Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШВИДКІСНОГО ДВОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.42.10.24.01 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273 освітньої програми
«Електровози та електропоїзди»
Русанов В. І.

Керівник: доцент, канд. техн. наук
Семененко О. І.

Рецензент: професор, д-р техн. наук
Крашенінін О. С.

2024

Український державний університет залізничного транспорту
Факультет механіко-енергетичний
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»
Освітня програма «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
_____ М.М. Бабаєв
(підпис)
«26» грудня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Русанову Владиславу Ігоровичу

1. Тема «Модернізація електроприводу швидкісного двосистемного електропоїзда»
керівник Семененко Олександр Іванович, доцент, канд. техн. наук,

затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «02» жовтня 2024 року № 42.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «25» грудня 2024 року.
3. Вихідні дані:
тяговий перетворювач двосистемного електропоїзда;
номінальна напруга контактної мережі постійного струму, В – 3000;
номінальна напруга контактної мережі змінного струму, В – 25000;
номінальна потужність асинхронного двигуна, кВт – 500.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1 Аналіз структур тягових перетворювачів двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами. 2 Вибір схеми тягового перетворювача для модернізації двосистемного електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами. 3 Розрахунок основних параметрів тягового перетворювача модернізованого двосистемного електропоїзда. 4 Охорона праці при проведенні модернізації електроприводу. 5 Визначення економічного ефекту від застосування нових перетворювачів у системі тягового електроприводу швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами.
5. Перелік ілюстративного матеріалу:
1 Титульний аркуш – один слайд;
2 Об’єкт і мета дослідження – один слайд;
3 Спрощена силова схема тягового перетворювача двосистемного швидкісного електропоїзда Хюндай – один слайд;

4 Силова структурна схема міжрегіонального двосистемного швидкісного електропоїзда ЕКр-1 – один слайд;
5 Структура бортової системи швидкісного електропоїзда ЕКр-1– один слайд;
6 Трифазний мостовий дворівневий інвертор напруги на IGBT – один слайд;
7 Формування вихідної напруги трифазним інвертором з двополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією – один слайд;
8 Трифазний трирівневий інвертор напруги – один слайд;
9 Діаграми напруг тягового трирівневого інвертора напруги при відсутності широтно-імпульсної модуляції – один слайд;
10 Перетворювач бортової системи живлення швидкісного модернізованого двосистемного електропоїзда – один слайд;
11 Економічний ефект від впровадження розробки – один слайд;
12 Висновки – один слайд.
6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, к.е.н.		

7 Дата видачі завдання «1» жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Аналіз існуючих і нових рішень по будові тягового перетворювача швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами	1.10-10.10.24	
Порівняння та вибір варіанта структури тягового перетворювача швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами	11.10-30.10.24	
Розрахунок тягового перетворювача швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами	01.11-20.11.24	
Розрахунок економічного ефекту від модернізації двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами	21.11-25.12.24	

Студент _____ Русанов В. І.
(підпис)

Керівник _____ Семененко О. І.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 12 слайдів презентації, 85 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 18 рисунків, 6 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: АСИНХРОННІ ДВИГУНИ, ШВИДКІСНИЙ ДВОСИСТЕМНИЙ ЕЛЕКТРОПОЇЗД, ТРИФАЗНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, ВХІДНИЙ ЧОТИРИКВАДРАНТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ.

Об’єктом дослідження є електромагнітні процеси в напівпровідникових перетворювачах швидкісних двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами.

Метою дослідження є підвищення ефективності напівпровідникових перетворювачів швидкісних двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами.

У роботі проведено дослідження існуючих та перспективних варіантів структур напівпровідникових перетворювачів двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами. В результаті аналізу запропоновано для швидкісних двосистемних електропоїздів з асинхронними двигунами застосовувати тяговий перетворювач на базі трифазного мостового трирівневого інвертора напруги. В якості вхідних перетворювачів застосовано випрямляч струму з широтно-імпульсним регулюванням. Визначено основні параметри, проведено вибір і тепловий розрахунок біполярних транзисторів з ізольованим затвором силових ключів та фільтрового обладнання тягових перетворювачів швидкісних двосистемних електропоїздів з асинхронними двигунами.

ABSTRACT

This qualification work includes 12 presentation slides, 97 sheets of A4 explanatory note, including 18 figures, 5 tables, 12 references.

Keywords: ASYNCHRONOUS MOTORS, HIGH-SPEED DUAL-SYSTEM ELECTRIC TRAIN, THREE-PHASE VOLTAGE INVERTER, INPUT FOUR-QUADRANT CONVERTER, BIPOLAR TRANSISTORS WITH INSULATED GATE.

The object of study is electromagnetic processes in semiconductor converters of high-speed dual-system electric trains with asynchronous traction motors.

The aim of the study is to increase the efficiency of semiconductor converters of high-speed dual-system electric trains with asynchronous traction motors.

The paper investigates existing and promising variants of semiconductor converter structures for two-system electric trains with asynchronous traction motors. As a result of the analysis, it is proposed to use a traction converter based on a three-phase bridge three-level voltage inverter for high-speed dual-system electric trains with asynchronous motors. A current rectifier with pulse-width control is used as an input converter. The main parameters, selection, and thermal calculation of bipolar transistors with an isolated gate of power switches and filter equipment of traction converters of high-speed dual-system electric trains with asynchronous motors are determined.

Зміст

Вступ…….…….... 8
1 Аналіз структур тягових перетворювачів двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами …….……..…….…… 10
1.1 Структура тягового перетворювача двосистемного електропоїзда Хюндай залізниць України .....…… 10
1.2 Структура тягового перетворювача міжрегіонального двосистемного швидкісного електропоїзда ЕКр-1…….……..…….…..… 15
1.3 Трифазний мостовий дворівневий інвертор напруги ……..…… 20
1.4 Схема силових кіл моторного вагону електропоїзда з трифазними трирівневими інверторами напруги……...… 24
2 Вибір схеми тягового перетворювача для модернізації двосистемного електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами ……... 30
3. Розрахунок основних параметрів тягового перетворювача модернізованого двосистемного електропоїзда……..….. 34
3.1 Розрахунок основних параметрів тягового трифазного мостового інвертора……...……...…….. 34
3.2 Тепловий розрахунок транзисторів ключів тягового інвертора…….. 39
3.3 Розрахунок чотириквадрантного вхідного перетворювача двосистемного електропоїзду ……..…..… 41
3.4 Розрахунок елементів фільтра інвертора напруги…….……..… 50
3.5 Розрахунок конструкції дроселя фільтра…….. 53
3.6 Розрахунок перетворювача бортової системи живлення двосистемного електропоїзда ……..……... 57

4 Охорона праці при проведенні модернізації перетворювача…… 63
4.1 Коротка характеристика проєктованого об’єкту …….... 63
4.2 Заходи з охорони праці для слюсарів по ремонту електричного рухомого складу при проведенні модернізації ……..…..… 64
4.3 Розрахунок заземлюючого контуру цехового обладнання, працюючого під напругою 380 В …….…… 68
5 Визначення економічного ефекту від застосування нових перетворювачів у системі тягового електроприводу швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами ……...……..… 71
5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення …..……..... 71
5.2 Розрахунок економічного ефекту ……..… 71
Висновки ……... 82
Список використаних джерел…….. 84
Додаток А ……. 86

Вступ

На сьогодні різними закордонними фірмами виготовляється широкий спектр високовольтних напівпровідникових керованих швидкодіючих приладів, використання яких дозволяє виготовляти енергоефективні перетворювачі для тягових електроприводів змінного струму на базі безколекторних двигунів [1, 2]. Новий тяговий електрорухомий склад залізниць, який уже випускається в Україні або проєктується на заміну існуючим застарілим зразкам, повинен обладнуватися сучасними енергоефективними системами тягового електроприводу на основі використання напівпровідникових перетворювачів.

Застосування тягових перетворювачів, що створюються на базі трифазних інверторів напруги разом з безколекторними тяговими двигунами дозволяє відмовитись від уже застарілого електроприводу постійного струму з реостатно-контакторною системою керування. У випадку застосування їх на електрорухомому складі це забезпечує значне зменшення маси і габаритних розмірів силового обладнання, що дуже важливо для транспортних засобів. Як відомо, раніше створити безколекторний, а саме асинхронний тяговий електропривод, без напівпровідникових перетворювачів не вдавалося через значні труднощі, що виникають при забезпеченні плавного регулювання частоти обертання тягового електродвигуна та створенні необхідного обертального моменту на валу [1].

Сучасні напівпровідникові тягові перетворювачі електрорухомого складу повинні забезпечувати: плавне безступінчате регулювання швидкості, перехід від режиму тяги до електричного гальмування та ін. Також відомо, що застосування ефективного електричного рекуперативного гальмування з поверненням енергії в мережу дозволяє суттєво економити електричну енергію, що витрачається на тягу поїздів.

Крім указаних можливостей та переваг застосування тягового

асинхронного електроприводу з напівпровідниковими перетворювачами на електричному рухомому складі залізниць дозволяє:

- збільшити у 1,5-2 рази потужність;
- підвищити на 20-30% можливості зчеплення коліс з рейками;
- знизити експлуатаційні витрати більше ніж на 30 %.

Традиційно на двосистемних електропоїздах в тяговому електроприводі використовують трифазні мостові інвертори напруги, які є дворівневими. Застосування замість дворівневого інвертора трирівневого інвертора напруги з послідовним поєднанням транзисторних ключів на базі високовольтних біполярні транзистори з ізольованим затвором надає можливість підвищити ефективність тягового електроприводу [1, 2]. Пов'язано це з тим, що суттєво підвищується якість вихідної трифазної напруги, внаслідок чого вже будуть не потрібні дуже важкі вихідні силові фільтри та знизяться втрати енергії в асинхронних тягових двигунах.

Модернізація тягового перетворювача для двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами на основі трифазних трирівневих інверторів напруги при застосуванні сучасних напівпровідникових силових приладів є основною задачею магістерської кваліфікаційної роботи.

1 Аналіз структур тягових перетворювачів двосистемних електропоїздів з асинхронними тяговими двигунами

1.1 Структура тягового перетворювача двосистемного електропоїзда Хюндай залізниць України

Для електрифікованих залізниць України в Південній Кореї був розроблений та виготовлений двосистемний швидкісний електропоїзд Хюндай з асинхронними тяговими двигунами зі швидкістю руху до 176 км/год. Такі зразки електропоїздів з'явилися в Україні уже в 2010 році в період підготовки транспортної структури країни до Євро-2012 для забезпечення пасажирських перевезень.

На рис. 1.1 для спрощення наведена частина силової електричної схеми тягового перетворювача електропоїзда Хюндай без вхідних кіл, головного (тягового) трансформатора та навантаження: чотирьох тягових асинхронних електродвигунів, що приєднуються до перетворювача за паралельною схемою.

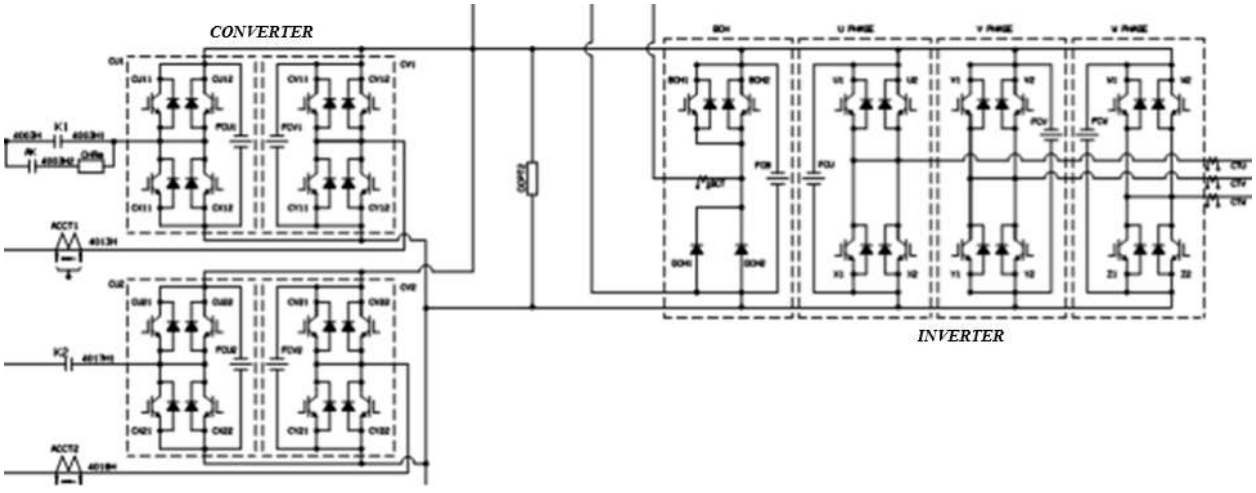


Рисунок 1.1 – Спрощена силова схема тягового перетворювача моторного вагону електропоїзда Хюндай

Якщо двосистемний електропоїзд споживає енергію від контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ, то до вхідного перетворювача і далі до трифазного інвертора напруги енергія надходить зі сторони головного трансформатора, який не показаний на схемі (рис. 1.1). Блок вхідного чотириквадрантного перетворювача, який позначений на схемі як CONVERTER (рис. 1.2), виконаний на базі силових біполярних транзисторів з ізольованим затвором (БТІЗ – англійською IGBT), що входять до складу двоквадрантних ключів із знакозмінним струмом.

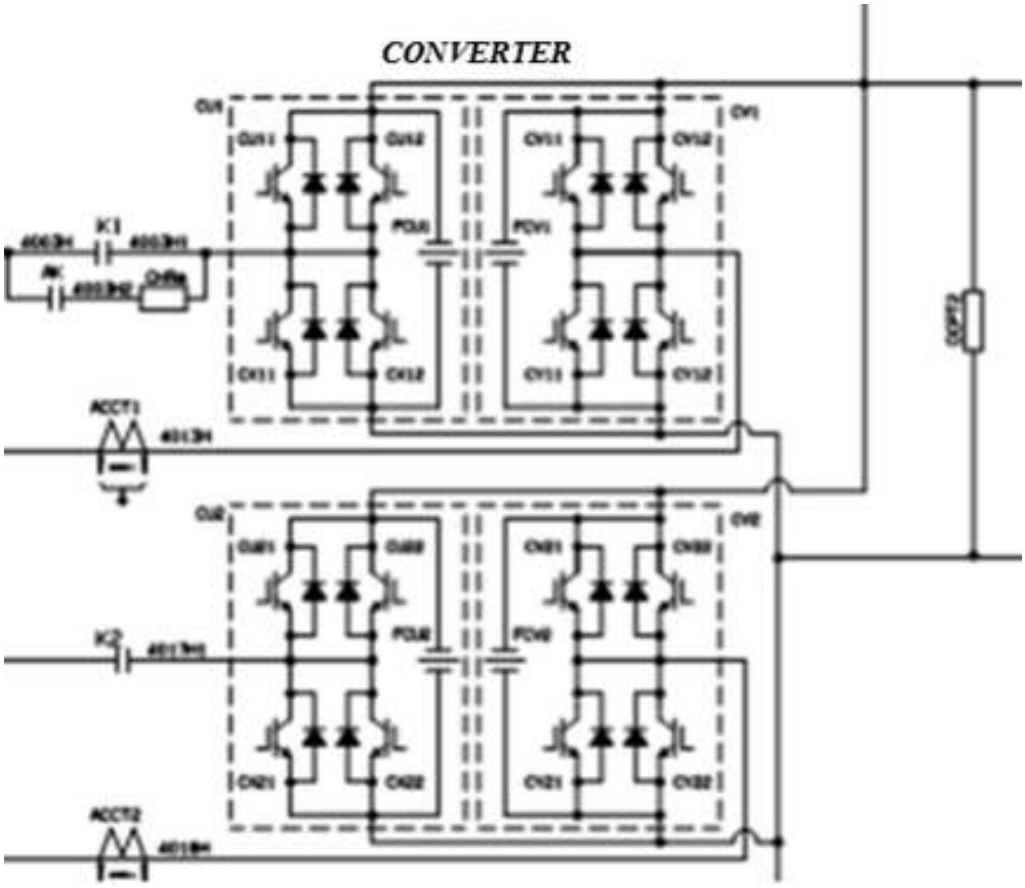


Рисунок 1.2 – Блок вхідного чотириквадрантного перетворювача моторного вагону електропоїзда Хюндай

Для зниження низькочастотних пульсацій вихідної напруги постійного струму з подвійною частотою мережі 100 Гц застосований резонансний фільтр та ємнісний фільтри – для зниження пульсацій у широкому діапазоні частот.

Вхідний чотириквадрантний перетворювач перетворює вхідну енергію змінного струму, що подається від вторинної обмотки головного трансформатора, в енергію постійного струму напругою 3000 В та подає її на вхід блоку трифазного інвертора напруги INVERTER рис. 1.1 та рис. 1.3. Для підвищення потужності застосовуються дві мостові схеми вхідних перетворювачів, виходи яких підключені паралельно до входу блоку трифазного інвертора напруги. При живленні від тягової мережі постійного струму напруга 3000 В від струмоприймача та вхідних ланок енергія подається на той же вхід блоку INVERTER через відповідні контактори.

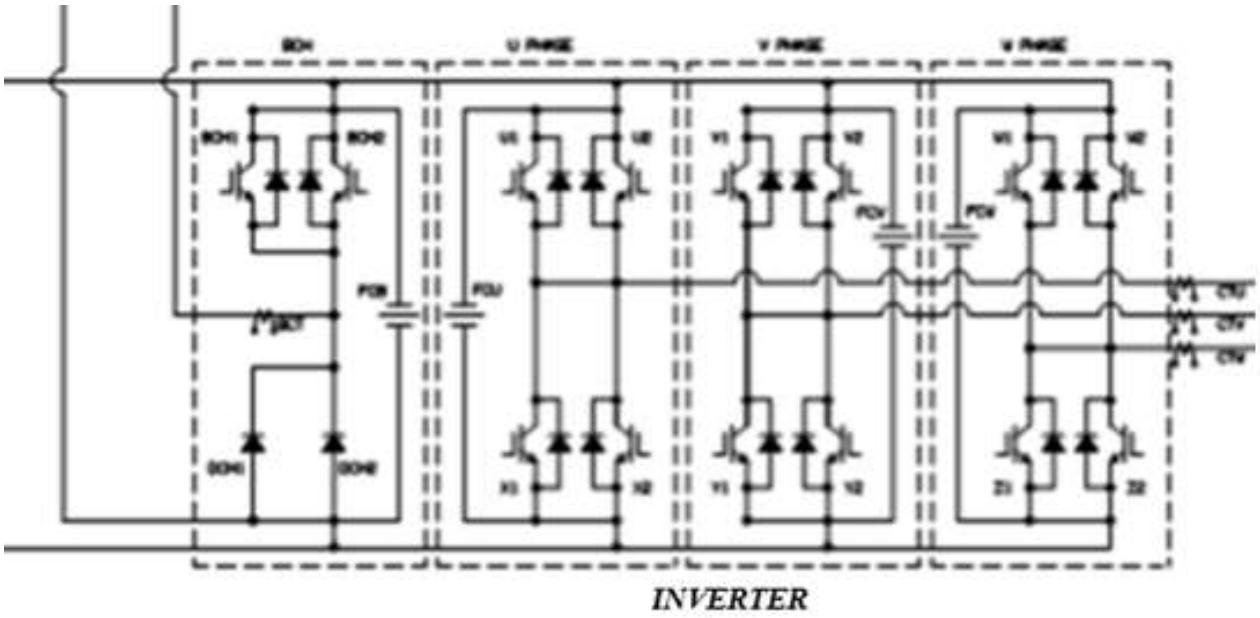


Рисунок 1.3 – Блок трифазного інвертора напруги INVERTER моторного вагону електропоїзда Хюндай

Блок трифазного інвертора напруги INVERTER рис. 1.3, що реалізований на базі двоквадрантних ключів із знакозмінним струмом на IGBT, формує вихідну трифазну напругу. Інвертор за рахунок регулювання частоти та амплітуди трифазної напруги регулює частоту обертання тягових двигунів. До вихідного блоку, який виконано за трифазною мостовою схемою інвертора напруги, приєднано чотири тягові асинхронні двигуни двох візків

моторного вагону. Номінальна потужність одного двигуна складає 250 кВт, тобто сумарна потужність всіх чотирьох електродвигунів моторного вагону – 1000 кВт.

В середній частині силової схеми (рис. 1.3) розміщена схема реостатного гальма, що регулюється за допомогою електронного ключа на базі двох паралельно увімкнених IGBT із увімкненими зустрічно паралельними діодами. Зворотні діоди забезпечують протікання струму гальмування під час паузи, тобто при вимкненому електронному ключі регулятора, чим убезпечують роботу схеми від негативних наслідків, що виникають під впливом перенапруг. Потужний гальмовий резистор винесений за межі силової схеми і не показаний на рис. 1.1.

У вхідному чотириквадрантному перетворювачі та трифазному інверторі напруги двосистемного електропоїзда Хюндай, схема яких зображена на рис. 1.1, застосовані силові IGBT шістдесят п’ятого класу. Тобто вони розраховані на максимальну напругу 6500 В, як і у більшості подібних силових схемах електричного рухомого складу залізниць з тяговими асинхронними двигунами, що отримують живлення від контактної мережі постійного струму напругою 3000 В. Передбачається подвійний запас за напругою, що пов’язано з можливими режимами рекуперативного гальмування з підвищенням напруги до 4000 В та можливими перенапругами в тяговій мережі.

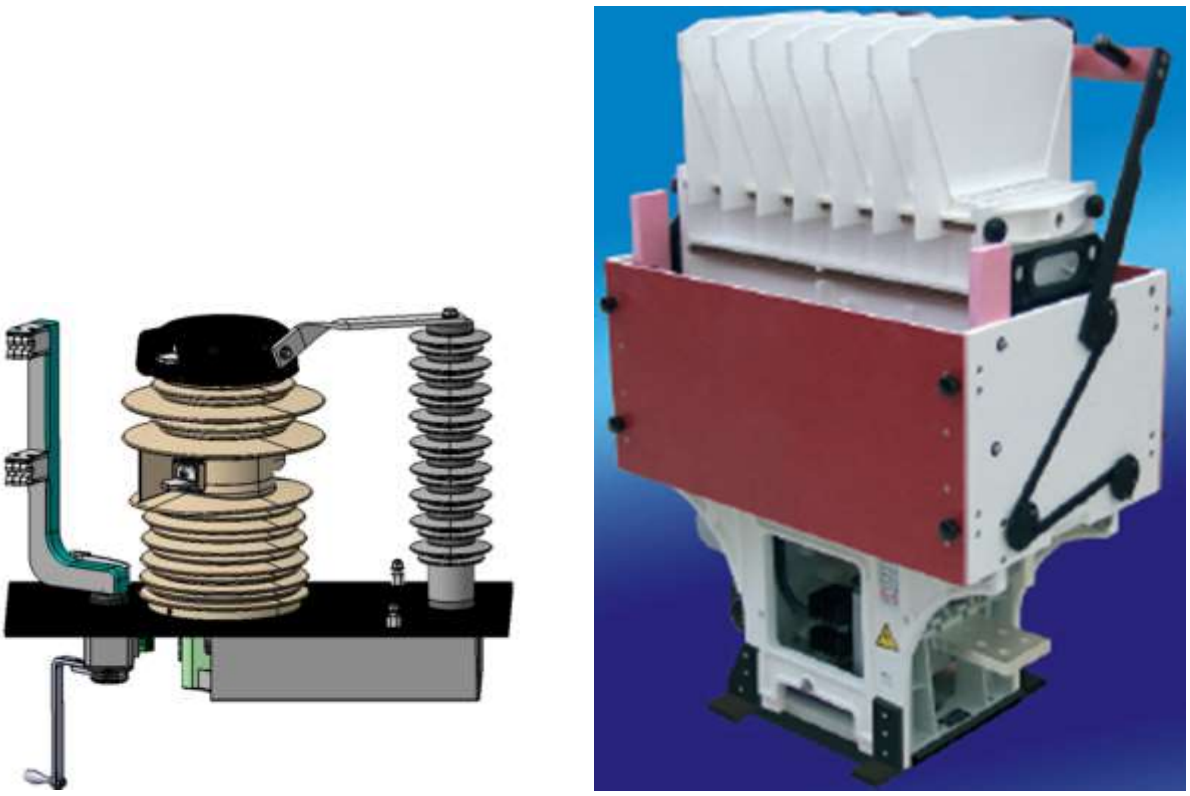
Для захисту силової схеми двосистемного електропоїзда Хюндай від атмосферних (грозових) та мережних (внутрішніх або комутаційних) перенапруг на вході від контактної мережі однофазного змінного струму напругою 25 кВ та контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ застосовані розрядники відповідно типу POLIM H 30N та POLIM H 4.2ND, що виготовляються фірмою ABB та наведені на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Розрядники типу POLIM H 30N та POLIM H 4.2ND

Для захисту від струмових перевантажень та струмів коротких замикань на вході змінного струму силової схеми двосистемного електропоїзда також застосовані вакуумний вимикач «Macs Assy» та високовольтний розрядник «Assy» на напругу змінного струму мережі 25 кВ (рис. 1.5, а). При використанні живлення від мережі постійного струм для захисту від струмових перевантажень та струмів коротких замикань застосований швидкодіючий вимикач постійного струму напругою 3 кВ (рис. 1.5, б).

Позитивний результат від роботи швидкодіючих вимикачів полягає у обмеженні часу можливої дії аварійних режимів, які виникають у високовольтному електрообладнанні. Для силового перетворювального обладнання, швидкодія ключів якого дуже висока передбачається блокування імпульсів керування з повним вимиканням силових керованих приладів.



а *б*

Рисунок 1.5 – Заземлюючий вимикач, вакуумний вимикач «MACS Assy» і високовольтний розрядник «Assy» на напругу 25 кВ (*а*) та швидкодіючий вимикач «Secheron» постійного струму напругою 3 кВ (*б*)

1.2 Структура тягового перетворювача міжрегіонального двосистемного швидкісного електропоїзда ЕКр-1

Для експлуатації на електрифікованих залізницях України був розроблений та виготовлений ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» міжрегіональний двосистемний швидкісний електропоїзд ЕКр-1 з асинхронними тяговими двигунами. Він призначений для забезпечення пасажирських перевезень мережею залізниць, що спеціально підготовлена для швидкісного руху, а саме із швидкістю руху до 200 км/год. Структура силового електрообладнання моторного вагону електропоїзда ЕКр-1 схожа зі

структурою моторного вагону електропоїзда Хюндай, але має ряд відмінностей, які можна розглянути за рис. 1.6.

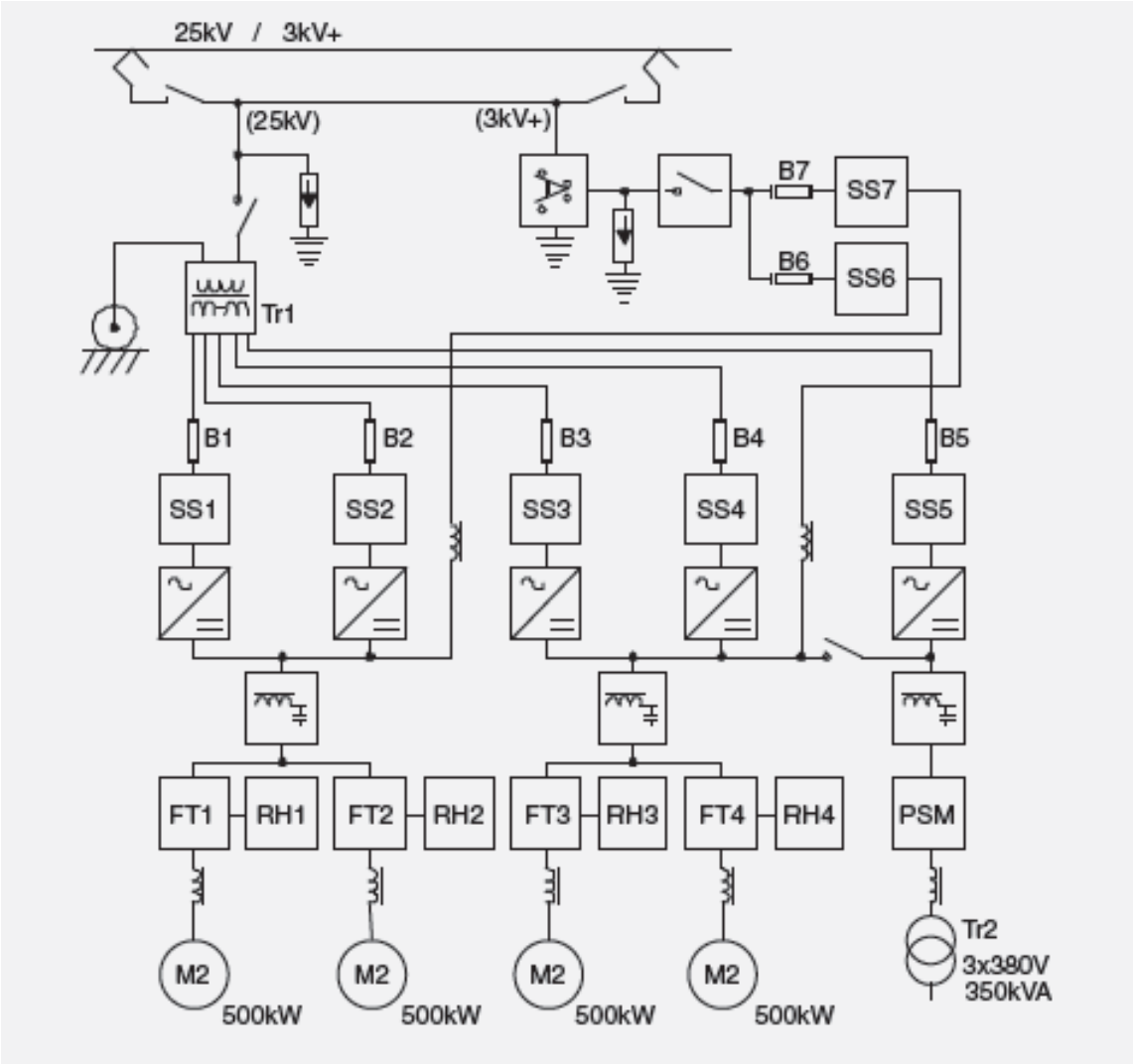


Рисунок 1.6 – Структура силового електрообладнання моторного вагону

Так як потужність асинхронного тягового двигуна моторного вагону електропоїзда ЕКр-1 складає 500 кВт, тобто вона збільшена вдвічі у порівнянні з потужністю тягових двигунів електропоїзда Хюндай, то в структурі силового електрообладнання на рис. 1.6 застосовуються чотири тягові інвертори FT1-FT4 на кожен двигун. Вони виконані за широко розповсюдженою трифазною мостовою схемою інвертора напруги, що наведена на рис. 1.7. Для зниження пульсацій синусоїдального вихідного струму застосовується силовий

індуктивний фільтр, що досить суттєво ускладнює та конструкцію тягового перетворювача.

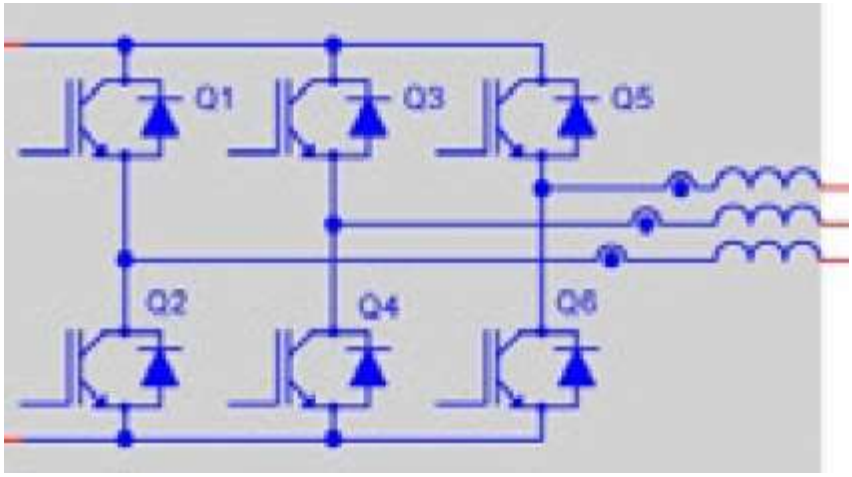


Рисунок 1.7 – Трифазна мостова схема інвертора напруги моторного вагону електропоїзда ЕКр-1

Якщо двосистемний електропоїзд ЕКр-1 отримує енергію від контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ, то до трифазних інверторів напруги енергія надходить зі сторони головного трансформатора, який позначений на рис. 1.6 TR1 та блоки вхідних чотириквадрантних перетворювачів. Коли живлення відбувається від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, то енергія подається відразу до трифазних інверторів напруги через відповідні силові контактори SS6 та SS7.

Управління перетворювачем здійснюється за технологією DSP (Digital Signal Processor) з застосування FOC SVPWM (Field Oriented Space Vector Pulse Width Modulation). У діапазоні високих швидкостей, система співпрацює з синхронізованою широтно-імпульсною модуляцією, що призводить до зменшення втрат і шум. Система управління забезпечує розгін з постійним крутним моментом і малими втратами потужності. Електропривод може працювати з реостатним або рекуперативним гальмуванням. Використання інверторної системи гарантує дуже хороші параметри як в режимі тяги, так

ідеальну стабілізацію рушійного моменту.

Як і в двосистемного електропоїзда Хюндай в силовій структурі моторного вагону електропоїзда ЕКр-1 (рис. 1.6) застосовані схеми реостатного гальма RH1-RH4, що регулюються за допомогою електронних ключів. Гальмівні резистори з нержавіючої сталі гарантують тривалий термін служби та низький рівень шуму. Застосована система збірних шин у поєднанні з якісним драйвером IGBT гарантує безвідмовну роботу схеми. Це також виключає можливість вторинних пошкоджень у разі виходу з ладу силового транзистора.

Застосовувані поліпропіленові конденсатори фільтру забезпечують тривалий термін служби та стійкість системи до змін напруги в тяговій мережі. Крім того, система інвертора також захищена тиристорним замикачем. Інвертор відповідає вимогам стандартів UIC і EN щодо рівня безпеки та електромагнітної сумісності. Система перетворювачів має дуже низькі рівні низькочастотних перешкод, створюваних для мережі. Інвертор оснащений системою примусового повітряного охолодження і працює в діапазоні температур від –40 °С÷+40 °С. Відсутність охолоджуючої рідини підвищує надійність і знижує експлуатаційні витрати електропоїзда. Діагностика та управління тяговим інвертором – через інтерфейс CANbus.

В структурі силового електрообладнання моторного вагону електропоїзда рис. 1.6 також показаний трифазний мостовий інвертор напруги PSM-350 бортової системи живлення рис. 1.8 з роздільним трифазним трансформатором TR2. Допоміжне електроустаткування електропоїзда отримує живлення від трансформатора TR2 при вихідній трифазній напрузі номінальною потужністю, що складає 350 кВА (330 кВт).

Допоміжне електроустаткування забезпечує: роботу тягового електрообладнання відповідно до їх заданих характеристик; живлення ланцюгів управління, живлення систем життєзабезпечення і сервісу; облік спожитої електроенергії.

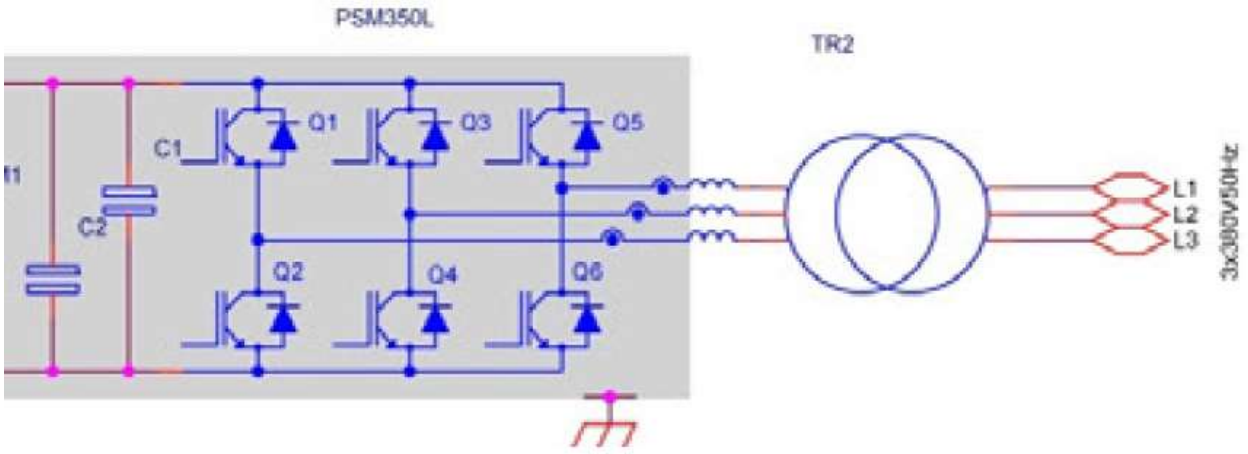


Рисунок 1.8 – Трифазний мостовий інвертор напруги з роздільним трансформатором бортової системи живлення

Для забезпечення електроенергією нетягового електроустаткування в електропоїзді ЕКр1 використовуються статичні перетворювачі і трансформатори власних потреб. Функціональна схема забезпечення електроенергією нетягових споживачів представлена на рис. 1.9.

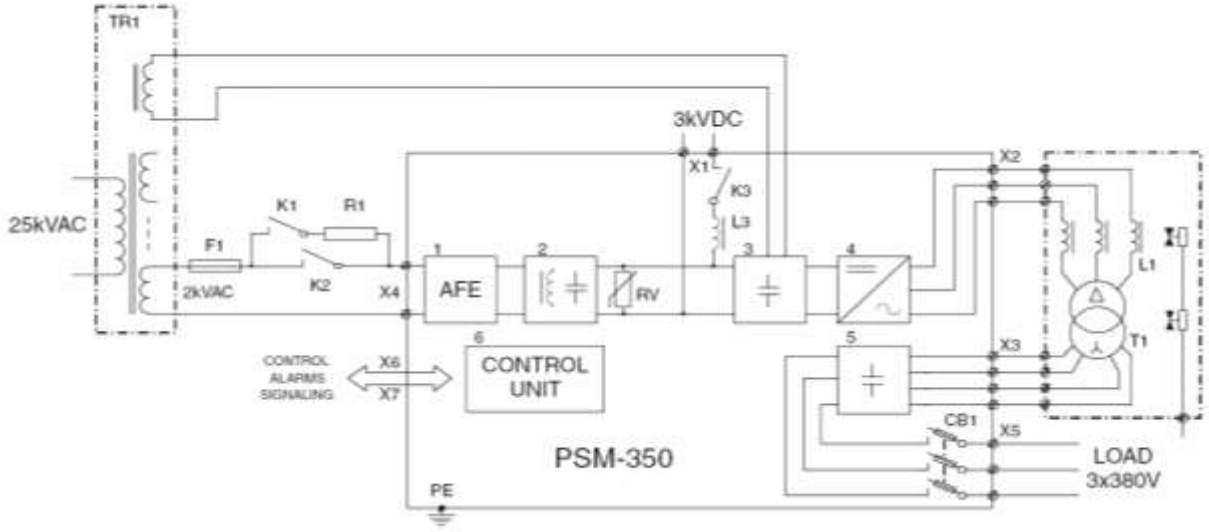


Рисунок 1.9 – Функціональна схема забезпечення електроенергією нетягових споживачів

На кожному головному вагоні є перетворювач PSM-350. Перетворювач

призначений для генерації напруги 3×380 В, частоти 50 Гц, необхідної для живлення споживачів з міжвагонної магістралі, а також для споживачів у головних вагонах електропоїзда.

Перетворювач забезпечує високу стабільність вихідних параметрів. Використані в пристрої напівпровідникові елементи за своїми параметрами забезпечують працездатність перетворювача при деяких перевантаженнях. Пристрій повністю необслуговуваний – система керування контролює параметри вихідної напруги та захищає перетворювач у разі тривалого перевантаження або короткого замикання у вихідних ланцюгах. або короткого замикання у вихідних колах.

Електрична міжвагонна магістраль подвійна і виконана таким чином, що від перетворювача, розташованого на першому головному вагоні, отримує живлення одна гілка магістралі, а від перетворювача, встановленого на другому головному вагоні, отримує живлення одна гілка магістралі, а від перетворювача, встановленого на другому головному вагоні, друга гілка.

На кожному вагоні є захисно-комутаційна апаратура, яка виключає можливість одночасної роботи контакторів зовнішньої мережі, магістралей. Нормальним є режим, коли до однієї магістралі під'єднано п'ять вагонів, а до іншої – чотири вагони.

1.3 Трифазний мостовий дворівневий інвертор напруги

В результаті аналізу встановлено, що у розглянутих вище розробках було застосовано високовольтні біполярні транзистори з ізольованим затвором у складі силових керованих ключів трифазних інверторів. У силових схемах сучасних двосистемних електропоїздів України з асинхронним приводом у якості вихідного тягового перетворювача застосовується трифазний мостовий дворівневий інвертор напруги.

Проаналізуємо роботу трифазних мостових інверторів напруги на IGBT розглянутих електропоїздів (рис. 1.10) які працюють із застосуванням двополярної синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (рис. 1.11) [2]. Принцип формування вихідної фазної та лінійної напруги за допомогою синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції представлено на графіках, що наведені на рис. 1.11. Фазні напруги u_{AN} та u_{BN} показані на графіках відносно потенціалу середньої точки трифазних обмоток асинхронного двигуна, рівень якого на графіках проведено пунктиром, нульовий рівень напруги відповідає потенціалу мінуса напруги живлення U.

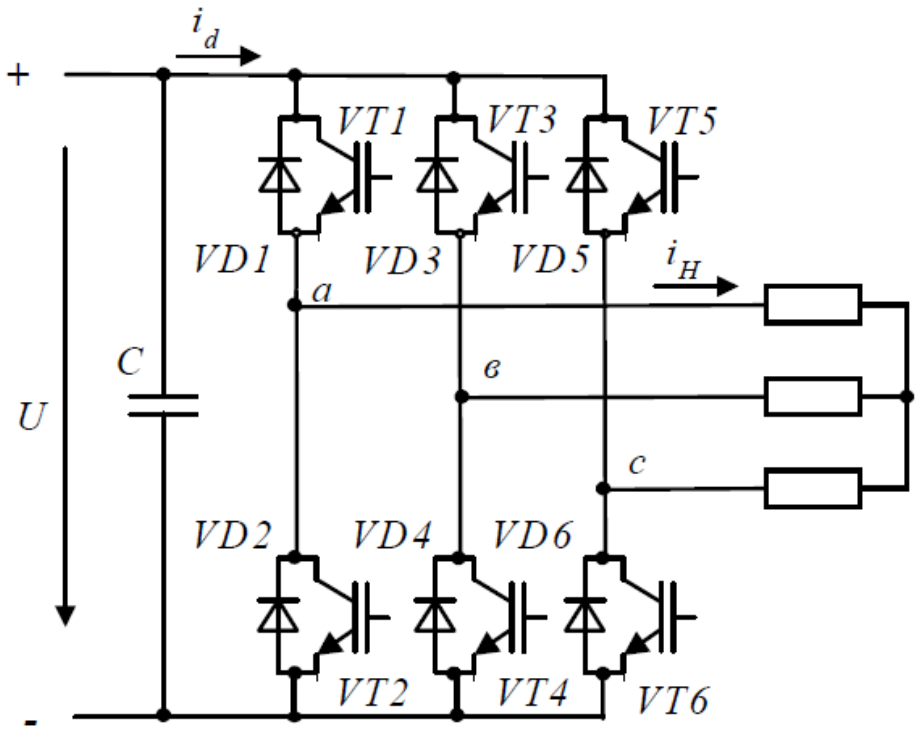


Рисунок 1.10 – Трифазний мостовий інвертор напруги на біполярних транзисторах з ізольованим затвором

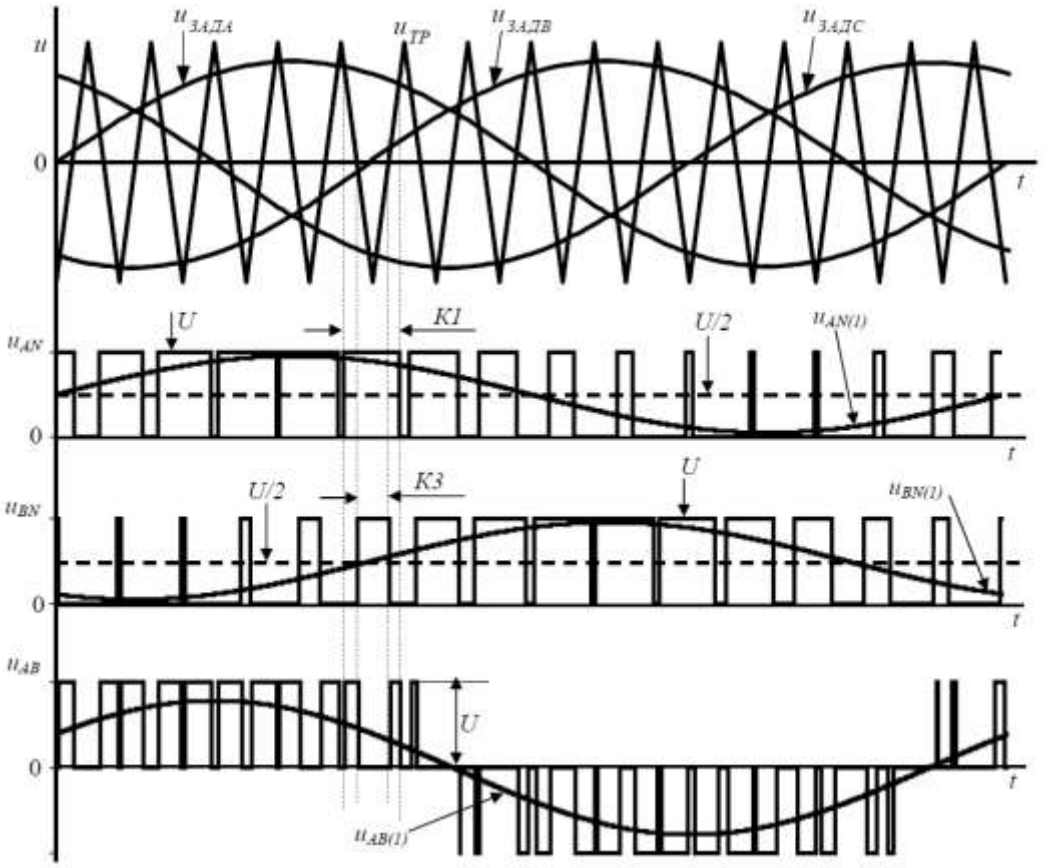


Рисунок 1.11 – Формування вихідної напруги трифазним інвертором з двополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

Для реалізації широтно-імпульсної модуляції у системі керування використовують порівняння за допомогою компараторів рівня заданої синусоїдальної напруги трьох фаз $u_{ЗАДА}$, $u_{ЗАДВ}$ та $u_{ЗАДС}$ від генератора напруги $u_{ТР}$ з частотою широтно-імпульсної модуляції, який є генератором трикутної напруги розгортки [2]. Рівень заданої синусоїдальної напруги $u_{ЗАД}$ визначає пропорційну напрузі тривалість прямокутних імпульсів вихідної напруги різних фаз трифазного мостового інвертора (рис. 1.11).

Для забезпечення двобічної провідності двоквадрантні керовані ключі (рис. 1.9) зібрані на біполярних транзисторах з ізольованим затвором та зустрічно-паралельно підключених до них діодах. Такі діоди повинні проводити струм на інтервалах, коли напрямок струму і напруги у кожній фазі трифазного інвертора напруги протилежні.

При живленні від трифазних мостових інверторів напруги (рис. 1.10) струм $i_н$ у обмотках асинхронного електродвигуна за рахунок їх значної індуктивності [1, 2] має форму близьку до синусоїди. Відомо, що на виході трифазного мостового інвертора із застосуванням двополярної синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції напруга має лише два рівня «плюс» та «мінус» напруги живлення u_{AB} (рис. 1.11), щоправда вихідна фазна напруга має більше рівнів напруги (рис. 1.12).

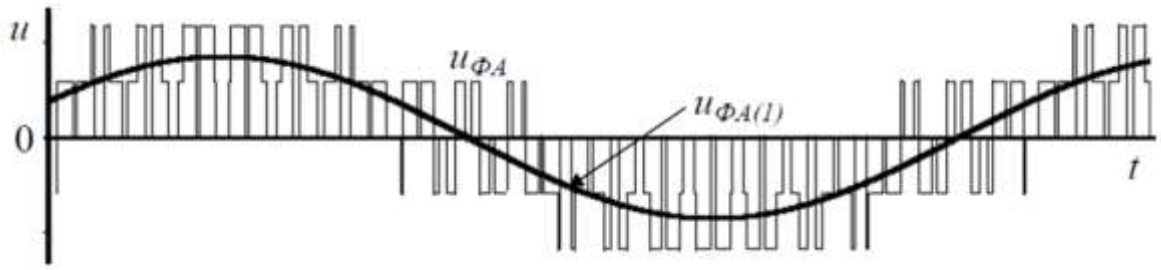


Рисунок 1.12 – Вихідна фазна напруга трифазного інвертора з двополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

Забезпечити якісніший гармонічний склад вихідної напруги дозволяє використання більш ефективної однополярної синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції, яка не може бути використана у звичайних трифазних мостових інверторах напруги. Сучасний український стандарт ДСТУ EN 50160:2014, що відповідає вимогам європейського стандарту, для мереж загального призначення [5] встановлює сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень THD для рівня напруги 0,4 кВ – 8(12) %, для рівня 6 кВ і вище – 6(8) %. Для трифазного дворівневого мостового інвертора напруги у разі використання навіть векторної широтно-імпульсної модуляції і коефіцієнта модуляції μ=1 для вихідної напруги маємо THD 53 % [2].

Це припустимо у випадку використання перетворювача для електроприводу змінного струму малої потужності, адже вищі гармоніки створюють додаткові втрати енергії у асинхронному електродвигуні й це необхідно враховувати при проєктуванні або виборі електродвигуна для

конкретного застосування [2]. Для потужних тягових електродвигунів електропоїздів такі втрати недопустимі і потрібно обов’язково застосовувати силові фільтри на виході перетворювача.

Ще більш істотнішою є проблема, пов'язана з частковими розрядами і руйнуванням ізоляції обмоток тягового асинхронного електродвигуна. При довжині кабелю, що з’єднує інвертор із електродвигуном, п'ятнадцять і більше метрів цей ефект може призводити до значних (2÷4-кратних) перенапруг на клемах асинхронного електродвигуна [2] при часі наростання імпульсу порядку однієї мікросекунди, що знижує діелектричну міцність та руйнує ізоляцію обмоток двигуна. Паразитні ємності між окремими елементами конструкції асинхронних двигунів, зокрема усередині підшипників, викликають протікання високочастотних струмів по замкненому контуру, що утворений обома підшипниками, валом та корпусом двигуна [2]. Це призводить до прискореного зношення мастильних матеріалів та до скорочення терміну експлуатації підшипників електродвигуна.

Використання дворівневого інвертора без силового вихідного фільтра не припустимо, але такі фільтри зменшують ККД тягового перетворювача електропоїзда, мають значні габаритні розміри, масу та вартість. Більш високу якість вихідної змінної напруги забезпечують багаторівневі інвертори напруги, прикладом застосування яких є схема силових кіл електропоїзда з трифазними трирівневими інверторами напруги, що розглянута нижче.

1.4. Схема силових кіл моторного вагону електропоїзда з трифазними трирівневими інверторами напруги

На електропоїзді встановлені асинхронні тягові двигуни АТД, для управління якими використовуються трифазні інвертори напруги японської фірми Hitachi, виконані на базі силових високовольтних IGBT. Це забезпечує

більш високі енергетичні характеристики у порівнянні з силовими перетворювачами на GTO-тиристорах. Причому, як і в попередніх розробках, передбачено пряме підключення трифазного інвертора напруги до контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ без вхідного понижувального перетворювача. Укрупнена схема силового перетворювача електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами номінальною потужністю 400 кВт кожен наведена на рис. 1.13 [1].

Як було сказано вище, схема трифазного інвертора напруги має пряме підключення до контактної мережі постійного струму напругою 3000 В, що стало можливим завдяки створенню надійних силових модулів IGBT з робочою напругою 3300 В і робочими струмами до 1200 А. Цьому сприяло також застосування схеми трифазного трирівневого інвертора напруги з послідовним поєднанням транзисторних ключів на високовольтних IGBT без використання спеціальних пристроїв, що вирівнюють розподіл напруги. Такі досить сучасні тягові трифазні трирівневі інвертори напруги для комплектування силової схеми електропоїзда виготовила та поставила японська фірма Hitachi, яка є відомим в світі виробником силового перетворювального обладнання.

Постійна напруга контактної мережі трифазного інвертора напруги перетворюється в трифазну змінну напругу регульовану по амплітуді та частоті. В якості тягових двигунів використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. При регулюванні амплітуди та частоти напруги сила тяги (гальмування) змінюється плавно без стрибків, характерних для систем з тяговими двигунами постійного струму і контактно-реостатними системами регулювання.

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

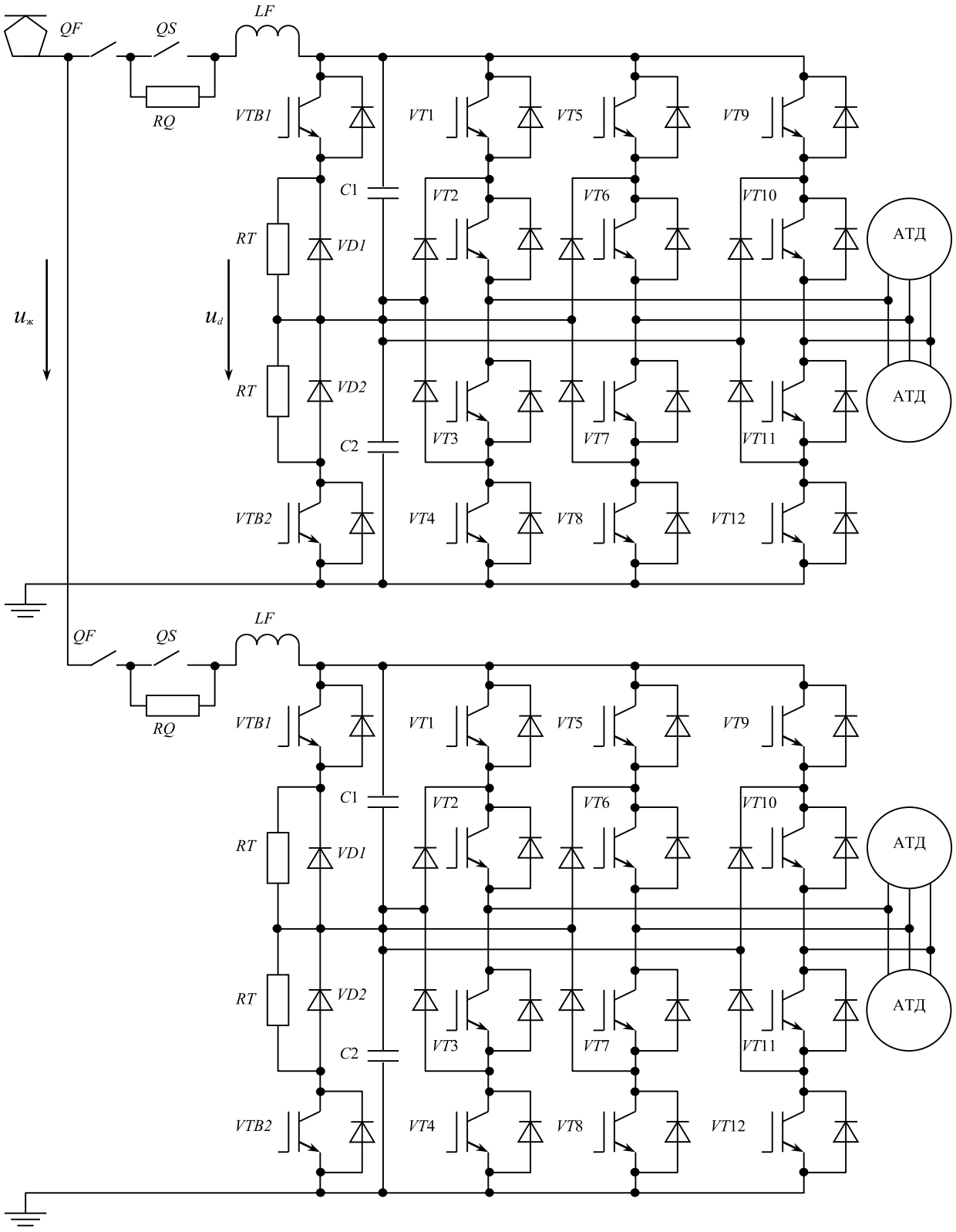


Рис. 1.13 – Схема силового тягового трифазного трирівневого інвертора напруги моторного вагону електропоїзда

На вагоні передбачено використання двох тягових перетворювачів –

кожен для управління своєю парою тягових асинхронних двигунів. Окремий перетворювач виконаний у вигляді єдиного конструктивного блоку і містить:

- трифазний мостовий трирівневий інвертор напруги, в якому кожна фаза виконана на модулях силових IGBT напругою 3,3 кВ і максимальним струмом 1200 А;

- дільник напруги живлення – конденсатори фільтра С1 і С2;

- переривник на транзисторах VTB1-VTB2 та діодах VD1-VD2 для регулювання режиму реостатного гальмування;

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

Тягові електродвигуни приєднуються по два паралельно з різних візків моторного вагону. До першого перетворювача приєднані перший і третій електродвигуни, до другого – другий і четвертий. Так вирівнюються навантаження на кожен тяговий перетворювач, оскільки коли працює дещо розвантажений перший по ходу електродвигун, то довантажений другий по ходу візка в режимі тяги (або навпаки в режимі гальмування).

Для аналізу якості вихідної напруги розглянемо діаграми напруг тягового трирівневого інвертора напруги для спрощення розгляду при відсутності широтно-імпульсної модуляції рис. 1.14 [2]. На діаграмах рівень напруги U відповідає напрузі $U_d/2$, тобто напрузі на одному з конденсаторів дільника напруги С1 або С2.

Напруга фази трирівневого інвертора напруги $u_{АО}$ має прямокутну форму (рис. 1.14) при амплітуді напівхвилі U [2]. Відносна тривалість напівхвилі складає (5/6)π. Для симетричного навантаження трирівневого інвертора напруги, з'єднаного за схемою «зірка» фазна напруга на навантаженні $u_{ФА}$ має східчасту форму (рис. 1.14) з 4 рівнів у напівхвилі (з амплітудою 1/3U). Вона

відрізняється від u_{AO} лише тим, що в ній відсутні гармоніки кратні трьом.

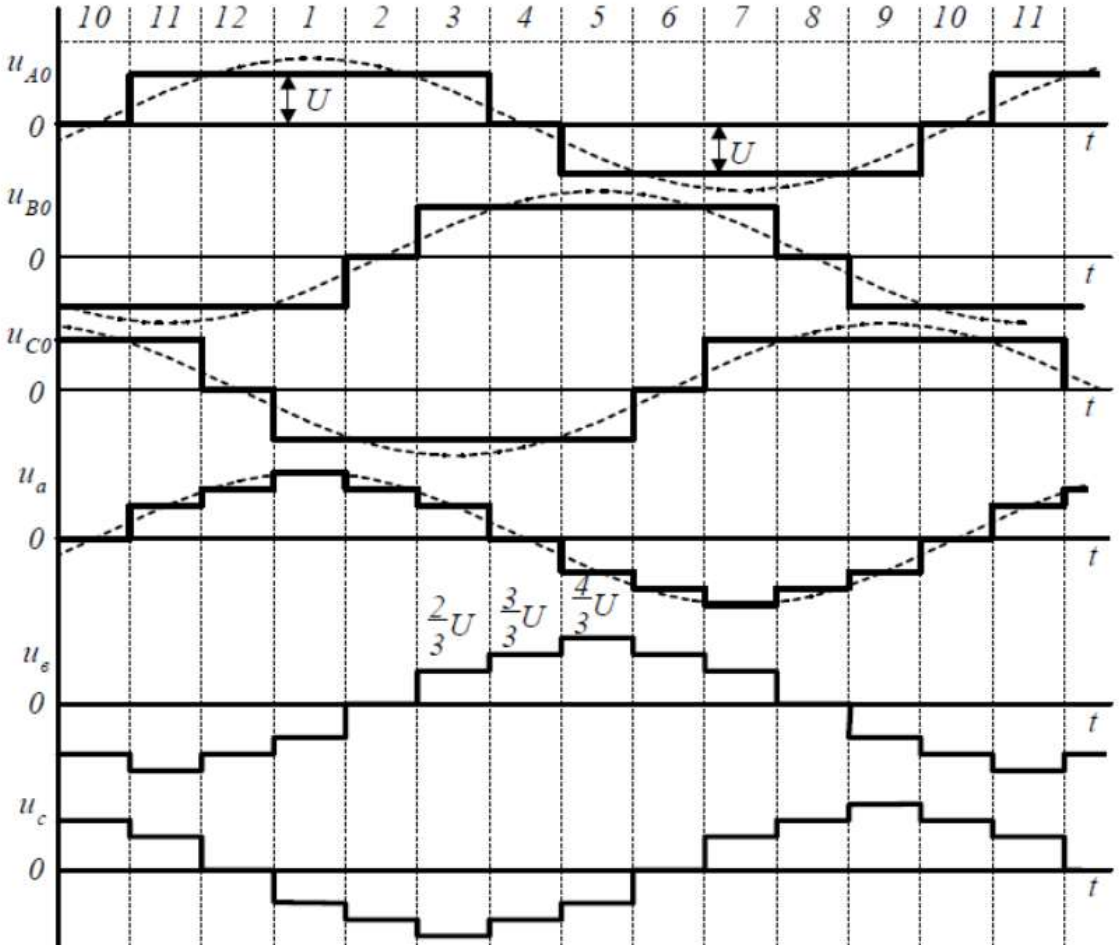


Рисунок 1.14 – Діаграми напруг тягового трирівневого інвертора напруги при відсутності широтно-імпульсної модуляції

Якщо проаналізувати амплітуди першої та вищих гармонік напруги, виходячи з розкладання в ряд Фур'є, то для вихідної фазної напруги маємо коефіцієнт гармонічних спотворень 16,67 % [2]. Як відомо, застосування трирівневих інверторів напруги дозволяє використовувати однополярну широтно-імпульсну модуляцію (діаграми фазної напруги та струму зображені на рис. 1.15), що забезпечує на відміну від дворівневих інверторів з двополярною широтно-імпульсною модуляцією можливість:

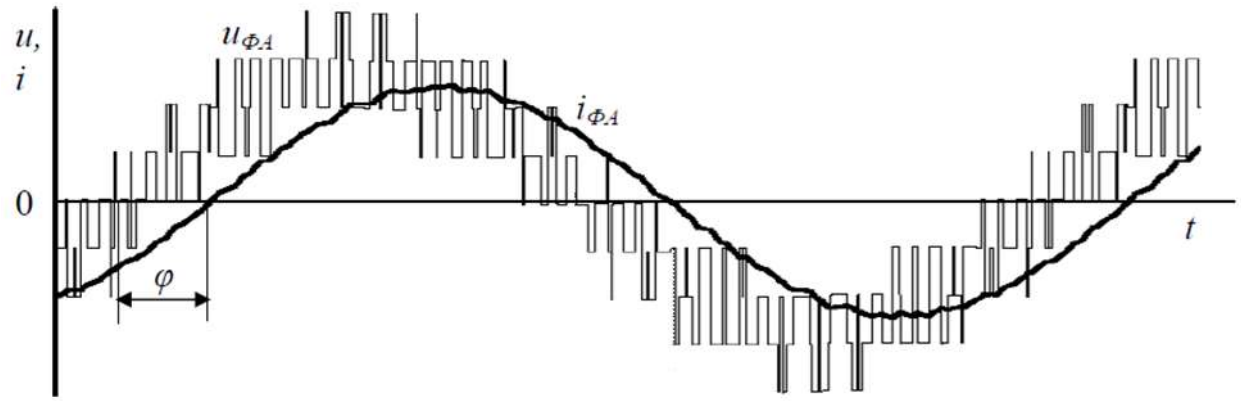


Рисунок 1.15 – Діаграма фазної напруги та струму трифазного трирівневого інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією

– поліпшити гармонічний склад вихідної напруги, що значно покращує умови роботи електродвигунів;

– зменшити швидкість наростання вихідної напруги du/dt, що значно зменшує проблеми, пов'язані з частковими розрядами і руйнуванням ізоляції обмоток електродвигунів.

Як показано вище, якісні характеристики трифазних трирівневих інверторів напруги у порівнянні з дворівневими значно вище, також вдвічі зменшена робоча напруга силових ключів схеми інверторів напруги, що важливо при підвищеній напрузі живлення перетворювачів. Суттєво знижаються статичні та комутаційні втрати енергії в силових приладах ключів при зменшенні робочої напруги, що спрощує їх охолодження. Проте через більшу складність виготовлення такі перетворювачі не так часто застосовувалися в електропоїздах з тяговими асинхронними двигунами.

2 Вибір схеми тягового перетворювача для модернізації двосистемного електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами

При виборі схеми тягового перетворювача для модернізації двосистемного електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами слід враховувати досвід розробок, що були розглянуті у попередньому розділі даної кваліфікаційної роботи. Зрозуміло, що для керування тяговими асинхронними двигунами електроприводу потрібно буде використати напівпровідниковий перетворювач, виконаний на біполярних транзисторах з ізольованим затвором.

Тягові асинхронні електродвигуни для двосистемного електропоїзда ЕКр-1, силову структурну схему якого приймаємо за базову для модернізації, мають потужність 500 кВт. Для подальшої розробки приймається саме така потужність тягових електродвигунів, та їх слід приєднувати по два паралельно. Це потрібно робити з урахуванням можливостей сучасних потужних трифазних інверторів напруги, адже сумарна номінальна потужність навантаження 1000 кВт є такою ж досяжною, як і потужність розглянутого вище інвертора напруги електропоїзда Хюндай або японської фірми Hitachi, що складає 800 кВт. Таким чином можна буде зменшити кількість перетворювального обладнання електропоїзда, крім того підключення електродвигунів з різних візків моторного вагону, як було сказано вище, забезпечить вирівнювання навантаження на кожен із двох тягових трифазних інверторів.

Аналіз розглянутих розробок показує, що у більшості силових схем сучасних електропоїздів з асинхронним приводом у якості вихідного тягового перетворювача застосовуються трифазні мостові дворівневі інвертори напруги. У них застосовані високовольтні дороговартісні біполярні транзистори з ізольованим затвором 65 класу. Для того щоб застосувати менш дороговартісні біполярні транзистори з ізольованим затвором 33 класу,

потрібно застосувати при модернізації двосистемного електропоїзда трифазні трирівневі інвертори напруги, виконані за схемою рис. 1.13.

Застосування трифазних трирівневих інверторів напруги значно покращить гармонічний склад вихідної трифазної напруги, що суттєво покращить умови роботи електродвигунів та підвищить їх термін експлуатації за рахунок зниження теплових навантажень. Також будуть зменшені втрати енергії в кожному з біполярних транзисторах з ізольованим затвором силових керованих ключів за рахунок меншого падіння напруги у ввімкненому стані менш високовольтних приладів та зниження комутаційних втрат з урахуванням вдвічі нижчої напруги комутації.

Підключення перетворювача до контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ, як і в розглянутій вище структурі силового електрообладнання моторного вагону двосистемного електропоїзда ЕКр-1 рис. 1.6, слід реалізовувати через тяговий трансформатор та вхідний чотириквадрантний перетворювач з номінальною вихідною напругою постійного струму 3 кВ. У випадку живлення модернізованого двосистемного електропоїзда від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, енергія подається відразу до трифазних інверторів напруги.

В схемі модернізованого двосистемного електропоїзда також як і в попередній версії електропоїзда буде передбачене використання рекуперативного та реостатного гальмування. При електричному гальмуванні асинхронні тягові двигуни генерують енергію змінного струму, яка випрямляється інвертором і повертається в мережу постійного струму 3 кВ або вхідним чотириквадрантним перетворювачем в мережу змінного струму 25 кВ. При відсутності навантажень в мережі електрична енергія, як у базовій для модернізації силовій схемі двосистемного електропоїзда ЕКр-1, скидається на гальмовий резистор, схема та конструкція якого буде збережена без змін.

Проведено аналіз показників трифазного мостового інвертора напруги PSM-350 бортової системи живлення рис. 1.8 та рис. 1.9 з роздільним

трансформатором TR2, що розрахований на частоту 50 Гц. Запропоновано удосконалити перетворювач бортової системи живлення за схемою рис. 2.1, що дозволить зменшити загальну масу блоку PSM-350 та роздільного трансформатора.

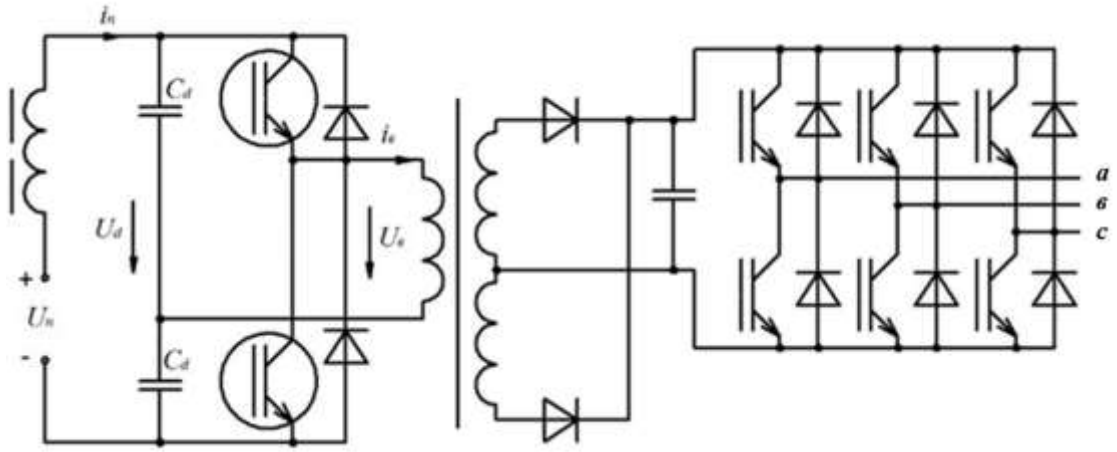


Рисунок 2.1 – Перетворювач бортової системи живлення модернізованого двосистемного електропоїзда

Напівмостовий інвертор напруги забезпечить перетворення напруги 3 кВ постійного струму від мережі або від вхідного чотириквадрантного перетворювача AFE рис. 1.9 у змінну напругу підвищеної частоти прямокутної форми. Вихідна напруга інвертора буде подаватись через індуктивний фільтр до роздільного трансформатора підвищеної частоти, де буде понижатися до необхідного рівня.

Після випрямлення простим за будовою двотактним випрямлячем напруга постійного струму порядку 600 В легко фільтруватись, бо пульсації вихідної напруги матимуть підвищену частоту. Напруга постійного струму повинна далі перетворюватись досить низьковольтним, тобто досить маловартісним, трифазним мостовим інвертором з широтно-імпульсною модуляцією у змінну напругу 3×380 В, частоти 50 Гц. Для підвищення якості вихідної напруги та струму слід використати існуючі в схемі рис. 1.9 вихідні

фільтри та систему захисту від перевантажень та струмів коротких замикань блоку PSM-350.

Як показує теорія і практика, застосування трансформатора підвищеної частоти суттєво знижує його масу та габаритні розміри. Також важливо, що перетворювач бортової системи живлення модернізованого двосистемного електропоїзда матиме більш простіший вхідний інвертор напруги на двох, а не шести високовольтних транзисторних ключах, що знизить його вартість.

3 Розрахунок основних параметрів тягового перетворювача модернізованого двосистемного електропоїзда

При проєктуванні складених перетворювачів, які отримані шляхом поєднання декількох простих, розрахунок за методикою [6] виконують для кожного з них окремо, починаючи з останнього. Такий порядок розрахунку пов'язаний з тим, що основні дані відомі або задані спочатку лише для навантаження – для асинхронних тягових двигунів. Тому ці дані стають вихідними для розрахунку трифазного мостового інвертора. Отримані результати розрахунку трифазного інвертора напруги стають вихідними для наступного розрахунку вхідного перетворювача.

3.1 Розрахунок основних параметрів тягового трифазного мостового інвертора напруги

Номінальне діюче значення першої гармоніки вихідної напруги фази трифазного трирівневого інвертора напруги (рис. 1.13) визначається як:

$$U_{в1} = \frac{U_{л1}}{\sqrt{3}}, \tag{3.1}$$

де $U_{л1}$ – номінальне діюче значення лінійної напруги живлення трифазного асинхронного електродвигуна.

Користуючись рівнянням (3.1), визначимо номінальне діюче значення першої гармоніки вихідної напруги фази трифазного мостового інвертора напруги:

$$U_{в1} = \frac{2200}{\sqrt{3}} = 1270\,\text{В}.$$

Визначаємо діюче значення першої гармоніки вихідного струму фази:

$$I_{в1} = \frac{P_н}{3U_{в1} \cdot \cos\phi_{в1}}, \qquad (3.2)$$

де $\cos\phi_{в1}$ – коефіцієнт потужності навантаження у номінальному режимі, $\cos\phi_{в1} = 0{,}91$;

$P_н$ – номінальна активна потужність навантаження перетворювача.

Оскільки в нашому випадку передбачається один перетворювач для живлення двох асинхронних тягових двигунів, то для нього номінальна активна потужність навантаження визначається як добуток номінальної потужності двигуна $P_{дн}$ на кількість двигунів n з урахуванням номінального коефіцієнту корисної дії асинхронного тягового двигуна $\eta_{дн}$, який приймаємо як середнє значення $\eta_{дн} = 0{,}94$:

$$P_н = \frac{P_{дн} \cdot n}{\eta_{дн}}.$$

$$P_н = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 2}{0{,}94} = 1064 \text{ кВт},$$

$$I_{в1} = \frac{1064000}{3 \cdot 1270 \cdot 0{,}91} = 307 \text{ А}.$$

Номінальний середній вхідний струм трифазного інвертора напруги за методикою [6] розраховується за формулою

$$I_{d\text{н}} = \frac{3K_{\text{м}}}{2\sqrt{2}\cdot\eta_{\text{ін}}} I_{\text{в1}} \cdot \cos\phi_{\text{в1}}, \qquad (3.3)$$

де $\eta_{\text{ін}}$ – номінальний коефіцієнт корисної дії інвертора, приймаємо середнє значення для таких інверторів $\eta_{\text{ін}} = 0{,}985$;

$K_{\text{м}}$ – коефіцієнт модуляції, який рівний 1,15, якщо використовується перемодуляція і 1, якщо ні. В даному випадку немає потреби у використанні режиму перемодуляції.

$$I_{d\text{н}} = \frac{3\cdot 1}{2\sqrt{2}\cdot 0{,}985}\cdot 307\cdot 0{,}91 = 302 \text{ А}.$$

Номінальний середній струм транзисторів двоквадрантних ключів трифазного інвертора напруги:

$$I_V = I_D = \frac{I_{\text{в1}}}{\sqrt{2\pi}} + \frac{I_{d\text{н}}}{6}, \qquad (3.4)$$

$$I_V = I_D = \frac{307}{\sqrt{2\pi}} + \frac{302}{6} = 173 \text{ А}.$$

Амплітудний струм ключа в номінальному режимі дорівнює:

$$I_{V\max} = I_{D\max} = \sqrt{2}\cdot I_{\text{в1}}. \qquad (3.5)$$

$$I_{V\max} = I_{D\max} = \sqrt{2}\cdot 307 = 433 \text{ А}.$$

Амплітуда напруги $U_{\max}$ та комутована напруга U_k ключа дорівнює

максимальній напрузі живлення інвертора, тобто дорівнює 4000 В. Середній комутований струм ключа, який діє як при увімкненні, так і при вимиканні, визначаємо згідно наступного рівняння:

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{в1} \ , \tag{3.6}$$

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 307 = 138 \text{ А}.$$

Для визначення частоти ШІМ трифазного інвертора напруги потрібно спочатку розрахувати відносне значення гармоніки вихідної напруги з частотною ШІМ:

$$U^*_{вш} = \frac{\sqrt{2} S_ш}{K_м}, \tag{3.7}$$

де $S_ш$ – гармоніка з частотою ШІМ в комутаційній функції, яка для трифазного інвертора дорівнює 0,312.

$$U^*_{вш} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0{,}312}{1} = 0{,}44 \, .$$

Для якісного формування вихідної напруги потрібна частота ШІМ (частота перемикань транзисторних ключів) трифазного інвертора напруги не нижче значення, розрахованого із рівняння:

$$f_п = \frac{U^*_{вш} f_0}{x^* I^*_{вш}}, \tag{3.8}$$

де x^* – відносне значення індуктивного опору розсіювання асинхронного тягового двигуна (0,2-0,3);

$I^*_{\text{вш}}$ – відносне значення гармоніки вихідного струму з частотою ШІМ, допустиме значення якої складає 0,07-0,15;

f_0 – номінальна частота першої гармоніки вихідної напруги інвертора.

$$f_{\text{п}} = \frac{0,44 \cdot 55}{0,25 \cdot 0,1} = 968 \text{ Гц}.$$

За розрахованою мінімально необхідною частотою варто з деяким запасом для забезпечення якості формування вихідної напруги прийняти частоту ШІМ трифазного інвертора 1000 Гц.

Після розрахунку всіх основних параметрів силових ключів вибираємо для їх реалізації силові напівпровідникові прилади за каталогами підприємств-виробників, а саме біполярні транзистори з ізольованим затвором CM800E2C-66H виробництва японської фірми Mitsubishi.

Основні параметри біполярного транзистора з ізольованим затвором CM800E2C-66H: номінальний комутований струм 800 А, максимальна тривала напруга 3300 В, час комутації 3 мкс, падіння напруги у провідному стані 3 В, внутрішній тепловий опір приладу складає 0,013 °С/Вт).

Визначаємо пульсаційну складову вхідного струму інвертора з частотою широтно-імпульсної модуляції

$$I_{d\text{ш}} = S_{\text{ш}} \frac{I_{d\text{н}}}{\cos \phi_{\text{в1}}}, \tag{3.9}$$

$$I_{d\text{ш}} = 0,312 \cdot \frac{302}{0,91} = 104 \text{ А}.$$

Значення струму $I_{d\text{ш}}$ використовується для розрахунку вхідного фільтра інвертора при живленні від мережі постійного струму.

3.2 Тепловий розрахунок транзисторів ключів тягового інвертора

Теплові втрати потужності у напівпровідникових приладах силових ключів складаються із втрат у провідному стані, втрат у непровідному стані та комутаційних втрат. Втрати у непровідному стані, як правило, не враховують, бо вони відносно інших не значні.

Втрати потужності в провідному стані (статичні втрати) транзистора

$$P_{on} = I_V^{'} \cdot \Delta U_V , \tag{3.10}$$

де $I_V^{'}$ – середнє значення струму одного *IGBT* або діода силових ключів перетворювача;

ΔU_V – падіння напруги на приладі у провідному стані.

При паралельному увімкненні двох *IGBT* або діодів силових ключів перетворювача спрощено для розрахунку за рівнянням (3.10) визначаємо середнє значення струму одного напівпровідникового приладу

$$I_V^{'} = \frac{I_V}{n} .$$

$$I_{Vi}^{'} = 173 \text{ А}.$$

Втрати потужності в провідному стані транзистора складуть

$$P_{oni} = 173 \cdot 3 = 519 \text{ Вт},$$

Комутаційні (динамічні) втрати в напівпровідниковому приладі ключа перетворювача визначаємо в два етапи:

$$E_k = \frac{1}{2} U_k \cdot I_k \cdot t_k , \qquad (3.11)$$

де U_k, I_k – комутована напруга та струм;

t_k – час комутації, який визначають сумою часу увімкнення і вимикання;

$f_{\text{п}}$ – частота перемикань напівпровідникового приладу;

E_k – енергія комутації, яка виділяється у вигляді тепла у напівпровідниковому приладі за один період перемикань.

$$E_{k\text{і}} = \frac{1}{2} \cdot 2000 \cdot 138 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,414 \text{ Дж.}$$

Комутаційні (динамічні) втрати в напівпровідниковому приладі ключа

$$P_k = E_k \cdot f_{\text{п}} . \qquad (3.12)$$

$$P_{k\text{і}} = 0,414 \cdot 1000 = 414 \text{ Вт,}$$

Комутаційні втрати в напівпровідниковому приладі ключа вважають припустимими, якщо вони перевищують статичні не більше ніж удвічі. У протилежному випадку необхідно застосувати пристрої комутаційного захисту, які дозволяють знизити динамічні втрати на порядок.

Внутрішній перепад температури у приладі

$$\Delta\tau = R_{\text{і в}}(P_{on} + P_k), \qquad (3.13)$$

де $R_{\text{тв}}$ – внутрішній тепловий опір приладу.

$$\Delta\tau_{\text{і}} = 0,013 \cdot (519 + 414) = 18\ ^\circ C ,$$

Допустимий перегрів поверхні радіатора-охолоджувача

$$\tau_{\text{п}} = T_{j\max} - T_0 - \Delta\tau\,, \qquad (3.14)$$

де $T_{j\max} = 150^0 C -$ максимально допустима температура кристалу для кремнієвих транзисторів, якими є *IGBT*;

$T_0 -$ максимальна температура оточуючого середовища, яку приймаємо для нашого регіону в умовах літа 40 ^{0}C.

$$\tau_{\text{пі}} = 150 - 40 - 18 = 92\ ^\circ C\,,$$

Тепловий опір радіатора-охолоджувача не повинен перевищувати значення, що розраховане за формулою

$$R_t = \frac{\tau_{\text{п}}}{P_{on} + P_k}\,.$$

$$R_{ti} = \frac{92}{519 + 828} = 0{,}068\ ^\circ C/\text{Вт}.$$

Для силових транзисторів інвертора вибираємо охолоджувач типу ОВ15 (маса – 250 г, R_t = 0,065 $^\circ C$ /Вт, $\Delta P = 10000$ Па).

3.3 Розрахунок чотириквадрантного вхідного перетворювача двосистемного електропоїзду

В якості вхідного перетворювача при живленні від мережі змінного струму використовуємо випрямляч струму з широтно-імпульсною

модуляцією. Спочатку розглянемо та опишемо роботу вхідного перетворювача та особливості його застосування в складі перетворювального блоку двосистемного електропоїзду.

Випрямляч струму з широтно-імпульсною модуляцією має ще назву чотириквадрантний перетворювач, схема якого показана рис. 3.1.

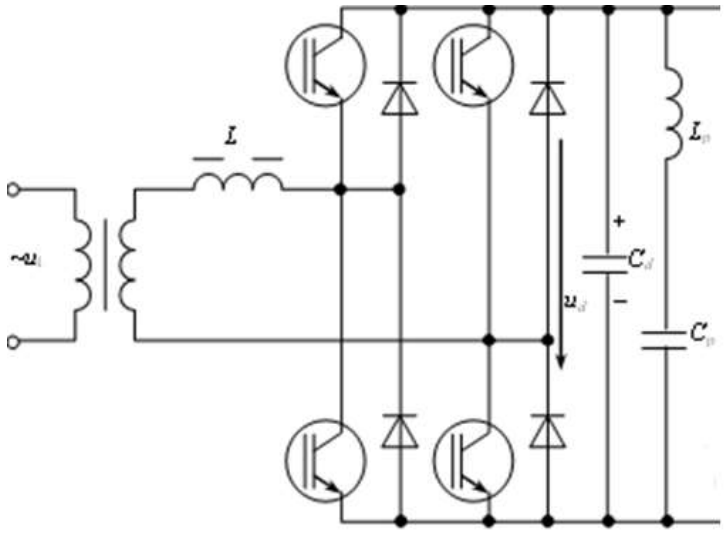


Рис. 3.1 – Вхідний чотириквадрантний перетворювач

Він працює як випрямляч в режимі тяги або як інвертор при рекуперативному гальмуванні електропоїзду. Крім основних функцій чотириквадрантний перетворювач покращує форму вхідного струму, наближаючи її до синусоїдальної, та ліквідує зсув між вхідними струмом та напругою. Таким чином підвищується коефіцієнт потужності енергії, що споживається силовою схемою або повертається до тягової мережі змінного струму. Для виконання сучасних норм Міжнародної електротехнічної комісії коефіцієнт потужності вхідного перетворювача λ повинен досягати рівня не нижче 0,98.

Визначаємо діюче значення першої гармоніки вхідної напруги, яка повинна подаватися із вторинної обмотки тягового трансформатора, щоб забезпечити необхідне значення напруги в проміжній ланці постійного струму:

$$U_{\text{вх1}} = \frac{C_{\text{р}}}{\sqrt{2}\eta_{\text{п}}} U_{d\text{н}}, \tag{3.15}$$

де $C_{\text{р}}$ – глибина регулювання;

$\eta_{\text{п}}$ – коефіцієнт корисної дії чотириквадрантного перетворювача, приймаємо $\eta_{\text{п}} = 0{,}99$.

За рівнянням (3.15) знаходимо максимальне значення першої гармоніки, яке визначається при максимальній глибині регулювання $C_{\text{р}m} = 0{,}9$ і максимальному значенні напруги живлення.

$$U_{\text{вх1}} = \frac{0{,}9}{\sqrt{2} \cdot 0{,}99} \cdot 3000 = 1934 \text{ В}.$$

Постійна складова номінального вихідного струму

$$I_{d\text{н}} = \frac{P_{d\text{н}}}{U_{d\text{н}}}. \tag{3.16}$$

де $P_{d\text{н}}$ – номінальна активна вихідна потужність вхідного перетворювача, яка співпадає з активною потужністю навантаження з урахуванням втрат у вихідному перетворювачі – трифазному інверторі напруги:

$$P_{d\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{ін}}}, \tag{3.17}$$

$$P_{d\text{н}} = \frac{1064000}{0{,}985} = 1080 \text{ кВт},$$

$$I_{d\text{н}} = \frac{1080000}{3000} = 360 \text{ А}.$$

Найбільше значення першої гармоніки вхідного струму

$$I_{\text{вх1}} = \frac{P_{d\text{н}}}{U_{\text{вх1}}} k_u, \tag{3.18}$$

де коефіцієнт

$$k_u = \frac{U_{\text{км max}}}{U_{\text{км min}}}, \tag{3.19}$$

де $U_{\text{км max}}$ та $U_{\text{км min}}$ найбільше і найменше значення напруги контактної мережі.

$$k_u = \frac{29 \cdot 10^3}{21 \cdot 10^3} = 1{,}381,$$

$$I_{\text{вх1}} = \frac{1080000}{1934} \cdot 1{,}381 = 771 \text{ А}.$$

Номінальний середній струм транзистора та діода силового ключа чотириквадрантного перетворювача

$$I_V = I_D = \frac{I_{\text{вх1}}}{\sqrt{2}\pi} + \frac{I_{d\text{н}}}{4}, \tag{3.20}$$

$$I_V = I_D = \frac{771}{\sqrt{2} \cdot \pi} + \frac{360}{4} = 264 \text{ А}.$$

Амплітудний струм силового ключа чотириквадрантного

перетворювача дорівнює:

$$I_{V\max} = I_{D\max} = \sqrt{2} I_{\text{вх1}}, \tag{3.21}$$

$$I_{V\max} = I_{D\max} = \sqrt{2} \cdot 771 = 1087 \text{ А}.$$

Амплітуда напруги $U_{\max}$ та комутована напруга U_k ключа дорівнює максимальній вихідній напрузі U_d. Середній комутований струм ключа, який діє як при увімкненні, так і при вимиканні при номінальному струмі

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{d\text{н}}, \tag{3.22}$$

$$I_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 360 = 162 \text{ А}.$$

Гармоніка напруги з частотою широтно-імпульсної модуляції у вхідній напрузі $U_{\text{вх1}}$ чотириквадрантного перетворювача

$$U_{\text{г}} = \sqrt{2} S_{\text{ш}} U_{\text{вх1}}, \tag{3.23}$$

$$U_{\text{г}} = \sqrt{2} \cdot 0{,}312 \cdot 1934 = 851 \text{ В}.$$

Допустима відносна величина неактивних складових вхідного струму (відносне значення струму гармонік підвищеної частоти)

$$I_{\text{г}}^{*} = \sqrt{1 - \lambda^2}, \tag{3.24}$$

де $\lambda = 0,98$ – рекомендоване значення коефіцієнта потужності навантаження мережі живлення змінного струму.

$$I_{\text{г}}^{*} = \sqrt{1 - 0,98} = 0,141.$$

$$I_{\text{г}} = I_{\text{г}}^{*} \cdot I_{\text{вх1}}, \tag{3.25}$$

$$I_{\text{г}} = 0,141 \cdot 771 = 109 \text{ А}.$$

Необхідна величина опору вхідного індуктивного фільтра

$$X = 2\pi f_{\text{п}} L = \frac{U_{\text{г}}}{I_{\text{г}}}, \tag{3.26}$$

$$X = \frac{851}{109} = 7,81 \text{ Ом}.$$

Доцільно використовувати в якості вхідного фільтра індуктивність розсіяння обмоток тягового трансформатора L_s, бо частота широтно-імпульсної модуляції (частота перемикань) досить висока. Згідно такої умови

$$L_s = \frac{U_{\text{вх1}}}{I_{\text{вх1}}} \frac{x_s^{*}}{2\pi f_{\text{м}}}, \tag{3.27}$$

де $f_{\text{м}}$ – частота напруги мережі живлення (50 Гц);

x_s = 0,1 – відносний індуктивний опір розсіяння обмоток тягового трансформатора.

$$L_s = \frac{1934}{771} \cdot \frac{0,1}{2 \cdot 50 \cdot \pi} = 0,799 \text{ мГн.}$$

Таким чином, застосувавши рівняння (3.21), визначаємо мінімально необхідну частоту широтно-імпульсної модуляції:

$$f_{\text{п}} = \frac{X}{2\pi L_s}, \tag{3.28}$$

$$f_{\text{п}} = \frac{7,81}{2 \cdot \pi \cdot 0,000799} = 1556 \text{ Гц.}$$

Амплітуда вихідного струму другої гармоніки (гармоніки з подвоєною частотою мережі) дорівнює постійній складовій $I_{d2m} = I_d$.

Задаючись допустимим коефіцієнтом пульсації напруги $k_{пи}$ на конденсаторі $C_{d\text{р}}$ в межах 0,2÷0,4, визначаємо величини ємності та індуктивності вихідного резонансного фільтра, який прийнято ще називати режекторним:

$$C_{d\text{р}} = \frac{I_{d2\text{m}}}{2\pi f_2 k_{пи} U_d}, \tag{3.29}$$

де $f_2 = 100$ Гц – частота другої гармоніки;

$$C_{d\text{р}} = \frac{360}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 0,3 \cdot 3000} = 1,91 \text{ мФ.}$$

$$L_{d\text{р}} = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 C_{d\text{р}}}, \tag{3.30}$$

$$L_{dp} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 100)^2 \cdot 0,00191} = 1,33 \text{ мГн.}$$

Значення вихідного струму гармоніки з частотою широтно-імпульсної модуляції

$$I_{гш} = 0,6 \cdot \frac{I_d}{C_{pm}}, \tag{3.31}$$

$$I_{гш} = 0,6 \cdot \frac{360}{0,9} = 240 \text{ А.}$$

Значення струму $I_{гш}$ використовується для розрахунку ємності вихідного фільтра перетворювача.

Згідно розрахованих параметрів чотириквадрантного перетворювача вибираємо силові напівпровідникові прилади, які використовуватимуться в схемі. Вибір виконуємо як і раніше за каталогами підприємств-виробників. При цьому доцільно застосовувати, якщо це можливо, такі ж силові прилади, як і у трифазному інверторі напруги, що сприятиме уніфікації і здешевленню перетворювального обладнання. Пропонується застосувати у складі силових керованих ключів біполярні транзистори з ізольованим затвором CM600HG-90H виробництва японської фірми Mitsubishi (номінальний струм 600 А, напруга 6500 В, час комутації 3 мкс, падіння напруги у провідному стані 4 В, внутрішній тепловий опір приладу складає 0,014 °С/Вт), які потрібно увімкнути паралельно по два.

За вищенаведеною методикою, за якою проведено теплові розрахунки для трифазного інвертора, виконаємо розрахунок для силових приладів вхідного чотириквадрантного перетворювача. Втрати потужності в провідному стані (статичні втрати) транзистора за рівнянням (3.10)

$$P_{on} = I_V^{'} \cdot \Delta U_V,$$

При паралельному увімкненні *n IGBT* або діодів силових ключів перетворювача спрощено для розрахунку за рівнянням (3.10) визначаємо середнє значення струму одного напівпровідникового приладу

$$I_V^{'} = \frac{I_V}{n}.$$

$$I_V^{'} = \frac{264}{2} = 132 \text{ А}$$

$$P_{оп\text{в}} = 132 \cdot 4 = 528 \text{ Вт.}$$

Комутаційні (динамічні) втрати в напівпровідниковому приладі ключа перетворювача визначаємо в два етапи:

$$E_k = \frac{1}{2} U_k \cdot I_k \cdot t_k,$$

E_k – енергія комутації, яка виділяється у вигляді тепла у напівпровідниковому приладі за один період перемикань.

$$E_{k\text{в}} = \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 162 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,729 \text{ Дж.}$$

$$P_k = E_k \cdot f_{\text{п}}.$$

$$P_{k\text{в}} = 0,729 \cdot 1556 = 1134 \text{ Вт.}$$

Комутаційні втрати в напівпровідниковому приладі ключа вважають припустимими, якщо вони перевищують статичні не більше ніж удвічі. У протилежному випадку необхідно застосувати пристрої комутаційного

захисту, які дозволяють знизити динамічні втрати на порядок.

Внутрішній перепад температури у приладі

$$\Delta\tau = R_{t\text{в}}(P_{on} + P_k),$$

де $R_{t\text{в}}$ – внутрішній тепловий опір приладу.

$$\Delta\tau_{\text{в}} = 0{,}014 \cdot (528 + 1134) = 23\ ^\circ C,$$

Допустимий перегрів поверхні радіатора-охолоджувача

$$\tau_{\text{пв}} = 150 - 40 - 23 = 87\ ^\circ C.$$

Тепловий опір радіатора-охолоджувача не повинен перевищувати значення, що розраховане за формулою

$$R_t = \frac{\tau_{\text{п}}}{P_{on} + P_k}.$$

$$R_{t\text{в}} = \frac{87}{528 + 1134} = 0{,}052\ \ ^\circ C/\text{Вт}.$$

Для транзисторів вхідного чотириквадрантного перетворювача вибираємо охолоджувач типу ОВ17, що має масу 1300 г, R_t = 0,022 $^\circ C$/Вт, $\Delta P = 7000$ Па.

3.4 Розрахунок елементів фільтра інвертора напруги

Оскільки перетворювач є для фільтру джерелом струму гармонік

пульсацій $I_{гш}$ (діюче значення, яке визначене раніше), то фільтр відносно перетворювача повинен починатися з паралельної ємності, як це показано на рис. 3.2.

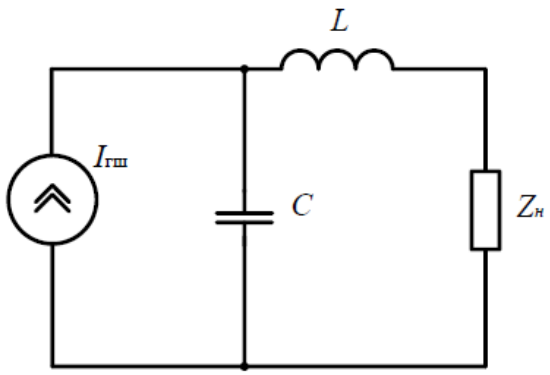


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема фільтра трифазного інвертора

Ємність фільтра C знаходиться по допустимій напрузі гармоніки $U_{гш}$ з частотою ШІМ на навантаженні. Вважаючи, що весь струм $I_{гш}$ йде в конденсатор, отримаємо рівняння:

$$\omega C = \frac{I_{гш}}{U_{гш}}, \tag{3.32}$$

де ω – частота фільтрованої гармоніки.

Допустима напруга гармоніки $U_{гш}$ на навантаженні визначається через заданий коефіцієнт пульсацій напруги $k_{пu}$

$$U_{гш} = k_{пu} U_d, \tag{3.33}$$

$$U_{гш} = 0,04 \cdot 3000 = 120 \text{ В}.$$

Ємність конденсатора вхідного фільтра

$$C = \frac{I_{\text{гш}}}{U_{\text{гш}} \cdot 2\pi \cdot f_{\text{п}}},$$

$$C = \frac{104}{120 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1000} = 138 \text{ мкФ}.$$

У трифазного трирівневого інвертора напруги у вхідному фільтрі застосовується дільник напруги, то ємність його конденсаторів повинна складати не менше 2х138=276 мкФ. Обираємо пропіленові конденсатори ємністю 300 мкФ.

Оскільки опір навантаження фільтру малий, то його необхідно підвищити введенням в схему фільтра послідовного дроселя L. Вважаючи, що вся напруга $U_{\text{гш}}$ прикладена до дроселя, отримуємо необхідну індуктивність фільтра з наступної умови:

$$\omega L = \frac{U_{\text{гш}}}{I_{\text{нг}}}, \tag{3.34}$$

де $I_{\text{нг}}$ – допустимий вміст фільтрованої гармоніки в струмі навантаження.

Гармоніка в струмі навантаження $I_{\text{нг}}$ визначається за допустимим коефіцієнтом пульсації струму $k_{\text{п}i}$

$$\sqrt{2} I_{\text{нг}} = k_{\text{п}i} I_{\text{н}}, \tag{3.35}$$

де $I_{\text{н}}$ – постійна складова струму навантаження.

$$I_{\text{нг}} = \frac{k_{\text{п}i} \cdot I_{\text{н}}}{\sqrt{2}},$$

$$I_{\text{нг}} = \frac{0,01 \cdot 302}{\sqrt{2}} = 2,14 \text{ А}.$$

Ємність конденсатора вхідного фільтра

$$L = \frac{U_{\text{гш}}}{I_{\text{нг}} \cdot 2\pi \cdot f_{\text{п}}},$$

$$L = \frac{120}{2,14 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1000} = 8,93 \text{ мГн}.$$

Для фільтра (рис. 3.1) величина $U_{\text{гш}}$ є проміжною і тому може варіюватися в достатньо широких межах. Чим більше величина $U_{\text{гш}}$, тим менше буде ємність фільтру і більше індуктивність. При високих вимогах, характерних для контактних мереж, слід приймати ці величини в межах 0,01÷0,02, бо інакше дросель фільтру вийде дуже важким.

3.5 Розрахунок конструкції дроселя фільтра

Для фільтрового дроселя постійного струму заздалегідь відомо, що допустима індукція визначається за умовами насичення, а не за умовами нагріву.

Амплітуда індукції, допустима за умовами насичення

$$B_m = \frac{B_s}{1,2 \div 1,5}, \tag{3.36}$$

де $B_s = 2,0 \text{Тл}$ – індукція насичення магнітопроводу, виготовленого із листів холоднокатаної електротехнічної сталі.

$$B_m = \frac{2}{1{,}35} = 1{,}5 \text{ Тл.}$$

За базисний розмір для розрахунку геометричних розмірів приймається ширина стержня осердя a, яка визначається за рівнянням

$$a = \left(\frac{k_a}{B_m k_j F_{\text{с}}^* F_{\text{в}}^*} \right)^{\frac{2}{7}}, \tag{3.37}$$

де $F_{\text{с}}^*$, $F_{\text{в}}^*$ – відносні значення площі перерізу осердя та площі вікна магнітопроводу, які приведені в табл. 3.1. Для стержневого осердя, відповідно дорівнює 1,5 та 4,2.

Таблиця 3.1 – Геометричні характеристики магнітопроводу

Геометричні характ. / Тип осердя	$c^*=c/a$	$h^*=h/a$	$в^*=в/a$	$F_{\text{с}}^*$	$F_{\text{в}}^*$	$П_{\text{с}}^*$	$П_{\text{к}}^*$	$V_{\text{с}}^*$	$V_{\text{к}}^*$
Стержневий (П-подібн.)	1,2	3,5	1,5	1.5	4,2	24	60	19	29
Броневий (Ш-подібн.)	0,8	2	1,5	1,5	1,6	30	19	10,7	12

Виберемо стержневий тип осердя для дроселя.

$$k_j = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_{\text{п}} \cdot П_{\text{к}}^*}{\rho \cdot V_{\text{к}}^* k_{\text{к}}}}, \tag{3.38}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

$\tau_{\text{п}}$ – допустимий перегрів поверхні котушки (для ізоляції витків обмотки класу А $\tau_{\text{п}}$=50 ^{0}С);

$П^*_{\text{к}}$ – відносний розмір поверхні охолодження котушки;

ρ – питомий електричний опір провідникового матеріалу (при 70°С для міді $\rho = 2{,}1 \cdot 10^{-8}$ Ом м);

$V^*_{\text{к}}$ – відносний об'єм котушки;

$k_{\text{к}}$ – коефіцієнт заповнення котушки (приймаємо 0,3 для круглого та 0,5 для прямокутного перерізу провідника).

$$k_j = \sqrt{\frac{36 \cdot 50 \cdot 60}{2{,}1 \cdot 10^{-8} \cdot 29 \cdot 0{,}5}} = 595600.$$

$$k_a = \frac{I\psi_m}{k_{\text{к}}}, \qquad (3.39)$$

де ψ_m – амплітуда потокозчеплення, яка може визначатися як добуток амплітудного значення струму та індуктивності дроселя.

$$\psi_m = I_{\text{н}} \cdot L,$$

$$\psi_m = 302 \cdot 0{,}00893 = 2{,}70 \text{ Вб}.$$

$$k_a = \frac{302 \cdot 2{,}70}{0{,}5} = 1631.$$

$$a = \left(\frac{1631}{1{,}5 \cdot 595600 \cdot 1{,}5 \cdot 4{,}2} \right)^{\frac{2}{7}} = 0{,}098 \text{ м}.$$

За базисним розміром a визначаємо основні геометричні розміри дроселя, для чого застосовуємо наступні співвідношення:

$$b = b^* \cdot a;\ c = c^* \cdot a;\ h = h^* \cdot a;\ F_c = F_c^* \cdot a^2. \tag{3.40}$$

Звідси маємо

$$b = 1,5 \cdot 0,098 = 0,147;$$

$$c = 1,2 \cdot 0,098 = 0,118 \text{ м};$$

$$h = 3,5 \cdot 0,098 = 0,343 \text{ м};$$

$$F_c = 1,5 \cdot 0,098^2 = 0,0144 \text{ м}^2.$$

Число витків обмотки

$$W = \frac{\psi_m}{F_c \cdot B_m}, \tag{3.41}$$

$$W = \frac{2,7}{0,0144 \cdot 1,5} = 115 \text{ витків.}$$

Задана індуктивність дроселя забезпечується введенням немагнітного зазору у осердя. Товщина немагнітного зазору

$$\delta = \frac{\mu_0 \cdot W^2 \cdot F_c}{2L}, \tag{3.42}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність зазору;

L – індуктивність дроселя фільтра.

$$\delta = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 115^2 \cdot 0,0144}{2 \cdot 0,00893} = 0,0134 \text{ м.}$$

3.6 Розрахунок перетворювача бортової системи живлення двосистемного електропоїзда

Перетворювач бортової системи живлення електропоїзда з вхідним напівмостовим інвертором напруги має схему, зображену на рис. 2.1. Вхідний напівмостовий інвертор напруги перетворює енергію постійного струму з ланки напругою 3000 В у енергію змінного струму підвищеної частоти, яка через роздільний понижувальний трансформатор подається на вхід випрямляча вихідного блоку. Він живить через фільтр трифазний мостовий інвертор для забезпечення вихідної напруги 3×380 В, частоти 50 Гц, що необхідна для живлення споживачів з міжвагонної магістралі, а також для споживачів у головних вагонах електропоїзда.

Розраховуємо середнє значення вихідної напруги напівмостового інвертора:

$$U_{\text{в}} = \frac{1}{2}\eta \cdot U_{\text{п}\min}, \tag{3.43}$$

де $U_{\text{п}\min}$ – мінімально допустиме значення напруги живлення ($U_{\text{п}\min}$= 2900 В);

η – очікуване значення ККД напівмостового інвертора, $\eta = 0{,}98$.

$$U_{\text{в}} = \frac{1}{2}0{,}98 \cdot 2900 = 1480 \text{ В}.$$

Найбільше діюче значення вихідного струму напівмостового інвертора:

$$I_{\text{в}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{п}\min} \cdot \eta}, \tag{3.44}$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність навантаження напівмостового інвертора.

Розраховуємо номінальну потужність навантаження напівмостового інвертора:

$$P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{в}}}{\eta_{вп}}, \tag{3.45}$$

де $P_{\text{в}}$ – номінальна активна вихідна потужність перетворювача бортової системи живлення електропоїзда;

$\eta_{вп}$ – коефіцієнт корисної дії вихідного перетворювача.

$$P_{\text{н}} = \frac{330000}{0,95} = 368000 \text{ Вт.}$$

За формулою (3.50) визначаємо найбільше діюче значення вихідного струму напівмостового інвертора.

$$I_{\text{в}} = \frac{368000}{2900 \cdot 0,98} = 130 \text{ А.}$$

Розраховуємо найбільший вхідний струм інвертора:

$$I_{\text{п}} = 2I_{\text{в}}. \tag{3.46}$$

$$I_{\text{п}} = 2 \cdot 130 = 260 \text{ А.}$$

Розраховуємо середній струм напівпровідникового транзисторного ключа в напівмостовому інверторі:

$$I_{VT} = \frac{I_{\text{п}}}{2}. \tag{3.47}$$

$$I_{VT} = \frac{260}{2} = 130 \text{ А.}$$

Розраховуємо амплітудний струм напівпровідникового ключа в напівмостовому інверторі

$$I_{VTm} = I_{\text{в}}. \tag{3.48}$$

$$I_{VTm} = 130\,\text{А}.$$

Керовані прилади працюють з примусовою комутацією при ввімкненні та вимкненні. При цьому:

$$U_k = U_{\text{п max}},\ \ I_k = I_{VTm}.$$

$$U_k = 4000\ \text{В},\ \ I_k = 130\ \text{А}.$$

За отриманими результатами розрахунку основних параметрів вибираємо біполярний транзистор з ізольованим затвором типу FD250R65KE3-K для реалізації керованих двоквадрантних ключів вхідного напівмостового інвертора напруги.

Основні параметри біполярного транзистора з ізольованим затвором CM800E2C-66H: номінальний комутований струм 250 А, максимальна тривала напруга 6500 В, час комутації 2 мкс, падіння напруги у провідному стані 3 В, внутрішній тепловий опір приладу складає 0,042 °С/Вт).

Розраховуємо необхідну ємність конденсатора вхідного ємнісного дільника напруги:

$$C_d = \frac{I_{\text{в}} \cdot T}{4k_{\text{пи}} \cdot U_{\text{пном}}}, \tag{3.49}$$

де $k_{\text{пи}}$ – коефіцієнт пульсацій вхідної напруги ($k_{\text{пи}} = 0{,}04$);

T – період проміжної ланки змінного струму, який залежить від використовуваного магнітного матеріалу осердя трансформатора та типу

напівпровідникових приладів ключів інвертора.

Приймаємо T = 1 мсек, що відповідає частоті на виході напівмостового інвертора напруги 1 кГц.

$$C_d = \frac{130 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,04 \cdot 3000} = 270 \text{ мкФ}.$$

Приймаємо ємність вхідного ємнісного дільника вході інвертора 300 мкФ, яка може бути забезпечена паралельним підключенням трьох конденсаторів ємністю по 100 мкФ.

Знову за вищенаведеною методикою, за якою проведено теплові розрахунки для трифазного інвертора та вхідного чотириквадрантого перетворювача, виконаємо розрахунок для силових приладів вхідного чотириквадрантного перетворювача. Втрати потужності в провідному стані (статичні втрати) транзистора за рівнянням (3.10)

$$P_{on} = I_V^{'} \cdot \Delta U_V ,$$

При паралельному увімкненні n *IGBT* або діодів силових ключів перетворювача спрощено для розрахунку за рівнянням (3.10) визначаємо середнє значення струму одного напівпровідникового приладу

$$I_V^{'} = \frac{I_V}{n}.$$

$$I_V^{'} = \frac{130}{1} = 130 \text{ А}$$

$$P_{on} = 130 \cdot 3 = 390 \text{ Вт}.$$

Комутаційні (динамічні) втрати в напівпровідниковому приладі ключа перетворювача визначаємо в два етапи:

$$E_k = \frac{1}{2} U_k \cdot I_k \cdot t_k ,$$

E_k – енергія комутації, яка виділяється у вигляді тепла у напівпровідниковому приладі за один період перемикань.

$$E_{k\text{в}} = \frac{1}{2} \cdot 4000 \cdot 130 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0{,}520 \text{ Дж.}$$

$$P_k = E_k \cdot f_{\text{п}} .$$

$$P_{k\text{в}} = 0{,}520 \cdot 1000 = 520 \text{ Вт.}$$

Комутаційні втрати в напівпровідниковому приладі ключа вважають припустимими, якщо вони перевищують статичні не більше ніж удвічі. У протилежному випадку необхідно застосувати пристрої комутаційного захисту, які дозволяють знизити динамічні втрати на порядок.

Внутрішній перепад температури у приладі

$$\Delta\tau = R_{\text{і}\text{в}} (P_{on} + P_k),$$

де $R_{\text{і}\text{в}}$ – внутрішній тепловий опір приладу.

$$\Delta\tau_{\text{в}} = 0{,}042 \cdot (390 + 520) = 38\ ^\circ C ,$$

Допустимий перегрів поверхні радіатора-охолоджувача

$$\tau_{\text{пв}} = 150 - 40 - 38 = 72\ ^\circ C .$$

Тепловий опір радіатора-охолоджувача не повинен перевищувати значення, що розраховане за формулою

$$R_t = \frac{\tau_{\text{п}}}{P_{on} + P_k}.$$

$$R_{t\text{в}} = \frac{72}{390 + 520} = 0,079 \ ^\circ C/\text{Вт}.$$

Для силових транзисторів вхідного напівмостового інвертора напруги бортової системи живлення електропоїзда вибираємо охолоджувач типу ОВ15 (маса – 250 г, R_t = 0,065 $^\circ C$ /Вт, $\Delta P = 10000$ Па).

4 Охорона праці при проведенні модернізації перетворювача

Охорона праці – система законодавчих актів і норм, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних, економічних заходів і засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності тих, що працюють, регульована Основами законодавства про охорону праці.

Цілі охорони праці: захист працюючих від дії шкідливих виробничих чинників, які загрожують їх здоров'ю і фізичній безпеці (безпека і гігієна праці, режими праці і відпочинку), забезпечення лікування і компенсація втрати працездатності при нещасних випадках на виробництві і професійному захворюванні, проведення медичної, соціальної і професійної реабілітації потерпілих на виробництві.

Охорона праці включає наступні основні розділи: виробнича санітарія, техніка безпеки, пожежний захист. Механізація і автоматизація виробництва використовуються для полегшення умов і ліквідації важкої фізичної праці.

4.1 Коротка характеристика проєктованого об’єкту

Велика кількість електровозів, що експлуатуються на залізницях України, працюють на змінному струмі, в тому числі і електровози.

У даній роботі пропонується заміна існуючого перетворювача системи керування на нові трифазні інверторні перетворювачі для більш якісного живлення тягових асинхронних двигунів. Це значно покращить ККД та зменшить витрати електроенергії, що добре впливає на позитивну роботу парку електропоїздів в цілому. Запровадження нових статичних перетворювачів, дає можливість реалізувати на даному електрорухомому

складі надійну та безперебійну роботу системи керування тягових асинхронних двигунів. Застосування тягового асинхронного електроприводу на електрорухомому складі залізниць дозволяє:

збільшити не менше ніж у 1,5 рази осьову потужність;

підвищити на 20-30% можливості зчеплення коліс з рейками;

усунути контакторну апаратуру з силових кіл;

знизити експлуатаційні витрати до 30-40%;

збільшити термін служби обладнання.

До основних операцій по проведенню модернізації системи можна віднести:

- Зняття старого обладнання;
- Встановлення нових трифазних інверторних перетворювачів;
- Регулювання і перевірка електричної системи.

4.2 Заходи з охорони праці для слюсарів по ремонту електричного рухомого складу при проведенні модернізації

До виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медогляд, спеціальне технічне навчання, перевірку знань і одержали відповідне посвідчення.

Режим праці слюсарів у цеху поточного ремонту ПР3 – цілодобовий. В цьому цеху, при проведенні модернізації системи використовують переносний електричний інструмент, слюсарний інструмент.

Електричне устаткування живиться від мережі змінного струму 380 В з глухо заземленою нейтраллю, переносний електричний інструмент живиться від мережі змінного струму 220 В.

Після встановлення всіх блоків системи, вони повинні бути відрегульовані та випробуванні. Для цього в цеху знаходяться стенди для

випробування електричної міцності ізоляції апаратів, регулювання та випробування електричних апаратів.

Монтаж виконується за допомогою ручного інструменту. Слюсарі повинні знати і виконувати вимоги ЦТ-0048 “Інструкції з охорони праці для слюсарів по ремонту електричного рухомого складу” та “Правилами, інструкцією по техніці безпеки і виробничої санітарії при експлуатації тепловозів, електровозів і моторвагонного рухомого складу ЦТ/199”.

Слюсарі повинні застосовувати безпечні прийоми роботи, засоби захисту та спецодяг, додержувати в справному стані і чистоті робоче місце, інструмент, обладнання, пристосування і вимірювальні прилади, які використовуються при ремонті.

Згідно з інструкцією з охорони праці №35 для слюсарів по ремонту МВРС, затвердженій наказом начальника депо №755 від 10.09.2007 року слюсар повинен:

- виконувати правила внутрішнього розпорядку депо;
- при виконанні роботи бути уважним і виконувати тільки доручену майстром або бригадиром роботу, про початок якої і закінчення виконання якої повідомляти безпосередньо керівнику робіт;
- переходити оглядові канави тільки по пішохідним місткам;
- виконувати вимоги заборонних, попереджувальних, вказівних знаків, написів, а також звукової і світлової сигналізації;
- при підйомі на МВРС звертати увагу на наявність і справність поручнів, сходів, підніжок, а при спуску звертати увагу на місце спуску, яке не повинне бути захламлено, залито маслом, при цьому необхідно знаходитися обличчям до підніжок та триматися руками за поручні;
- при виявленні порушень вимог пожежної безпеки, охорони праці, а також несправностей обладнання, інструмента, засобів захисту пожежогасіння, освітлення, опалення, спецодягу, які створюють небезпеку для життя людей і можуть привести до аварії, пожежі, нещасного випадку,

погіршенню стану здоров'я, необхідно повідомляти своєму безпосередньому керівнику.

Під час роботи на слюсаря впливають наступні небезпечні виробничі фактори:

- підвищене значення напруги в електричній мережі
- машини й механізми, що рухаються

Небезпечні виробничі фактори впливають на працівника і у визначених умовах приводять до травми або до раптового різкого погіршення стану здоров’я (Небезпечні виробничі фактори).

В умовах ремонтного цеху завжди присутнє різноманітне верстатне устаткування, зварювальні пристрої з оснащенням, що транспортують засоби, ручний інструмент, інше. Вони характеризуються наявністю що рухаються й падають об’єктів. Навколо них маються небезпечні зони, де найчастіше при порушенні правил безпечної експлуатації й технологічної дисципліни виникають випадки травматизму.

Шкідливі виробничі фактори, що впливають на слюсаря при робіті:

- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- понижена температура в холодний період року;
- небезпека ураження електричним струмом.

Для створення нормальних умов виробничої діяльності необхідно забезпечити оптимальну освітленість робочої зони, встановити нормативні параметри мікроклімату виробничого приміщення, необхідну чистоту повітря, а також забезпечити відповідність захистного заземлення.

Заходи безпеки, попереджаючи наїзд рухомого складу на людей: організація робіт на закритих для руху шляхах, організація безпечних зон, використання засобів сигналізації й сповіщання людей.

При потенційно небезпечних процесах безпека працівників забезпечується проведенням організаційних і технологічних заходів, дотриманням регламентів і правил застосування засобів захисту.

Забезпечення безпеки починається з процесу проектування технологічного устаткування й самих процесів; створення пристроїв, що виключають можливість контактів працівників з небезпечними об'єктами й огородженими небезпечними зонами; введення автоблокування, аварійного відключення, дистанційного керування установкою сигналізації. Безпечність технологічного процесу відповідає ДСТУ (Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки).

Використовуються також запобіжні пристрої, що автоматично відключають пересувні агрегати й машини при відхиленні від нормального режиму роботи (обмежники ходу, кінцеві вимикачі та ін.).

Параметри мікроклімату виробничого приміщення відповідають ГОСТу 12.1.005-88. ССТБ. (Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони) та ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

Згідно з інструкцією депо з охорони праці №35 для слюсарів по ремонту МВРС слюсар повинен бути забезпечений спецодягом, спецвзуттям й засобами індивідуального захисту по слідуючим нормам:

- костюм х/б 12 міс.
- ботинки 12 міс.
- теплозахистний костюм 36 міс.
- чоботи утеплені 36 міс.
- рукавиці 1 міс.

Освітленість робочих поверхонь у виробничому приміщенні регламентується ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Для

створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли продуктивності праці, виробниче освітлення повинно відповідає наступним вимогам:

- створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи й не є нижчою за встановлені норми;
- не повинно чинити засліплюючої дії як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору;
- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частої переадаптації органів зору;
- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней;
- повинно бути надійним і простим в експлуатації, економічним та естетичним.

4.3 Розрахунок заземлюючого контуру цехового обладнання, працюючого під напругою 380 В

Для забезпечення вимоги ДСТУ опір заземлення повинний бути не більше за 10 Ом. Пропонується використати як заземлювачі стальні труби довжиною l = 2,5 м та діаметром d = 5 см на відстані 5 м. З'єднувальна смуга закладена на глибині 80 см і має ширину 40 мм та товщину 2,5 мм. Ґрунт – пісок, ІІІ кліматична зона.

Опір одного заземлювача:

$$R_{тр} = 0{,}366 \frac{\rho}{l} (\lg \frac{2l}{d} + 0{,}5 \lg \frac{4t + l}{4t - l}), \qquad (4.1)$$

де ρ - питомий опір ґрунту.

$$R_{тр} = 0,366 \cdot \frac{7 \cdot 10^2}{2,5} \cdot (\lg \frac{2 \cdot 2,5}{0,05} + 0,5 \lg \frac{4 \cdot 2,05 + 2,5}{4 \cdot 2,05 - 2,5}) = 218,8 \ Ом.$$

Розрахункове число заземлювачів:

$$n = \frac{R_{тр} \cdot \eta_c}{r_з \cdot \eta_{ет}}, \qquad (4.2)$$

де η_c =коефіцієнт сезону;

$\eta_{ет}$ – коефіцієнт екранізування;

$r_з$ - опір заземлення.

$$n = \frac{218,8 \cdot 1,4}{10 \cdot 0,55} \approx 56.$$

Опір розтіканню струму в землі від смуги

$$R_c = 0,366 \frac{\rho}{\ln} \cdot \lg \frac{2 \ln}{bh}, \qquad (4.3)$$

$$R_c = 0,366 \frac{7 \cdot 10^2}{294} \cdot \lg \frac{2 \cdot 294}{0.004 \cdot 0.8} = 5,85 \ Ом.$$

Сумарний опір заземлення

$$R_c = \frac{1}{\frac{n_{en}}{R_n} + \frac{n_{en} \cdot n}{R_{mp}}} \quad , \tag{4.4}$$

$$R_c = \frac{1}{\frac{0,27}{11,7} + \frac{0,55 \cdot 56}{218,8}} = 6,13 \ Ом.$$

Оцінка результатупідтверджує, що розрахована система заземлюючого контуру цехового обладнання, працюючого під напругою 380 В, відповідає вимогам ДСТУ.

5 Визначення економічного ефекту від застосування нових перетворювачів у системі тягового електроприводу швидкісного двосистемного електропоїзда з асинхронними двигунами

5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

Модернізація системи живлення тягових двигунів двосистемного електропоїзда, а саме запровадження живлення від нового варіанту напівпровідникового перетворювача, дає можливість реалізовувати на швидкісному двосистемному електропоїзді з асинхронними двигунами більш надійну та економну систему електроприводу. Це надає нам можливість суттєвого поліпшення умов роботи електрообладнання та скорочення витрат на поточне утримання систем електроприводу шляхом впровадження нових напівпровідникових перетворювачів.

Запровадження напівпровідникової техніки на залізничному транспорті обумовлюється її техніко-економічними перевагами. Експлуатація напівпровідникової техніки дозволяє виконувати ремонт блоків за короткий термін часу, швидко замінювати непрацюючий блок на новий. Запропонований напівпровідниковий перетворювач зібраний з застосуванням високоякісної елементної бази зарубіжного виробництва, що зумовлює підвищення рівня надійності та ремонтопридатності електропоїзда, також один напівпровідниковий перетворювач замінює два існуючих.

5.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект заходу НТП визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки,

тобто є інтегральним ефектом.

Він розраховується, виходячи з умов використання тієї продукції (кінцевої продукції), яку планується виробляти з застосуванням нових науково-технічних розробок. Під умовами використання мають на увазі обсяг випуску кінцевої продукції на протязі розрахункового періоду із застосуванням нових технічних засобів, матеріалів, технологій і попередньої ціни на неї.

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект ($E_т$) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період ($P_т$) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_т$) згідно з методичними вказівками [9]

$$E_т = P_т - З_т , \qquad (5.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу – розрахунковому року $t_р$. Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t, що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1 + E_н)^{tp-t} , \qquad (5.2)$$

де $E_н$ – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_н = 0{,}1$;

$t_р$ – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

Оскільки автоматичне вимкнення двигунів не вплине на вартісну оцінку результатів, тому економічний ефект буде визначатися економією витрат.

$$E_{\text{т}} = З_{\text{т}}^{\text{б}} - З_{\text{т}}^{\text{н}}, \tag{5.3}$$

Вартісна оцінка витрат визначається

$$З_t = \sum_{t=t_{н'}}^{t_k} З_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_{н'}}^{t_k} (u_t + k_t - л_t) \cdot \alpha_t, \tag{5.4}$$

де $З_t$ - витрати всіх ресурсів у рік t (включаючи витрати на отримання супутніх результатів);

u_t - поточні витрати у рік t без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію;

k_t - одноразові витрати у рік t;

$л_t$ - залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, що вибувають у рік t.

До капітальних вкладень на модернізацію одного електропоїзда постійного струму входять витрати, пов’язані з придбанням перетворювачів, витрати на демонтаж старого обладнання і монтаж нового. Вартість напівпровідникового перетворювача складає 2100000 грн. Для модернізації необхідно чотири напівпровідникових перетворювача, тому загальна їх вартість складе 8400000 грн.

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем старого обладнання, монтажем нового та встановленням напівпровідникових перетворювачів. Трудові витрати на демонтаж старого обладнання представлені в таблиці 5.1.

На монтаж нового та встановлення напівпровідникового перетворювача представлені в таблиці 5.2, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів третього і п'ятого розрядів по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Таблиця 5.1 – Трудові витрати на демонтаж існуючого тягового перетворювача

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна плата, грн. (10%)	Відрахування на соц.заходи, грн. (22%)	Усього, грн.
Демонтаж існуючого тягового перетворювача	3	1,25	73,94	92,43	9,24	20,34	122,01
	5	1,25	95,51	119,39	11,94	28,65	159,98
Усього, грн.							281,99

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{ДЕМОНТ} = З_Д \cdot m_м, \tag{5.5}$$

де $m_м$ – кількість існуючих перетворювачів у електропоїзді;

$З_Д$ – витрати на демонтаж одного перетворювача.

Підставляємо значення та отримаємо:

$$B_{ДЕМОНТ} = 281,99 \cdot 8 = 2255,92 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.2 – Трудові витрати на монтаж та встановлення нового тягового перетворювача

Вид робіт	Розряд	Витрати часу, год.	Годинна тарифна ставка, грн.	Основна заробітна плата, грн.	Додаткова заробітна пла-та, грн. (10%)	Відрахування на соц.заходи, грн. (22%)	Усього, грн.
Монтаж нового тягового перетворювача	3	1,75	73,94	129,40	12,94	28,47	170,81
	5	1,75	95,51	167,14	16,71	36,77	220,62
Усього, грн.							391,43

Оскільки на електропоїзді потрібно встановити чотири нові напівпровідникових перетворювачі, то витрати складуть, грн.

$$B_{МОНТ} = З_М \cdot m, \tag{5.6}$$

де m – кількість нових перетворювачів у електропоїзді;

$З_М$ – витрати на монтаж перетворювача.

Підставляємо значення та отримаємо:

$$B_{МОНТ} = 391,43 \cdot 4 = 1565,72 \text{ грн.}$$

В загальному вигляді капітальні вкладення на модернізацію одного електропоїзда складають, грн.:

$$\Delta К = \Sigma B_{ПР} + B_{МОНТ} + B_{ДЕМОНТ}, \tag{5.7}$$

де $\sum B_{ПР}$ - загальна вартість перетворювачів, грн.;

$B_{МОНТ}$ – монтаж обладнання, грн.;

$B_{ДЕМОНТ}$ – витрати на демонтаж обладнання, грн.

$$\Delta K = 8400000 + 2255,92 + 1565,72 = 8403821,64 \text{ грн.}$$

У даному розділі розрахунок економічного ефекту базується на отриманні прибутку від нововведення за рахунок економії електричної енергії на тягу поїздів та витрат на обслуговування та ремонт електропоїзда.

Розраховуємо витрати електроенергії на тягу поїздів одного електропоїзда базового варіанту і нового варіанту.

Визначимо пробіг електропоїзда за рік

$$L_{\text{рік}} = 365 \times L_{\text{с}}, \tag{5.8}$$

де $L_{\text{с}}$ – середньодобовий пробіг електропоїзда, км.

$$L_{\text{рік}} = 365 \times 688 = 251120 \text{ км.}$$

Середньорічний бюджет часу електропоїзду

$$K_{об} = 365 \cdot 24 - (\sum T_{ТР1} + \sum T_{ТР2} + \sum T_{ТР3} + \sum T_{то3}) \ , \tag{5.9}$$

де $\sum T_{ТР3}, \sum T_{ТР2}, \sum T_{ТР1}$ – простій електропоїзду на ремонті ПР3, ПР2, ПР1 середньорічний, год;

$\sum T_{то3}$ – простій електропоїзду на технічному обслуговуванні ТО3 в середньому за рік, год.

Простій на і-виді ремонту за рік

$$\sum T_i = \sum M_i \cdot t_{\text{рем}i} \ , \tag{5.10}$$

де $\sum M_i$ – кількість і-тих видів ремонтів за рік;

$t_{\text{рем}i}$ – норма простою на ремонт і-ого виду ремонту, год.

Кількість ремонтів і-го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{L_{річ}}{n_{рем_i}} \ , \tag{5.11}$$

де $n_{рем_i}$ – міжремонтний пробіг і-го виду ремонту;

$$\sum M_{тр3} = \frac{141620}{260000} = 0{,}544,$$

$$\sum M_{тр2} = \frac{141620}{120000} = 1{,}18,$$

$$\sum M_{тр1} = \frac{141620}{388 \cdot 50} = 7{,}3,$$

де 50 – міжремонтний період ПР1, діб.

$$\sum M_{то3} = \frac{141620}{388 \cdot 5} = 73,$$

де 5 – міжремонтний період ТО3, діб.

Таким чином середньорічний простій електропоїзда на і-му виді ремонту складає

$$\sum T_{тр3} = 0{,}544 \cdot 91 = 49{,}504 \text{ год},$$

$$\sum T_{тр2} = 1{,}18 \cdot 36 = 42{,}48 \text{ год},$$

$$\sum T_{тр1} = 7{,}3 \cdot 15 = 109{,}5 \text{ год},$$

$$\sum T_{то3} = 73 \cdot 6 = 438 \text{ год}.$$

Ефективний фонд робочого часу електропоїзда за рік

$$T_{еф} = 365 \cdot 24 - (49{,}5 + 42{,}5 + 109{,}5 + 438) = 8120{,}5 \text{год}.$$

Визначаємо річну кількість електричної енергії спожитої на електричну тягу з середньою потужністю навантаження 2000 кВт на один моторний вагон. Потужність на весь електропоїзд складе $P_{нав}$ = 2000·2=4000 кВт для базового варіанту, кВт-год

$$E_{\text{річ}}^{баз} = \frac{P_{нав}}{\eta_{пер}} \times T_{еф} = \frac{4000}{0{,}9} \times 8120{,}5 = 36091000 \text{ кВт-год},$$

для модернізованого варіанту, кВт-год

$$E_{\text{річ}}^{мод} = \frac{P_{нав}}{\eta_{н.пер}} \times T_{еф} = \frac{4000}{0{,}92} \times 8120{,}5 = 35306500 \text{ кВт-год},$$

де $\eta_{н.пер}, \eta_{пер}$ – коефіцієнт корисної дії напівпровідникового нового тягового перетворювача та існуючого перетворювача відповідно.

Визначаємо економію електричної енергії

$$\Delta E_{річ} = (E_{річ}^{баз} - E_{річ}^{мод}) \cdot к_{сз} \cdot в_{е}.$$

де $к_{сз}$ – коефіцієнт середньорічного завантаження тягового силового електрообладнання;

$в_{е}$ – вартість електричної енергії, яка складає 5,60 грн/кВт-год.

$$\Delta E_{річ} = (36091000 - 35306500) \cdot 0,67 \cdot 5,60 = 2943362 \text{ грн.}$$

Визначаємо економію витрат на ремонт таблиця 5.4.

Таблиця 5.4 – Визначення загальної вартості ремонту перетворювача

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту перетворювачів, грн	Кількість перетворювачів на електропоїзді, шт	Вартість ремонту обладнання електропоїзда, грн
Вартість ремонту існуючого перетворювача				
ПР3	0,544	1047,56	8	4558,98
ПР2	1,18	730,72	8	6897,99
ПР1	7,3	429,58	8	25087,47
ТО3	73	114,45	8	66838,80
Разом				103383,24
Вартість ремонту нового перетворювача				
ПР3	0,544	1100,26	4	2394,17
ПР2	1,18	548,20	4	2587,50
ПР1	7,3	418,62	4	12223,71
ТО3	73	114,45	4	33419,40
Разом				50624,78
Різниця вартості ремонту				52758,46

Таким чином, річна економія поточних витрат на ремонт тягових перетворювачів складає

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{рем}} = 103383,24 - 50624,78 = 52758,46 \text{ грн.}$$

Загальна економія витрат складе

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{заг}} = 2943362 + 52758,46 = 2996120,46 \text{ грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі.

Таблиця 5.5 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Капітальні вкладення K_t, тис.грн.	8403,82									
Економія поточних витрат Δu_t, тис. грн	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12
Економічний ефект E_t, тис.грн.	-5407,70	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12
Коефіцієнт приведення α_t	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-5407,70	2726,47	2486,78	2247,09	2037,36	1857,59	1690,41	1538,27	1399,83	1273,84
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \ldots + E_k$ тис.грн.	-5407,70	-2681,23	-194,45	2052,64	4090,00	5947,59	7638,00	9176,27	10576,10	11849,94

Висновок: Розрахунок економічного ефекту від впровадження нового удосконаленого тягового напівпровідникового перетворювача на електропоїзді постійного струму вказує на доцільність запропонованого заходу, а значення економічного ефекту за десять років наростаючим підсумком складає 11849940 грн., період повернення капітальних вкладень складає менше 4 років.

Висновки

У кваліфікаційній роботі проведено аналітичне дослідження розроблених для України тягових перетворювачів систем асинхронного електроприводу швидкісних двосистемних електропоїздів Хюндай та ЕКр-1. Показано, що характеристики вихідної напруги трифазних трирівневих інверторів напруги у порівнянні з дворівневими значно вище, також вдвічі зменшена робоча напруга силових ключів схеми інверторів напруги, що важливо при підвищеній напрузі живлення перетворювачів. З урахуванням підвищеної якості вихідної трифазної напруги та високої вартості потужних біполярних транзисторів з ізольованим затвором 65 класу, запропоновано структуру трирівневих інверторів напруги, в якій застосовано напівпровідникові прилади ключів 33 класу.

Склад схеми та структуру перетворювача було обрано із міркувань забезпечення підвищеної якості вихідної трифазної напруги живлення асинхронних тягових електродвигунів приводу при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Під час дослідження проведено аналіз досвіду ефективності експлуатації подібних систем тягового асинхронного електроприводу двосистемного електричного рухомого складу як в Україні, так і за кордоном.

В розрахунковій частині роботи визначено основні параметри та проведено вибір силових напівпровідникових приладів ключів і фільтрового обладнання перетворювачів системи тягового асинхронного електроприводу та бортової мережі живлення допоміжного електрообладнання швидкісного двосистемного електропоїзда. Для проєктування радіаторів охолоджувальної системи виконано тепловий розрахунок силових напівпровідникових приладів ключів.

У економічному розділі магістерської кваліфікаційної роботи було виконано розрахунок економічної ефективності запропонованих заходів по

модернізації перетворювачів у системі тягового асинхронного електроприводу двосистемного електропоїзда. Значення економічного ефекту за десять років наростаючим підсумком повинно скласти 11849940 грн., період повернення капітальних вкладень – менше 4 років, що підтверджує економічну доцільність та окупність впровадження запропонованої розробки.

Список використаних джерел

1. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: Навч. посібник / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін./ За ред. Ю. П. Гончарова – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. - 192с.

2. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.

3. Сенько В. І., Панасенко М. В., Юрченко М. М. та ін.. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник у 4-х томах / За ред. В. І. Сенька. Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.

4. Офіційний сайт представника фірми «ABB» в Україні http://www.abb.ua/ProductGuide/Alphabetical.aspx.

5. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) ДСТУ EN 50160:2014. Видання офіційне. – Київ, Мінекономрозвитку України, 2014. – 27 с.

6. Семененко О.І., Семененко Ю.О. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни Тягові статичні перетворювачі на тему “Модернізація тягового електроприводу ЕРС з асинхронними двигунами”. Харків: УкрДУЗТ, 2017 – 24 с.

7. Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Т., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка: Підручник/ За ред. В.С. Руденка.– Харків: Фоліо, 2000. Ч.2. – 360 с.

8. Семененко О.І. Моделювання режимів роботи трифазного інвертора напруги з м’якою комутацією ключів / О.І. Семененко, М.М. Одєгов, Ю.О. Семененко, В.М. Харченко, А.О. Павлов //Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків, НТУ „ХПІ”. 2021. – С. 123.

9. Калабухін Ю.Є., Шраменко О.В. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності “Електричний транспорт” всіх форм

навчання «Визначення економічної ефективності заходів науково-технічного прогресу на залізничному транспорті». Харків: УкрДУЗТ, 2007 – 20 с.

10. Русаловський А. В. Правові та організаційні питання охорони праці: навч. посіб. / А. В. Русаловський – 4-те вид., допов. і переробл. – К. : Університет «Україна», 2009. – 295 с.

11. Новий російсько-український словник-довідник : 100000 термінів / за ред. С. Я. Єрмоленко. – 2-ге вид., допов. – К. : Довіра : Рідна мова, 1999. – 877 с.

12. Закон України «Про вищу освіту». Електронний ресурс. – Режим доступу: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1556-18.

Додаток А

Український державний університет залізничного транспорту

Механіко-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

2024

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ1

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА ТЕМУ «МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ШВИДКІСНОГО ДВОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА»

Розробив : студент групи 214-ЕЕ-Д23 спеціальності 273 освітньої програми «Електровози та електропоїзди»

Русанов В.І.

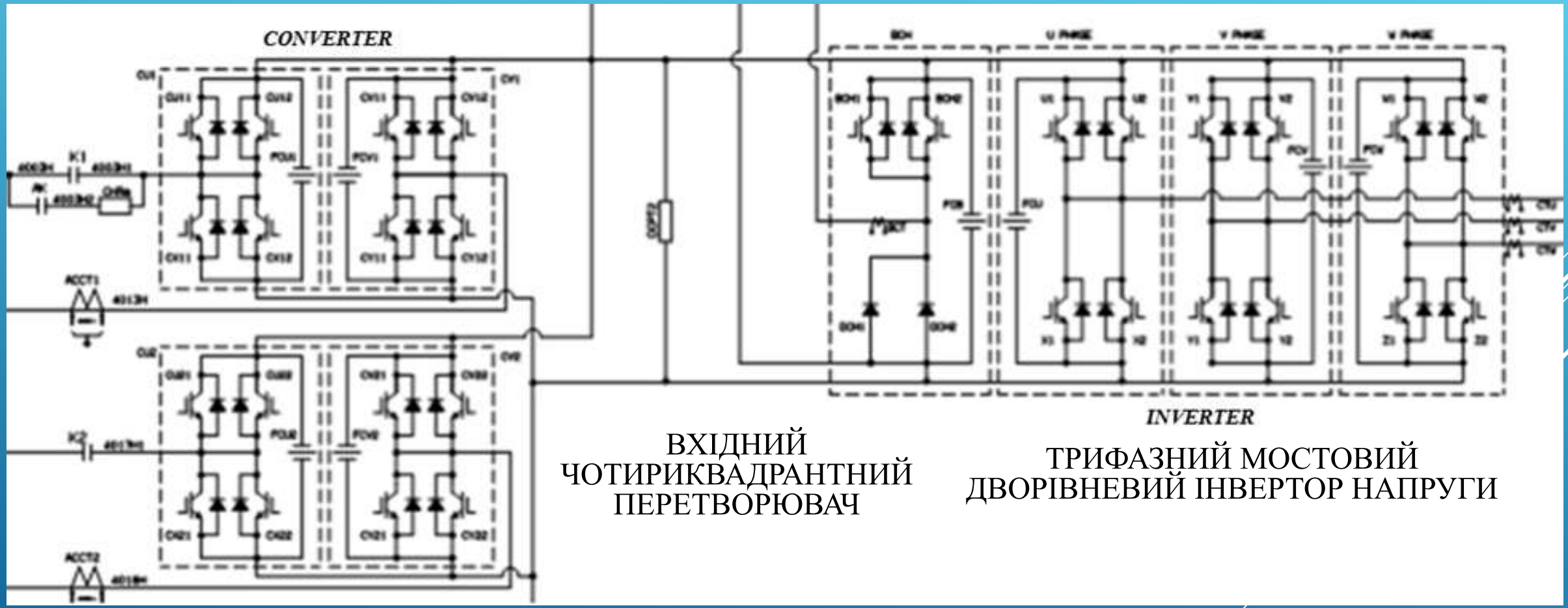
Керівник : к.т.н., доцент

Семененко О.І.

Об’єктом дослідження є електромагнітні процеси в напівпровідникових перетворювачах швидкісних двосистемних електропоїздів з тяговими асинхронними двигунами.

Метою дослідження є підвищення ефективності напівпровідникових перетворювачів швидкісних двосистемних електропоїздів з тяговими асинхронними двигунами.

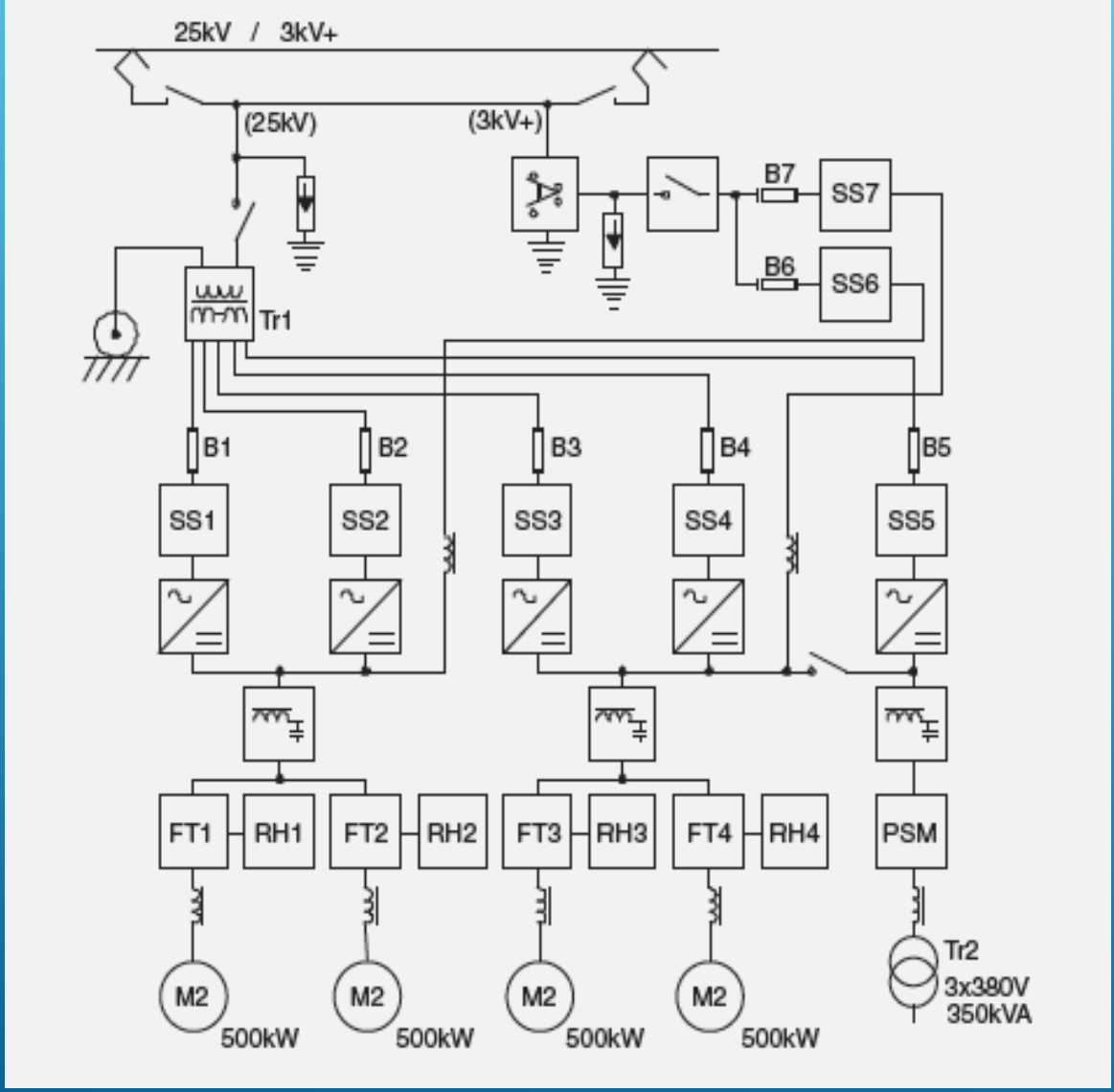
СПРОЩЕНА СИЛОВА СХЕМА ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДВОСИСТЕМНОГО ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ХЮНДАЙ



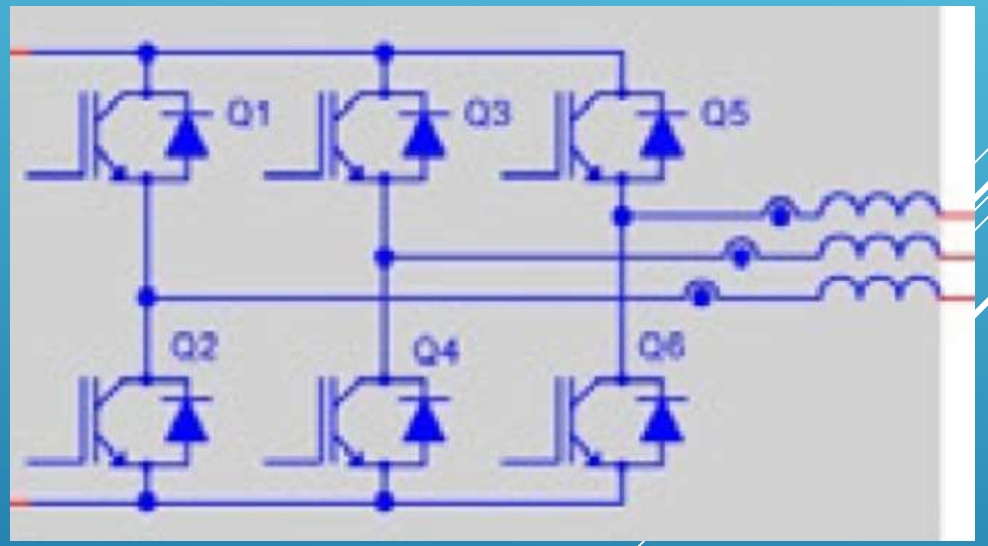
ВХІДНИЙ ЧОТИРИКВАДРАНТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

ТРИФАЗНИЙ МОСТОВИЙ ДВОРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ

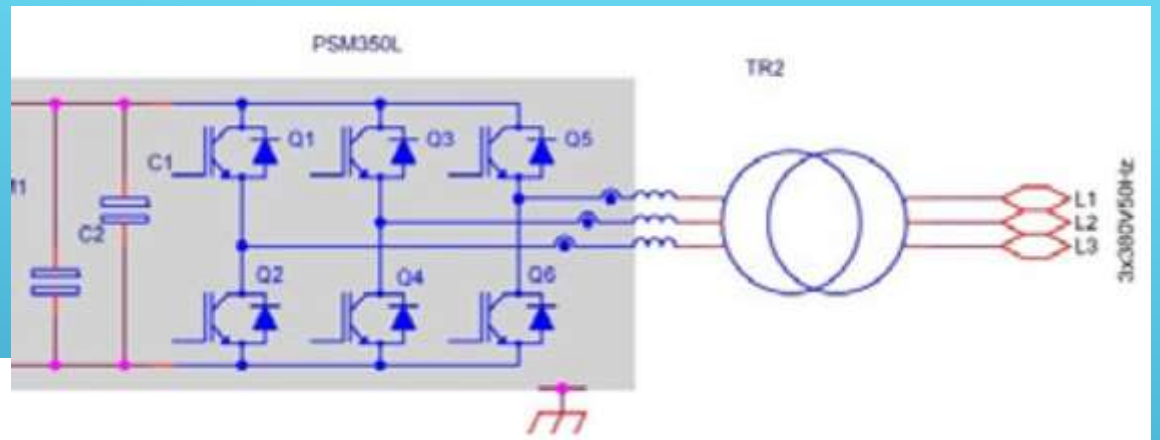
СИЛОВА СТРУКТУРНА СХЕМА МІЖРЕГІОНАЛЬНОГО ДВОСИСТЕМНОГО ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЕКр-1

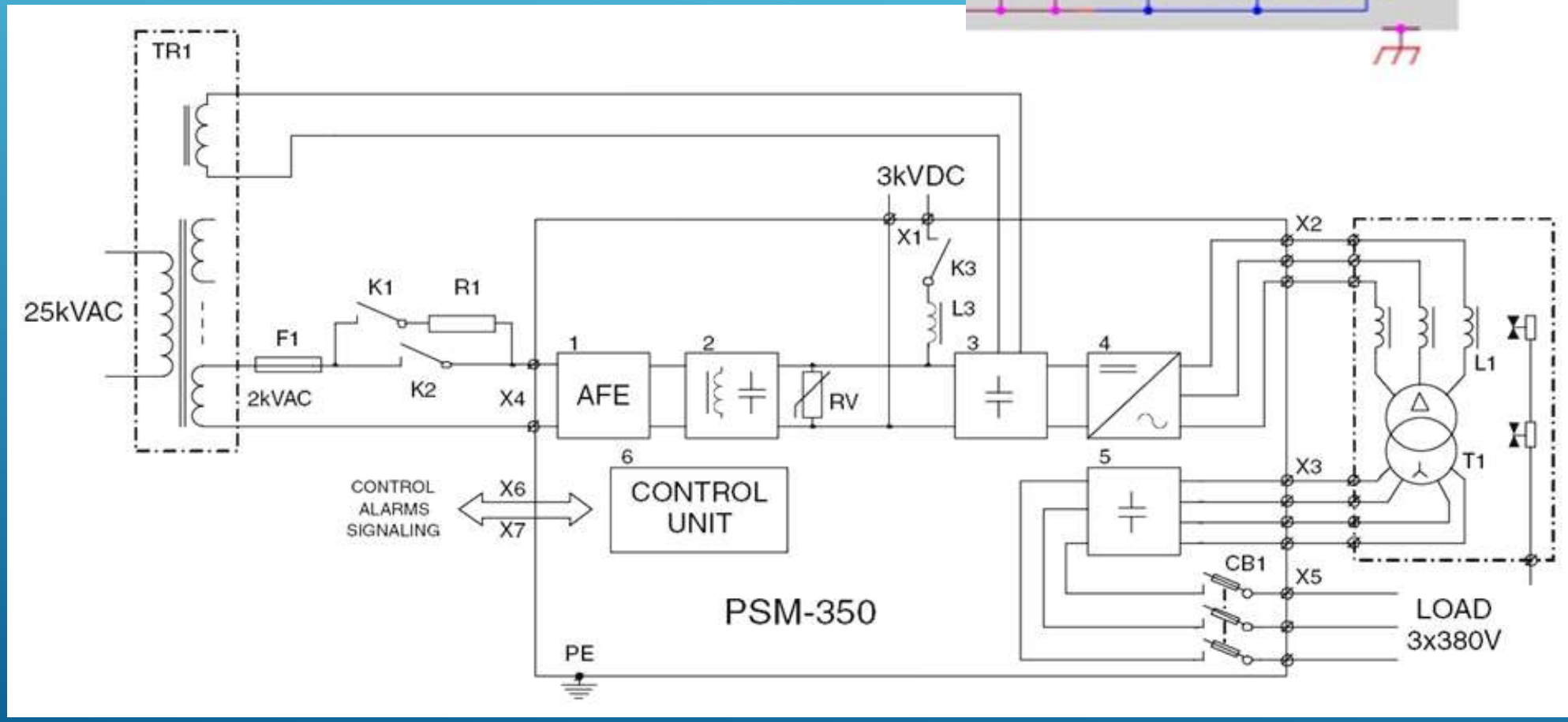


ТРИФАЗНИЙ МОСТОВИЙ ДВОРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ



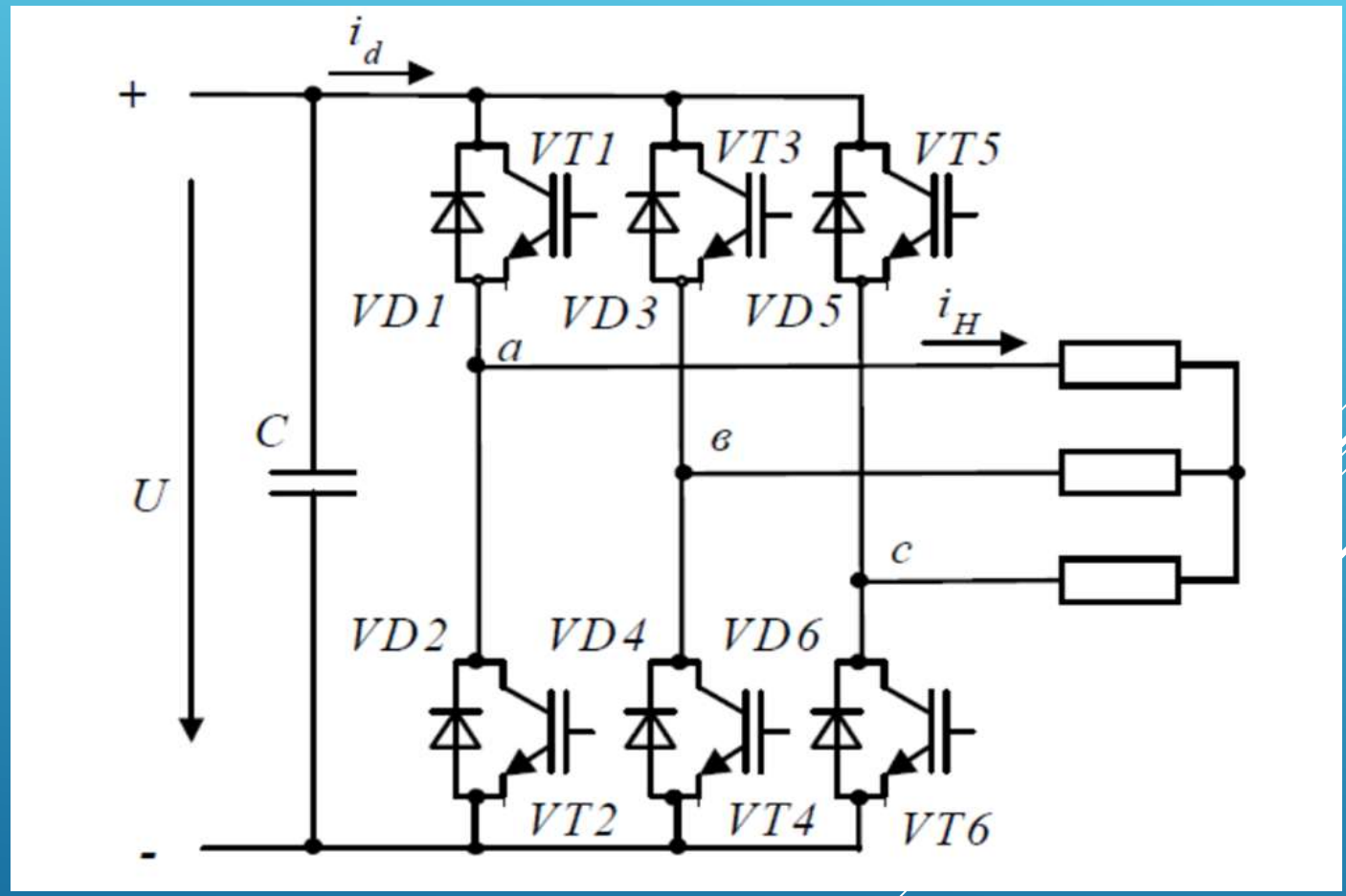
СТРУКТУРА БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЕКр-1



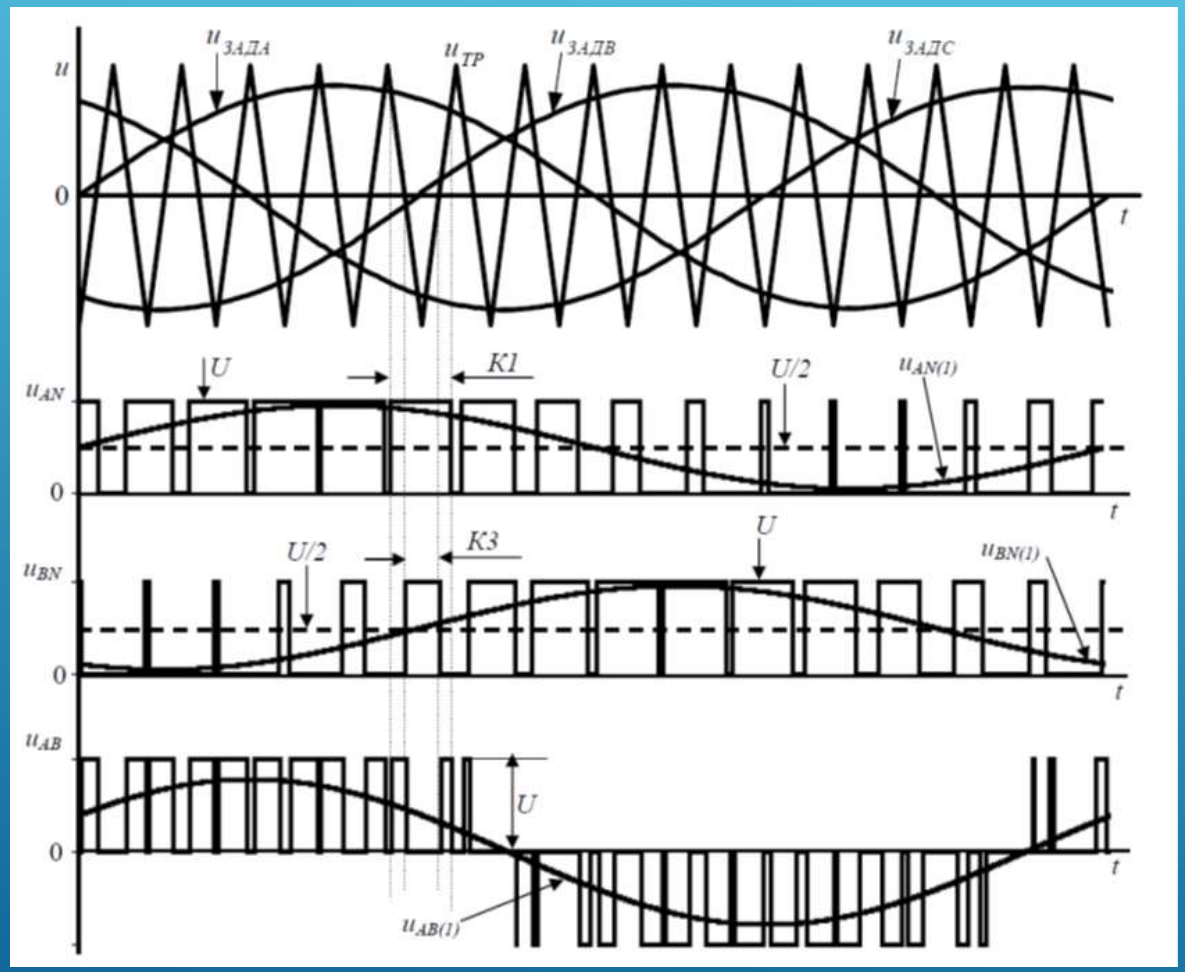


ТРИФАЗНИЙ МОСТОВИЙ ДВОРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ НА IGBT

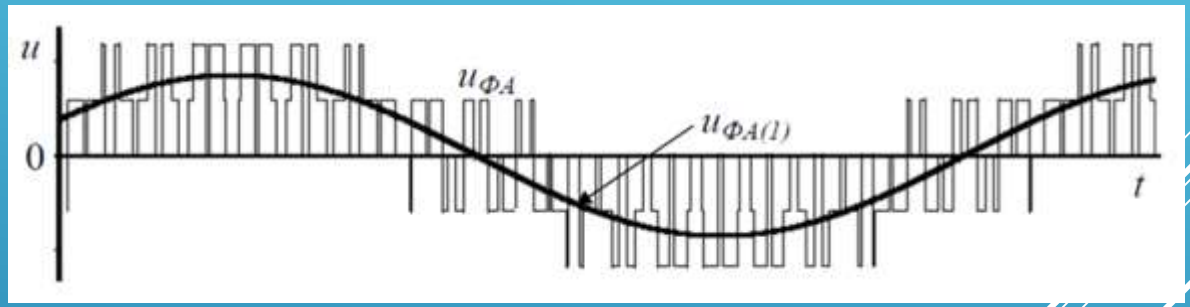
Аналіз розглянутих розробок показує, що у більшості силових схем сучасних електропоїздів з асинхронним приводом у якості тягового перетворювача застосовуються трифазні мостові дворівневі інвертори напруги. У них застосовані високовольтні дороговартісні біполярні транзистори з ізольованим затвором 65 класу, а вихідна трифазна напруга має коефіцієнт гармонічних спотворень вище 53 % .



Формування вихідної напруги трифазним інвертором з двополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

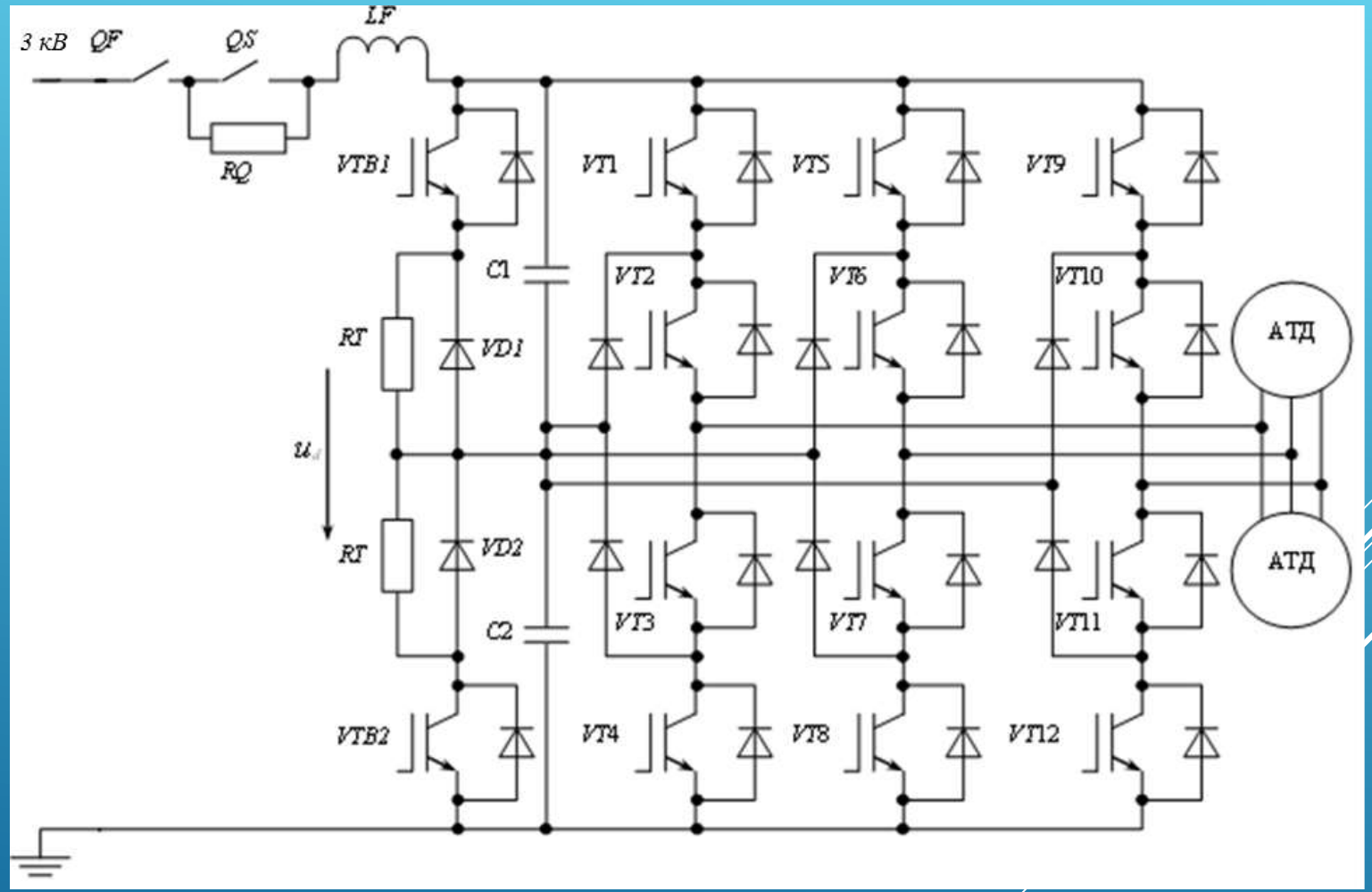


Вихідна фазна напруга трифазного інвертора з двополярною синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією

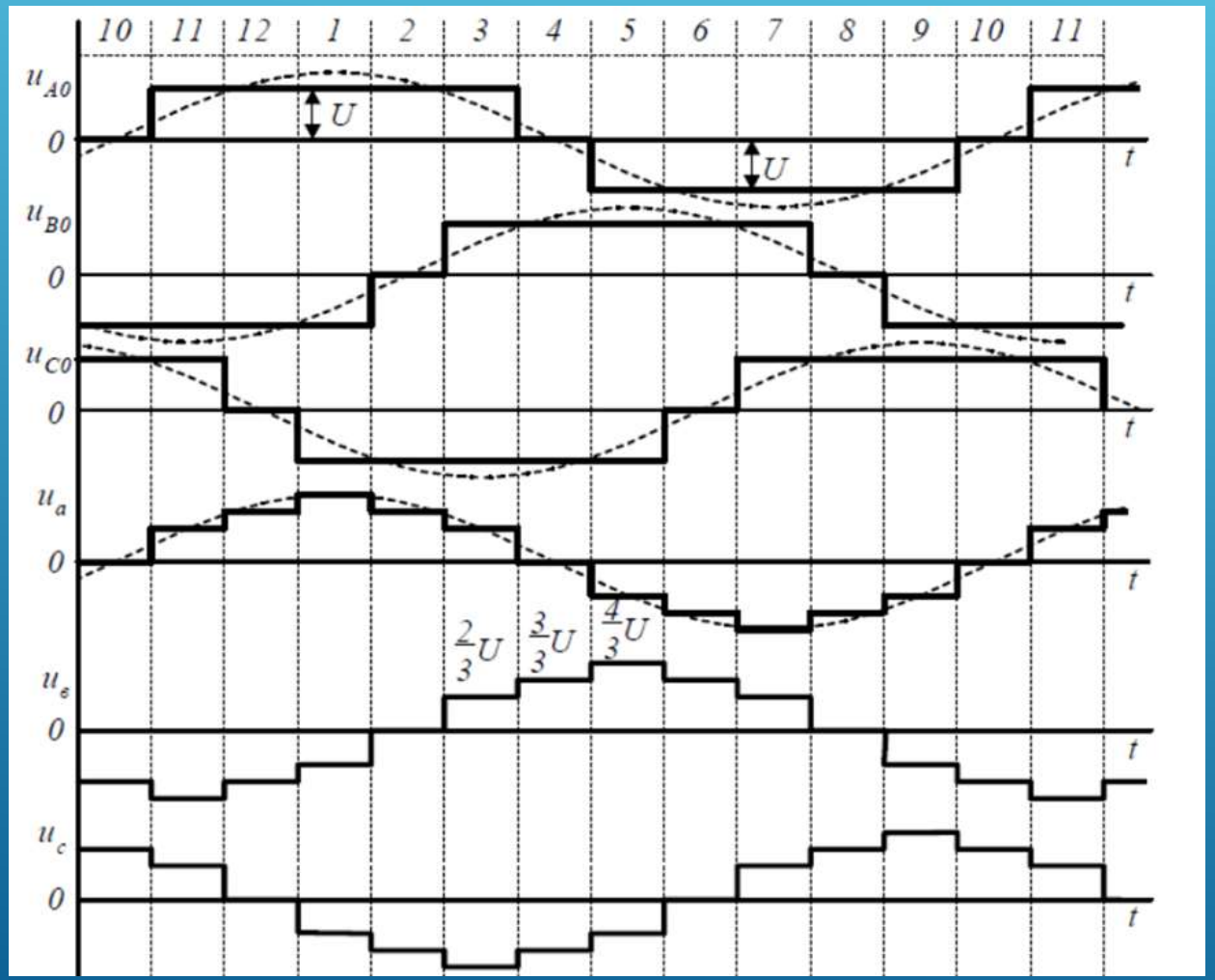


ТРИФАЗНИЙ ТРИРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ

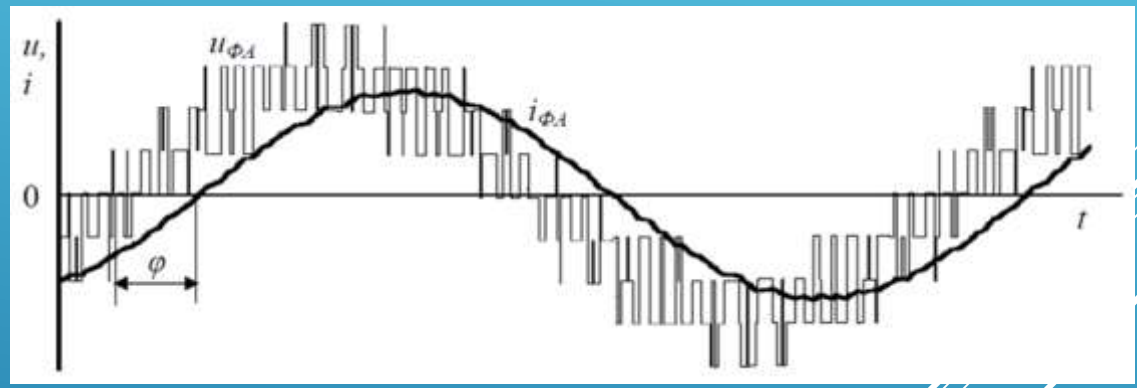
Щоб покращити гармонічний склад вихідної трифазної напруги і використати менш дороговартісні біполярні транзистори з ізольованим затвором 33 класу, потрібно застосувати для двосистемного електропоїзда трифазні трирівневі інвертори напруги. Це забезпечить спрощення вихідного фільтра, поліпшення умов роботи тягових електродвигунів і підвищить термін їх експлуатації.



Діаграми напруг тягового трирівневого інвертора напруги при відсутності широтно-імпульсної модуляції

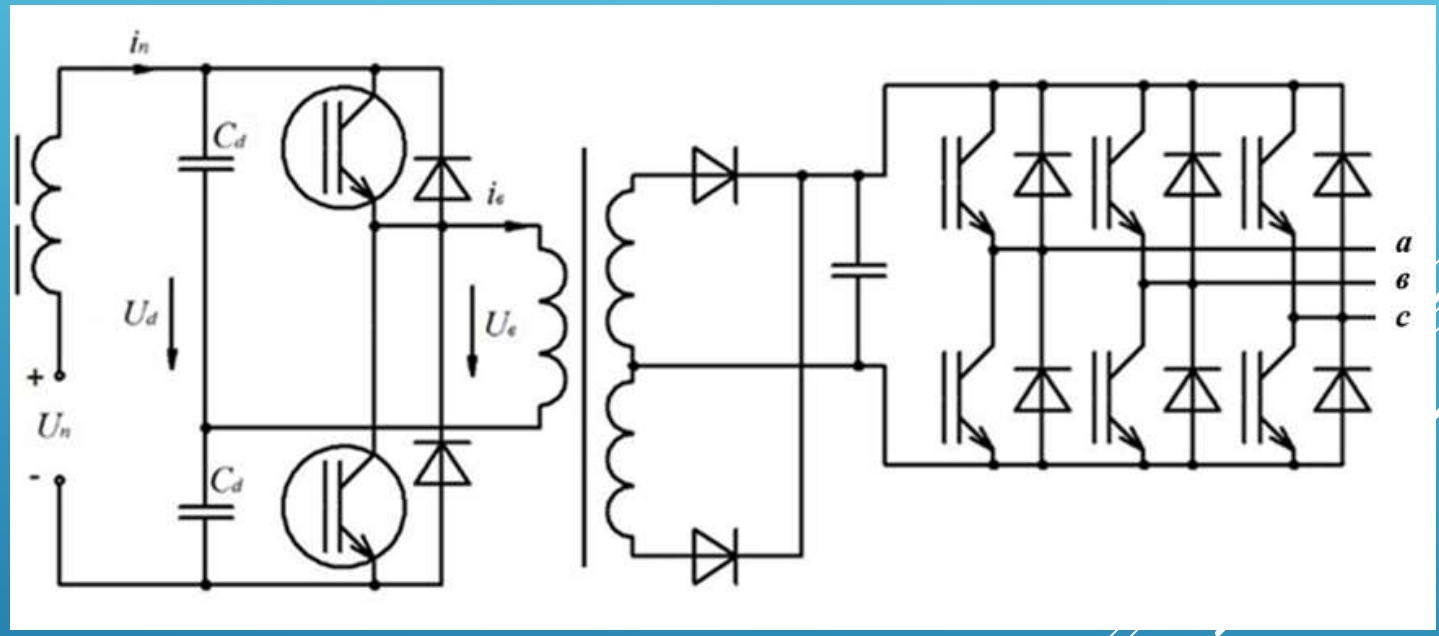


Діаграма фазної напруги та струму трифазного трирівневого інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією



ПЕРЕТВОРЮВАЧ БОРТОВОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ШВИДКІСНОГО МОДЕРНІЗОВАНОГО ДВОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Напівмостовий інвертор напруги забезпечить перетворення напруги 3кВ від мережі постійного струму або від вхідного чотириквадрантного перетворювача у змінну напругу підвищеної частоти, яка буде подаватись до роздільного трансформатора. Змінна напруга буде понижена до необхідного рівня та випрямлена діодним випрямлячем, а низьковольтний трифазний мостовий інвертор з ШІМ перетворить випрямлену напругу у змінну напругу 3×380 В, частоти 50 Гц.



ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБКИ

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	**10**
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	**2034**
Капітальні вкладення K_t, тис.грн.	8403,82									
Економія поточних витрат Δu_t, тис. грн	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	**2996,12**
Економічний ефект E_t, тис.грн.	-5407,70	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	2996,12	**2996,12**
Коефіцієнт приведення	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	**0,42**
Економічний ефект з урахуванням приведення	-5407,70	2726,47	2486,78	2247,09	2037,36	1857,59	1690,41	1538,27	1399,83	**1273,84**
Економічний ефект наростаючим підсумком тис.грн.	**-5407,70**	**-2681,23**	**-194,45**	**2052,64**	**4090,00**	**5947,59**	**7638,00**	**9176,27**	**10576,10**	**11849,94**

Висновки до кваліфікаційної роботи

У кваліфікаційній роботі проведено аналітичне дослідження розроблених для України тягових перетворювачів систем асинхронного електроприводу швидкісних двосистемних електропоїздів Хюндай та ЕКр-1. Показано, що характеристики вихідної напруги трифазних трирівневих інверторів напруги у порівнянні з дворівневими значно вище, також вдвічі зменшена робоча напруга силових ключів схеми інверторів напруги, що важливо при підвищеній напрузі живлення перетворювачів. З урахуванням підвищеної якості вихідної трифазної напруги та високої вартості потужних біполярних транзисторів з ізольованим затвором 65 класу, запропоновано структуру трирівневих інверторів напруги, в якій застосовано напівпровідникові прилади ключів 33 класу.

Склад схеми та структуру перетворювача було обрано із міркувань забезпечення підвищеної якості вихідної трифазної напруги живлення асинхронних тягових електродвигунів приводу при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Під час дослідження проведено аналіз досвіду ефективності експлуатації подібних систем тягового асинхронного електроприводу двосистемного електричного рухомого складу як в Україні, так і за кордоном.

В розрахунковій частині роботи визначено основні параметри та проведено вибір силових напівпровідникових приладів ключів і фільтрового обладнання перетворювачів системи тягового асинхронного електроприводу та бортової мережі живлення допоміжного електрообладнання швидкісного двосистемного електропоїзда. Для проєктування радіаторів охолоджувальної системи виконано тепловий розрахунок силових напівпровідникових приладів ключів.

У економічному розділі магістерської кваліфікаційної роботи було виконано розрахунок економічної ефективності запропонованих заходів по модернізації перетворювачів у системі тягового асинхронного електроприводу двосистемного електропоїзда. Значення економічного ефекту за десять років наростаючим підсумком повинно скласти 11849940 грн., період повернення капітальних вкладень – менше 4 років, що підтверджує економічну доцільність та окупність впровадження запропонованої розробки.

Звіт подібності

метадані

Заголовок
Модернізація електроприводу швидкісного двосистемного електропоїзда

Автор
Русанов Владислав Ігорович

Науковий керівник / Експерт
Семененко Олександр Іванович

підрозділ
Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

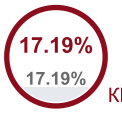
Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв	ß	9
Інтервали	A⟶	0
Мікропробіли	·	24
Білі знаки	ß	0
Парафрази (SmartMarks)	a	48

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

25	4130	33383
Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2	Кількість слів	Кількість символів

Подібності за списком джерел

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз — Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)	
1	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")	43	1.04 %
2	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42605/1/Mokhovyk_bakalavr.pdf	41	0.99 %
3	http://eprints.kname.edu.ua/41615/1/2015%207%D0%9D%20%D0%A8%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf	31	0.75 %

4	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")	30	0.73 %
5	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")	26	0.63 %
6	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42605/1/Mokhovyk_bakalavr.pdf	24	0.58 %
7	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")	23	0.56 %
8	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42605/1/Mokhovyk_bakalavr.pdf	22	0.53 %
9	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42605/1/Mokhovyk_bakalavr.pdf	22	0.53 %
10	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")	22	0.53 %

з бази даних RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

з домашньої бази даних (9.39 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)	
1	Поясн. зап. Лавр.docx [redacted] 1/5/2024 **Ukrainian State University of Railway Transport (Кафедра "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка")**	**388 (26)**	**9.39 %**

з програми обміну базами даних (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

з Інтернету (7.80 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)	
1	**https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42605/1/Mokhovyk_bakalavr.pdf**	**185 (9)**	**4.48 %**
2	**http://eprints.kname.edu.ua/41615/1/2015%207%D0%9D%20%D0%A8%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BA%D0%B8%D0%BD.pdf**	**137 (8)**	**3.32 %**

Список прийнятих фрагментів (немає прийнятих фрагментів)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)