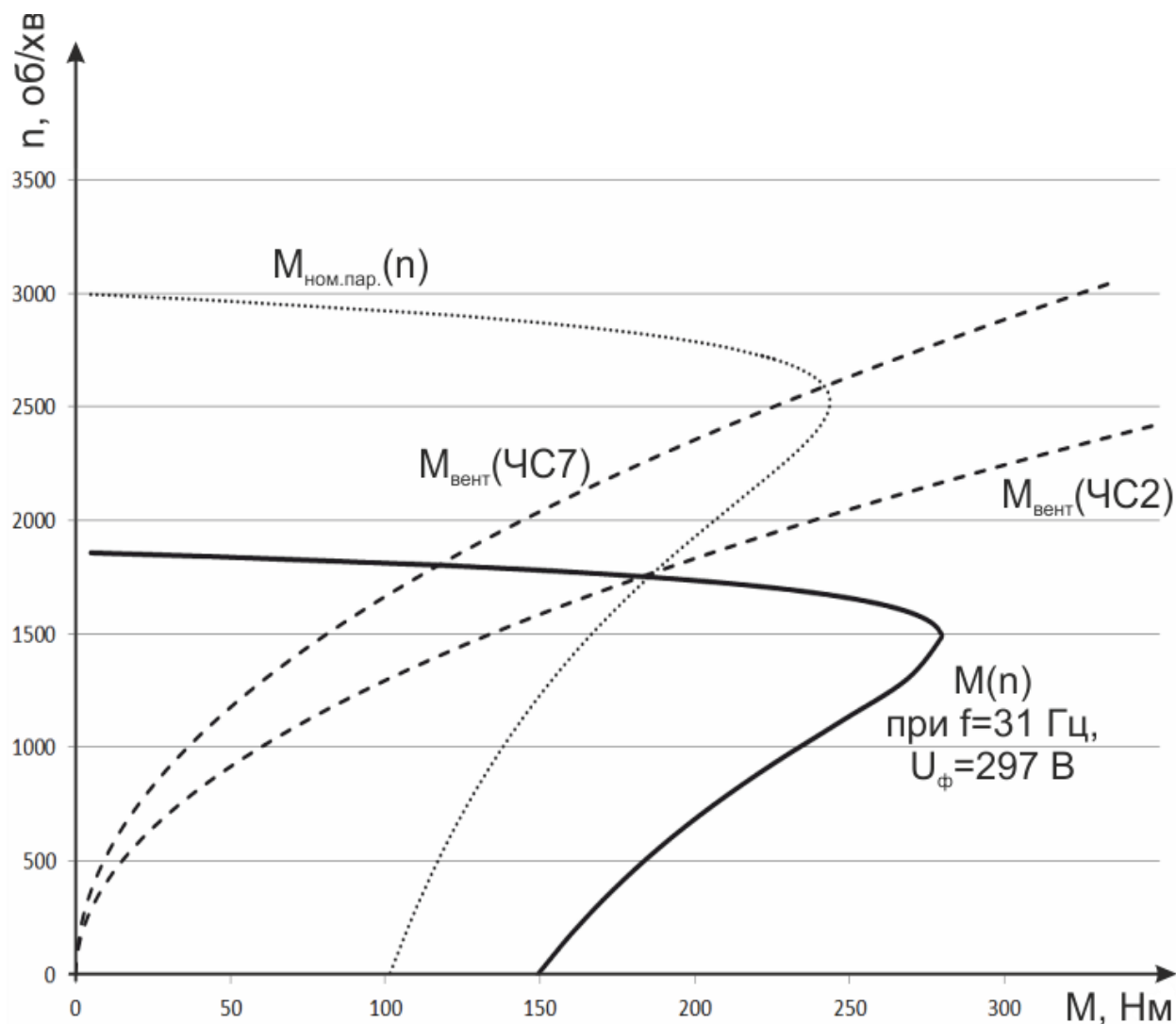


Рисунок 3.3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна АІР180М2.

3.3 Вибір схеми трифазного автономного інвертора

3.3.1 Структура частотного перетворювача

Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовано за схемою подвійного перетворення. Вони складаються з наступних основних частин: ланки постійного струму (некерованого випрямляча), силового імпульсного інвертора й системи керування.

Ланка постійного струму складається з некерованого випрямляча й фільтра. Змінна напруга живильної мережі перетворюється в ньому в напругу постійного струму.

Силовий трифазний імпульсний інвертор складається із шести транзисторних ключів. Кожна обмотка електродвигуна підключається через відповідний ключ до позитивного й негативного виходів випрямляча. Інвертор здійснює перетворення з випрямленої напруги в трифазну змінну

напругу потрібної частоти й амплітуди, що прикладається до обмоток статора електродвигуна.

У вихідних каскадах інвертора як ключі використовуються силові IGBT-транзистори. У порівнянні з тиристорами вони мають більше високу частоту перемикання, що дозволяє виробляти вихідний сигнал синусоїдальної форми з мінімальними переключеннями.

3.3.2 Принцип дії перетворювача частоти

Перетворювач частоти при живленні від мережі змінного струму складається з некерованого силового випрямляча, автономного інвертора, системи керування ШІМ, системи автоматичного регулювання, дроселя і конденсатора фільтра. Регулювання вихідної частоти $f_{\text{вих}}$ і напруги $U_{\text{вих}}$ здійснюється в інверторі за рахунок високочастотного широтне-імпульсного керування.

Широтне-імпульсне керування характеризується періодом модуляції, усередині якого обмотка статора електродвигуна підключається по черзі до позитивного й негативного полюсів випрямляча.

Тривалість цих станів усередині періоду ШІМ модулюється за синусоїдальним законом. При високих тактових частотах ШІМ, в обмотках електродвигуна, внаслідок їхніх фільтруючих властивостей, течуть синусоїдальні струми.

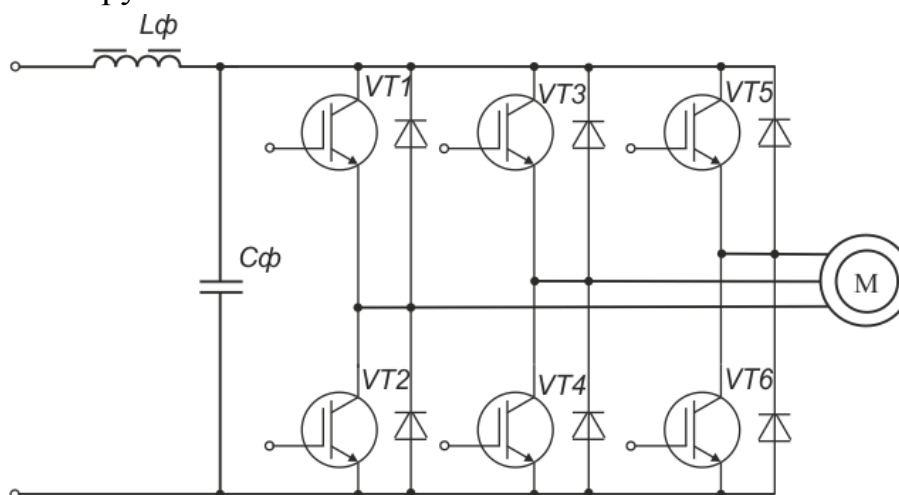


Рисунок 3.4 – Трифазний автономний інвертор напруги по мостовій схемі

Таким чином, форма кривої вихідної напруги являє собою високочастотну двох полярну послідовність прямокутних імпульсів. Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість (ширина) імпульсів протягом періоду вихідної частоти автономного інвертора напруги

модульована за синусоїдальним законом. Форма кривої вихідного струму (струму в обмотках асинхронного електродвигуна) практично синусоїдальна.

Регулювання вихідної напруги інвертора можна здійснити двома способами: амплітудним за рахунок зміни вхідної напруги і широтне-імпульсним регулюванням за рахунок зміни програми перемикання вентилів VT1-VT6 (рисунок 3.4) при умові, що напруга на виході випрямляча змінюється в малих межах.

Другий спосіб одержав поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, IGBT-транзистори). При широтне-імпульсній модуляції форма струмів в обмотках статора асинхронного двигуна виходить близької до синусоїдального завдяки фільтруючим властивостям самих обмоток.

Таке керування дозволяє одержати високий ККД перетворювача й еквівалентно аналоговому керуванню за допомогою частоти й амплітуди напруги.

Сучасні інвертори виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів - що замикають GTO - тиристорів, або біполярних IGBT-транзисторів з ізольованим затвором. На рисунку 3.4 представлена 3-х фазна мостова схема автономного інвертора напруги на IGBT-транзисторах.

Вона складається із вхідного ємнісного фільтра C_{ϕ} і шести IGBT-транзисторів VT1-VT6 включеними паралельно діодами зворотного струму.

За рахунок почергового перемикання вентилів VT1-VT6 по алгоритму, заданому системою керування, постійна вхідна напруга перетвориться в змінну прямокутне-імпульсну вихідну напругу. Через керовані ключі VT1-VT6 протікає активна складова струму асинхронного електродвигуна, через діоди – реактивна складова струму. Часова діаграма фазних напруг на виході перетворювача при амплітудноімпульсній модуляції зі робочим станом ключів 180 град. електричних показана на рисунку 3.5.

В будь-якому випадку, вихідними даними для вибору елементів схеми є прийнятий алгоритм керування силовими приладами, електричні параметри асинхронного двигуна та напруга мережі живлення, яка визначається останньою.

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

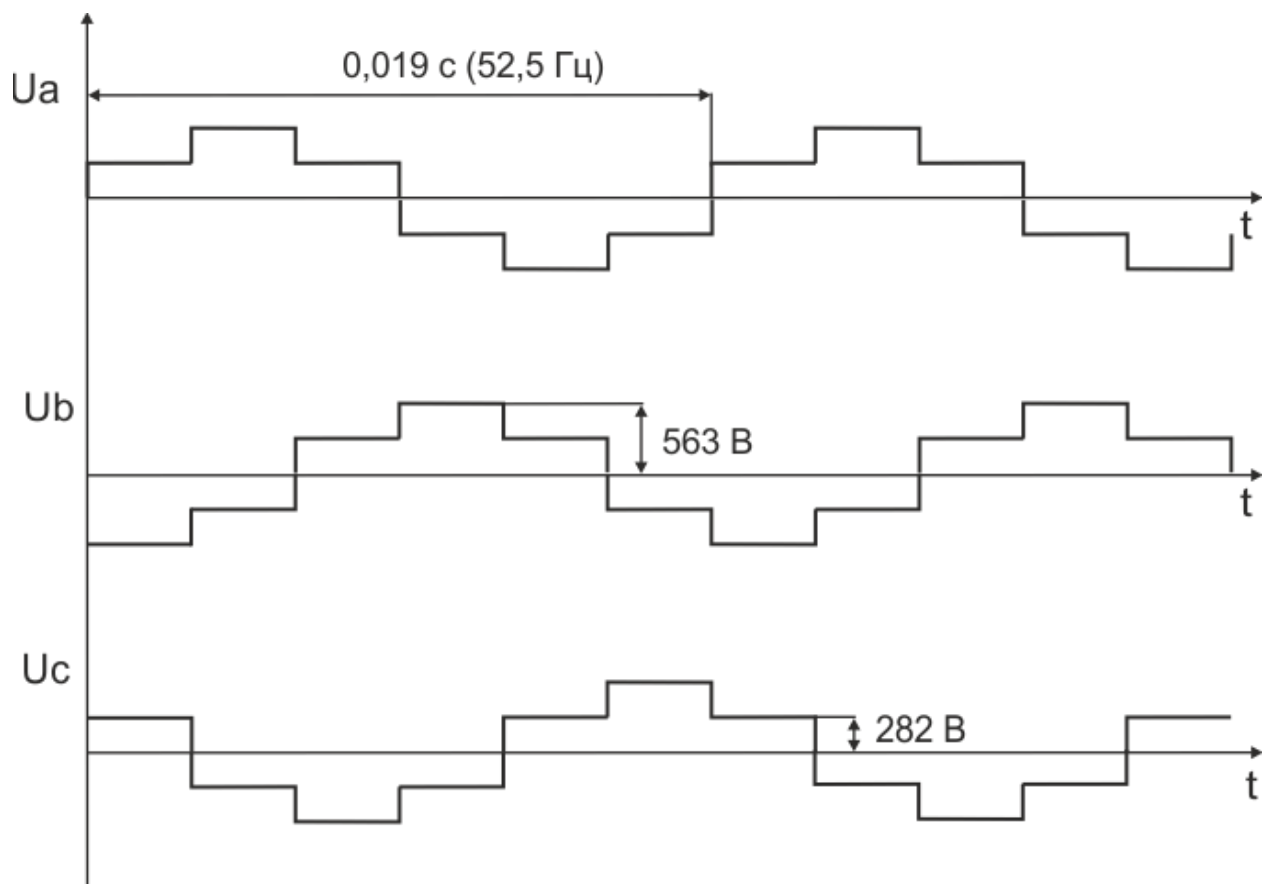


Рисунок 3.5 – Часова діаграма фазних напруг на затисках асинхронного двигуна приводу компресора

3.4 Розрахунок силових приладів автономного інвертора допоміжного приводу

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

Розрахунок виконуємо за методикою, яка запропонована в [13]. При виборі братимемо до уваги лише перші гармоніки вихідних напруг та струмів. Похибка при цьому не перевищує 5%.

Основні співвідношення для напруги та струмів інверторів витікають з рівняння балансу потужності

$$U_d I_d \approx 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \phi_n, \quad (3.32)$$

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

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

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

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

$$I_{\partial n} = \lambda_I I_{1\phi}^H, \quad (3.33)$$

де λ_I – кратність пускового струму;

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

$$I_{1\phi}^H = \frac{P_1}{3U_{1\phi}^H \cos \phi_H}, \quad (3.34)$$

де P_1 – потужність двигуна;

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

$\cos \phi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності.

Розрахунок виконуємо для двигуна приводу компресора АИР160М4, який вимагає максимального значення напруги.

$$I_{1\phi}^H = \frac{18500}{3 \cdot 380 \cdot 0,86} = 18,8 \text{ А};$$

$$I_{\partial n} = 7 \cdot 18,8 = 132 \text{ А}.$$

Середні струми ключа та зворотного діода

$$I_{VT} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 + \cos \phi_H), \quad (3.35)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial n}}{\sqrt{2}\pi} (1 - \cos \phi_H). \quad (3.36)$$

$$I_{VT} = \frac{132}{\sqrt{2}\pi} (1 + 0,86) = 55 \text{ А},$$

$$I_{VD} = \frac{132}{\sqrt{2}\pi} (1 - 0,86) = 4,16 \text{ А}.$$

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

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{\partial n} \cos \phi_H, \quad (3.37)$$

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

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 132 \cdot 0,86 = 153 \text{ A.}$$

Середній номінальний струм на вході автономного інвертора напруги

$$I_{d\text{ном}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot 18,8 \cdot 0,86 = 21,8 \text{ A,}$$

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

$$U_d^{\text{ном}} = \frac{3U_{1\phi}I_{1\phi} \cos \phi_n}{I_{d\text{ном}}}. \quad (3.38)$$

$$U_d^{\text{ном}} = \frac{3 \cdot 380 \cdot 18,8 \cdot 0,86}{21,8} = 845 \text{ B,}$$

Напруга на яку повинні бути розраховані ключі та діоди

$$U_{VS} \geq U_d^{\text{ном}} k_3 U, \quad (3.39)$$

де $k_3 U$ – коефіцієнт запасу що враховує можливе підвищення напруги живильної мережі на 15%.

$$U_{VS} \geq 845 \cdot 1,15 = 972 \text{ B.}$$

Таким чином, для забезпечення необхідних пускових струмів асинхронного двигуна типу АИР160М4 приводу компресора необхідно мати параметри ключів зі струмом не менш 55 А та напругою не менш 972 В.

Обираємо IGBT- модуль типу SKM195GB126D фірми SEMIKRON Elektronik GmbH & Co який представляє собою півмостову схему з двох транзисторів та діодів в одному корпусі [14]. Для реалізації принципової схеми інвертора необхідно три таких модуля. Технічні дані вибраного модуля:

максимальна напруга між виводами емітер-колектор, В 1200;
максимальний струм колектора, А..... 160;
структураN-канал+діод;
напруга насичення при максимальному струмі, В 1,7;
напруга управління, В 6;
максимальна потужність, Вт..... 350;
максимальна частота переключень, кГц..... 20;
діапазон температур, °С..... -40...155;
тип корпусу SEMITRANS 2.

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

Максимальна фазна напруга на затисках двигуна приводу вентилятора складатиме 297 В при частоті 31 Гц відповідно до попередніх розрахунків.

Перевіримо можливість використання вибраного транзистора та мережі живлення попереднього випадку, но з умови, що формування цих фазних напруги відбуватиме за допомогою ШІМ.

Максимально можлива глибина модуляції

$$\mu_m \approx 1 - 4t_b f_m, \quad (3.40)$$

де $t_b = 850$ нс – тривалість відновлення запірних властивостей модуля SKM195GB126D;

$f_m = 500$ Гц – частота модуляції, що приймаємо у розрахунку.

$$\mu_m \approx 1 - 4 \cdot 850 \cdot 10^{-9} \cdot 500 = 0,998.$$

Потрібна глибина модуляції для забезпечення розрахункового режиму.

$$\mu = \frac{\sqrt{2}U_\phi}{U_d^{\text{НОМ}} k_{\text{ВН}}}, \quad (3.41)$$

де U_ϕ – фазна вихідна напруга АІН з ШІМ;

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

$$\mu = \frac{\sqrt{2} \cdot 297}{845 \cdot 0,5} = 0,994$$

Тобто, можливо живлення від єдиної мережі 845 В постійного струму. Найбільше значення середнього вхідного струму

$$I_d = 3\sqrt{2}\mu k_{\text{ВН}} I_{\partial\Pi} \cos \phi_H, \quad (3.42)$$

$$I_d = 3\sqrt{2} \cdot 0,994 \cdot 0,5 \cdot 213 \cdot 0,9 = 404 \text{ А.}$$

Середній струм ключів та діодів

$$I_{VT} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{\mu\pi}{4} \cos \phi_H \right); \quad (3.43)$$

$$I_{VD} = \frac{I_{\partial\Pi}}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{\mu\pi}{4} \cos \phi_H \right); \quad (3.44)$$

$$I_{VT} = \frac{213}{\sqrt{2}\pi} \left(1 + \frac{0,994 \cdot \pi}{4} \cdot 0,9 \right) = 81,6 \text{ А};$$

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

$$I_{VD} = \frac{213}{\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{0,994\pi}{4} \cdot 0,9 \right) = 14,3 \text{ А.}$$

3.5 Розрахунок випрямляча

Випрямлячі виконуються на основі діодів і тиристорів, а в окремих випадках на основі силових транзисторів. Основне призначення випрямляча – це перетворення змінного струму в постійний (пульсуючий випрямлений) струм. Додатковою функцією випрямляча може бути регулювання напругою на виході в результаті зміни кута відкритого стану напівпровідника. Такі випрямлячі мають назву керовані. Некеровані випрямлячі не мають пристроїв для керування напругою і виконуються на діодах. Для наших цілей підходить некерований випрямляч. Для нього не потрібна система керування і він має меншу ціну ніж керований.

Випрямлячі однофазного струму використовують для живлення випрямленим струмом різних систем і пристроїв промисловості і транспортної інформаційної електроніки, що вирішує задачі керування, регулювання, переробки і відображення інформації. Такі випрямлячі розраховані на невеликі потужності. В тяговому електроприводі на електрорухомому складі використовуються потужні однофазні випрямлячі до декількох мегават [10, 11].

Як ми бачимо однофазні випрямлячі широко застосовуються на залізничному транспорті. Важливо лише вірно обрати схему випрямлення, напівпровідникові пристрої та згладжуючий фільтр.

Найпростішою схемою однофазного випрямляча є одноппульсова (однопівперіодна) схема на одному діоді з шунтуючим діодом або без нього. Але частіше використовують двопульсові (двопівперіодні) нульову і мостову схеми однофазних випрямлячів [10, 11].

На основі цього можна зробити висновок, що якість випрямленої напруги невисока, тому краще використати двох півперіодну схему. Для неї необхідно виконати вибір напівпровідникових діодів. В цілях зниження собівартості установки застосуємо діоди вітчизняного виробника.

В мостовій схемі (рисунок 3.6) діоди проводять струм попарно: VD1, VD2 – на протязі додатних, а VD3, VD4 – на протязі від’ємних півперіодів.

Середнє значення струму в колі діода:

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

$$I_V = \frac{I_H}{2}. \quad (3.45)$$

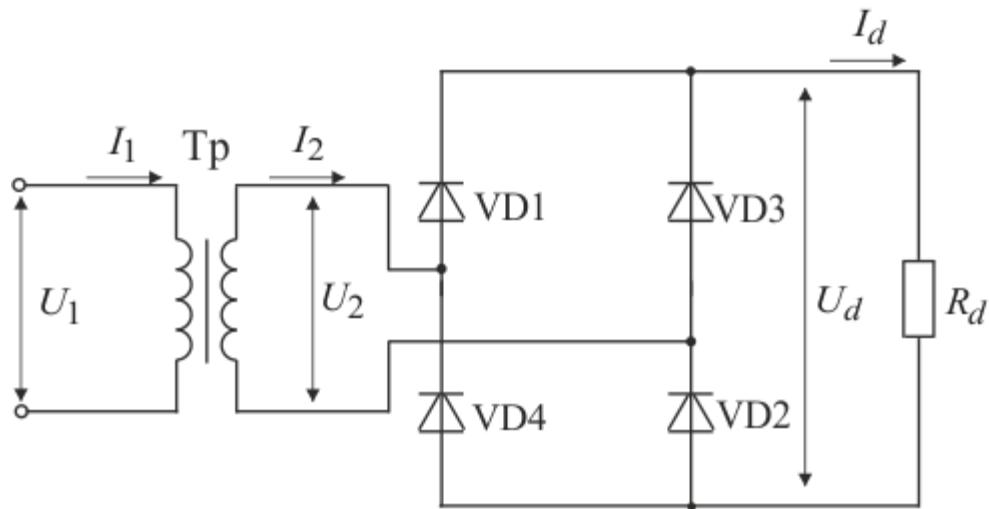


Рисунок 3.6 – Мостова схема випрямлення однофазного струму

Для контуру автономного інвертора за умовою, що необхідно забезпечити пусковий струм групи асинхронних двигунів будемо вважати, що одночасно можуть знаходитися в режимі пуску приводи вентиляторів та приводи компресорів:

$$I_H = I_d^K + 2I_d^B \quad (3.46)$$

де I_d^K – струм навантаження випрямляча, яке визначається пусковим струмом приводу компресора АИР160М4;

I_d^B – струм навантаження випрямляча, яке визначається номінальним струмом приводу вентилятора АИР180М2.

$$I_H = 153 + 2 \cdot 404 = 961 \text{ А},$$

$$I_V = \frac{961}{2} = 480,5 \text{ А}.$$

Середнє значення випрямленої напруги, визначаємо виходячи з того, що джерелом енергії є змінна напруга прямокутної форми при нижчій напрузі контактної мережі 2400 В. Відповідно до прийнятого в другому розділі способу регулювання напруги пропонується робота однофазного автономного інвертора зі змінним коефіцієнтом заповнення, тобто напівпровідникові ключі виконують стабілізацію напруги мережі живлення асинхронних приводів 845 В. Найбільше значення коефіцієнта заповнення

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

для одного півперіоду в такому випадку може бути 0,5, що відповідає максимальному значенню напруги мережі 4 кВ.

Коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k_T = \frac{U_{1m}}{U_{2m}}, \quad (3.47)$$

де U_{1m} – амплітудне значення напруги первинної обмотки трансформатора. Оскільки напруга прямокутної форми, а в якості інвертора буде використано пів мостову схему з ємнісним подільником, то приймаємо $2400/2 = 1200 \text{ В}$;

U_{2m} – амплітудне значення напруги вторинної обмотки трансформатора. Приймаємо 845 В.

$$k_T = \frac{1200}{845} = 1,42.$$

Найменший коефіцієнт заповнення одного ключа інвертора

$$\lambda_{\min} = 0,5 \cdot \frac{U_{KM}^{\min}}{U_{KM}^{\max}}, \quad (3.48)$$

де $U_{KM}^{\max}, U_{KM}^{\min}$ – максимальне та мінімальні значення напруги контактної мережі відповідно завдання.

$$\lambda_{\min} = 0,5 \cdot \frac{2400}{4000} = 0,3.$$

Максимальне значення зворотної напруги діоду дорівнює амплітудному значенню вторинної напруги, оскільки вона прямокутна:

$$U_{b \max} = U_{KM}^{\max} / k_T, \quad (3.49)$$

$$U_{b \max} = 4000 / 1,42 = 2816 \text{ В}.$$

Вибираємо для випрямляча, що живить мережу автономних трифазних інверторів напруги діоди типу ДЧ253-800-30 [15] з технічними характеристиками:

- Середній прямий струм, А 800;
- Ударний прямий струм, кА 9,5;
- Імпульсна зворотна напруга, що повторюється, В 3000;
- Імпульсний струм, що повторюється, мА 50;
- Імпульсна пряма напруга, В 3,5;

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

Маса діода, кг 0,55;

Тип охолоджувача..... 0153.

В колі навантаження забезпечується безперервне протікання струму з допустимою пульсацією. Це досягається завдяки підключення дроселю і достатньо високою частотою комутації.

Мінімальний коефіцієнт заповнення імпульсної послідовності на виході випрямляча

$$\gamma_{min} = 2 \cdot \lambda_{min}, \quad (3.50)$$

$$\gamma_{min} = 2 \cdot 0,3 = 0,6.$$

Мінімальна необхідна індуктивність дроселю визначається [16]

$$L_{d \min} \geq \frac{U_{ex}^{max}}{2I_{d \max} f} \gamma_{min} (1 - \gamma_{min}), \quad (3.51)$$

де $I_{d \max}$ – максимальний струм навантаження (прийнято раніше при розрахунку випрямляча);

U_{ex}^{max} – максимальна амплітуда напруги на вході фільтру. Приймаємо при напруги мережі 4 кВ, та виходячи з того, що автономний інвертор виконує ділення напруги пополам:

$$U_{ex}^{max} = \frac{U_{KM}^{max}}{2k_T} \quad (3.52)$$

$$U_{ex}^{max} = \frac{4000}{2 \cdot 1,42} = 1408 \text{ В.}$$

f – частота роботи напівпровідникового ключа. Відповідно до [17] частота роботи ключів на основі сучасних силових IGBT транзисторів може бути до 5 кГц без використання додаткових пристроїв корекції робочого режиму, а в [18] показано, що на цей час в силових перетворювачах в якості магнітопроводів трансформаторів та дроселів можливо використання деяких електротехнічних сталей на частотах до 3 кГц. Виходячи з цього приймаємо частоту роботи напівпровідникових ключів автономного однофазного інвертора 2000 Гц. Мінімальна необхідна індуктивність дроселя

$$L_{d \min} \geq \frac{1408}{2 \cdot 961 \cdot 2000} \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,6) = 0,0000879 \text{ Гн.}$$

Приймаємо індуктивність дроселю $L_d = 0,00009 \text{ Гн.}$

Ємність конденсатора Г-образного фільтру визначаємо [16]

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

$$C_d \geq \frac{q}{4\pi^2 f^2 L_d}, \quad (3.53)$$

де q – коефіцієнт згладжування Г-образного фільтру. Рекомендована межа по значенню коефіцієнт згладжування Г-образного фільтру не більш 30 [16]. Тому в розрахунку приймаємо $q = 10$.

$$C_d \geq \frac{10}{4\pi^2 \cdot 2000^2 \cdot 0,00009} = 0,000703 \text{ Ф.}$$

Часові діаграми первинної напруги на вході трансформатора, вторинної напруги трансформатора та напруги на навантаженні при напрузі контактної мережі 2400 В показані на рисунку 3.7.

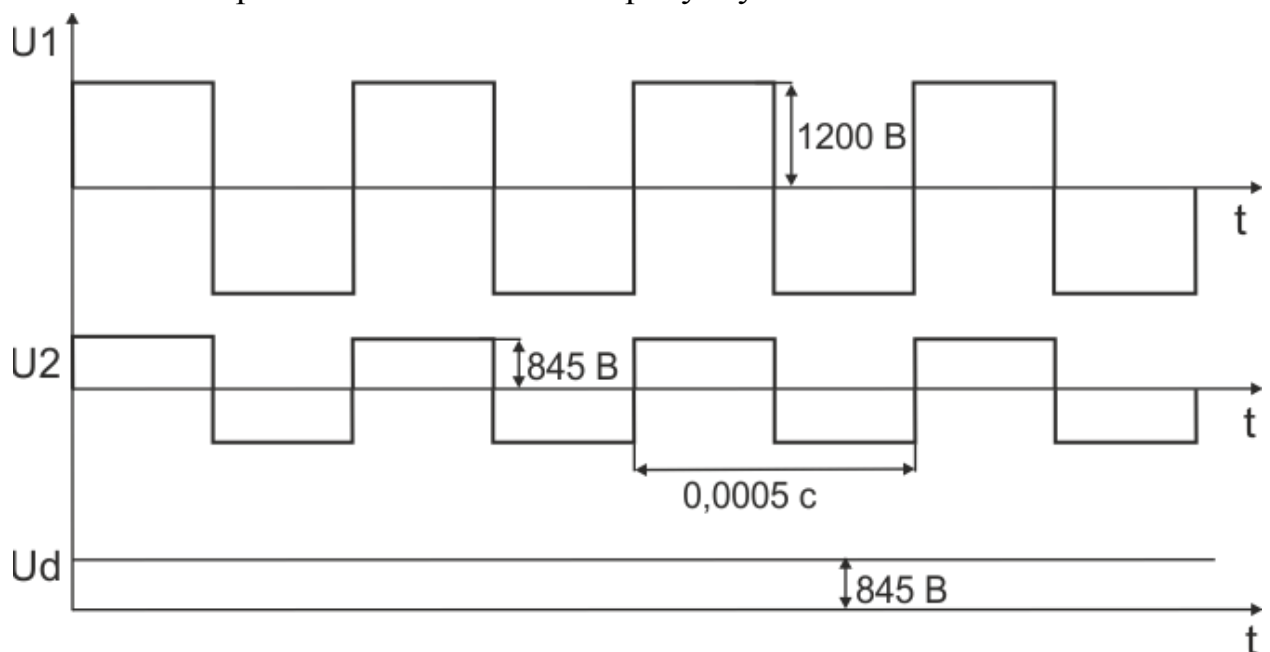


Рисунок 3.7 – Часові діаграми напруг трансформатора та виходу випрямляча при $U_{\text{км}} = 2400 \text{ В}$

Часові діаграми первинної напруги на вході трансформатора, вторинної напруги трансформатора, напруги на виході випрямляча та напруги на навантаженні при напрузі мережі 4000 В показані на рисунку 3.8. В цьому випадку ключі інвертора напруги працюють з коефіцієнтом заповнення імпульсної послідовності 0,3, а на виході випрямляча – 0,6.

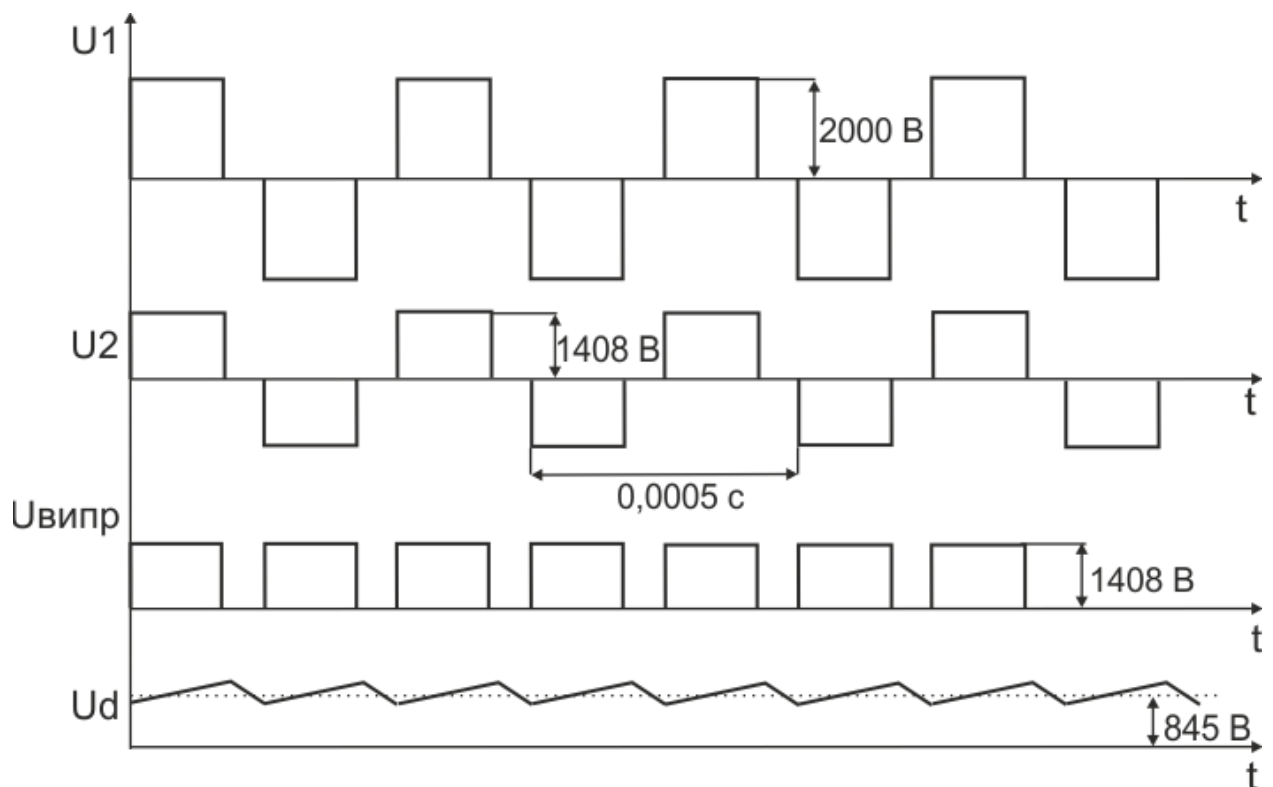


Рисунок 3.8 – Часові діаграми напруги трансформатора та виходу випрямляча при $U_{\text{км}} = 4000 \text{ В}$

3.6 Вибір елементів однофазного автономного інвертора напруги

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

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

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

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

В роботі пропонується виконати розробку крім трифазної автономної схеми інвертування ще й і однофазну схему інвертування. Для зменшення амплітуди коливання струму мережі та усунення небезпечних перенапружень використовують вхідні фільтри [10, 11, 16]. Фільтри значно поліпшують

перехідні процеси, згладжують зміну напруги та струму на вході перетворювача при різких коливаннях напруги мережі.

Автономний однофазний інвертор напруги, виконаний по схемі двотактного не регулюючого перетворювача постійної напруги з гальванічним розв'язанням джерела живлення та навантаження представлено на рисунку 3.9.

Схема складається з двох транзисторних ключів (IGBT) VT1 – VT2, які протифазні за циклом роботи та конденсаторів подільника напруги для зменшення напруги в два рази, що прикладається до напівпровідникових ключів інвертора [19]. Транзистори по чергово вмикаються, підключаючи коло навантаження до джерела живлення з періодично змінною полярністю. Такий алгоритм забезпечує формування на навантаженні напруги прямокутної форми. Частота вихідної напруги задається схемою керування в результаті зміни тривалості циклу переключення транзисторних ключів. Зміною моменту запирання одного з ключів в кожній робочій парі можна змінювати тривалість прикладення напруги джерела до навантаження.

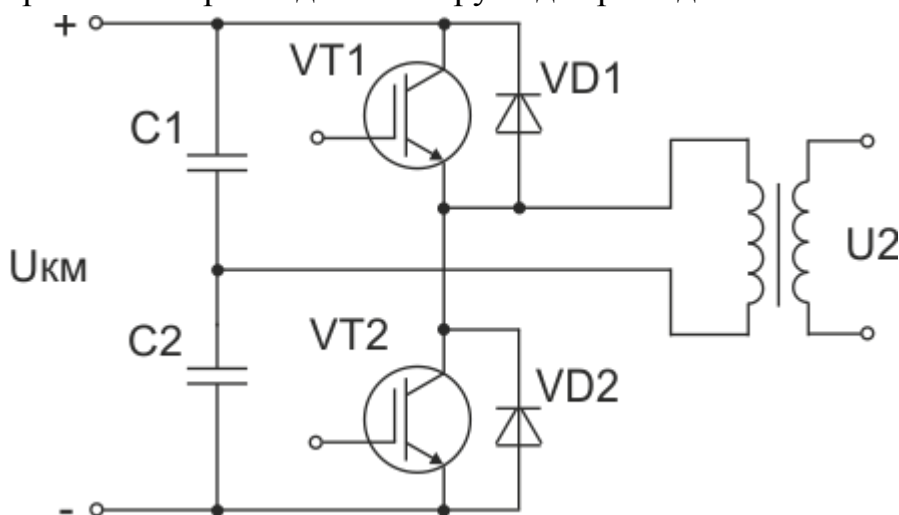


Рисунок 3.9 – Однофазний інвертор напруги

Навантаженням в нашому випадку являється трансформатор.

Необхідні коефіцієнти трансформації силового трансформатора визначені раніш при розрахунку випрямлячів.

Максимальний струм навантаження I_H вихідного кола, як раніше зазначалося, складає 961 А. Струм, що споживається з контактної мережі (струм інвертора) при максимальному режимі визначається

$$I_m = \frac{I_H}{2k_T}, \quad (3.54)$$

$$I_M = \frac{961}{2 \cdot 1,42} = 338 \text{ A.}$$

Середній струм плеча автономного інвертора [19]

$$I_{VT} = \frac{I_M}{2}, \quad (3.55)$$

$$I_{VT} = \frac{338}{2} = 169 \text{ A.}$$

Вибираємо модуль на основі силового IGBT транзистора типу CM400HB-90H фірми Mitsubishi:

максимальна напруга колектор – емітер 4500 В;
 номінальний струм колектора 400 А;
 максимальна частота 15 кГц;
 напруга насичення 3 В;
 максимальна припустима напруга затвор-емітер 6 В;
 драйвер управління зовнішній;
 діапазон температур -40...+150 0С;
 напруга ізоляції 6 кВ;
 виконання – два одиночні транзистори зі зворотними діодами.

Вхідний фільтр використовується для досягнення режиму безперервного струму і зниження пульсацій напруги при імпульсному регулюванні.

Розрахунок вхідного фільтру виконуємо за методикою, що наведена в [20]. Методика прийнятна для систем в яких виконується імпульсне регулювання напруги. За алгоритмом роботи випрямляча відомо, що на їх входи поступає змінна напруга прямокутної форми, далі вона випрямляється і на виході випрямлячів буде прямокутна напруга одного знаку з малими паузами. Напруга частотою 2 кГц має найменший коефіцієнт заповнення 0,6.

Використовуємо найпростіший Г-образний фільтр, який містить дросель з індуктивністю L_Φ і конденсатор з ємністю C_Φ . Завдяки послідовно включеній індуктивності струм мережі при замиканні ключа наростає поступово. При розмиканні ключа струм мережі зменшується також поступово за рахунок протікання струму через коло діодів випрямного моста та віддачу енергії до навантаження конденсатором C_Φ . При достатньо великих значеннях L_Φ і C_Φ струм в навантаженні буде безперервним і пульсуючим щодо середнього значення. Пульсуючою буде і напруга U_Φ на

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

виході фільтру. За умови що $I_C = \lambda \cdot I_M$, а розмах коливань напруги на конденсаторі ΔU_Φ досягає максимуму при $\lambda = 0,5$:

$$\Delta U_{\Phi \max} = \frac{I_M}{4 \cdot f \cdot C_\Phi}; \quad (3.56)$$

$$\Delta I_{C \max} = \frac{I_M}{32 \cdot f^2 \cdot L_\Phi \cdot C_\Phi}. \quad (3.57)$$

Ці вирази отримані шляхом лінеаризації процесів зміни струмів і напруг фільтру і дають прийнятну погрішність за умови

$$f \geq 2 \cdot f_\Phi, \quad (3.58)$$

де f_Φ – власна частота коливального контуру, утвореного ємністю фільтру C_Φ і індуктивністю фільтру L_Φ .

$$f_\Phi = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_\Phi \cdot L_\Phi}} \quad (3.59)$$

Умова (3.58) повинна суворо виконуватися, оскільки при резонансі частот $f = f_\Phi$ і поблизу нього пульсації ΔI_C і ΔU_Φ у багато разів перевищуватимуть розраховані за формулами (3.56), (3.57).

Формули (3.56) і (3.57) дозволяють розрахувати L_Φ і C_Φ по відомих значеннях допустимих пульсацій, частоти і максимального струму навантаження.

Приймаємо розмах пульсацій напруги на конденсаторі 10%, а розмах пульсацій струму рівним 5% від струму навантаження

$$\Delta U_{\Phi \max} = 0,1 \cdot U_{\max}, \quad (3.60)$$

$$\Delta U_{\Phi \max} = 0,1 \cdot 4000 = 400 \text{ В},$$

$$\Delta I_{C \max} = 0,05 \cdot I_{M \max}, \quad (3.61)$$

$$\Delta I_{C \max} = 0,05 \cdot 338 = 17 \text{ А}.$$

Ємність вхідного фільтру

$$C_\Phi = \frac{I_{M \max}}{4 \cdot f \cdot \Delta U_{\Phi \max}}, \quad (3.62)$$

$$C_\Phi = \frac{338}{4 \cdot 2000 \cdot 400} = 0,0001 \text{ Ф}.$$

Індуктивність вхідного фільтру

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

$$L_{\Phi} = \frac{I_{m \max}}{32 \cdot f^2 \cdot \Delta I_{C \max} \cdot C_{\Phi}}. \quad (3.63)$$

$$L_{\Phi} = \frac{338}{32 \cdot 2000^2 \cdot 17 \cdot 0,0001} = 0,0015 \text{ Гн.}$$

3.7 Силова схема перетворювача

Силовая схема статичного перетворювача представлена на рисунку 3.10.

Схема розроблена на основі попередніх розрахунків окремих блоків та функціональної схеми, яка була описана в попередньому розділі.

Вхідна напруга від контактної мережі надходить на вхідний Г-образний фільтр на основі елементів L1-C1. Далі напруга позитивним виводом приєднана до середньої обмотки імпульсного трансформатора, а негативним до емітерів IGBT- транзисторів VT1, VT2. Під управлінням сигналів, які надходять від системи управління транзистори почергово відчиняються. Перший півперіод працює транзистор VT1. Струм протікає через коло дроселя від позитивного потенціалу мережі, через верхню обмотку трансформатора (знизу – до верху) транзистор VT1, негативний вивід. До особливостей другого півперіоду відносимо те, що струм протікає через коло транзистора VT2, нижню обмотку трансформатора (зверху – до низу). Таким чином в магнітопроводі трансформатора з'являється змінний струм, який на вторинній стороні має значення нижче.

На виході трансформатора отримано змінну напругу прямокутної форми зі змінним коефіцієнтом заповнення імпульсу залежно від напруги контактної мережі.

На діодах VD3-VD6 зібрано мостовий випрямляч до виходу якого приєднано фільтр L2-C4.

На елементах VT3-VT8, VD7-VD12 зібрано мостову трифазну схему автономного інвертора напруги для живлення трифазного асинхронного двигуна М.

Всього вказаних інверторів в схемі 4. Всі чотири інвертори отримують напругу від єдиного випрямляча. Це зменшує кількість елементів в схемі, що підвищує надійність та, зменшує втрати потужності. Крім того, управління автономними інверторами з деяким зсувом дозволяє зменшити габарити фільтрів.

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

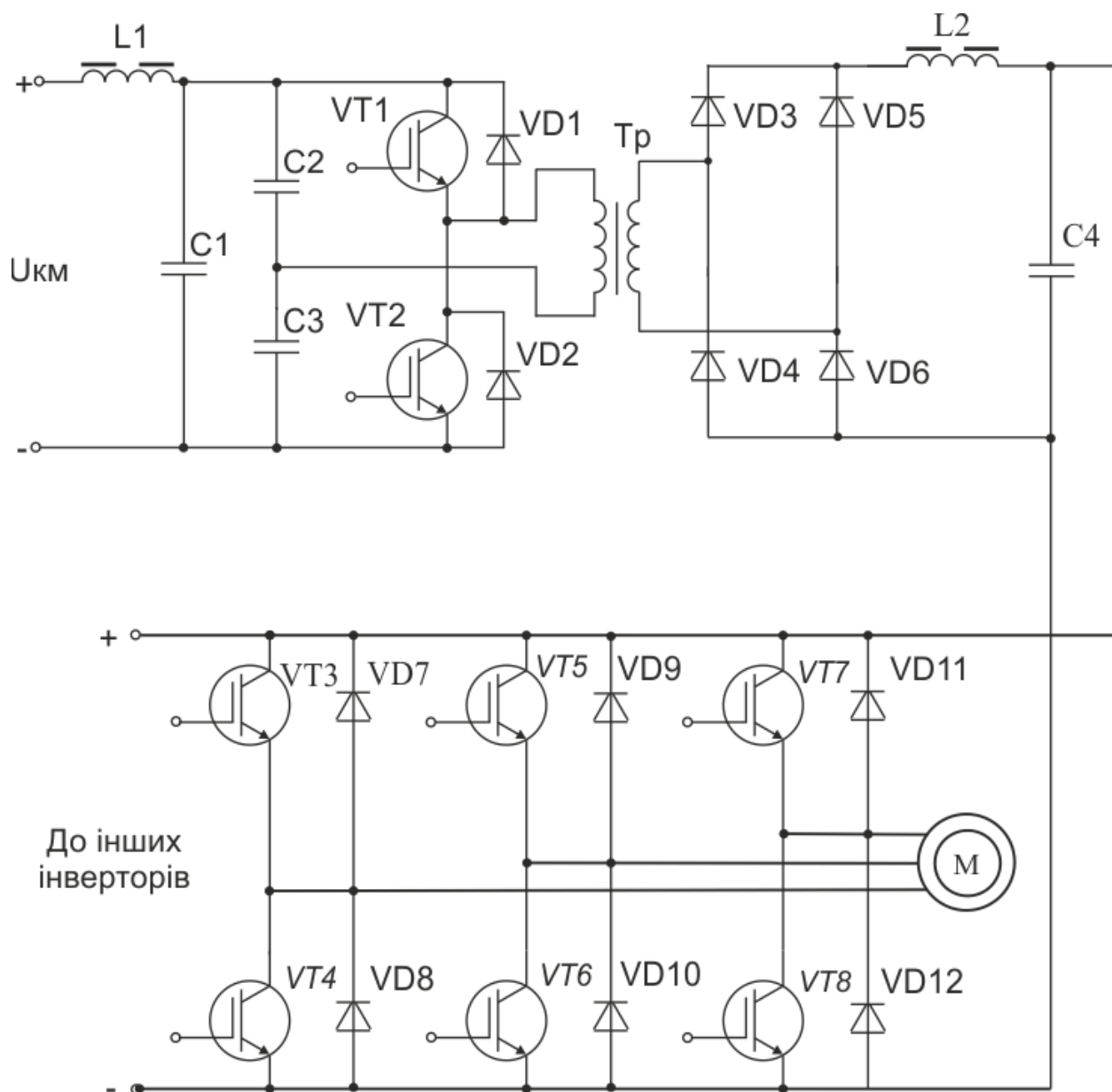


Рисунок 3.10 – Уніфікована силова схема статичного перетворювача кіл власних потреб електровозів ЧС2 та ЧС7

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ ПРИЛАДАМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1 Вимоги до системи керування

Будь-яка система керування реалізує цілий ряд функціональних завдань у незалежності від того, який тип пристроїв є виконавчим. В існуючій схемі електровозів ЧС2 та ЧС7 до виконавчих пристроїв відносяться тягові електричні двигуни постійного струму та електричні машини допоміжних приводів. І те й інше є електромашинними перетворювачами. Проміжними пристроями впливу на даний тип перетворювачів є пристрої релейного типу – електромеханічні контактори й регулятори, які і являють собою систему керування пристроями електровозу та електровозом у цілому. Система керування на основі контакторів реалізує необхідний алгоритм функціонування, забезпечуючи тим самим рівень заданих параметрів системи й стійкість її роботи при певних зовнішніх змінах.

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

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

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

Нова система керування дозволяє ввести додаткові блоки діагностики для швидкого обслуговування при ремонтах. Касетне виконання блоків також збільшує темпи обслуговування при експлуатації. Крім того

						Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

відбувається зниження габаритів та підвищення надійності усього блоку в цілому на відміну від електромашинних перетворювачів.

4.2 Система керування автономним трифазним інвертором приводу компресору

Алгоритм роботи ключів автономного інвертора напруги, який формує напругу на затисках асинхронного двигуна приводу компресора – амплітудне-імпульсна модуляція з тривалістю включеного стану ключа 180 град. ел., що дає змогу регулювати частоту в широких межах. Однак, регулювання частоти, відповідно до закону Костенко, вимагає й одночасного регулювання напруги, що заданий алгоритм не дозволяє зробити. Однак, для приводу компресора встановлено лише постійна частота 52,5 Гц та номінальна фазна напруга 380 В.

Виходячи з того, що пропонується розробка найпростішої системи частотного управління вибираємо типову систему управління частотним перетворювачем, яка приведена в [21]. Схема виконана на вітчизняній елементній базі, що знижує собівартість виготовлення, не вимагає залучення для налагодження системи фахівців з програмування.

Система управління частотним перетворювачем, яка виконана на логічних елементах середнього ступеню інтеграції представлена на рисунку 4.1, а часові діаграми напруги в контрольних точках схеми представлені на рисунку 4.2.

Принципова схема виконана на елементах транзистор-транзисторної логіки:

- елементи DD1.1-1.4, DD4.1-4.3 – дві мікросхеми K155ЛА3;
- DD2 – мікросхема K155ИЕ4;
- DD3.1-DD3.4 – мікросхема K155ЛП5.

Мікросхема K155ЛА3 представляє собою схему малого ступеню інтеграції. До її структури входять чотири однотипні елементи типу 2И-НЕ. Логіка роботи такого елемента полягає в тому, що при надходженні на один з логічних входів елемента логічного нуля – на виході завжди знаходиться логічна одиниця. Логічний нуль може з'явитися на виході при надходженні на обидва входи логічних одиниць.

Мікросхема K155ЛП5 – чотири незалежних суматора за модулем 2, кожний з яких працює наступним чином. Якщо на обох входах елемента логічні нулі – на виході логічний нуль. Якщо на одному з входів логічний нуль, а на іншому логічна одиниця, на виході встановлюється логічна

						Лист
						73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

одиниця. Якщо на обох входах логічні одиниці – на виході встановлюється логічний нуль.

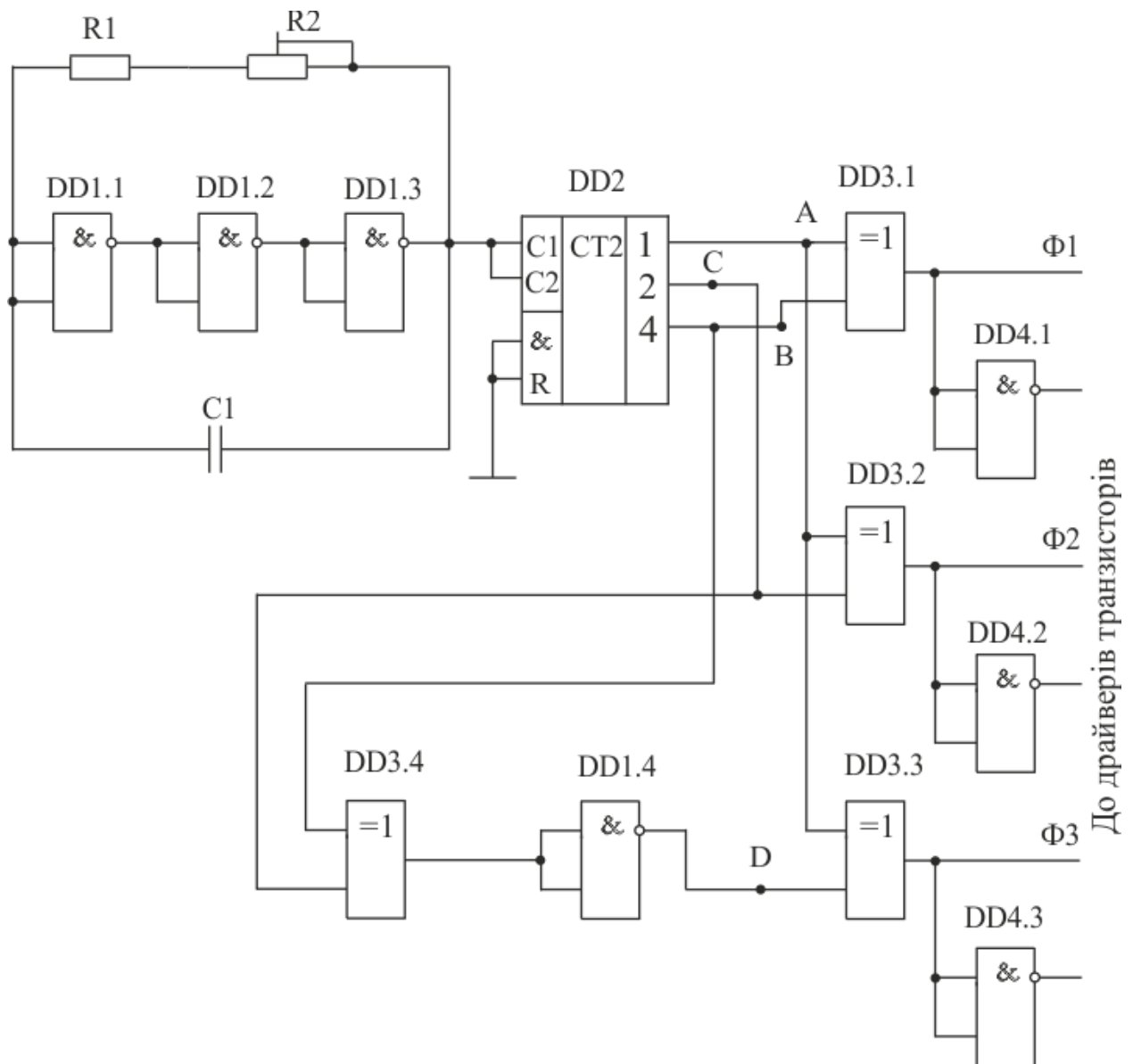


Рисунок 4.1 – Система управління частотним перетворювачем

Мікросхема K155IE4 представляє собою двійковий лічильник. Складається з чотирьох лічильних тригерів. Схема дозволяє при з'єднанні між собою визначених номерів виводів між собою отримати коефіцієнти перерахунку 4, 5, 7, 8, 10, 12 [22]. В схемі рисунка 4.1 лічильник працює з коефіцієнтом перерахунку 4.

Схема, яка представлена на рисунку 4.1 працює наступним чином [21]. На елементах DD1.1-DD1.3, конденсаторі C1 та резисторах R1, R2 виконано генератор тактових імпульсів, який генерує імпульсну послідовність необхідної частоти. Частота може змінюватися за допомогою

резистора R2. Тактові імпульси надходять на генератор-формував трьохфазної послідовності, який виконано на елементах DD2, DD3, DD1.4. Лічильник DD2 формує послідовності імпульсів А, В, С (див. рисунок 4.2), які надходять на елементи DD3.1-DD3.3. В результаті на виходах цих елементів формуються імпульсні послідовності $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, які мають точне та постійне фазування. На елементах DD4.1-DD4.3 виконані інвертори для подачі імпульсів управління на протифазні ключі автономного трифазного інвертора напруги.

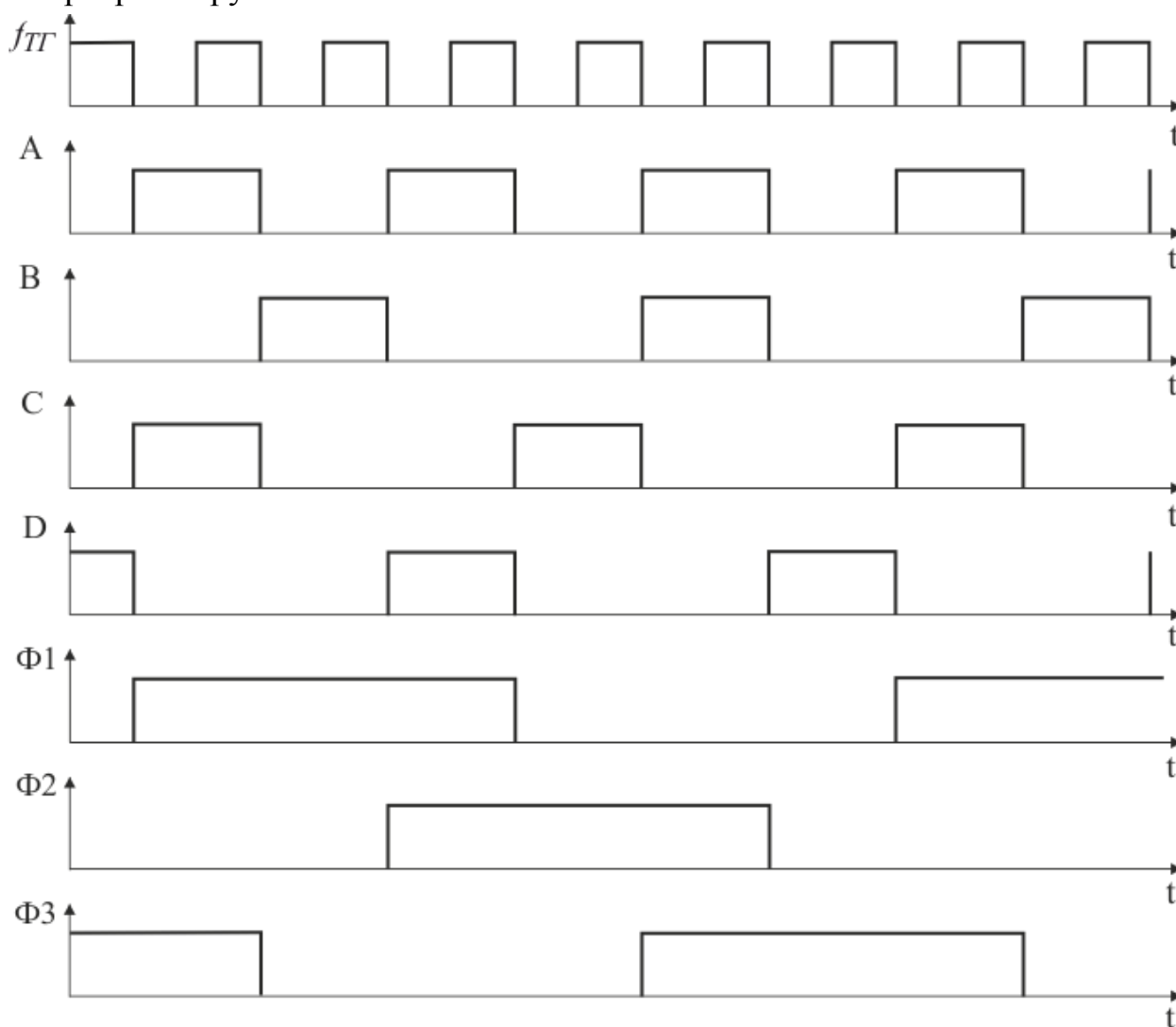


Рисунок 4.2 – Часові діаграми напруги в контрольних точках системи управління

4.3 Система керування автономним трифазним інвертором приводу вентиляторів

Алгоритм роботи ключів автономного інвертора напруги, який формує напругу на затисках асинхронних двигунів приводів вентиляторів засновано на використанні широтне-імпульсної модуляції. В попередньому

розділі встановлено, що для електровоза ЧС7 де виконується заміна двигуна 2А-2839/4 на двигун АИР180М2 параметри фазної напруги та частоти найбільші (297 В та 31 Гц) з можливим зниженням частоти обертання вентилятору зі зниженням струму тягових двигунів. Для електровозу ЧС2 напруга та частота дещо нижча.

Таким чином, найпростіша система управління не підходить.

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

Найбільш універсальним приладом для будови керуючої частини перетворювача є мікроконтролер, якій управляє логікою переключення вентилів силової частини та забезпечує інтерфейсні функції для зв'язку з оператором та іншими технологічними об'єктами [13, 23].

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

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

Обираємо уже розроблену типову схему керування інвертором (рисунок 4.3). Схема керування була випробувана з використанням потужного інвертора на IGBT транзисторах [24].

Відповідно завданню до вхідних сигналів мікроконтролера відносимо сигнал від датчика струму в колі тягових двигунів, сигнал на включення силового перетворювача, який поступає від центрального процесора, сигнал пропорційний необхідному коефіцієнту заповнення імпульсної послідовності

						Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

силового перетворювача або сигнал від блок-контактів реле тиску компресора (у разі використання вузла керування для управління приводом компресора). До вихідних сигналів відносимо сигнали, які поступають на силові кола перетворювача – транзистори автономного інвертора напруги.

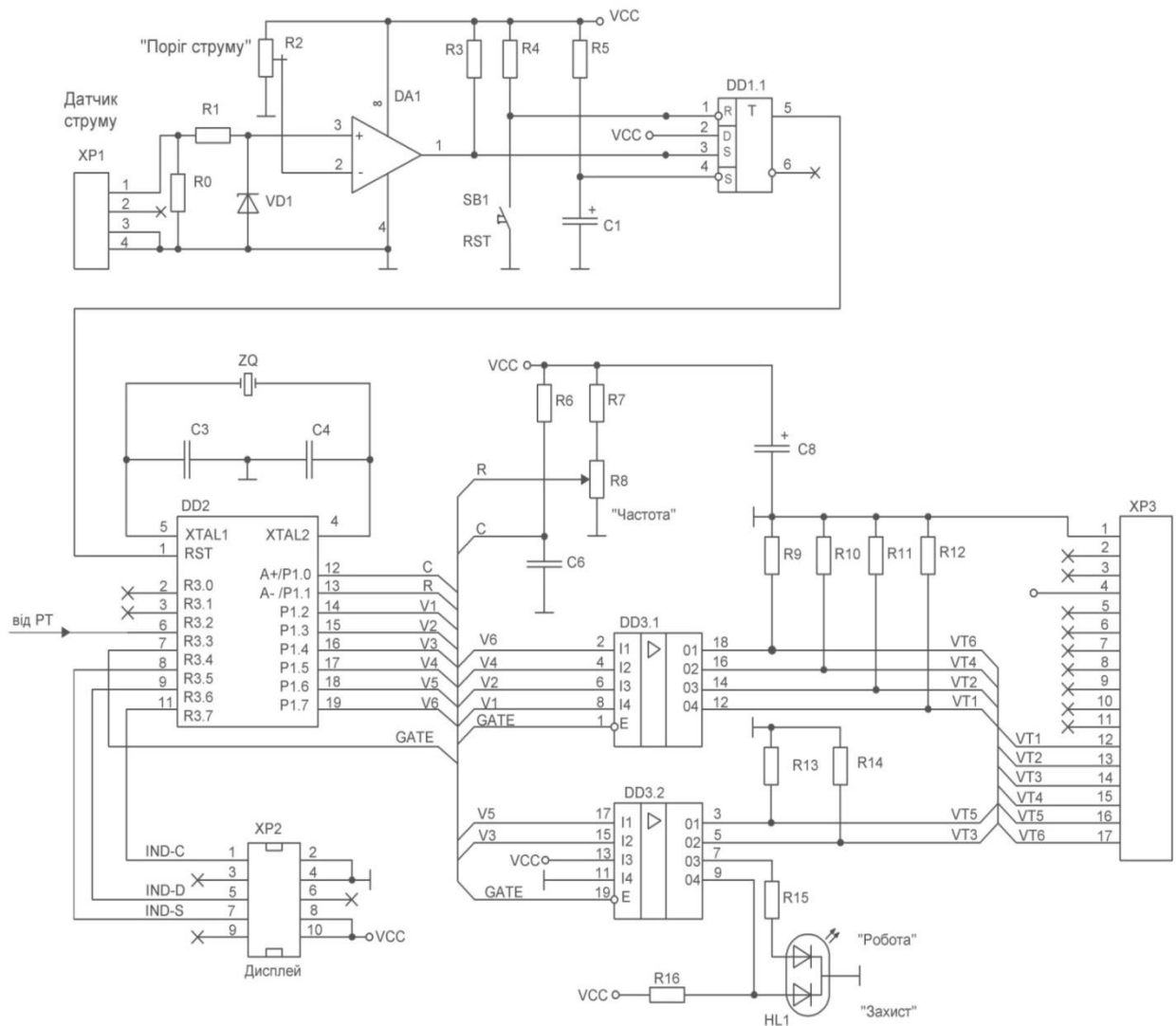


Рисунок 4.3 – Схема керування інвертором приводів вентиляторів

Короткі характеристики і особливості схеми, що вибрана:

- формування послідовності імпульсів керування силовими ключами по алгоритму, який реалізовує лінійну залежність значення напруги, що діє, від частоти;
- регулювання частоти вихідної напруги інвертора від 5 - 50 Гц;
- швидкодіючий захист силових ключів інвертора від струмів КЗ;
- можливість використання в якості датчика струму як спеціалізованого датчика (наприклад, фірми LEM), так і звичайного шунта;

- можливість підключення додаткового дисплея з послідовним інтерфейсом для індикації поточної і заданої частоти;
- надзвичайна простота схеми – всього 4 мікросхеми, включаючи мікроконтролер.

При струмі вище струму уставки (задається під час налагодження для типу електровоза), частота струму мотор-вентиляторів зберігається рівною розрахунковим значенням, що буди визначено у третьому розділі (31 Гц для ЧС7 та нижче для ЧС2). Якщо струм тягових двигунів виявився нижчим за значення струму уставки, система керування дає команду на зміну режиму вентиляції з високої частоти на низьку частоту, або плавне зниження частоти обертання, якщо замість датчика струму використовувати датчик температури повітря на виході двигуна.

У схемі використовується недорогий мікроконтролер AT89C2051-24PI. Він реалізує всі необхідні функції за спеціально розробленою програмою. Програма мікроконтролера формує 6 вихідних сигналів керування силовими ключами інвертора у відповідності з прийнятим алгоритмом АІМ, ШІР чи ШІМ. Роз'єм ХР3 служить для підключення напруги живлення схеми керування 5 В (контакти 1 і 4), а так само для підключення до схеми драйверів силових ключів інвертора (контакти 12 – 17).

Роз'єм ХР1 служить для підключення сигналу з датчика струму інвертора. Якщо використовується датчик струму фірми LEM або аналогічний, то обов'язкова наявність резистора навантаження R0. Якщо як датчика використовується шунт, то цей резистор не потрібний. Шунт має бути розрахований так, щоб за наявності струму КЗ в колі на ньому падала напруга від 3 до 5 В. Якщо напруга істотно нижча, може потрібно додатковий каскад підсилення.

Схема визначення струму тягового двигуна побудована на компараторі DA1A і тригері DD1.1 і працює наступним чином. Напруга з датчика струму через захисне коло R1-VD1 поступає на не інвертуючий вхід компаратора DA1, а на вхід, що інвертує, поступає опорна напруга з резистора налаштування R2. Коли напруга з датчика струму перевищить опорну, компаратор спрацює, і високий логічний рівень з його виходу поступить на тактовий вхід тригера DD1.1, який перемкнеться і сигналом зі свого виводу 5 переведе мікроконтролер в робочий стан.

За допомогою резистора R8 можливо вручну встановлювати бажане значення частоти вихідної напруги інвертора. Незалежно від положення

						Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

движка R8, відразу після початку роботи інвертор формує вихідні сигнали для частоти напруги в 5 Гц. Потім, проаналізувавши сигнали з датчика струму, мікроконтролер починає поступове підвищення частоти до заданого рівня. Це зроблено для виключення стрибкоподібної зміни вихідної частоти, що може привести до виникнення ударних струмів в АД і механічних перевантажень в приводному механізмі.

До роз'єму ХР2 можна підключити дисплей з послідовним інтерфейсом, за допомогою якого відображається задане і поточне значення частоти, для роботи схеми наявність дисплея необов'язкова. У авторському варіанті застосований простий дисплей на шести семи сегментних світлодіодних індикаторах і шести регістрах з послідовним введенням і паралельним виведенням даних, схему якого можна знайти на сайті автора.

Алгоритм роботи схеми керування в режимі пуску пояснюють діаграми вихідних сигналів і відповідні ним діаграми вихідної напруги інвертора (рисунок 4.4 і рисунок 4.5).

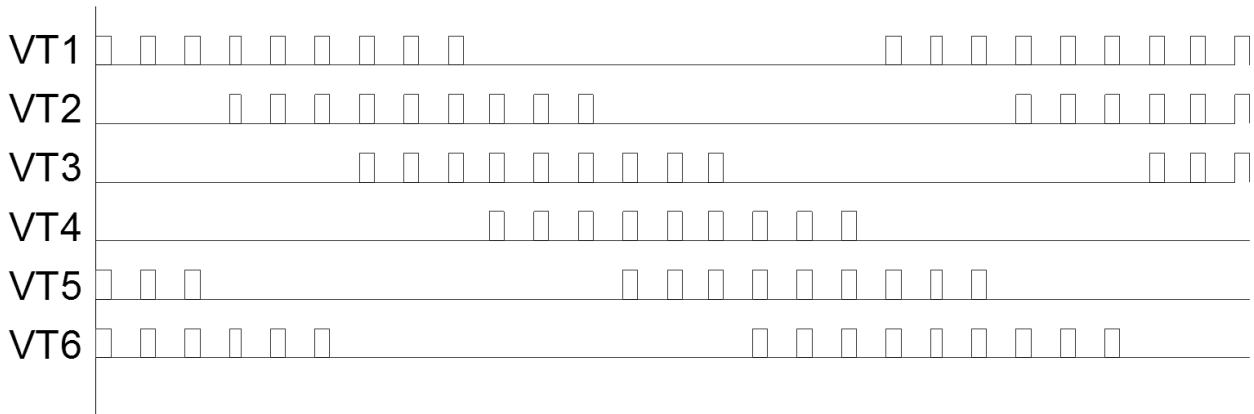


Рисунок 4.4 – Діаграма вихідних сигналів схеми керування.

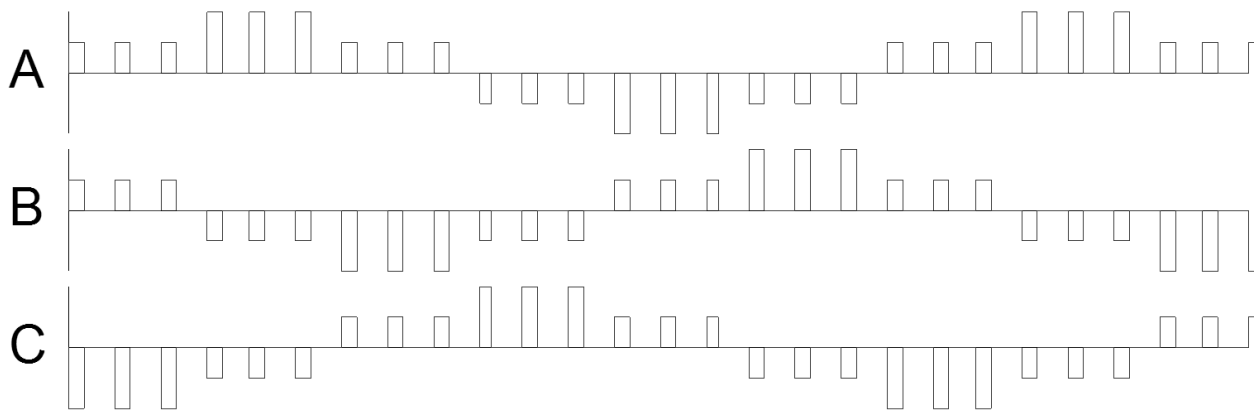


Рисунок 4.5 – Форма вихідної напруги при активному навантаженні.

Висновки

1. На цей час використання приводів компресорів та вентиляторів електровозів ЧС2 та ЧС7 за допомогою електричних двигунів постійного струму з живленням від контактної мережі є застарілим, що вимагає суттєвих витрат на його обслуговування.

2. За рахунок наявності реостатів, які ввімкнено послідовно в коло двигунів постійно втрачається потужність до 2 кВт приводу компресорів та до 3 кВт приводу вентиляторів залежно від типу двигуна, який використано.

3. На цей час більш раціональною системою живлення асинхронних приводів вважається система, яка будується за структурою «контактна мережа – автономний однофазний інвертор – трансформатор – випрямляч – автономний трифазний інвертор».

4. Аналіз механічних характеристик вентиляторів, компресорів та декількох серійних асинхронних двигунів з можливості їх використання показав, що для приводу компресора можна використовувати двигун типу АИР160М4 з незначним форсуванням частоти живлення у допустимих межах, що дає номінальну частоту обертання валу компресора. Для приводу вентиляторів слід використовувати АИР180М2. З метою забезпечення нормального регулювання за частотними законами регулювання слід використовувати закон зміни частоти та напруги гіперболічний. Це не є оптимальним з куту зору управління вентиляторною характеристикою, але знижує необхідну потужність двигуна.

5. Автономний однофазний інвертор напруги, виконаний по схемі двохтактного перетворювача постійної напруги з гальванічним розв'язанням джерела живлення та навантаження та ємнісним подільником вхідної напруги. Виконує стабілізацію напруги живлення інверторів.

6. Автономний трифазний інвертор напруги для живлення приводу компресора, розрахований на роботу за алгоритмом амплітудно-імпульсної модуляції з кутом відкритого стану

						Лист
						80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

транзисторів 180 ел. град. Це дозволяє використання достатньо простих схемних рішень системи управління.

7. Автономний трифазний інвертор напруги для живлення приводу вентиляторів, розрахований на роботу за алгоритмом широтне-імпульсної модуляції та виконує управління за гіперболічним законом зміни напруги та частоти. Для цього вибрано вузол системи управління на основі мікроконтролера.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Раков В. А. Пассажирский электровоз ЧС2/ В. А. Раков – М.: Транспорт, 1976. – 320 с.
2. ЧС2 [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/ЧС2>
3. Электровозы и электропоезда [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://electri4ka.com/loc.html>
4. ЧС7 [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/ЧС7>
5. Карасев И. И. Локомотивной бригаде об электровозе ЧС7. / И. И. Карасев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 223 с.
6. Раков В. А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза, 1976–1985. / В. А. Раков. – М.: Транспорт, 1990. – 238 с.
7. 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.
8. 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.
9. Гейлер Л. Б. Основы электропривода / Гейлер Л. Б. – Мн.: Вышэйш. школа, 1972. – 608 с.
10. Солодунов А. М. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями./ Солодунов А. М., Иньков Ю. М. и др. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
11. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Бурков А. Т. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
12. Компания ПО «Электромотор». [Электрон. ресурс] – Режим доступа: http://electronpo.ru/dvigatel_air180m
13. М. М. Казачковський. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навч. посібник для студ. вузів. – Д. : НГА України, 2000. – 196 с.
14. IGBT electronics. Каталог. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: http://www.igbt.ru/igbt_mod.aspx

						Лист
						82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

15. Партала О. Н. Радиоконпоненты и материалы: справочник / Партала О. Н. – К.: Радиоаматор, М.: КУБК-а, 1998, – 720 с.
16. Северенс Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Пер. с англ. под ред. Л. Е. Смольникова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
17. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / Воронин П. А. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2005. – 384 с.
18. Скороход Ю. Ю. Сравнительный анализ потерь мощности в высоковольтных статических преобразователях [Электрон. ресурс] / Ю. Ю. Скороход // Электронный научный журнал «Исследовано в России» –2007. – Режим доступа: <http://zhurnal.apec.relarn.ru/articles/2007/132.pdf>
19. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
20. Електроніка та мікросхемотехніка: Завдання на курсову роботу з методичними вказівками для студентів заочної форми навчання. / Дніпропетр. нац. ун-т залізничн. трансп.; Укл: Білухін Д.С. Дніпропетровськ. 2004. – 28 с.
21. М. Мухин. Трехфазный ток – это очень просто. / Мухин М. – Радио, вып. 11, 1999. – С. 54-55.
22. Бирюков С.А. Применение цифровых микросхем серий ТТЛ и КМОП. – М.: ДМК, 2000. – 240 с.
23. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемо техніка. Теорія і практикум. - К.: Каравела, 2003. - 368 с.
24. Простая схема управления трехфазным инвертором напряжения [Электрон. ресурс] – Режим доступа: http://www.kedr-npp.ru/schemes/prostaya_shema_invertor.shtml.

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

1. Схема живлення допоміжних кіл електровоза ЧС7
2. Функціональна схема перетворювача
3. Механічні характеристики асинхронного двигуна АИР160М2 приво­ду компресора
4. Механічні характеристики асинхронного двигуна АИР160М4 приво­ду компресора
5. Механічні характеристики асинхронного двигуна АИР180М2 приво­ду вентиляторів
6. Силова схема статичного перетворювача кіл власних потреб електро­возів ЧС2 та ЧС7
7. Часові діаграми напруг трансформатора та виходу випрямляча
8. Схема керування автономним інвертором напруги приводів вентиляторів

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84