

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
Факультет “*Транспортна інженерія*”  
Кафедра “*Локомотиви*”

“ДО ЗАХИСТУ”  
Зав.кафедрою *Б. Боднар* Борис БОДНАР  
“ *16* ” *01* \_\_\_\_\_ 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: “**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВІВ  
ЗМІННОГО СТРУМУ**”

за освітньою програмою: “*Локомотиви та локомотивне господарство*”  
зі спеціальності 273 “*Залізничний транспорт*”  
галузі знань 27 “*Транспорт*”

Виконав: студент групи *ЛГ2221*

\_\_\_\_\_ *С* Сергій ШАРАФАН  
Керівник \_\_\_\_\_ *В* Володимир СЕРДЮК  
Нормоконтролер \_\_\_\_\_ *Л* Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_ *С*

Дніпро, 2024

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”  
Department “*Locomotives*”

Explanatory Note  
to Master’s Thesis

*master*

on the topic: “RESEARCH OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF LOCOMOTIVES  
ALTERNATING CURRENT”

according to educational curriculum: “*Locomotives and Locomotive Economy*”  
in the Speciality 273 “*Railway transport*”  
Branch of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group *LG2221*:

Sergey SHARAFAN

Scientific Supervisor: Volodymyr SERDYUK

Normative controller: Lyudmila KOLODIY

Dnipro, 2024



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 МАГІСТРАЛЬНІ ЕЛЕКТРОВОЗИ .....	10
1.1 Загальна характеристика електровозів .....	10
1.2 Вимоги до швидкісних локомотивів в Україні .....	17
2 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ВІП ЕЛЕКТРОВОЗА.....	29
2.1 Аналітичне дослідження процесів роботи ВІП в режимі тяги .....	29
2.2 Аналітичне дослідження процесів роботи ВІП в режимі рекуперативного гальмування .....	32
2.3 Схема силових кіл електровоза ДСЗ .....	36
3 РОЗРОБКА ВІП ЕЛЕКТРОВОЗА НА ОСНОВІ IGBT-ТРАНЗИСТОРІВ В РЕЖИМІ ТЯГИ І РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ .....	40
3.1 Розробка ВІП електровоза на основі IGBT-транзисторів в режимі тяги і способи його управління.....	40
3.2 Розробка ВІП електровоза на основі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування і способи його управління .....	51
4 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТИПУ АД-914 ПРОЕКТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА.....	57
4.1 Призначення та застосування автономних інверторів.....	57
4.2 Вибір схеми перетворювача.....	59
4.3 Розрахунок параметрів випрямляча.....	60
4.4 Розрахунок параметрів фільтра.....	65
4.5 Розрахунок миттєвих значень струму для заданої частоти АІН.....	69

					0032.190111.000.04MP.ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Дослідження електро- обладнання електровозів змінного струму	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Архивів</i>
<i>Розроб.</i>		Шарафан				5	121	
<i>Перевір.</i>		Сердюк						
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		Колодій				УДУНТ, гр.ЛГ2221		
<i>Затверд.</i>		Боднар						

4.6	Заходи щодо зменшення перешкоджаючих впливів при застосуванні тиристорних перетворювачів на проектному електровозі .....	76
4.7	Фазно-частотне регулювання АТД .....	84
5	ЗАСТОСУВАННЯ НОВІТНЬОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОЛПШЕННЯ ТЯГОВИХ І ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ .....	91
5.1	Технічне обґрунтування застосування асинхронних тягових двигунів типу АД-914 на проектному електровозі .....	91
5.2	Розрахунок тягових і швидкісних характеристик проектного електровоза з асинхронним приводом для швидкісного руху .....	98
5.3	Розміщення обладнання та поздовжнє розважування проектного електровоза .....	109
	ВИСНОВКИ.....	117
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	120

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## ВСТУП

На сьогоднішній день на залізниці всі експлуатовані електровози змінного струму з колекторними тяговими електродвигунами мають невисокий рівень енергетичних показників в режимах тяги і рекуперативного гальмування. У зв'язку з цим електровози мають високе споживання електроенергії, витраченої на тягу поїздів, яка являється основною статтею витрат залізниці.

Для української залізниці поставлені задачі на запровадження ресурсозберігаючих технологій і нових технічних засобів. В цьому напрямку енергозбереження і підвищення якості електроенергії в контактній мережі є одним з основних напрямків розвитку.

Зараз на залізницях України та Росії використовуються такі електровози змінного струму типу ВЛ80<sup>Р</sup>, ВЛ85, ВЛ80<sup>ТК</sup>, 2ЭС5К, 3ЭС5К і 4Э5К, які частіше за все складаються з двох, трьох секцій, в кожній з яких знаходиться чотири або шість тягових електроприводів постійного струму на основі колекторних тягових двигунів із живленням від мережі через тяговий трансформатор і два або три випрямляючих інверторних перетворювачів (ВІП), працюючих випрямлячами в режимі тяги електровоза та інверторами в режимі його електричного рекуперативного гальмування. Ці електровози за своїми енергетичними показниками в режимах тяги і рекуперативного гальмування не відповідають сучасним вимогам. Загальним недоліком тягових електроприводів електровоза є значне споживання реактивної потужності, а також викривлення форми напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора електровоза, які і обумовлюють низьке значення коефіцієнту потужності ( $K_{\Pi}$ ), який не перевищує в режимі тяги 0,84 і рекуперативного гальмування 0,65. Крім того, існуючі типові алгоритми управління перетворювачами породжують порушення у роботі електрообладнання, що в свою чергу призводить до скорочення строку служби ізоляції електричних машин і апаратів, призводить до погіршення роботи пристроїв сигналізації, централізації і блокування (СЦБ), зв'язку [1].

Коливання напруги в контактній мережі, які викликані процесами

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

перемикання тиристорів перетворювача, в деяких режимах мають амплітуду, яка порівнюється до напруги в контактній мережі. При кутах регулювання близько 90 ел. град. і при значному віддаленні електровоза від тягової підстанції максимальне значення викривлення напруги може у півтора а то й більше разів перевищувати амплітуду невикривленої живлячої напруги.

Досвід експлуатації електровозів змінного струму з тиристорними ВПП показує, що існуючі принципи управління ними гостро потребують перегляду. В результаті вивчення роботи виникла ідея підвищення енергоефективності тягових електроприводів електровоза шляхом розробки інших принципів їх управління.

Всі вказані вище типи електровозів оснащені системою рекуперативного гальмування, за допомогою якої з'являється можливість збільшення пропускної і провізної здатності залізниць, підвищення безпеки руху поїздів і повернення електроенергії в контактну мережу, а також дає перспективи для розвитку більшої швидкості електровозом. В той же час існує ряд серйозних причин, які стримують широке застосування рекуперативного гальмування. До таких причин відноситься те, що застосування ВПП електровоза в режимі інвертору викликає значне викривлення синусоїдальної форми напруги контактної мережі на струмоприймачі електровоза, а також те, що робота інвертору супроводжується низьким коефіцієнтом потужності електровоза по причині завищеної заради надійності величини кута запасу інвертору. Виникаюче викривлення в кривій напруги мережі негативно впливає на роботу блоку синхронізації апаратури управління інвертором, в результаті чого порушується його стійкість роботи, що може привести до порушення роботи інвертору і виходу його з ладу.

Обговорене вище дозволяє стверджувати, що одним з головних шляхів розвитку і удосконалення сучасних електровозів змінного струму, які працюють в режимі тяги і рекуперативного гальмування, є цілеспрямована зміна способів управління ВПП із введенням в його схему діодного плеча, а також радикальне удосконалення силової схеми ВПП шляхом заміни тиристорів на сучасні IGBT-транзистори і застосування нового алгоритму його управління, які направлені на значне підвищення коефіцієнту потужності тягових електроприводів електровоза і

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження гармонік напруги контактної мережі.

Таким чином, магістерська робота являє собою нове рішення важливої проблеми підвищення енергетичних показників електровозів і якості споживаної ними електричної енергії.

Новизна роботи полягає в наступному.

1) Запропоновано концепцію, яка дозволяє реалізувати математичне моделювання на узагальненій моделі системи «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз» з метою проведення досліджень процесу роботи електровоза.

2) Розроблено нову структуру і запропоновано нову схему ВПІ, виконану на основі IGBT-транзисторів з частотою комутації, яка відповідає частоті живлячої мережі, а також його новий алгоритм управління.

3) Запропоновано встановити новий потужніший тяговий електродвигун АД-914, який збільшить потужність електровоза майже в півтора рази і дозволить реалізувати більші швидкості локомотивом.

4) Для реалізації більшої швидкості пропонується переробити конструкцію візка, зокрема застосувати опорно-рамне підвішування замість опорно-осьового.

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 МАГІСТРАЛЬНІ ЕЛЕКТРОВОЗИ

## 1.1 Загальна характеристика електровозів

### 1.1.1 Пасажирський електровоз ЕП20

Електровоз ЕП20 – російський магістральний односекційний електровоз подвійного живлення. Електровоз призначено для пасажирських поїздів на залізницях стандартної колії 1520 мм, електрифікованих на однофазному змінному струмі промислової частоти 50 Гц з номінальною напругою 25 кВ і на постійному 3000 В. Випускається на Новочеркаському заводі.

Метою розробки електровоза було створення перспективних магістральних швидкісних пасажирських електровозів нового покоління, що відповідають сучасним вимогам та нормам експлуатації залізниць і не поступаються за критеріями світовим аналогам інших виробників. Електровоз експлуатується при температурах оточуючого середовища від -50 до +49°C. А також підтримує автоведення поїзду за допомогою систем позиціонування GPS і ГЛОНАС для енергорационального руху. Максимальна допустима швидкість електровоза 200 км/год.

### 1.1.2 Пасажирський електровоз ЕП1М

Електровоз ЕП1М призначений для водіння пасажирських поїздів. Може водити склад з 24 пасажирських вагонів по ділянці з підйомом в 9%. Замінює пасажирські вітчизняні електровози ВЛ60 і раніше імпортовані ЧС4, ЧС4<sup>т</sup>. Нова кабіна машиніста відповідає нормам безпеки НБЖТЦТ 04 і призначена для однієї особи. Застосовано систему автоведення, яка дозволяє вести поїзд по заданому режиму з урахуванням параметрів шляхової структури. Надійний струмоприймач забезпечує стабільні і високі характеристики струмоприймання.

Особливості конструкції:

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 1) опорно-рамний привід другого класу;
- 2) мікропроцесорна система управління рухомого складу АСУБ «Локомотив», яка забезпечує безпеку руху поїздів, автоматичне управління режимами руху, діагностує апарати і обладнання на відмову;
- 3) АСУБ «Локомотив» включає в себе комплексне локомотивне приладдя забезпечення безпеки КЛУБ, підсистему управління режимами двигуна, підсистему контролю і управління обладнанням і агрегатами електровоза та підсистему діагностики апаратів і обладнання електровоза.

### *1.1.3 Магістральний електровоз 2ЭС5К*

Електровоз 2ЭС5К – магістральний вантажний двосекційний змінного струму призначений для водіння вантажних поїздів. Основна мета його випуску – замінити існуючі локомотиви серії ВЛ80. Електровоз складається з двох секцій. Кожна секція електровоза має головну кабіну управління і комплект обладнання, який забезпечує роботу одного електровоза, а також роботу по системі багатьох одиниць в складі двох електровозів 2ЭС5К. Ходова частина виконана з опорно-осьовим підвішуванням тягових електродвигунів з моторно-осьовими підшипниками ковзання із нового композиційного матеріалу. Мікропроцесорна система управління забезпечує автоматичне управління рухом, режими автоведення поїзду а також діагностику параметрів руху і роботи обладнання електровоза. Обладнана сучасними системами безпеки. Також існують прототипи 3ЭС5К, 4ЭС5К які відрізняються кількістю секцій. Такі локомотиви створені для реалізації більшої сили тяги і більших навантажень.

#### Особливості конструкції

- 1) електрична схема забезпечує плавне чотиризонне регулювання напруги тягових електродвигунів і роботу електровоза в режимі тяги та електричного (рекуперативного) гальмування з управлінням з будь-якої кабіни управління головної чи хвостової секції;
- 2) вдосконалено тягові електродвигуни НБ-514Б;

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) новий трансформатор ОНД4Э-4350/25 із зменшеними втратами потужності;  
4) нова кабіна управління з покращеними умовами праці локомотивної бригади. Екологічно безпечні термоелектричні кондиціонери потужністю 4 кВт. Замість пічного опалення – панельні нагрівачі, розміщені по всій поверхні стін та підлоги кабіни.

### ***1.1.4 Магістральний електровоз ВЛ85***

Перший електровоз цієї серії було розроблено на Новочеркаському заводі в 1983 р. В кінці року їх вже було два. Після серії випробувань державної комісії було винесено рішення, що електровоз пройшов випробування, є придатним до експлуатації та відноситься до найвищої якості. З 1986 р. починається їх серійний випуск і продовжується до 1994 р. Всього було виготовлено 270 таких електровозів [3]. До 2000 р. він був найпотужнішим в світі електровозом. Дані електровози експлуатуються в східній і центральній частині Російської федерації. Локомотив складається з двох шестивісних секцій (рис. 1.1). Кузов кожної секції електровоза опирається на три двовісні візки. Тягові і гальмівні зусилля передаються на кузов за допомогою нахилених тяг. Для забезпечення потрібної сили тяги було застосовано колісно-моторні блоки. В перших електровозах були встановлені тягові двигуни з попередніх серій, для того, щоб прискорити випуск, а вже серійні локомотиви випускались з новими потужними тяговими двигунами.

Для забезпечення живлення електровоза від контактної мережі використовується два струмоприймача типу пантограф, які розташовані по кінцям кожної секції. Струмоприймачі обох секцій з'єднані між собою через шину, яка проходить через весь дах локомотива. В центральній частині даху кожної секції розташовані повітряний вимикач і головний ввід, який веде до первинної обмотки трансформатора.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Вантажний електровоз ВЛ85

Технічна характеристика електровоза ВЛ85

Осьова (колісна) формула	2(2 – 2 – 2)
Навантаження на вісь, кН (т)	230 (23)
Максимальна сила тяги при русанні з місця, кН (тс)	960 (96,0)
Потужність годинного режиму на валах тягових двигунів, кВт	9400
Сила тяги в годинному режимі, кН (тс)	740 (74,0)
Максимальна допустима швидкість, км/год	110

На кожній секції встановлено тяговий трансформатор ОНДЦЭ-10000/25 номінальною потужністю 7100 кВА. Трансформатор має обмотку високої напруги, три тягових обмотки, обмотку збудження тягових двигунів в режимі рекуперації. На секції стоять три випрямних інверторних перетворювача ВІП-4000. Кожний ВІП живиться від власної тягової обмотки і призначений для живлення двох з'єднаних паралельно тягових двигунів одного візка. ВІП дозволяє перетворювати в режимі тяги змінний струм в постійний з плавним регулюванням напруги шляхом зонно-фазного регулювання. А в режимі рекуперативного гальмування постійний струм в змінний.

**1.1.5 Вантажний електровоз ВЛ80<sup>Р</sup>**

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Електровоз було спроектовано на базі механічної частини, пневматичного і деякого електричного обладнання електровозів ВЛ80<sup>К</sup> і ВЛ80<sup>Т</sup>, що забезпечило високу степінь уніфікації [2]. Трансформатори і перетворювальні установки з використанням керованих напівпровідникових вентилів – тиристорів спеціально спроектовані для цих електровозів. За допомогою перетворювальної установки на тяговому режимі без перемикання силових кіл здійснюється випрямлення струму і плавне регулювання напруги на натискачах тягових електродвигунів, що покращує тягові властивості електровоза, а на гальмівному режимі постійний струм, який виробляється тяговими електродвигунами, перетворюється в установці в змінний частотою 50 Гц. Цей струм живить тягові обмотки трансформатора, первинна обмотка якого стає вторинною і повертає електричну енергію в контактну мережу для інших споживачів.

На кожній секції електровоза встановлено трансформатор ОДЦЭ-5000/25АМ, який має мережеву обмотку, дві тягові, обмотку власних потреб і обмотку для живлення кіл збудження тягових двигунів в режимі гальмування. Тягова обмотка виконана з двома проміжними виводами, номінальна напруга на крайніх виводах при холостому ході 1230 В, випрямний струм 1750 А. Номінальна напруга, яка може бути знята з виводів обмотки власних потреб при холостому ході, 231, 410 і 631 В, номінальний струм 520 А. Номінальний струм обмотки збудження 720 А. Маса трансформатора 7800 кг. На електровозі розміщено чотири випрямляючих інверторних перетворювача ВІП-2200М. Перетворювач має вісім пліч і працює за схемою однофазного регульованого мосту. Кожне плече складається з семи паралельних кіл, два плеча мають в кожному колі по два послідовно ввімкнених тиристора, останні шість – по три. В перетворювачі використані тиристори Т2-320 14-15 класів. Обмотки збудження тягових електродвигунів при рекуперативному гальмуванні живляться випрямленим струмом від випрямляючої установки збудження, яка має два плеча з нульовим виводом, межі регулювання напруги установки від нуля до 130 В, тривалий струм 850 А. Управління перетворювальними установками здійснюють

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



електровозобудівному заводі спільно із німецькою компанією Siemens. Виробництво електровозів спільне, а саме: Siemens – силова електроніка тягового приводу, ДЕВЗ – механічна частина, допоміжні машини, тягові двигуни. Електровоз розроблений як універсальний – для роботи з вантажними і пасажирськими поїздами на електрифікованих залізницях. Всі електровози ДСЗ працюють з пасажирськими потягами в локомотивному депо Київ-Пасажирський.



Рисунок 1.3 – Вантажо-пасажирський електровоз ДСЗ

#### Технічна характеристика електровоза ДСЗ

Осьова (колісна) формула	2o – 2o
Навантаження на вісь, кН (т)	210 (21)
Максимальна сила тяги при рушанні з місця, кН (тс)	310 (31)
Потужність годинного режиму на валах тягових двигунів, кВт	4800
Сила тяги в годинному режимі, кН (тс)	480 (48)
Максимальна допустима швидкість, км/год	160

Механічна частина електровоза багато в чому уніфікована з електровозом ДЕ1 – два двовісні візки зі зварними рамами, незбалансованим пружним підвішуванням і двостороннім натисканням гальмівних колодок на колеса. Передача сил тяги та гальмування на раму електровоза – похилими тягами, по

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

одній на кожен візок, як і у електровозів ВЛ85, ЕП1, 2ЭС5К.

Тягові двигуни електровоза – трифазні асинхронні з короткозамкненим ротором. Живляться тягові двигуни від двох розташованих в середині кузова перетворювачів лінійною напругою до 2200 В. Векторне управління перетворювачами, як і управління іншим обладнанням електровоза, здійснює мікропроцесорна система. Режим роботи тягових двигунів задається реверсивним перемикачем і двома рукоятками – рукояткою швидкості і рукояткою завдання тягової (при переміщенні від себе) і гальмівної (при переміщенні на себе) сили.

## 1.2 Вимоги до швидкісних локомотивів в Україні

На сьогоднішній день Україна не має достатніх фінансових ресурсів для створення магістральних електровозів, застосовуючи традиційний підхід, а саме створення електровозів як різних серій по роду служби так і різних серій по роду струму живлення в контактній мережі, які вже вкрай необхідні для заміни швидко старіючого багатосерійного електровозного парку «ПАТ Укрзалізниця». Для успішного вирішення задачі по оновленню в найближчі роки електровозного парку «ПАТ Укрзалізниця» вітчизняним електровозобудівникам і залізничникам потрібно насамперед розробити науково-обґрунтовану, технічно та фінансово реалізовану стратегію розвитку електровозобудування на найближчі 10-15 рр., виходячи із сучасного стану електровозного парку залізниць та із урахуванням пріоритетних шляхів розвитку залізничного транспорту.

Відомо, що для залізниць України при забезпеченні вантажного, пасажирського, прискореного пасажирського і швидкісного пасажирського руху поїздів з економічно доцільною масою і вагоноскладністю потрібні магістральні електровози потужністю від 4200 кВт до 14000 кВт. Вказані потужності дуже добре реалізуються на основі базової чотириосьової секції електровоза потужністю 4800 кВт. В цьому випадку структура електровозного парку «ПАТ Укрзалізниця» при концепції «гнучкого типажу» буде мати можливість забезпечувати видачу під поїзди електровозів потужністю 4800 кВт

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

(односекційного), 9600 кВт (двосекційного) та 14400 кВт (трисекційного). Такий підхід до оновлення електровозного парку «ПАТ Укрзалізниця» потребує насамперед формування вимог до базової секції електровозів «гнучкого типу» які прийдуть на заміну багатосерійного парку електровозів, та вирішати задачі по забезпеченню планових об'ємів перевезень та зменшенню капітальних і експлуатаційних витрат залізниць.

Однією з головних задач сучасного етапу розвитку світового залізничного транспорту є необхідність підвищення конкурентоспроможності за рахунок покращення якості транспортних послуг на ринку перевезень. Для ліній електрифікованих залізниць із сумісним вантажним і пасажирським рухом вирішення цієї задачі в значній мірі залежить від електровозобудівників, а саме, від їх спроможності створити вискооефективний магістральний електровоз, який відповідає наступним вимогам:

- універсальності з боку роду служби і максимальній уніфікації з боку роду струму в контактній мережі;
- високій надійності і експлуатаційній готовності;
- сприятливому співвідношенню основних технічних характеристик і ціни;
- незначним витратам на технічне обслуговування і поточний ремонт;
- можливості деповської заміни кабіни на перехідний блок і роботи в системі багатьох одиниць;
- можливості підвищення конструкційної швидкості електровоза;
- забезпечення безумовної безпеки руху.

Розглянемо тепер ці основні вимоги з точки зору необхідності і вигоди при їх реалізації стосовно використання електровозів на лініях електрифікованих залізниць України. Тут треба особливо відмітити, що в зв'язку з двосистемною лінією електрифікованих залізниць України по роду струму тягових електромереж, а це постійний струм напруги 3 кВ або змінний струм промислової частоти 50 Гц напруги 25 кВ, електровозний парк залізниць України складається і буде складатися із магістральних електровозів постійного струму і змінного струму. Крім цього, є також велика необхідність в двосистемних магістральних

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

електровозах (3 кВ/25 кВ, 50 Гц), спроможних забезпечувати безупинне перетинання поїздами дальнього сполучення (вантажними і пасажирськими) стиків між ділянками, електрифікованими в різних системах струму.

Універсальність з боку роду служби і максимальна уніфікація з боку роду струму в контактній мережі живлення. Враховуючи, що індивідуальне створення нового покоління окремих серій вантажних і пасажирських магістральних електровозів постійного, змінного і подвійного струму живлення є процесом наукоємним, тривалим та дуже вартісним, необхідно щоб роботи по їх проектуванню зводились головним чином до пристосування деякої базової конструкції з точки зору її використання в пасажирській і вантажній роботі для заданої системи струму живлення. Такий підхід і потребує від координуючого центру залізниць (у нашому випадку це «ПАТ Укрзалізниця») першочергового прийняття рішення по створенню базової конструкції вантажно-пасажирського варіанту електровоза для цих серій. Така базова конструкція електровоза вимагає від електровозобудівників обов'язкового вирішення першої вимоги, а саме, її універсальності з боку роду служби і максимальній уніфікації з боку роду струму живлення.

Виходячи з досвіду, накопиченого електровозобудівниками на кінець двадцятого століття, сьогодні можна стверджувати, що універсальний (вантажно-пасажирський) магістральний електровоз для постійного, змінного і подвійного струму живлення можливо створити на базі тягової електропередачі з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором.

Типовими базовими конструкціями для вантажно-пасажирських магістральних електровозів є чотириосний вантажно-пасажирський електровоз змінного струму серії ДСЗ номінальної потужності 4800 кВт [5]. Максимальна сила тяги при зрушенні з місця електровоза серій ДСЗ складає 310 кН, а його конструкційна швидкість при опорно-рамному тяговому приводі візків 160 км/год. Виробники цього електровоза стверджують, що його базова конструкція може використовуватися для створення вантажно-пасажирських електровозів інших типів з боку роду струму живлення. Основне призначення

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

електровоза ДСЗ це робота з вантажними експрес-поїздами і пасажирськими поїздами на лініях 25 кВ, 50 Гц електрифікованих залізниць.

Виконання електровозобудівниками щодо базової конструкції для нової серії електровозів першої вимоги обумовлює спрощення стандартизації конструкції і компонентів обладнання навіть в межах невеликої кількості електровозів різних типів в одній серії, що надає можливість реалізації модульного принципу побудови електровозів однієї серії, а це як відомо, значно здешевлює виробництво, а також технічне обслуговування і поточний ремонт як в рамках конкретного типу електровозів, так і в рамках всього електровозного парку цієї серії. Крім цього, модульний принцип побудови базової конструкції електровоза дає ще дві суттєві вигоди, а саме:

– дозволяє мінімізувати виробничі витрати за рахунок прискорення роботи по монтажу, наладці і здачі в експлуатацію конкретного типу електровоза даної серії;

– окремі підсистеми електровоза, виконані на модульному принципі, навіть після тривалої експлуатації можуть бути у випадку необхідності замінені попередньо налагодженими, випробуваними і готовими до монтажу підсистемами.

Модульний принцип також дозволяє як у виробництві так і в експлуатації швидко і економічно провести удосконалення підсистем електровоза і таким чином забезпечити відповідність електровоза новітньому рівню техніки.

Висока надійність і експлуатаційна готовність електровоза. Світовий досвід показує, що мінімізувати ризик можливо за рахунок виключення розвитку аварійних режимів при відмовах як в підсистемі тягової електропередачі, так і в допоміжних бортових пристроях тягової електроенергетичної системи електровозів шляхом доповнення цієї системи бортовою підсистемою функціональної діагностики всіх бортових пристроїв (інформаційних та енергетичних). Такий підхід дозволяє забезпечити високу надійність і експлуатаційну готовність, оскільки машиніст за допомогою підсистеми діагностики може аналізувати ситуацію і приймати відповідні заходи у випадку

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

появи несправностей.

Наявність бортової підсистеми діагностики і придатність ремонту тягової електроенергетичної системи по агрегатному методу шляхом заміни окремих модулів підсистем без їх ремонту на місці значно збільшує експлуатаційну готовність електровозів. Експлуатаційна готовність електровозів з асинхронними двигунами в порівнянні з електровозами з колекторними двигунами підвищується також за рахунок виключення робіт по обслуговуванню щітково-колекторного вузла та зменшення кількості контактної апаратури на підтримку працездатності яких витрачається десь біля 10% від трудовитрат на технічне обслуговування і ремонт.

Підвищення надійності внаслідок зростання коефіцієнта експлуатаційної готовності електровозів в практиці сучасного світового електровозобудування досягається також за рахунок використання нових технічних рішень при створенні вузлів і схем, застосування нових технологій, нових матеріалів, сучасних методів об'єктивного контролю якості, що як результат, забезпечує використання безремонтних конструкцій і впровадження планових заміन деталей та вузлів з гарантованим ресурсом.

Висока надійність та експлуатаційна готовність електровозів нового покоління поряд з їх універсальністю дозволяє довести добові пробіги електровозів з поїздами до 2000 км, а це як відомо приводить до значного скорочення електровозного парку, що в першу чергу, суттєво зменшить капітальні витрати залізниць України.

Такий підхід до визначення сприятливого співвідношення ціни і основних технічних та експлуатаційних характеристик конкретного типу магістрального електровоза нового покоління в серійному виробництві може бути реалізований при виконанні наступних двох умов:

По-перше, коли цей електровоз буде представляти собою модифікацію недорогої у виробництві базової конструкції з модульним принципом її побудови. В рамках цієї умови основними заходами електровозобудівників є:

– спрощення підсистем;

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- зменшення кількості підсистем в межах виробництва всіх типів електровозів цієї серії;
- зменшення різноманітності вузлів і деталей стосовно різних типів електровозів цієї серії;
- використання попередньо випробуваних підсистем великої серійності;
- впровадження у виробництво нових, більш економічних технологій.

По-друге, коли базова конструкція електровозів нової серії буде створена за рахунок централізованих коштів координуючого центру, а саме, «ПАТ Укрзалізниця», що принципово дає можливість не включати в ціну серійного електровоза, який постачатиметься на залізниці, тимчасові витрати на науково-дослідну, конструкторську роботи та дослідні зразки електровозів, які при створенні електровозів нового покоління є дуже великими в порівнянні з прямими витратами при серійному виробництві. В рамках цієї умови основними заходами з боку «ПАТ Укрзалізниця» є:

- розробка технічних вимог до базової конструкції вантажно-пасажирського електровоза з обов'язковим визначенням основних технічних характеристик стосовно кожного типу електровоза, як модифікацій базової конструкції;
- узгодження технічного завдання на розробку базової конструкції вантажно-пасажирського електровоза та затвердження об'єму фінансування та термінів створення дослідних зразків окремих типів електровозів;
- узгодження кількості і ціни модифікацій в рамках всієї серії електровозів, а також кількості електровозів в межах кожної модифікації та їх випуск по рокам з урахуванням реальної потреби окремих залізниць.

Вигода від реалізації цих двох умов в рамках вимоги сприятливого співвідношення технічних та експлуатаційних характеристик і ціни лежать в площині фактичної появи плану довгострокової співпраці цих двох сторін в напрямку створення як високоефективних локомотивів нового покоління, так і сучасних енергозберігаючих систем технічного обслуговування і ремонту цих локомотивів.

Незначні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електровоза. Виконання цієї вимоги ґрунтується в значній мірі на забезпечені електровозобудівниками двох перших вимог, а саме, універсальності з боку роду служби та максимальній уніфікації з боку роду струму живлення і високої надійності та експлуатаційної готовності.

Побудова базової конструкції електровоза по модульному принципу реалізації його підсистем дозволяє підвищити ступінь готовності електровозів в рамках електровозного парку, а також суттєво підвищити контролепридатність та ремонтпридатність електровозів. Ці два чинника дозволяють значно знизити витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт як електровозного парку в цілому, так і окремого електровоза за рахунок стандартизації конструкцій і компонентів обладнання, що дає суттєвий вигрaш по трудозатратам навіть в рамках невеликої кількості електровозів окремих типів.

Включення в тягову електроенергетичну систему електровозів бортової підсистеми діагностики з реалізацією каналу передачі інформації від цієї підсистеми до стаціонарних діагностичних пунктів системи технічного обслуговування і поточного ремонту електровозів дозволяє при постановці електровоза на технічне обслуговування практично відразу мати інформацію про стан та наявність відмов в підсистемах, що скорочує час на виконання робіт по профілактиці та відновлення працездатності електровоза.

Зниження трудовитрат на обслуговування і ремонт в розрахунку на весь експлуатаційний цикл електровозного парку нового покоління досягається також за рахунок переходу з шести та восьми на чотириосну конструкцію електровозів, що стало можливим при використанні асинхронних тягових двигунів. Крім цього, асинхронний тяговий двигун має краще використання активних матеріалів, в основному міді, та не потребує щітково-колекторного вузла, що робить його дешевшим як у виробництві, так і в експлуатації. Так, німецький досвід експлуатації чотириосних магістральних електровозів з асинхронними тяговими двигунами свідчить, що витрати часу на їх обслуговування і ремонт складають десь біля двох годин на 1000 км пробігу електровоза, а це значно менше (в 1,5-2 рази) ніж затрати часу на обслуговування і ремонт шестиосних електровозів

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

з колекторними тяговими двигунами.

Таким чином, незважаючи на деяке підвищення в ціні магістральних електровозів нового покоління з асинхронними тяговими двигунами, реалізація електровозобудівниками концепцій базової конструкції, потребууючої менших витрат на технічне обслуговування і ремонт, дозволить залізничникам суттєво зменшити їх витрати в розрахунку на весь життєвий цикл електровозів.

Можливість деповської заміни кабіни машиніста на перехідний блок і роботи електровоза в системі багатьох одиниць. Забезпечення експлуатаційної ефективності електровозів при їх використанні потребує вирішення обов'язкової умови щодо можливості роботи електровоза в системі багатьох одиниць і бажаної умови щодо можливої деповської заміни як кабіни машиніста на перехідний блок, так і перехідного блоку на кабіну машиніста. Перша умова потребує від електровозобудівників вирішення задачі по забезпеченні можливості роботи електровоза в режимі кратної тяги при управлінні локомотивного зчеплення з однієї кабіни машиніста. Вирішення цієї задачі не викликає з боку електровозобудівників ніяких заперечень і на сучасному рівні розвитку електровозобудування вирішується достатньо просто. Однак, реалізація тільки цієї умови обумовлює дуже велику незручність для локомотивної бригади при контролі та обслуговуванні таких електровозних зчеплень в їх поїзному режимі роботи. Для вирішення цієї проблеми, як правило, йдуть на збільшення чисельного складу локомотивних бригад для електровозів-зчеплень. Тому більш доцільно електровозні зчеплення створювати на основі базової конструкції електровоза (секції), пристосованої до заміни кабіни машиніста на перехідний блок. В цьому випадку структура парку електровозів буде реалізовувати концепцію «гнучкого типажу», а це надасть спроможність забезпечувати видачу під поїзд як односекційного електровоза з двома кабінами машиніста, так і двосекційного електровоза з двома кабінами машиніста, з'єднаного з секцій по схемі: перша секція «кабіна машиніста – перехідний блок», друга секція «перехідний блок – кабіна машиніста», або трисекційного електровоза з двома кабінами машиніста з'єднаного з секцій по схемі: перша секція «кабіна машиніста

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

– перехідний блок», друга секція «перехідний блок – перехідний блок», третя секція «перехідний блок – кабіна машиніста». Виконання цієї умови дозволяє формувати в локомотивному депо на базі одного конкретного типу електровоза з боку його струму живлення багатосекційних електровозів великої потужності за рахунок збільшення осьової кількості. Такий підхід не приводить до збільшення різнотипності електровозного парку і кількості локомотивних бригад, що як наслідок, дозволяє зменшити експлуатаційні витрати при одночасному збільшенні продуктивності перевезень.

Можливість підвищення конструктивної швидкості електровоза. Відомо, що швидкісні характеристики електровоза в значній мірі визначаються доскональністю його екіпажної частини з точки зору зменшення негативної динамічної дії на колію. Ступінь негативності динамічної дії електровоза на колію при заданій швидкості залежить як від величини осьового навантаження, так і від величини невіднесеної маси електровоза. В свою чергу, величина невіднесеної маси електровоза визначається невіднесеною масою його візків, яка залежить від технічних рішень щодо тягового приводу візків з боку підвіски тягових двигунів і редукторів.

Сучасні тягові приводи магістральних електровозів в залежності від підвіски тягового двигуна і редуктора діляться на три основні класи:

- тяговий привід 1-го класу, реалізуючий опорно-осьову підвіску тягового двигуна і редуктора;
- тяговий привід 2-го класу, реалізуючий опорно-рамну підвіску тягового двигуна і опорно-осьову редуктора;
- тяговий привід 3-го класу, реалізуючий опорно-рамну підвіску тягового двигуна і редуктора.

Найдосконалішим з точки зору забезпечення найменшої невіднесеної маси візка, максимальної конструкційної швидкості електровоза є тяговий привід 3-го класу, дещо гіршим – привід 2-го класу і найгіршим – привід 1-го класу. Однак тут треба мати на увазі, що візки з досконалішим в швидкісному відношенні тяговим приводом мають і більшу складність та вартість у

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

виробництві та експлуатації.

Відмітимо також, що в рамках одного класу тягового приводу можливе деяке підвищення конструкційної швидкості електровоза за рахунок використання досконаліших конструкцій тягового двигуна і редуктора. Найвагоміше цей чинник з боку тягового двигуна проявляється в тягових приводах 1-го класу, де маса тягового двигуна (як і редуктора) безпосередньо є значною складовою невіднесеної маси візка. Так, збільшення конструкційної швидкості електровозів з асинхронними двигунами при використанні тягового приводу 1-го класу стає можливим, оскільки асинхронний тяговий двигун має значно меншу масу в порівнянні з тяговим колекторним двигуном постійного струму традиційної конструкції, що і приводить до зменшення динамічної дії електровоза на колію.

Таким чином, якщо базова конструкція вантажно-пасажирського електровоза з асинхронними тяговими двигунами на основі тягового приводу 1-го класу не має обмежень по конструкційній швидкості з боку міцності екіпажних частин, потужності, сили тяги і осьового навантаження то простою заміною візків на візки з тяговим приводом вищого класу можна підняти конструктивну швидкість електровоза. Очевидна вигода від реалізації в базовій конструкції електровоза вимоги щодо можливості підвищення конструкційної швидкості є в зменшенні серійності електровозного парку при забезпеченні вантажно-пасажирського (до 140 км/год), прискорено-пасажирського (до 160 км/год) і швидкісного (до 200 км/год) руху, а це, в свою чергу знижує як витрати на виробництво електровозів, так і витрати на їх експлуатацію.

Забезпечення безумовної безпеки руху. Ця вимога обумовлює для електровозобудівників необхідність виконання дуже суворих умов як з боку вибору матеріалів та конструктивного виконання несучих ходових вузлів екіпажної частини електровоза з метою забезпечення оптимальної міцності з точки зору її довговічності і матеріалоемності, так і з боку недопущення розвитку аварійних процесів в тяговій електропередачі при відмовах електрообладнання з метою усунення пошкоджень в механічних вузлах ходової частини. Крім цього,

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

дуже важливо, щоб силова схема та система управління базової секції електровоза забезпечувала при ординарних відмовах електрообладнання не менше чим 50% живучості електровоза з боку його потужності. Тут треба відмітити, що, по-перше, накопичений електровозобудівниками досвід по створенню екіпажної частини електровозів ДЕ1 і ДС3 та використання ЕОМ дозволяє підвищити точність розрахунків міцності лімітуючих вузлів її конструкції, знизити коефіцієнти запасу міцності нелімітуючих вузлів, зробити конструкцію екіпажної частини базової секції електровоза рівномічною без зниження її довговічності і надійності і тим самим забезпечити безпеку руху з її боку. По-друге, відпрацьовані в експлуатації структури тягової електропередачі електровозів з асинхронними двигунами дозволяють виконати умову щодо збереження 50% «живучості» односекційного електровоза з боку його потужності при ординарних відмовах електрообладнання.

Дуже важливим з боку забезпечення безумовної безпеки руху є також виконання умов по недопущенню розвитку аварійних процесів в тяговій електропередачі при ординарних відмовах в її вузлах і підсистемах з метою усунення можливих пошкоджень ходової частини. Вирішення цієї задачі є обов'язковим на даному етапі розвитку електровозобудування при традиційному підході до побудови тягової асинхронної електропередачі на базі дворівневих трифазних інверторів напруги. Категоричність цієї умови для електровозів з асинхронними тяговими двигунами і перетворювачами частоти на основі дворівневого інвертора напруги обумовлюється тим, що поява ординарної відмови в інверторі напруги на великих швидкостях приводить до великих гальмових ударних моментів на валу тягового асинхронного двигуна, а це може привести до катастрофічних наслідків.

Важливість вимоги по забезпеченню безумовної безпеки руху обумовлює також обов'язкове обладнання електровозів комплектами спеціальних систем: автоматичної локомотивної сигналізації з автостопом та пристроєм перевірки пильності машиніста, двобічного радіозв'язку, звукової та світлової сигналізації, прожекторів, автоматичних та ручних гальм. Виконання електровозобудівниками

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

вимоги щодо забезпечення безумовної безпеки руху направлене на створення умов безаварійності поїзної роботи, що особливо важливо при перевезенні пасажирів є обов'язковим і обговоренню не підлягає.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

## 2 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ ВІП ЕЛЕКТРОВОЗА

### 2.1 Аналітичне дослідження процесів роботи ВІП в режимі тяги

Застосування електричної тяги, у порівнянні з іншими видами тяги, має ряд техніко-економічних переваг. Потужні електровози дозволяють водити важкі поїзди з високими швидкостями, у зв'язку з цим пропускна і перевізна спроможності залізниць різко зростає. Застосування рекуперативного і реостатного гальмування дозволяє економити електроенергію і зменшує зношення гальмівних колодок. Використовується робота електровозів за системою багатьох одиниць. У зрівнянні з іншими видами локомотивів на ремонт і експлуатацію електровозів йдуть більші витрати [4].

Розвиток тягових перетворювачів електроприводів електровоза почалось з випрямлячів на основі інгітронів, які застосовувались для живлення тягових двигунів на перших електровозах змінного струму. До 1960-х років ртутні випрямлячі залишались єдиними апаратами, які випускались серійно. Однак, такі перетворювачі мали ряд недоліків, головним із яких була схильність перекидання електричної дуги на корпус, великі габаритні розміри і висока можливість виділення ртутних парів при ушкодженні корпусу перетворювача.

По мірі створення кремнієвих і германієвих вентилів, ртутні випрямні установки були витіснені і замінені силовими напівпровідниковими пристроями (СНП) – діодами. Перші діоди були стержневими і вкручувались в охолоджувач. Застосування нових СНП на електровозах породило нові проблеми, такі як мала одинична потужність, що вимагало їх послідовного і паралельного з'єднання. Прикладом електровозів з перетворювачами на основі силових діодів являються серії ВЛ60<sup>К</sup> і ВЛ80<sup>К</sup>.

Наступним кроком в розвитку перетворювальної техніки стало освоєння виробництва напівкерованих СНП – тиристорів, що дозволило створити ВІП з плавним регулюванням тягових і гальмівних зусиль при роботі електровоза в

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

режимі тяги і рекуперативного гальмування. Застосування перетворювачів, які здійснювали плавне регулювання сили тяги замість ступінчатого, дозволило покращити пускові властивості електровозів і підвищити використання сили тяги на вісім-десять відсотків. До того ж це дозволило реалізувати режим рекуперативного гальмування електровоза, який дає можливість не тільки знизити енергозатрати на тягу поїздів на 10-18% в залежності від профілю коліс, але й зекономити матеріальні ресурси.

Поява тиристорів і діодів великої потужності на струм до 2000 А і напругою до 6000 В дозволила спростити електричні принципові схеми, раніше застосованих перетворювачів на електровозі за рахунок зменшення кількості СНП в плечі перетворювача, а відповідно, привело до підвищення їх надійності.

На тиристорних перетворювачах з 1974 до 1986 рр. серійно випускались електровози ВЛ80<sup>Р</sup>, а з 1983 по 1994 рр. – ВЛ85. З 2014 р налагоджено серійне виробництво серії «Єрмак»: Э5К, 2ЭС5К і 4ЭС5К, які експлуатуються на мережі російських залізниць.

За достатньо довгий період експлуатації типових ВПП електровозів змінного струму на основі тиристорних ключів можна виділити наступні основні недоліки:

- 1) типовий спосіб регулювання;
- 2) значна тривалість нерегульованого кута відкриття  $\alpha_0$  близько  $9 \pm 2$  ел. град;
- 3) тривалість імпульсів управління ВПП складає порядку 1000 мкс, що необхідно для забезпечення надійності роботи ВПП у випадку відмови системи слідування за процесом комутації струму;

- 4) значний кут зсуву фаз ( $\varphi$ ) між струмом і напругою в первинному колі тягового трансформатора і, відповідно, високе споживання реактивної потужності, наслідком чого є низький коефіцієнт потужності;

- 5) тривала мережева комутація пліч ВПП, яка складається з послідовно протікаючих одна за одною комутацій у великому і малому контурі.

- 6) складна система управління ВПП через застосування великої кількості додаткових і спеціальних пристроїв, таких як датчики потенційних умов, датчики синхронізації, комутації, логічні елементи, перетворювачі, посилювачі зв'язку

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між собою та іншими пристроями системи; при відмові одного з таких пристроїв управління випрямлячем стає неможливим.

Електропривід сучасного електровоза змінного струму з колекторним тяговим двигуном і тиристорними ВІП в розрахунку на один візок, який забезпечує режими тяги і рекуперативного гальмування зображений на листі 2. Крайні плечі ВІП VS1, VS2, VS7 і VS8 має по чотири паралельні гілки, в кожній з яких включено послідовно по три тиристори, а внутрішні плечі VS3, VS4, VS5 і VS6 мають також чотири паралельні гілки з увімкненими послідовно по два тиристори.

Одним із ефективних способів підвищення енергоефективності електричних споживачів є застосування однофазних коректорів коефіцієнту потужності (ККМ). У вхідне коло практично будь-якого імпульсного перетворювача потрібно ввімкнути спеціальний пристрій, який забезпечує зниження реактивної потужності і викривлення форми струму та напруги мережі [5].

Розробка і впровадження на рухомому складі керованих силових напівпровідникових пристроїв відкриває широкі можливості для реалізації нових конструкцій перетворювачів, а також покращення електричних показників електровозів в режимі тяги і рекуперативного гальмування. На базі закордонного досвіду створення електровозів змінного струму з безколекторним тяговим приводом, силова установка яких виконана на базі чотириквadrантного перетворювача ( $4qS$ ). При роботі такого перетворювача електровоз споживає практично синусоїдальний струм, який співпадає по фазі з живлячою напругою, при цьому значення коефіцієнту потужності наближається до одиниці. На ранніх стадіях розробок доля вартості цих перетворювачів в ціні електровоза була дуже значною. Використання  $4qS$ -перетворювачів на електровозі вимагає значних змін в ньому.

На сьогоднішній день заводами випускаються локомотиви змінного струму 2ЭС5, 2ЭС7, 2ЭС11 і ЭП20 з асинхронними тяговими двигунами, створені разом із закордонними компаніями. Відомо, що подвійне перетворення енергії, яка використовується на даних електровозах, викликає зменшення загального ККД і

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складність самих перетворювачів. Велику зацікавленість сучасного вітчизняного і закордонного електровозобудування викликали тягові перетворювачі на базі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), які дозволяють підвищити енергетичні показники електровозів. Стрімкий розвиток перетворювальної техніки на базі IGBT-транзисторів в тягових системах рухомого складу почався ще у 1980 р. на залізницях Японії, Франції та Німеччини.

Тягові перетворювачі на базі транзисторів IGBT відрізняються двома особливостями, важливими як для залізниць, так і для заводів-виробників. Перш за все, ці пристрої створюють потенційні можливості для зниження витрат, головним чином завдяки здешевленню складання і підвищенню ефективності тягових систем. Друга особливість, яка сприяла швидкому впровадженню, полягає у підвищенні надійності та експлуатаційної готовності тягових систем. На відміну від замикаючих тиристорів ГТО, транзистори IGBT керуються напругою. Завдяки цьому, значно спрощується схема управління затвором. До того ж, використання IGBT-транзисторів в перетворювачах не вимагає допоміжних комутаційних кіл, вони мають хорошу захисну здатність і високу частоту перемикачів при низьких комутаційних втратах.

## 2.2 Аналітичне дослідження процесів роботи ВПІ в режимі рекуперативного гальмування

Регулювання починається з першої зони, на якій випрямлена напруга, яка підводиться до тягових двигунів, визначається напругою секції 1-2 вторинної обмотки тягового трансформатора. Пуск електровоза на першій зоні регулювання починається з максимального значення кута регулювання  $\alpha_{pmax}$ , при якому випрямлена напруга максимальна. Подаючи керовані імпульси  $\alpha_p$  на тиристорні плечі VS4 і VS6 в межах від  $\alpha_{pmax}$  до  $\alpha_{pmin}$ , можна змінити випрямлену напругу від мінімального значення  $U_{dmin}$  до  $1/4 \cdot U_H$  – номінальної випрямленої напруги.

На другій зоні регулювання випрямлена напруга формується під дією напруги секції 1-2 вторинної обмотки тягового трансформатора і напруги секції

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$a1-1$ , додатково прикладеної до тягових двигунів на інтервалі від  $\alpha_p$  до  $\pi$ . При мінімальній величині фази імпульсів управління  $\alpha_p$ , які надходять на плечі VS1 і VS2 на другій зоні регулювання, випрямлена напруга збільшується до  $1/4 \cdot U_H$  [6].

На третій зоні регулювання секції 1-2 і  $a1-1$  вторинної обмотки тягового трансформатора замінюються обмоткою 2-х1 з рівною напругою. До неї додатково прикладається регульована по фазі напруга обмотки 1-2. При зміні  $\alpha_p$ , наданої на плечі VS3 і VS4 від  $\alpha_{pmax}$  до  $\alpha_{pmin}$ , випрямлена напруга досягає  $3/4 \cdot U_H$ .

На четвертій зоні регулювання до напруги секцій 1-2 і 2-х1 вторинної обмотки тягового трансформатора додається частина напруги секції  $a1-1$  за рахунок зміни кута регулювання тиристорних пліч VS1 і VS2 від  $\alpha_{pmax}$  до  $\alpha_{pmin}$ . При мінімальному куті регулювання тиристорних пліч VS1 і VS2 випрямлена напруга досягає номінальної напруги  $U_H$  перетворювача. В табл. 2.1 представлено типовий алгоритм управління ВПІ в режимі тяги, який використовується на сьогоднішній день в електровозах змінного струму.

Таблиця 2.1 – Типовий алгоритм роботи пліч ВПІ електровоза ВЛ80<sup>Р</sup> в режимі тяги

Зона регулювання	Напрямок ЕРС трансформатора	Алгоритм роботи пліч ВПІ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1		-	-	-	$\alpha_p$	$\alpha_p$	-	-	--
		-	-	$\alpha_p$	-	-	$\alpha_p$	-	-
2		-	$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	$\alpha_p$	-	-	-
		$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	-	-	$\alpha_p$	-	-
3		-	-	-	$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	$\alpha_p$	
		-	-	$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	-	-	$\alpha_p$
4		-	$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	-	-	$\alpha_p$	-
		$\alpha_p$	-	$\alpha_p$	-	-	-	-	$\alpha_p$

Типовий алгоритм роботи випрямного інверторного перетворювача електровоза на першій зоні регулювання.

Розглянемо детальніше процеси роботи ВПІ при зміні півперіодів напруги на прикладі першої зони регулювання. Для цього перший півперіод розбиваємо на тимчасові інтервали 0-1-2-3-4- $\pi$ , а другий на  $\pi$ -5-6-7-8- $2\pi$  (лист 3).

Припустимо, що в попередньому півперіоді напруги (позначено на рис. 2.1 суцільною стрілкою), струм протікав по плечам VS4 і VS5 завдяки прикладанню до них позитивного знаку в цьому півперіоді змінної ЕРС  $e_{1-2}$  секції 1-2 вторинної обмотки тягового трансформатора. Після зміни в точці 0 напрямку ЕРС із суцільної на пунктирну стрілку, на інтервалі 0-1 забезпечується виникнення від'ємної випрямленої напруги  $u_d$ . Це пояснює, що тиристори пліч VS4 і VS5 проводять струм навантаження, але вже не під дією  $e_{1-2}$ , а під дією ЕРС самоіндукції  $e_L$ , яка викликає індуктивність  $L_d$  кола випрямленого струму під час проходження по ньому струму навантаження в попередній півперіод напруги.

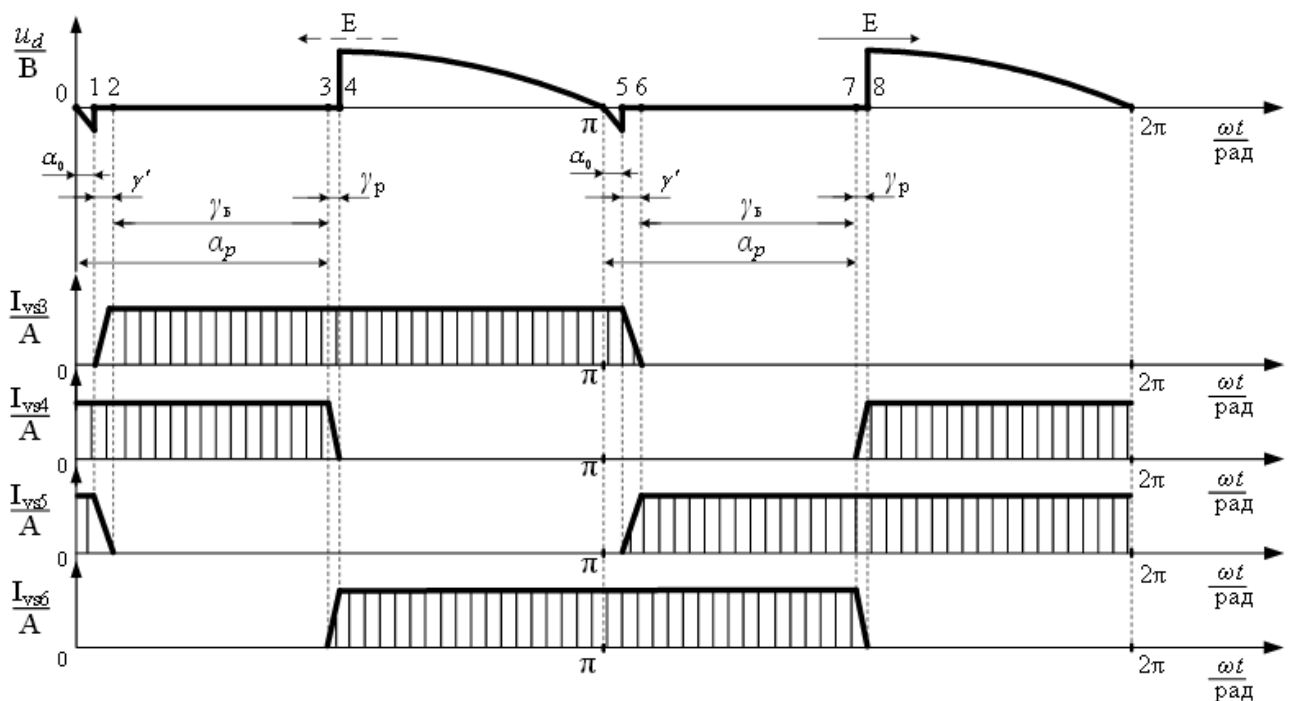


Рисунок 2.1 – Діаграма випрямленої напруги і струму пліч ВІП електровоза з типовим алгоритмом управління на першій зоні регулювання в режимі тяги

В результаті через секцію 1-2 вторинної обмотки тягового трансформатора і плечі VS4, VS5 проходить розряд (передача) в мережу електричної енергії, накопиченої в індуктивності  $L_d$ . Миттєва схема заміщення ВІП електровоза в годинному інтервалі 0-1, приведена на рис. 2.2, а.



управління з фазою  $\alpha_p = 90$  ел. град. На інтервалі 3-4 проходить комутація, струм в плечі VS6 зростає, а в плечі VS4 падає до нуля (рис. 2.1). Миттєва схема заміщення ВІП електровоза на годинному інтервалі 3-4 представлена на листі 3.

На інтервалі 4- $\pi$ -5 струм протікає через відкриті тиристорні плечі VS3 і VS6 (лист 3). До тягового двигуна прикладається напруга, обумовлена виводами 1-2 вторинної обмотки тягового трансформатора. Робота схеми на інтервалі  $\pi$ -5 аналогічна роботі на інтервалі 0-1, описаної вище. Миттєва схема заміщення ВІП на годинному інтервалі 4- $\pi$ -5 представлена на рис. 2.2, а.

В момент часу, що відповідає точці 5, на плече VS5 подається імпульс управління з фазою  $\alpha_0$ . На інтервалі 5-6 проходить комутація, струм в плечі VS5 зростає, а в плечі VS3 падає до нуля, випрямлена напруга рівна нулю, (рис. 2.1). Миттєва схема заміщення ВІП електровоза в годинному інтервалі 5-6 представлена на рис. 2.2, б. На інтервалі 6-7 утворюється буферний контур протікання струму навантаження через тиристорні плечі VS5, VS6, минаючи вторинну обмотку трансформатора, випрямлена напруга при цьому також рівна нулю (рис. 2.1). Миттєва схема заміщення електровоза представлена на рис. 2.2, в.

### 2.3 Схема силових кіл електровоза ДСЗ

Для підключення до контактної мережі електровоз обладнано двома струмоприймачами (рис. 2.3). Послідовно зі струмоприймачем увімкнено роз'єднувач-заземлювач. Роз'єднувач-заземлювач оснащений дистанційно керованим приводом. При нормальній роботі струмоприймач і роз'єднувач-заземлювач підключені до контактної мережі, а при вимкненому стані до «землі».

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



головного вимикача силовим кабелем підключені обмежувач перенапруги контактної мережі, заземлювач високовольтного вводу головного трансформатора і прохідний ізолятор. Вивід первинної обмотки тягового трансформатора на колісних парах з'єднується з рейковою колією. Трансформатор підключається до центрального обладнання керування і таким чином утворює диференціальний захист головного трансформатора.

Тягові двигуни електровоза живляться трифазною напругою з регульованою частотою і амплітудою. Перетворення однофазного струму контактної мережі в регульовану за частотою і амплітудою трифазну напругу здійснюється за допомогою головного трансформатора, який має чотири тягових обмотки і двох перетворювачів. Один перетворювач призначений для живлення тягових двигунів першого візка, а інший для другого візка. Перетворювач підключається до тягових обмоток. Тяговий двигун підключається до вивідних зажимів перетворювача через контакти триполюсного перемикача. Перемикач призначений для підключення двигуна до розетки при живленні від стороннього джерела зниженої частоти при русі на території депо. Тягові двигуни у візку встановлено дзеркально по відношенню один до одного. Перетворювач підключається до тягових обмоток.

Амплітуда і частота напруги, які подаються на тяговий двигун, регулюється індивідуально для кожного тягового двигуна за допомогою систем регулювання електроприводу, які вмонтовано в кожний перетворювач струму. Кожен перетворювач складається з двох чотириквadrантних випрямлячів з примусовою комутацією протягом кожного півперіоду мережевої напруги, кола постійної напруги зі зворотнім резонансним контуром і двох вивідних трифазних інверторів. В режимі тяги чотириквadrантні випрямлячі за рахунок великої індуктивності розсіювання тягового трансформатора, працюючи в режимі комутації, підвищують напругу в колі постійної напруги вдвічі в порівнянні з діючою напругою на вході, а трифазний мостовий імпульс інвертора перетворює постійну напругу в трифазну напругу системи з регульованою амплітудою і частотою.

Силовую схемою передбачено два режими управління швидкістю

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електровоза. Перший режим – управління швидкістю із задаванням величини сили тяги. В цьому випадку вхідна частина кожного з тягових перетворювачів працює в режимі випрямляча, а вихідна частина – в інверторному режимі, регулюючи частоту і амплітуду напруги на статорних обмотках тягових двигунів. В кожний тяговий перетворювач вмонтована система управління тяговим проводом, яка забезпечує автоматичне підтримування сили тяги, заданої машиністом за допомогою рукоятки контролера машиніста. Другий режим – управління швидкістю із задаванням величини швидкості. В цьому випадку система управління тяговим проводом забезпечує автоматичне підтримання значення швидкості, заданого машиністом за допомогою рукоятки контролера машиніста. Для роботи в цьому режимі попередньо за допомогою дисплея на пульті в кабіні машиніста необхідно задати бажане прискорення. В цьому випадку в залежності від зміни умов руху електровоз автоматично може переходити від режиму тяги до режиму гальмування і навпаки.

При роботі електровоза в режимі рекуперативного гальмування силовою схемою електровоза передбачена робота в режимі із задаванням величини гальмівної сили за допомогою рукоятки контролера машиніста. В цьому випадку система управління тяговим приводом автоматично підтримує задані значення гальмівної сили. Ефективне гальмування можливе при швидкостях руху більше 5 км/год.

Режим рекуперативного гальмування автоматично може виникати при роботі зі стабілізацією швидкості руху, а також при зміні заданих значень швидкості чи сили тяги від більших значень до менших. Тягові двигуни працюють в генераторному режимі за рахунок того, що інвертор, який працює в даному випадку як керований випрямляч, створює в статорі двигуна магнітне поле, синхронна частота обертання якого менша частоти обертання ротора. Ковзання ротора виходить від'ємним, і тяговий двигун працює як асинхронний генератор. Вхідний чотириквADRантний випрямляч при цьому переводиться в режим роботи інвертора.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### **3 РОЗРОБКА ВІП ЕЛЕКТРОВОЗА НА ОСНОВІ IGBT-ТРАНЗИСТОРІВ В РЕЖИМІ ТЯГИ І РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ**

#### **3.1 Розробка ВІП електровоза на основі IGBT-транзисторів в режимі тяги і способи його управління**

Після появи тиристорів, які використовуються зараз в схемі ВІП експлуатованих електровозів з колекторними тяговими електроприводами, пройшло вже більше 40 років. Сьогодні електровози мають однакову основоположну силову схему, яка не відповідає сучасним технічним вимогам. Основною причиною є низький коефіцієнт потужності електровоза змінного струму з тиристорними ВІП в режимі тяги [4].

Наукові дослідження за останні 40 років показали, що без принципових змін силової схеми електровоза неможливо вирішити проблеми підвищення енергетичних показників.

Прогрес в силовій, електронній і мікропроцесорній техніці відкриває нові можливості в розробках перспективних силових схем електровозів і систем їх управління.

Практика показує, що на електровозах ВЛ80<sup>Р</sup>, ВЛ85, ВЛ65 і ЕП1 в режимах тяги і рекуперативного гальмування доцільніше використовувати замість тиристорних ВІП нові пристрої. В роботі виноситься пропозиція на використання IGBT-транзисторів (Insulated-gate bipolar transistor). Транзистори являють собою напівпровідникові пристрої з управлінням, подібні польовим транзисторам, а за вихідними характеристиками аналогічні біполярним транзисторам. Застосування IGBT-транзисторів дозволяє вирішити десятиліттями існуючу проблему – забезпечення силових схем електровозів змінного струму напівпровідниковими пристроями з повною керованістю.

Пропонується розроблений на базі IGBT-транзисторів ВІП електровоза, який може вже сьогодні замінити ВІП на тиристорах. Транзисторні ВІПи відрізняються важливими особливостями при експлуатації електровозів. Перш за

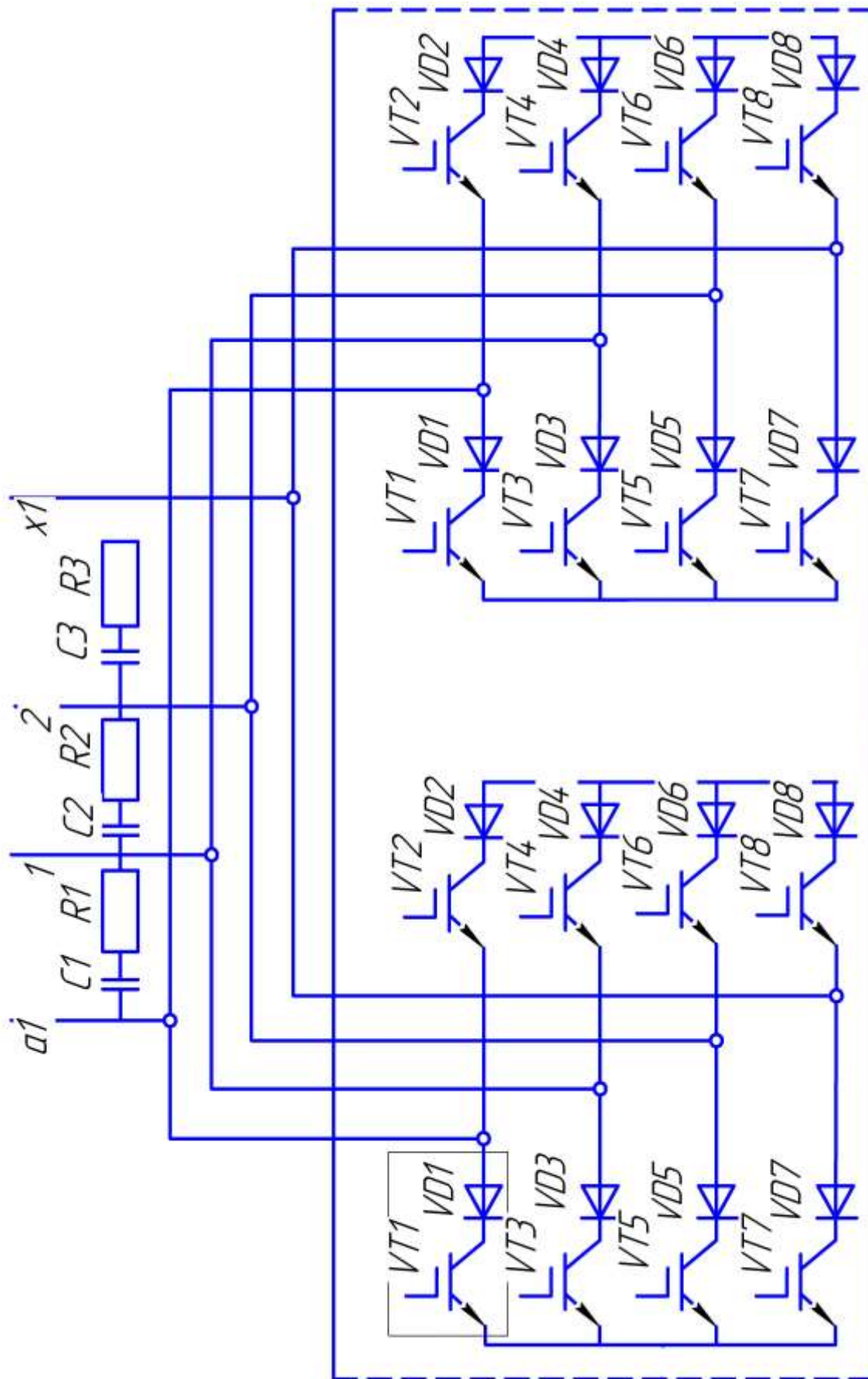
					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

все, ці пристрої створюють значні можливості для зниження енергозатрат на тягу поїздів, головним чином завдяки розробці нових алгоритмів управління такого ВІП електровоза [5].

З метою мінімізації змін в колах управління в силовій схемі електровоза пропонується використовувати ті ж чотири зони регулювання випрямленої напруги як в режимі тяги, так і в режимі рекуперативного гальмування. Спрощена силова схема пропонованого електровоза в розрахунку на один візок представлена на листі 4 і передбачає аналогічну типовому ВІП (вісім плечей). ВІП пропонується виготовляти для кожного тягового двигуна індивідуально. Тобто, в одній конструкції два індивідуальних перетворювача, де кожен з них живить один тяговий двигун електровоза. Такий підхід дозволить в подальшому забезпечити поосне регулювання сили тяги і гальмування, а також поосну піскоподачу. Кожне плече ВІП складається з двох паралельних гілок, кожна з яких має IGBT-транзистор ввімкнений послідовно з силовим діодом. Наприклад, плече 1 ВІП складається з двох транзисторів VT1 і VT1 і двох діодів VD1 і VD1 (рис.3.1). Паралельно до кожного транзистора VT вмикається зворотній діод VD і живляче RC-коло. Паралельно кола випрямленого струму включено в діодне розрядне плече VD9 послідовно з IGBT-транзистором VT9, що показано на листі 4.

При відключенні IGBT-транзисторів, через наявність індуктивності розсіювання тягового трансформатора електровоза, виникає імпульсна перенапруга. В результаті напруга на колекторах IGBT-транзисторів зростає на величину  $\Delta V = L_{pac} \cdot di_c/dt$  відносно потенціалу джерела струму  $V_{DC}$ , де  $di_c/dt$  – швидкість спаду струму колектора. Сумарна напруга «колектор-емітер» при цьому рівна  $V_{CE} = V_{DC} + \Delta V$  і може перевищити допустиме значення, а відповідно, вивести транзистори з ладу. Для захисту транзисторів від комутаційних перенапруг пропонується встановити снабберні ємності безпосередньо на виходи тягового трансформатора паралельно їх вторинним обмоткам, а також використовувати індивідуальні снабберні RC-кола кожного транзистору плеча ВІП (лист 4).

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Тяговий трансформатор Т приймається типовим для електровозів ДСЗ з

Рисунок 3.1 – Принципова схема випрямляючого інверторного перетворювача

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.190111.000.04MP.ПЗ

Арк.

42

транзисторними ВПІ в зонно-фазному регулюванні. ВУЗ пропонується також застосовувати на базі IGBT-транзисторів. Коло випрямленого струму електроприводу електровоза приймається типовим з асинхронним тяговим двигуном.

Суть розробленого способу управління такого перетворювача полягає у тому, що при використанні IGBT-транзисторів є можливість управління ввімкненням і вимкненням пліч ВПІ в будь-який момент часу півперіоду напруги. Для найбільш ефективного споживання електроенергії на протязі всього процесу роботи електровоза необхідно забезпечити збільшення випрямленої напруги ВПІ в максимальних значеннях напруги мережі, тим самим суміщати миттєві значення струму в первинній обмотці тягового трансформатора і напруги мережі. Це значно збільшить коефіцієнт потужності і, відповідно, знизить розхід електроенергії електроприводів електровоза на тягу поїздів.

Для цього розроблена діаграма управління транзисторним ВПІ, яка має декілька підібраних інтервалів, які мають різні кути нахилу. Ці кути нахилу кожного із інтервалів: 2-3- $\psi_{2-3}$ , 3-4- $\psi_{3-4}$ , 5-6- $\psi_{5-6}$ , і 6-7- $\psi_{6-7}$  – підбирались таким чином, щоб протягом всього півперіоду регулювання симетрувати максимальні миттєві значення струму первинної обмотки тягового трансформатора і напруги мережі за рахунок непропорційного збільшення як за переднім, так і за заднім фронтами випрямленої напруги в півперіоді, що дещо компенсує індуктивний характер навантаження ВПІ електровоза.

Відкриття транзисторів плеча ВПІ пропонується проводити за сигналом системи синхронізації, тобто при переході напруги через 0,  $\pi$ ,  $2\pi$  і т.д. Далі в роботу вступають діоди, які в плечі ВПІ увімкнені послідовно з тиристорами. За рахунок прикладеної до діодів напруги позитивної полярності від вторинної обмотки тягового трансформатора, діоди за рахунок складених потенційних умов починають комутувати, але вже не з паралельним плечем ВПІ, а з діодним розрядним плечем, ввімкненим паралельно колу випрямленого струму. При цьому діодне розрядне плече працювало раніше з попереднього півперіоду напруги, починаючи зі 150 ел. град., корисно використовуючи накопичену електромагнітну

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43









енергію в індуктивності навантаження того ж півперіоду. В результаті, струм двигуна підтримується на відповідному рівні енергією розряду кола випрямленого струму при повністю відключеному ВПІ електровоза від мережі. Струм в первинній обмотці трансформатора знижується до рівня холостого ходу, рис. 2.3, б. Споживання з мережі електровозом в цей момент часу реактивної потужності незначне. Таким чином, організація роботи транзисторних пліч ВПІ в кожен півперіод напруги реалізується не до 180 ел.град., а до 150 ел. град., після чого транзистори закриваються. Останні 30 ел. град. в півперіоді напруга працює тільки на діодне розрядне плече, розряджаючи накопичену енергію в колі випрямленого струму на те ж навантаження. Також його робота зменшує струмове навантаження транзисторів пліч ВПІ приблизно на 18%, що проявляється на збільшенні ресурсу їх роботи.

Типовому ВПІ і його алгоритму управління притаманні два значних недоліки. Перший проявляється в зворотній подачі збереженої електромагнітної енергії від навантаження через тяговий трансформатор в мережу в момент часу, відповідний тривалості кута з фазою  $\alpha_0$ . Сам кут  $\alpha_0$  утворює від'ємну випрямлену напругу, яка впливає на зниження середньої напруги, прикладеної до тягового двигуна. Другий суттєвий недолік полягає в організації основної комутації. Вона проходить по чергово в два етапи, що в свою чергу збільшує загальний час комутації. Таким чином, тривалість основної комутації типового ВПІ разом з кутом  $\alpha_0$  складає приблизно 39 ел. град [6].

Для запропонованих технічних рішень ВПІ електровоза з використанням IGBT-транзисторів і діодного розрядного плеча розроблений алгоритм управління в режимі тяги, табл. 3.1. Алгоритм має три керуючих сигнали:  $\alpha_{\omega}$  – часова зона відкриття IGBT-транзисторів пліч ВПІ;  $\alpha_{reg}$  – часова зона регулювання відкриття IGBT-транзисторів пліч ВПІ;  $\alpha_d$  – часова зона роботи транзистора VT9 і діодного розрядного плеча ВПІ.

Таблиця 3.1 – Новий алгоритм управління ВПІ електровоза на базі IGBT-транзисторів в режимі тяги

Зона	Напрямок ЕРС	Алгоритм роботи пліч ВПІ
------	--------------	--------------------------

регулювання	трансформатора	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
1		-	-	-	$\alpha_{reg}$	$\alpha_{reg}$	-	-	-	$\alpha_D$
		-	-	$\alpha_{reg}$	-	-	$\alpha_{reg}$	-	-	$\alpha_D$
2		-	$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	$\alpha_{\omega}$	-	-	-	$\alpha_D$
		$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	-	-	$\alpha_{\omega}$	-	-	$\alpha_D$
3		-	-	-	$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	$\alpha_{reg}$		$\alpha_D$
		-	-	$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	-	-	$\alpha_{\omega}$	$\alpha_D$
4		-	$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	-	-	$\alpha_{\omega}$	-	$\alpha_D$
		$\alpha_{reg}$	-	$\alpha_{\omega}$	-	-	-	-	$\alpha_{\omega}$	$\alpha_D$

На рис. 3.2-3.3 у зрівнянні представлено діаграми електромагнітних процесів струму мережі, напруги мережі, випрямленої напруги і струму перетворювачів, діаграми управління, а також часові діаграми струмів в плечах ВІП при типовому (а) і пропонованому (б) способі управління. Необхідно відмітити, що збільшення випрямленої напруги на тягових двигунах при типовому алгоритмі управління здійснюється за напрямом від кінця півперіоду мережевої напруги на першій і вищих зонах регулювання. При цьому напруга управління змінюється лінійно, діаграма управління рис. 3.2, а і 3.3, а. Враховуючи значну індуктивність кола випрямленого струму, струм в первинній обмотці тягового трансформатора буде додатково зсунутий на деякий кут, що збільшує кут зсуву фаз між струмом і напругою мережі [7].

Далі розглянемо електромагнітні процеси при новому алгоритмі управління транзисторним ВІП в режимі тяги. Регулювання починається з першої зони, на якій випрямлена напруга, підведена до тягових двигунів, визначається напругою обмотки 1-2 тягового трансформатора, рис. 3.3, регульована на інтервалі часу  $\alpha_{reg}$ , рис. 3.3, б.

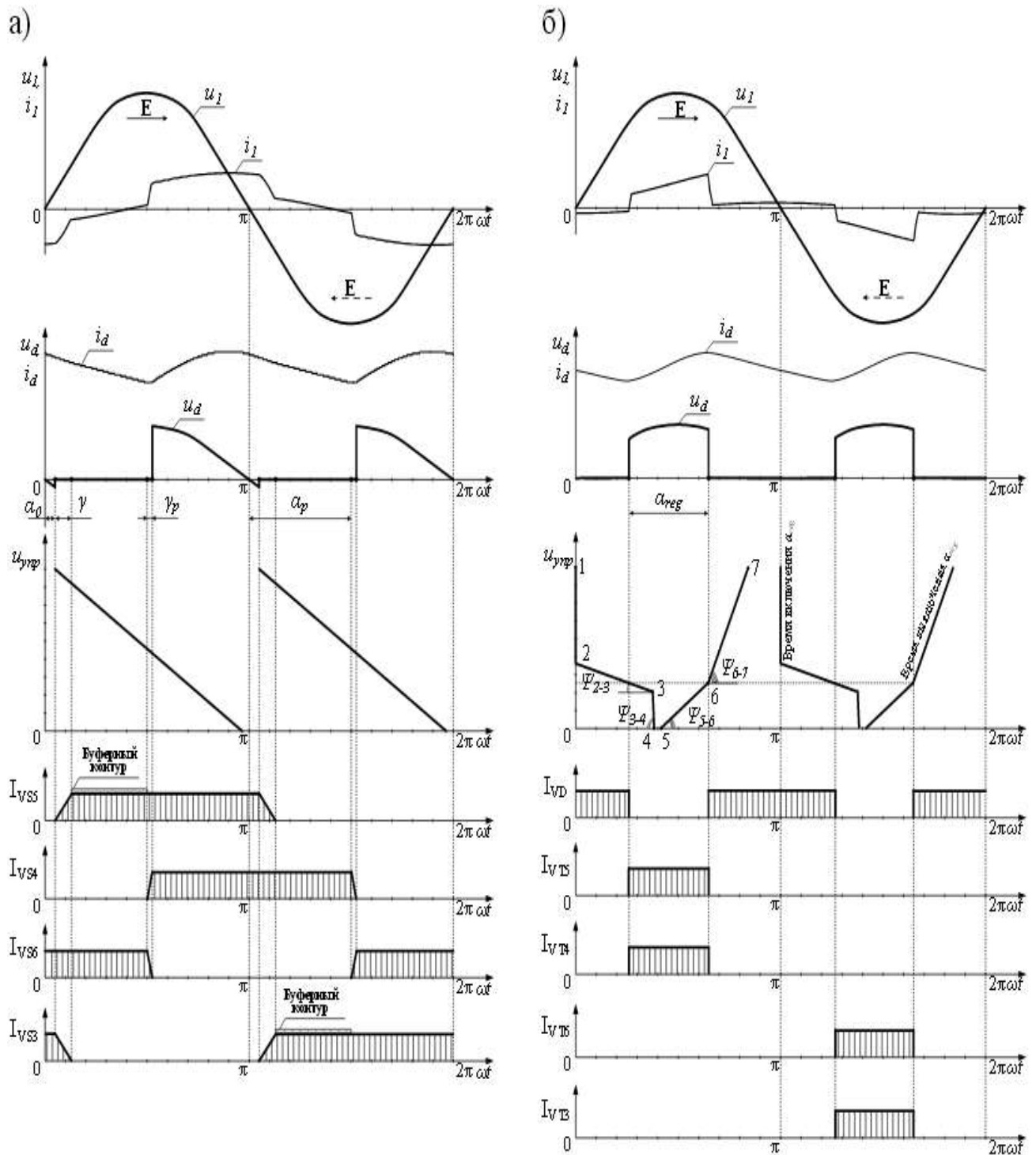


Рисунок 3.2 – Діаграма електромагнітних процесів струму  $i_l$  і напруги мережі  $u_l$ , випрямленої напруги  $u_d$  і струму  $i_d$  перетворювачів, діаграми управління, а також часові діаграми струмів в плечах ВП  $I_{V_{Sn}}$  при типовому (а) і пропонованому (б) способах управління в режимі тяги на першій зоні регулювання

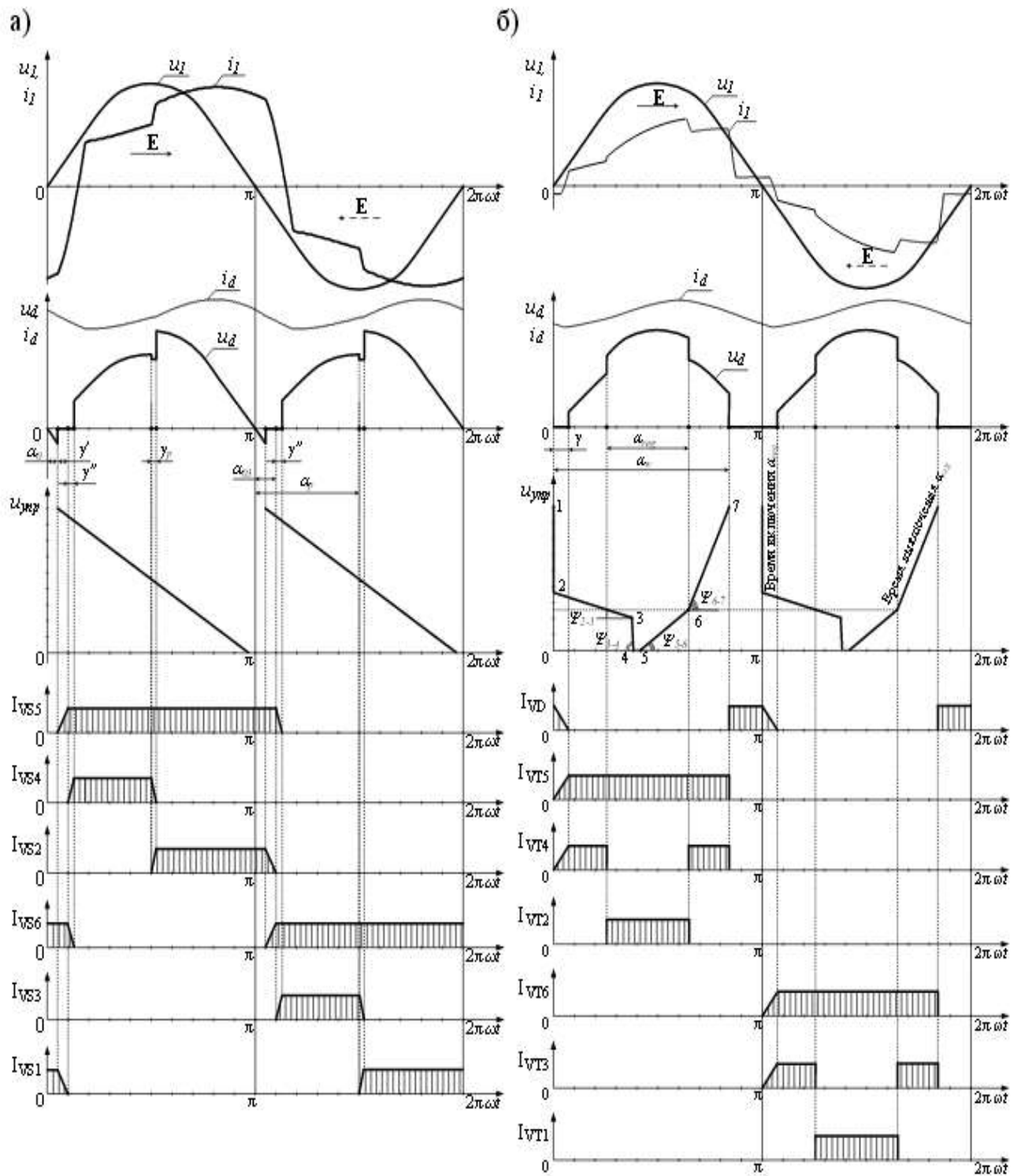


Рисунок 3.3 – Діаграма електромагнітних процесів струму  $i_l$  і напруги  $u_l$  мережі, випрямленої напруги  $u_d$  і струму  $i_d$  перетворювачів, діаграми управління, а також часові діаграми струмів в плечах ВП  $I_{Vsn}$  при типовому (а) і пропонуваному (б) способах управління в режимі тяги на другій зоні регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На першій зоні в позитивний півперіод напруги мережі відкриваються плечі VT4 і VT5 у від'ємний – VT3 і VT6, регульовані тимчасовою зоною  $\alpha_{reg}$ . В проміжках часу між закритими станами транзисторних пліч ВІП струм в тяговому двигуні підтримується за рахунок діодного розрядного плеча VD9, шунтуючого коло постійної напруги на всіх зонах регулювання, які відкриваються за рахунок подачі сигналу управління на транзисторах VT9, рис. 3.2.

Розглянемо детальніше процес комутації струмів пліч ВІП при зміні півперіодів напруги мережі на прикладі другої зони регулювання, рис. 3.3, б. Припустимо, що процесу комутації передував півперіод, коли напрямок ЕРС тягової обмотки трансформатора відповідав штрихованій стрілці, і струм проходив по плечам VT3 і VT6. Закриття цих пліч відбувається по закінченню робочої часової зони  $\alpha_{\omega}$ , при цьому відкривається транзистор VT8, струм починає протікати через діодні розрядні плечі VD8 за рахунок накопиченої електромагнітної енергії в колі випрямленого струму.

Після зміни напрямку ЕРС в первинній обмотці тягового трансформатора, у відповідності із суцільною стрілкою, імпульси управління  $\alpha_{\omega}$  подаються на плечі VT5 і VT4 в момент часу  $\omega t = 0$ , під дією напруги секції 1-2 плечі VT5 і VT4 відкриваються, утворюючи напругу повної першої зони. Для утворення другої зони подається імпульс управління  $\alpha_{reg}$  на плече VT2, внаслідок чого відбувається утворення часової зони регулювання фазної напруги. При підвищенні напруги, в залежності від кута повороту ручки машиніста, відбувається збільшення тривалості часової зони регулювання сигналу  $\alpha_{reg}$ , згідно діаграми управління, рис. 3.3, б. Одночасно з відкриттям транзисторів плеча VT2, закривається плече VT4 за рахунок втрати потенціальних умов діодів, увімкнених послідовно з транзисторами. Відкрите сигналом  $\alpha_{\omega}$  плече VT5 працює до 150 ел. град.

По закінченню сигналу управління  $\alpha_{reg}$  плеча VT2 відкривається плече VT4 сигналом управління  $\alpha_{\omega}$ , яке також працює до 150 ел. град.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

В наступний півперіод при зміні напрямку ЕРС тягового трансформатора сигнал  $\alpha_{\omega}$  подається на плечі VT3 і VT6, а додатковий  $\alpha_{reg}$  – на плече VT1, далі робота пліч ВІП відбувається аналогічно вищеописаному.

Робота на третій і четвертій зоні регулювання аналогічна роботі на другій зоні, за виключенням того, що в третій зоні в якості основної напруги використовується напруга обмоток тягового трансформатора 2-х1, а в якості додаткової – напруга обмотки 1-2. На четвертій зоні в якості основної напруги використовуються обмотки 1-х1 і а1-1 – в якості додаткової напруги.

Нижче представлені електромагнітні процеси роботи транзисторного ВІП електровоза в режимі тяги з новим алгоритмом управління (табл. 3.1) на прикладі 3, 5 зони регулювання випрямленої напруги (рис. 3.4-3.6).

За результатами математичного моделювання отримано, що у транзисторного ВІП електровоза основна комутація починається з самого початку півперіоду і складає 20 ел. град, що практично вдвічі менше, ніж у типового ВІП. Відповідно, середня випрямлена напруга, прикладена до тягового двигуна, значно збільшується. На 3, 5 зоні регулювання при новому алгоритмі управління транзисторними ВІП коефіцієнт потужності електровоза підвищився до 0,96 проти 0,77 роботи типового ВІП, що на 19,8% більше, а кут зсуву фаз між вхідним струмом і мережевою напругою наближається до нуля.

Основні причини зниження коефіцієнту потужності електровоза змінного струму при управлінні тиристорними ВІП в режимі рекуперативного гальмування розглянуто вище. Для розробленої схеми ВІП електровоза з використанням IGBT-транзисторів розроблено алгоритм управління в режимі рекуперативного гальмування. Для більшої уніфікації конструкції типового електровоза, аналогічно типовому алгоритму управління пропонується чотири зони регулювання [7]. Це забезпечить високу надійність роботи типового електрообладнання електровоза в сполученні з новим випрямляючим інверторним перетворювачем.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

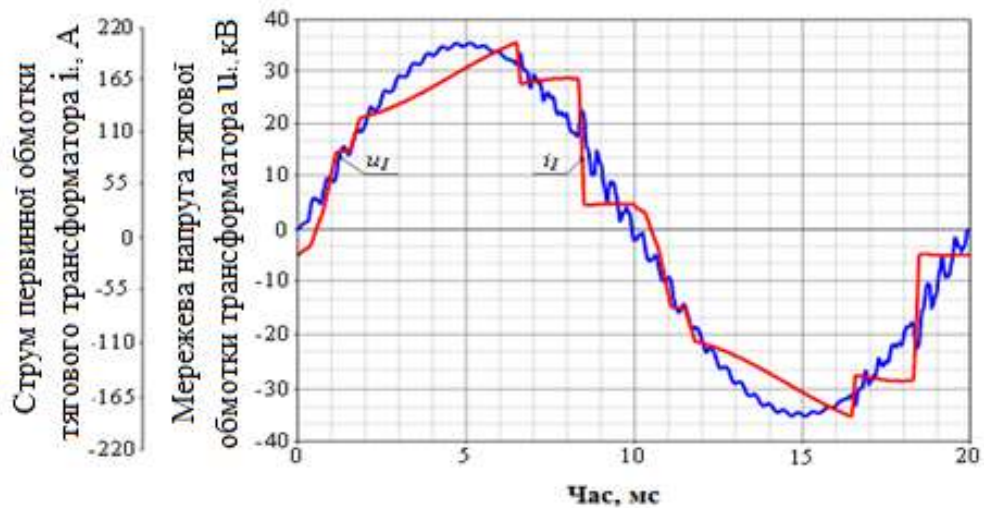


Рисунок 3.4 – Форма кривих напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора електровоза при пропонованому алгоритмі управління з тиристорними ВПІ на 3, 5 зоні регулювання

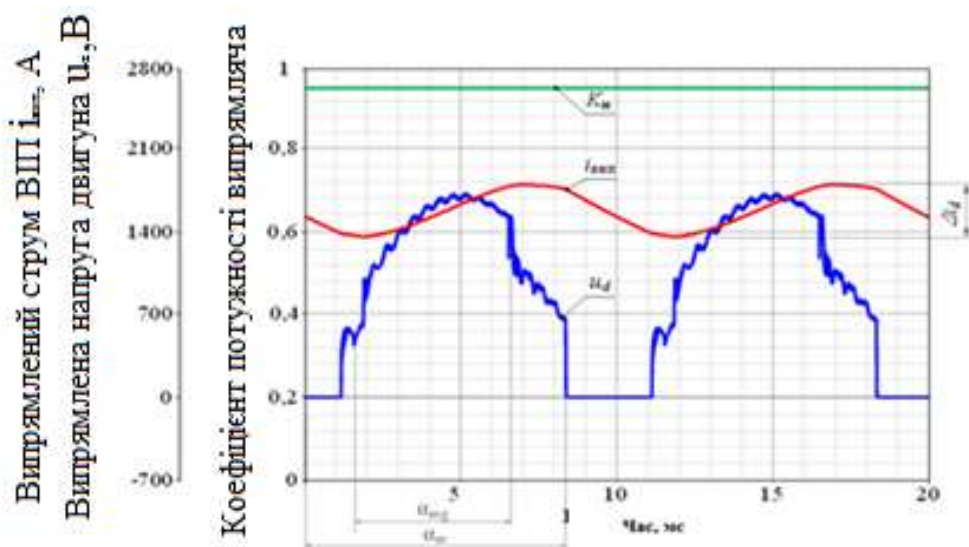


Рисунок 3.5 – Діаграма випрямленої напруги, струму ВПІ і коефіцієнту потужності електровоза в режимі тяги при пропонованому алгоритмі управління з транзисторними ВПІ на 3, 5 зоні регулювання

Аналогічно типовому алгоритму управління пропонується чотири зони регулювання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Таблиця 3.2 – Новий алгоритм управління ВПП електровоза на базі IGBT-транзисторів в режимі рекуперативного гальмування

Зона регулювання	Напрямок ЕРС трансформатора	Алгоритм роботи пліч ВПП							
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8
4	→	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	-	-	-	-	$\beta_{\omega}$
	←---	-	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	-	-	$\beta_{\omega}$	-
3	→	-	-	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	-	-	$\beta_{\omega}$
	←---	-	-	-	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	$\beta_{\omega}$	-
2	→	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	-	-	$\beta_{\omega}$	-	-
	←---	-	$\beta_{reg}$	-	$\beta'_{\omega}$	$\beta_{\omega}$	-	-	-
1	→	-	-	$\beta_{reg}$	-	-	-	-	-
	←---	-	-	-	$\beta_{reg}$	$\beta_{reg}$	-	-	-

Електромагнітні процеси при типовому алгоритмі управління ВПП електровоза на першій з вищих зон регулювання розглядалися в роботі раніше. Необхідно відмітити, що зміна напруги інвертора при типовому алгоритмі управління здійснюється за напрямком від кінця півперіоду мережевої напруги на першій з вищих зон регулювання від  $\alpha_p = \pi - \beta$  до  $\alpha_{p \min}$ .

При цьому напруга управління змінюється лінійно, діаграма управління представлена на рис. 3.7, а і 3.8 а. Враховуючи значну індуктивність кола випрямленого струму, струм в первинній обмотці тягового трансформатора буде додатково зсунутий на деякий кут, що збільшує кут зсуву фаз між струмом і напругою мережі, а це в свою чергу значно знижує коефіцієнт потужності.

Далі розглянемо електромагнітні процеси при новому алгоритмі управління транзисторним ВПП в режимах інвертування. Регулювання починається з четвертої зони. На великих швидкостях електровоза регулювання гальмівної сили здійснюється струмом збудження за рахунок випрямної установки збудження. Після досягнення максимального значення струму збудження гальмівна сила регулюється зміною ЕРС інвертора.

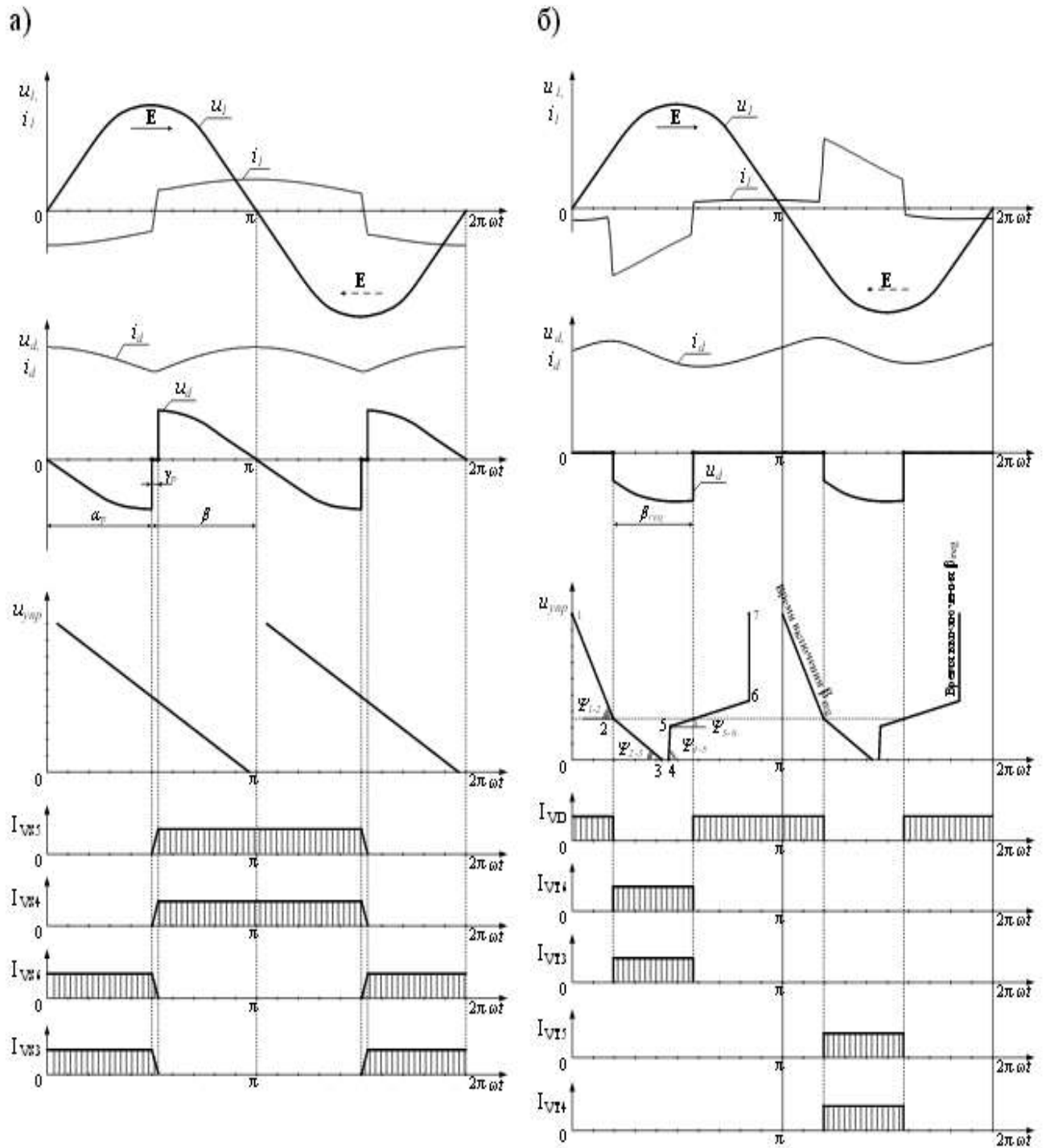


Рисунок 3.7 – Діаграма електромагнітних процесів струму  $i_1$  і напруги мережі  $u_1$ , випрямленої напруги  $u_d$  і струму  $i_d$  перетворювачів, діаграми управління, а також часові діаграми струмів в плечах ВП  $I_{vsn}$  при типовому (а) і пропонуваному (б) способах управління в режимі рекуперативного гальмування на першій зоні регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

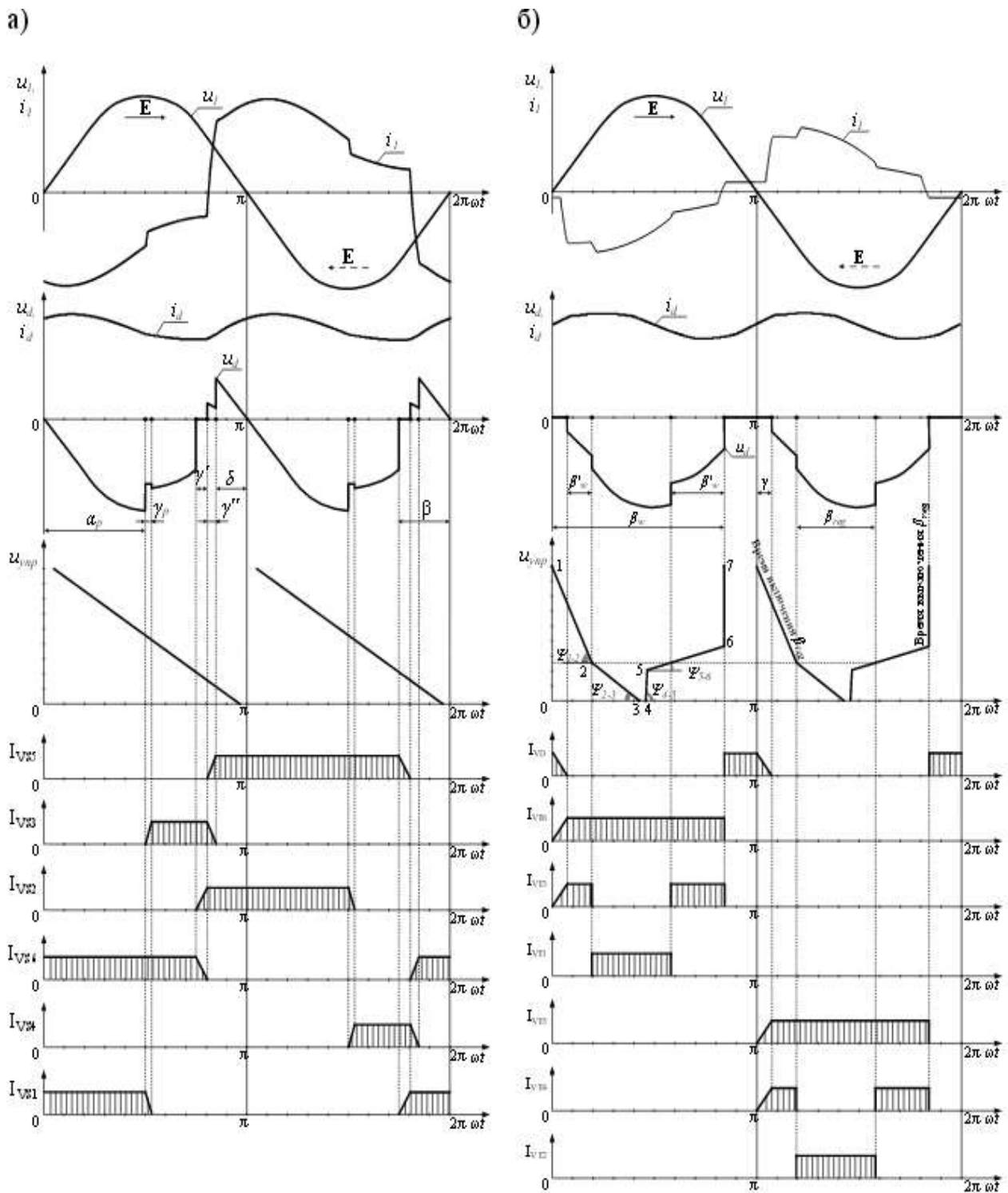


Рисунок 3.8 – Діаграма електромагнітних процесів струму  $i_1$  і напруги мережі  $u_1$ , випрямленої напруги  $u_d$  і струму  $i_d$  перетворювачів, діаграми управління, а також часові діаграми струмів в плечах ВП  $I_{vsn}$  при типовому (а) і пропонуваному (б) способах управління в режимі рекуперативного гальмування на другій зоні регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Далі розглянемо електромагнітні процеси при новому алгоритмі управління транзисторним ВПП в режимах інвертування. Регулювання починається з четвертої зони. На великих швидкостях електровоза регулювання гальмівної сили здійснюється струмом збудження за рахунок випрямної установки збудження. Після досягнення максимального значення струму збудження гальмівна сила регулюється зміною ЕРС інвертора.

Принципи роботи для третьої і четвертої зон регулювання за сенсом однакові і відрізняються тільки величиною ЕРС інвертора, тому розглянемо електромагнітні процеси на прикладі першої і другої зон регулювання.

Алгоритм роботи перетворювача на першій зоні регулювання дещо відрізняється від роботи ВПП на інших зонах. Напряга інвертора визначається напругою секції 1-2 обмотки тягового трансформатора. Інвертування здійснюється за рахунок подачі сигналу управління  $\beta_{reg}$  на плечі ВПП VT3, VT6 в додатний півперіод мережевої напруги і на плечі VT4, VT5 у від'ємний, у відповідності з пропонованим алгоритмом управління інвертором (табл. 3.2).

З діаграми електричних процесів видно, що струм первинної обмотки тягового трансформатора при пропонованому способі управління ВПП більше симетричний за напругою, кут зсуву фаз практично рівний нулю, що обумовлює високий коефіцієнт потужності.

Детальніше розглянемо процес комутації струму пліч ВПП при зміні півперіодів напруги мережі на прикладі другої зони регулювання, рис. 3.8, б. Припустимо, що процесу комутації передував півперіод, коли ЕРС тягової обмотки трансформатора відповідала штриховій стрілці, і струм проходив по плечам VS5 і VS4. Закриття цих плечей проходить по закінченню робочої часової зони  $\beta_{\omega}$  і  $\beta'_{\omega}$ .

Після зміни напрямку ЕРС в первинній обмотці тягового трансформатора у відповідності із суцільною стрілкою, імпульси управління  $\beta_{\omega}$  подаються на плече VT6, а  $\beta'_{\omega}$  – на плече VT3 в момент часу  $\omega t = 0$ , під дією ЕРС генератора, плечі VT6 і VT3 відкриваються, утворюючи напругу повної першої зони. Для утворення

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

другої зони подається імпульс управління  $\beta_{reg}$  на плече VT1, внаслідок чого проходить утворення часової зони регулювання фазної напруги. При підвищенні напруги управління, в залежності від кута повороту штурвалу машиніста, проходить збільшення тривалості часової зони регулювання згідно діаграми управління, рис. 3.8, б, одночасно з відкриттям транзисторів плеча VT1, знімається керуючий сигнал  $\beta'_{\omega}$  і плече VT3 закривається. Відкрите сигналом плече VT6 працює до 150 ел. град [6].

В наступний півперіод при зміні напрямку ЕРС тягового трансформатора сигнали  $\beta_{\omega}$  і  $\beta'_{\omega}$  подаються на плечі VT5 і VT4 відповідно, а додатковий  $\beta_{reg}$  – на плече VT2, далі робота пліч ВПІ проходить аналогічно описаному вище.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

# 4 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТИПУ АД-914 ПРОЕКТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

## 4.1 Призначення та застосування автономних інверторів

Автономний інвертор – це перетворювач постійного струму в однофазний або багатофазних змінний струм, частота якого визначається системою управління, а величина і форма вихідної напруги залежить від характеру і параметрів навантаження. На відміну від залежного інвертора, частота якого визначається частотою мережі, на виході автономного інвертора отримують змінний струм будь-якої частоти, а напруга плавно змінюється від нуля до максимально допустимого значення [12].

Комутація струму в інверторах при використанні тиристорів проводиться незалежно від процесів у зовнішніх електричних колах, завдяки наявності додаткових комутуючих пристроїв всередині самого перетворювача. Автономні інвертори класифікуються залежно від способу примусової комутації струму, схеми інвертора, параметрів джерела живлення і навантаження. За характером обміну енергією між джерелом живлення і навантаженням автономні інвертори поділяються на автономні інвертори напруги (АІН), струму (АІС) і автономні резонансні інвертори (АІР).

Характерною особливістю автономного інвертора напруги є те, що він отримує живлення від джерела напруги, на вході АІН включається конденсатор великої ємності. Друга особливість АІН полягає у використанні в якості ключів повністю керованих вентилів, зашунтованих діодами зворотного струму. АІН формує в навантаженні напругу прямокутної форми, а форма струму визначається характером навантаження. АІН знаходить велике застосування в перетворювальній техніці, його інакше називають універсальним модулем перетворення електроенергії. На його основі виконуються регулятори змінної напруги, безпосередні перетворювачі частоти, активні фільтри напруги і струму, компенсатори реактивної потужності.

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Характерними ознаками автономного інвертора струму є живлення від джерела струму. Тоді в коло джерела включається дросель великої індуктивності. У найпростіших резонансних інверторах навантаження, що складається з послідовно включеного з котушкою індуктивності конденсатора, підключається до джерела за допомогою основного тиристора. Потім допоміжний тиристор комутує основний, при цьому струм через навантаження тече в протилежному напрямку.

Залежно від числа комутацій струму розрізняють інвертори з одно- і двоступеневою комутацією. При одноступеневій комутації струм навантаження відразу переходить на вступаючий в роботу тиристор, при двоступеневій комутації навантаження спочатку переключується в допоміжне коло, а потім в основне. При використанні одноопераційних тиристорів схеми доповнюються спеціальними вузлами примусової комутації. В автономних інверторах на тиристорах повна комутація з перемиканням струму з однієї гілки схеми на іншу виконується в кілька етапів. Спочатку відбувається зменшення прямого струму в одному з тиристорів до нуля, потім затримка прикладання прямої напруги на ньому до повного відновлення замикаючої здатності і далі наростання прямого струму в другому тиристорі. Автономний інвертор напруги (АІН) виконується за мостовою схемою. Принципова схема інвертора зображена на рис. 4.1 та листі 9.

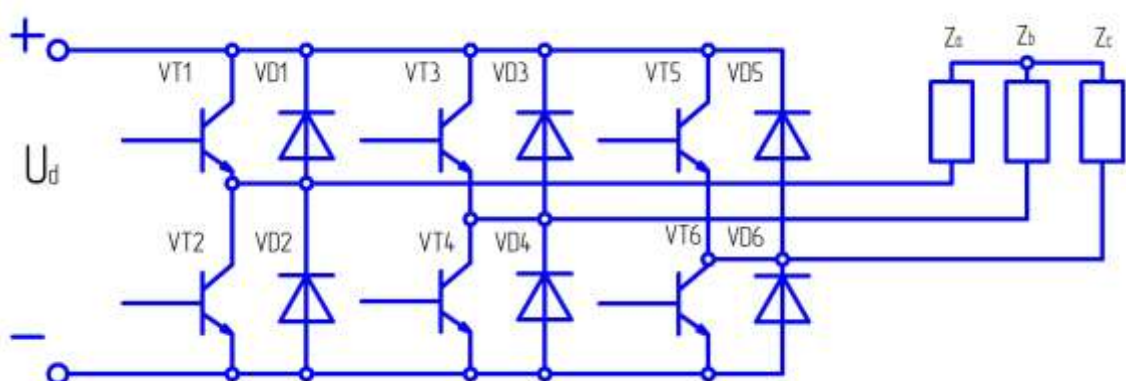


Рисунок 4.1 – Принципова схема автономного інвертора напруги

У зв'язку з тим, що при будь-яких дослідженнях ефективності застосування

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

нового обладнання на існуючому рухомому складі намагаються максимально зменшити капіталовкладення, логічно було б припустити про доцільність використання електрообладнання вітчизняного виробництва.

В першому вітчизняному електровозі змінного струму ДСЗ, розробленого сумісно з німецькою фірмою «Siemens», в якості тягових двигунів використовуються трифазні асинхронні двигуни АД-914 виробництва ДП «Електроважмаш». Вони отримують живлення від частотних перетворювачів виробництва німецької фірми «Siemens» та розраховані на низьку частоту живлення мережі. Система керування електровоза ДСЗ виконана на основі мікропроцесорного комплекту Siemens-SIBAS 32.

Для покращення тягових якостей електровоза ВЛ80<sup>р</sup> ми запропонували застосувати на них АТД типу АД-914, які вже добре зарекомендували себе в експлуатації. А для здешевлення виконання комплексу робіт зі встановлення необхідного електрообладнання на проектному електровозі ми пропонуємо розробити і встановити автономний інвертор напруги вітчизняного виробництва.

#### 4.2 Вибір схеми перетворювача

Автономний інвертор напруги будується за мостовою схемою. Використовується принцип одноразової комутації вентилів з тривалістю провідного стану ключів 180 ел. град., або широтно-імпульсна модуляція. При використанні ШІМ автономний інвертор виконує регулювання частоти і напруги одночасно. В такому випадку на вході перетворювача використовують нерегульований випрямляч, а гальмування двигуна відбувається шляхом виключення двигуна від джерела постійної напруги і замикання статора на активний опір. При частотно-регульованому гальмуванні необхідно передавати енергію від двигуна до мережі змінного струму. Такий режим стає можливим при використанні реверсивного керованого випрямляча, в якому одна група вентилів працює в режимі керованого випрямляча, а друга – в режимі веденого мережею інвертора [17].

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

При значній різниці напруги мережі та напруги двигуна використовують узгоджений трансформатор, через який напруга подається на вхід випрямляча. Функціональна схема перетворювача частоти наведена на рис. 4.2 та листі 9.

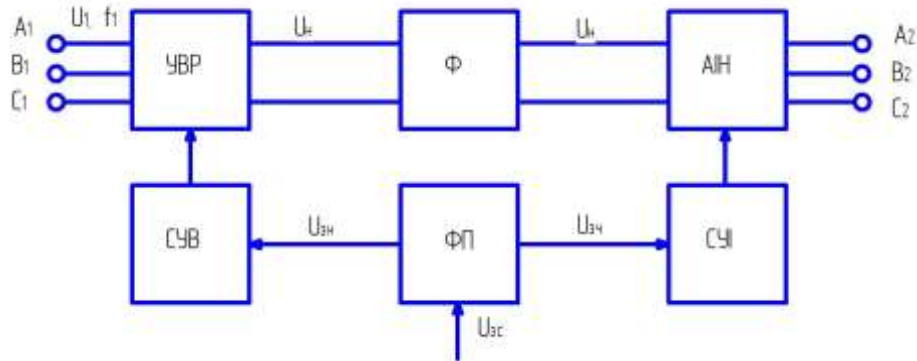


Рисунок 4.2 – Функціональна схема перетворювача частоти:

УВР – керований реверсивний випрямляч; Ф – фільтр ланки постійного струму; АІН – автономний інвертор напруги; СУВ, СУІ – системи управління випрямлячем і інвертором відповідно; ФП – функціональний перетворювач;  $U_{зш}$ ,  $U_{зч}$  – сигнали завдання швидкості, напруги і частоти

### 4.3 Розрахунок параметрів випрямляча

Силові ключі (IGBT модулі) вибираємо по напрузі і струму навантаження. Для цього використовуємо технічні параметри асинхронного двигуна, частоту якого необхідно регулювати. Для розрахунку обираємо двигун АД-914, який ми пропонуємо застосувати на проектному електровозі. Його потужність складає  $P_H = 1200$  кВт; частота обертання ротора  $n_H = 1105$  хв<sup>-1</sup>; ковзання  $s_H = 2,7\%$ ; ККД  $\eta_H = 95,5\%$ ;  $\cos \varphi_H = 0,88$  д.е.

Номінальний струм статора

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}, \quad (4.1)$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $P_H$  – номінальна потужність АД;  $P_H = 1200$  кВт;

$U_H$  – номінальна лінійна напруга АД;  $U_H = 1870$  В;

$\cos \varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності АД;  $\cos \varphi_H = 0,88$  д.е.;

$\eta_H$  – номінальний ККД АД;  $\eta_H = 95,5\%$ .

$$I_{1H} = \frac{1200000}{3 \cdot 1870 \cdot 0,88 \cdot 0,955} = 254,5 \text{ А.}$$

Значення пускового приймається вдвічі більшим від номінального, тобто

$$I_{II} = 2I_{1H}; \quad (4.2)$$

$$I_{II} = 2 \cdot 254,5 = 509 \text{ А.}$$

Найбільша напруга, яка може бути подана на транзисторний ключ, рівна напрузі кола постійного струму

$$U_{dH} = \frac{3 \cdot U_H}{\sqrt{2}}; \quad (4.3)$$

$$U_{dH} = \frac{3 \cdot 1870}{\sqrt{2}} = 3966,9 \text{ В.}$$

Середнє значення струму, який споживається інвертором із кола постійного струму при номінальній частоті АІН

$$I_{dH} = \frac{P_H \cdot K_{BG}}{U_{dH}}, \quad (4.4)$$

де  $K_{BG}$  – коефіцієнт, що враховує вплив вищих гармонік; приймаємо  $K_{BG} = 1,15$  [14].

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{дн} = \frac{1200000 \cdot 1,15}{3966,9} = 347,9 \text{ А.}$$

Активний  $R_{ен}$  та індуктивний  $X_{ен}$  опір знайдемо за схемою заміщення асинхронного двигуна (рис. 4.3).

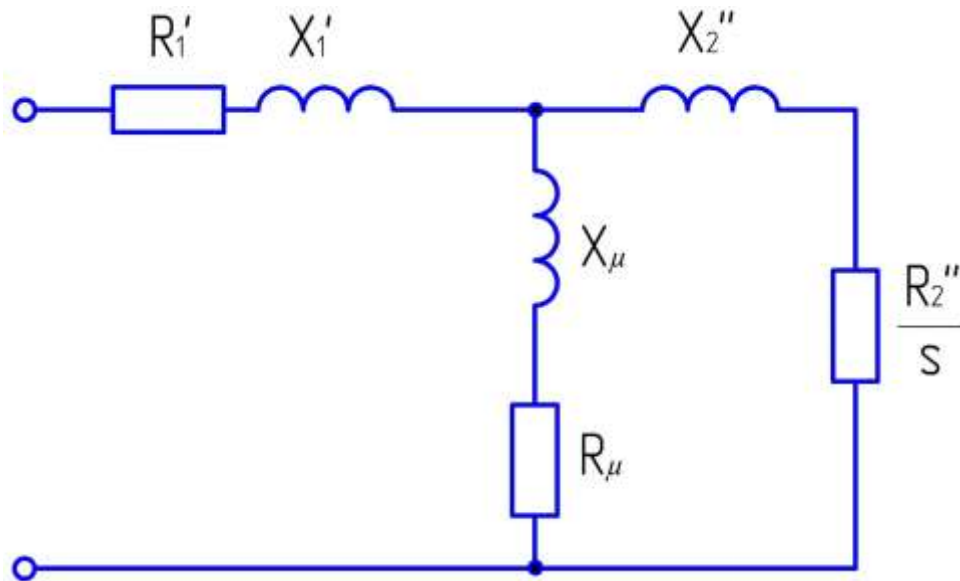


Рисунок 4.3 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Параметри схеми заміщення  $X_0 = 3,1$  в.о.;  $R_1' = 0,62$  в.о.;  $X_1' = 0,14$  в.о.;  $R_2'' = 0,029$  в.о.;  $X_2'' = 0,18$  в.о.

Номінальний опір, який розглядається як базовий

$$R_{\sigma} = \frac{U_{н}}{I_{1н}}; \tag{4.5}$$

$$R_{\sigma} = \frac{1870}{254,5} = 7,35 \text{ Ом.}$$

Виділимо параметри схеми заміщення асинхронного двигуна

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$R_1 = R_{\sigma} \cdot R'_1; \quad (4.6)$$

$$R_1 = 7,35 \cdot 0,62 = 4,56 \text{ Ом.}$$

$$R'_2 = R_{\sigma} \cdot R''_2; \quad (4.7)$$

$$R'_2 = 7,35 \cdot 0,029 = 0,21 \text{ Ом.}$$

$$X_1 = R_{\sigma} \cdot X'_1; \quad (4.8)$$

$$X_1 = 7,35 \cdot 0,14 = 1,03 \text{ Ом.}$$

$$X'_2 = R_{\sigma} \cdot X''_2; \quad (4.9)$$

$$X'_2 = 7,35 \cdot 0,18 = 1,32 \text{ Ом.}$$

$$X_{\mu} = R_{\sigma} \cdot X_0; \quad (4.10)$$

$$X_{\mu} = 7,35 \cdot 3,1 = 22,78 \text{ Ом.}$$

Активним опором контуру намагнічування можна знехтувати, з огляду на його незначну величину [18].

Для номінальної частоти АІН визначимо активний та індуктивний опір фази статора асинхронного двигуна

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

$$R_{\text{ен}} = R_1 + \frac{X_{\mu}^2 \cdot \frac{R'_2}{s_H}}{(X'_2 + X_{\mu})^2 + \left(\frac{R'_2}{s_H}\right)^2}, \quad (4.11)$$

де  $s_H$  – номінальне ковзання, яке зумовлене відносною різницею кутової швидкості магнітного поля  $\omega_0$  та кутової швидкості ротора АД  $\omega_H$ ; приймаємо  $s_H = 2,7\%$ .

$$R_{\text{ен}} = 4,56 + \frac{22,78^2 \cdot \frac{0,21}{0,027}}{(1,32 + 22,78)^2 + \left(\frac{0,21}{0,027}\right)^2} = 10,85 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{ен}} = X_1 + X_{\mu} - \frac{X_{\mu}^2 \cdot (X'_2 + X_{\mu})}{(X'_2 + X_{\mu})^2 + \left(\frac{R'_2}{s_H}\right)^2}; \quad (4.12)$$

$$X_{\text{ен}} = 1,03 + 22,78 - \frac{22,78^2 \cdot (1,32 + 22,78)}{(1,32 + 22,78)^2 + \left(\frac{0,21}{0,027}\right)^2} = 4,31 \text{ Ом.}$$

До складу модулів входять транзистори і діоди, параметри яких узгоджені з паспортними параметрами модуля, тому немає необхідності розраховувати значення окремих елементів.

Середнє значення струму, який проходить через ключ

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{дн}}}{m}, \quad (4.13)$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

де  $m$  – кількість фаз перетворювача;  $m = 3$ .

$$I_{\text{кл}} = \frac{347,9}{3} = 116 \text{ А.}$$

Обираємо IGBT-модулі фірми SEMIKRON на основі умови:

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{к}} \geq k_{\text{пер}} \cdot I_{\text{кл}}; \\ U_{\text{ке}} \geq U_{\text{дн}}. \end{array} \right\} \quad (4.14)$$

де  $k_{\text{пер}}$  – коефіцієнт кратності перевантаження по струму; згідно технічного завдання  $k_{\text{пер}} = 1,5$ ;

$I_{\text{к}}, U_{\text{ке}}$  – каталогові параметри IGBT-модулів.

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{к}} \geq 1,5 \cdot 116 = 174 \text{ А}; \\ U_{\text{ке}} \geq 3966,9 \text{ В.} \end{array} \right\}$$

Тип модуля: SKM200GD123D, струм колектора  $I_{\text{к}} = 200 \text{ А}$ ; напруга колектор-емітер  $U_{\text{ке}} = 4000 \text{ В}$  при  $t = 25^\circ\text{C}$ ; потужність  $P_{\text{к max}} = 145 \text{ Вт}$ .

Схема приладу IGBT приведена на рис. 4.4.

#### 4.4 Розрахунок параметрів фільтра

Згладжування пульсацій напруги в колі постійного струму відбувається за допомогою Г-подібних або П-подібних LC-фільтрів [12].

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

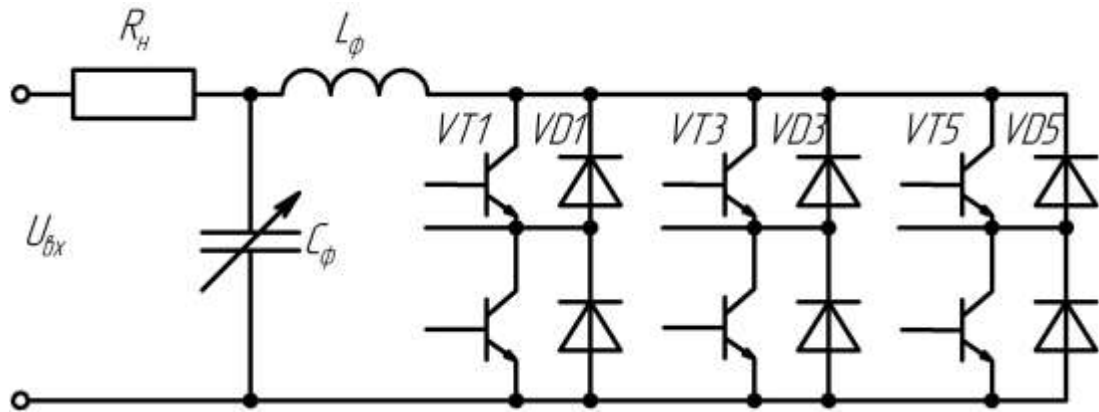


Рисунок 4.4 – Схема IGBT-модуля SKM200GD123D фірми SEMIKRON з фільтруючим елементом

Значення ємності конденсатора визначається рівнем пульсацій напруги в колі постійного струму  $\Delta U_c$ . Якщо вважати, що допустимі пульсації напруги не перевищують  $0,1 \cdot U_{дн}$  і знехтувати зміною струму при зміні напруги на конденсаторі фільтра, то можна прирівняти струм навантаження до зарядного або розрядного струму конденсатора. У цьому випадку ємність конденсатора визначається за формулою:

$$C_{\phi} = \frac{U_{дн} \cdot T_{н}}{R_{ен} \cdot \Delta U_c} \cdot \left( \frac{1-B}{1+B} - \ln \frac{2}{1+B} \right), \quad (4.15)$$

де  $T_{н}$  – електромагнітна стала часу кола навантаження, с.

$$T_{н} = \frac{L_{ен}}{R_{ен}} = \frac{X_{ен}}{R_{ен} \cdot \omega}, \quad (4.16)$$

де  $L_{ен}$  – індуктивність котушки фільтра, Гн.

$$T_{н} = \frac{4,31}{10,85 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 146,5} = 0,000432 \text{ с.}$$

						0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			66

Тоді з формули (4.16) випливає, що

$$L_{eH} = 0,000432 \cdot 10,85 = 0,0047 \text{ Гн.}$$

$$B = e^{-\frac{T}{2 \cdot T_H}}, \quad (4.17)$$

де  $T$  – період вихідної напруги автономного інвертора, с.

$$T = \frac{1}{f_{2H}}; \quad (4.18)$$

$$T = \frac{1}{146,5} = 0,007 \text{ с;}$$

$$B = e^{-\frac{0,007}{2 \cdot 0,000432}} = 0,000371.$$

Тоді за формулою (4.15)

$$C_\Phi = \frac{3966,9 \cdot 0,000432}{10,85 \cdot 0,1 \cdot 3966,9} \cdot \left( \frac{1 - 0,000371}{1 + 0,000371} - \ln \frac{2}{1 + 0,000371} \right) = 122 \text{ мкФ.}$$

При зменшенні частоти вихідної напруги інвертора необхідна ємність конденсатора збільшується. При  $f_i = 0$  вона досягає максимального значення [18], яке визначається за формулою:

$$C_\Phi = \frac{U_{dH} \cdot T_H}{R_{eH} \cdot \Delta U_c} \cdot (1 - \ln 2); \quad (4.19)$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

$$C_{\Phi} = \frac{3966,9 \cdot 0,00432}{10,85 \cdot 0,1 \cdot 3966,9} \cdot (1 - \ln 2) = 122 \text{ мкФ.}$$

Якщо ємність конденсатора позначити в мікрофарадах, то розрахункова індуктивність фільтра визначається в генрі, виходячи з необхідного значення коефіцієнта фільтрації.

$$L_{\Phi \text{ розр}} = \frac{10 \cdot k_{\Phi}}{p^2 \cdot C_{\Phi \text{ розр}}}; \quad (4.20)$$

де  $p$  – кількість імпульсів випрямленої напруги за один період змінної напруги мережі живлення; приймаємо  $p = 6$  імпульсів;

$k_{\Phi}$  – коефіцієнт фільтрації;  $k_{\Phi} = 5 \div 50$ , приймаємо максимальний для досягнення найбільшого ефекту  $k_{\Phi} = 50$ .

$$L_{\Phi \text{ розр}} = \frac{10 \cdot 50}{6^2 \cdot 122} = 0,114 \text{ Гн або } 11,4 \text{ мГн.}$$

Використовуючи отримані розрахункові значення  $L_{\Phi \text{ розр}}$  та  $C_{\Phi \text{ розр}}$ , необхідно вибрати конденсатор і дросель з урахуванням величини напруги і струму кола постійного струму:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{др}} &\geq L_{\Phi \text{ розр}} = 11,4 \text{ мГн,} \\ I_{\text{др}} &\geq I_{\text{дн}} = 347,9 \text{ А.} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{к}} &\geq C_{\Phi \text{ розр}} = 122 \text{ мкФ,} \\ U_{\text{к}} &\geq 1,2 \cdot U_{\text{дн}} = 1,2 \cdot 3966,9 = 4760,3 \text{ В.} \end{aligned} \right\}$$

Обираємо конденсатори типу КЭП2-5-200-2У1 з параметрами:  $U_{\text{к}} = 5 \text{ кВ}$ ;

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

$C_k = 144,4$  мкФ;  $Q_k = 200$  квар та дроселі типу RCH895 з параметрами:  
 $L_{др} = 12$  мГн;  $I_{др} = 350$  А.

Відмінною особливістю обраних нами складових захисного пристрою є те, що вони вітчизняного виробництва (ТОВ «Запорізький Енергомашзавод»).

#### 4.5 Розрахунок миттєвих значень струму для заданої частоти АІН

При використанні закону частотного керування повинна виконуватися умова:

$$\frac{U_2}{f_2} = const, \quad (4.21)$$

де  $U_2$  – напруга на виході перетворювача частоти, В;

$f_2$  – необхідне значення зниженої частоти, Гц.

$$f_2 = \frac{f_{2н}}{D}, \quad (4.22)$$

де  $D$  – необхідний діапазон регулювання швидкості; приймаємо  $D = 3$  [16].

$$f_2 = \frac{146,5}{3} = 48,8 \text{ Гц.}$$

Дійсне значення напруги на виході АІН залежить від її частоти і визначається:

$$U_2 = \frac{f_2 \cdot U_{нф}}{f_{2н}}, \quad (4.23)$$

де  $U_{нф}$  – номінальна фазна напруга асинхронного двигуна;  $U_{нф} = 1296,6$  В.

$$U_2 = \frac{48,8 \cdot 1296,6}{146,5} = 432,2 \text{ В.}$$

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потрібне значення напруги в ланці постійного струму, яке відповідає заданому значенню частоти:

$$U_{d2} = \frac{3}{\sqrt{2}} U_2; \quad (4.24)$$

$$U_{d2} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 432,2 = 916,8 \text{ В.}$$

Кут включення транзисторів керованого випрямляча при заданому значенні частоти отримаємо так:

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{U_{d2} + I_{dH} \cdot R_{ТП}}{U_{d0}}\right), \quad (4.25)$$

де  $R_{ТП}$  – еквівалентний опір транзисторного перетворювача, Ом;

$U_{d0}$  – напруга на виході випрямляча в некерованому режимі, В.

$$R_{ТП} = n \cdot R_{\text{тр}\phi(p)} + R_K, \quad (4.26)$$

де  $n$  – кількість послідовно включених вторинних обмоток трансформатора; для мостової схеми приймаємо  $n = 2$  [16];

$R_{\text{тр}\phi(p)}$  – активний опір обмотки трансформатора; приймаємо

$$R_{\text{тр}\phi(p)} = 0,102 \text{ Ом [14];}$$

$R_K$  – комутаційний опір, Ом.

$$R_K = \frac{p \cdot \Omega \cdot L_{\text{тр}\phi(p)}}{2 \cdot \pi}, \quad (4.27)$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $L_{\text{трф}}(p)$  – номінальна індуктивність фази; приймаємо  $L_{\text{трф}}(p) = 0,505$  мГн [14];

$\Omega$  – кутова частота напруги живлення мережі,  $\text{с}^{-1}$ .

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{2\text{H}}; \quad (4.28)$$

$$\Omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 146,5 = 920 \text{ с}^{-1};$$

$$R_{\text{к}} = \frac{6 \cdot 920 \cdot 0,505 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14} = 0,444 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{III}} = 2 \cdot 0,102 + 0,444 = 0,648 \text{ Ом}.$$

Напруга на виході випрямляча в некерованому режимі

$$U_{\text{d0}} = U_{\text{нф}} \cdot k_{\text{сх}}, \quad (4.29)$$

де  $k_{\text{сх}}$  – коефіцієнт схеми; для мостової схеми приймаємо  $k_{\text{сх}} = 2,34$  [16].

$$U_{\text{d0}} = 1296,6 \cdot 2,34 = 3034 \text{ В};$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{396,7 + 916,8 \cdot 0,648}{4375,8}\right) = 76,91^\circ \text{ або } 1,342 \text{ рад}.$$

Для заданої частоти АІН визначається активний та індуктивний опори фази асинхронного двигуна:

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

$$R_{e2} = R_1 + \frac{\left( X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{s_2}}{\left( X'_2 \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} + X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} \right)^2 + \left( \frac{R'_2}{s_2} \right)^2}, \quad (4.30)$$

де  $s_2$  – підвищене ковзання.

$$s_2 = 1 - \frac{1}{D}; \quad (4.31)$$

$$s_2 = 1 - \frac{1}{3} = 0,667;$$

$$R_{e2} = 4,56 + \frac{\left( 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} \right)^2 \cdot \frac{0,21}{0,667}}{\left( 1,32 \cdot \frac{48,8}{146,5} + 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} \right)^2 + \left( \frac{0,21}{0,667} \right)^2} = 4,84 \text{ Ом.}$$

$$X_{e2} = X_1 \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} + X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} - \frac{\left( X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} \right)^2 \cdot \left( X'_2 \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} + X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} \right)}{\left( X'_2 \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} + X_{\mu} \cdot \frac{f_2}{f_{2H}} \right)^2 + \left( \frac{R'_2}{s_H} \right)^2}; \quad (4.32)$$

$$X_{e2} = 1,03 \cdot \frac{48,8}{146,5} + 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} - \frac{\left( 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} \right)^2 \cdot \left( 1,32 \cdot \frac{48,8}{146,5} + 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} \right)}{\left( 1,32 \cdot \frac{48,8}{146,5} + 22,78 \cdot \frac{48,8}{146,5} \right)^2 + \left( \frac{0,21}{0,667} \right)^2} = 0,770 \text{ Ом.}$$

Кут зсуву між струмом асинхронного двигуна і вихідною напругою перетворювача частоти:

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

$$\phi_{e2} = \arctg \frac{X_{e2}}{R_{e2}}; \quad (4.33)$$

$$\phi_{e2} = \arctg \frac{0,770}{4,84} = 9,04^\circ \text{ або } 0,160 \text{ рад.}$$

Протягом одного півперіоду три рази змінюються схеми підключення фаз. Миттєве значення струму однієї фази протягом півперіоду складається з трьох відрізків експоненціальних функцій. Виконаємо розрахунок струму на прикладі фази А.

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}, \\ i_A = \frac{U_{d2}}{3 \cdot R_{e2}} \left( 1 - \frac{(1+a)(2-a)}{1+a^3} e^{-k\omega t} \right) \end{array} \right\} \quad (4.34)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}, \\ i_A = \frac{U_{d2}}{3 \cdot R_{e2}} \left( 2 - \frac{(1+a)^2}{1+a^3} e^{-k\omega t} \right) \end{array} \right\} \quad (4.35)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi, \\ i_A = \frac{U_{d2}}{3 \cdot R_{e2}} \left( 1 + \frac{(1+a)(1-2a)}{1+a^3} e^{-k\omega t} \right) \end{array} \right\} \quad (4.36)$$

де  $a$  – постійна складова навантаження інвертора;

$k$  – параметр, що характеризує навантаження інвертора.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

$$a = e^{-k \frac{\pi}{3}}; \quad (4.37)$$

$$k = \frac{R_{e2}}{X_{e2}}; \quad (4.38)$$

$$k = \frac{4,84}{0,77} = 6,286;$$

$$a = e^{-6,286 \cdot \frac{3,14}{3}} = 1,389 \cdot 10^{-3}.$$

$$0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3},$$

$$i_A = \frac{396,7}{3 \cdot 4,84} \left( 1 - \frac{(1 + 1,389 \cdot 10^{-3})(2 - 1,389 \cdot 10^{-3})}{1 + (1,389 \cdot 10^{-3})^3} e^{-6,286 \omega t} \right) = 27,34 - 54,68 e^{-6,28 \omega t}.$$

$$\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3},$$

$$i_A = \frac{396,7}{3 \cdot 4,84} \left( 2 - \frac{(1 + 1,389 \cdot 10^{-3})^2}{1 + (1,389 \cdot 10^{-3})^3} e^{-6,28 \omega t} \right) = 54,79 - 27,395 e^{-6,28 \omega t}.$$

$$\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi,$$

$$i_A = \frac{396,7}{3 \cdot 4,84} \left( 1 + \frac{(1 + 1,389 \cdot 10^{-3})(1 - 2 \cdot 1,389 \cdot 10^{-3})}{1 + (1,389 \cdot 10^{-3})^3} e^{-6,28 \omega t} \right) = 27,28 + 27,28 e^{-6,28 \omega t}.$$

На кожному інтервалі розрахунку  $\omega t$  відлік часу починаємо з нуля. Розрахунок виконуємо протягом періоду.

Результати розрахунку фазного струму  $i_A$  зведемо у табл. 4.1.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку миттєвих значень струму  $i_A$  однієї фази А в залежності від часу  $t$

$t, c$	$i_A, A$	$t, c$	$i_A, A$	$t, c$	$i_A, A$	$t, c$	$i_A, A$	$t, c$	$i_A, A$	$t, c$	$i_A, A$
0	-27,340	0,0033	27,395	0,0066	54,560	0,01	27,340	0,0133	-27,395	0,0166	-54,560
0,0002	10,702	0,0036	46,454	0,007	35,581	0,0102	-10,702	0,0136	-46,454	0,017	-35,581
0,0004	22,277	0,0038	52,254	0,0072	29,806	0,0104	-22,277	0,0138	-52,254	0,0172	-29,806
0,0006	25,800	0,004	54,018	0,0074	28,049	0,0106	-25,800	0,014	-54,018	0,0174	-28,049
0,0008	26,871	0,0042	54,555	0,0076	27,514	0,0108	-26,871	0,0142	-54,555	0,0176	-27,514
0,001	27,197	0,0044	54,719	0,0078	27,351	0,011	-27,197	0,0144	-54,719	0,0178	-27,351
0,0012	27,297	0,0046	54,768	0,008	27,302	0,0112	-27,297	0,0146	-54,768	0,018	-27,302
0,0014	27,327	0,0048	54,783	0,0082	27,287	0,0114	-27,327	0,0148	-54,783	0,0182	-27,287
0,0016	27,336	0,005	54,788	0,0084	27,282	0,0116	-27,336	0,015	-54,788	0,0184	-27,282
0,0018	27,339	0,0052	54,789	0,0086	27,281	0,0118	-27,339	0,0152	-54,789	0,0186	-27,281
0,002	27,340	0,0054	54,790	0,0088	27,280	0,012	-27,340	0,0154	-54,790	0,0188	-27,280
0,0022	27,340	0,0056	54,790	0,009	27,280	0,0122	-27,340	0,0156	-54,790	0,019	-27,280
0,0024	27,340	0,0058	54,790	0,0092	27,280	0,0124	-27,340	0,0158	-54,790	0,0192	-27,280
0,0026	27,340	0,006	54,790	0,0094	27,280	0,0126	-27,340	0,016	-54,790	0,0194	-27,280
0,0028	27,340	0,0062	54,790	0,0096	27,280	0,0128	-27,340	0,0162	-54,790	0,0196	-27,280
0,003	27,340	0,0064	54,790	0,0098	27,280	0,013	-27,340	0,0164	-54,790	0,0198	-27,280
0,0033	27,340	0,0066	54,790	0,01	27,280	0,0133	-27,340	0,0166	-54,790	0,02	-27,280

За результатами розрахунку будемо криву миттєвих значень струму з урахуванням кута навантаження  $\phi_{e2} = 2,97^\circ$  або  $0,0519$  рад;  $\omega = 2\pi f = 314$  с<sup>-1</sup> (рис. 4.5, лист 9).

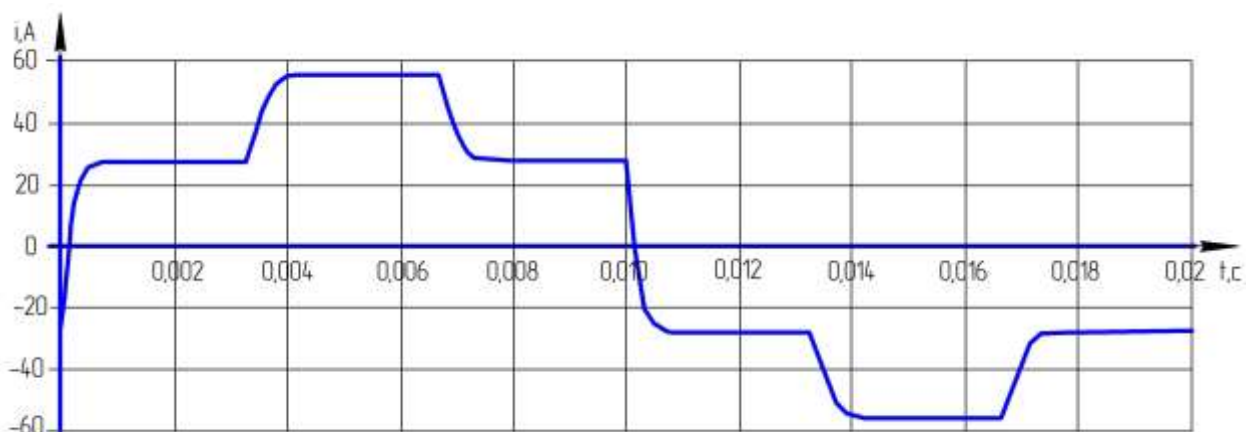


Рисунок 4.5 – Крива миттєвих значень струму фази А проектного інвертора

Отже, після проведених теоретичних досліджень можемо зробити висновки про доцільність розробки автономного інвертора напруги для живлення асинхронних двигунів типу АД-914, які ми пропонуємо до встановлення на проектний електровоз змінного струму.

Результати аналізу схеми роботи АІН та розрахунку його основних складових дають уявлення про можливість створення такого перетворювача на основі комплектуючих вітчизняного виробництва. Це значно спрощує впровадження передових технологій на ТРС та разом з цим підвищує ефективність застосування морально застарілих електровозів і покращує їх тягово-економічні характеристики.

В результаті розрахунку інвертора нами була розроблена математична модель миттєвих значень струму фази А та зображена крива миттєвих значень струму  $i_A$  в залежності від часу  $t$  (періоду).

#### **4.6 Заходи щодо зменшення перешкоджаючих впливів при застосуванні тиристорних перетворювачів на проектному електровозі**

Впроваджуючи та експлуатуючи на ЕРС тиристорні електронні пристрої, слід враховувати їх специфічні особливості: вплив на основні параметри тиристорів як температури, так і швидкостей наростання струмів і напруг, хибні перемикання, викликані перенапругами, перешкоди, які виникають при роботі тиристорів.

Оскільки для живлення АТД, які ми пропонуємо встановити на проектному електровозі, необхідно застосувати автономний інвертор напруги (АІН), то найдоцільніше взяти типовий – той, що застосовується на електровозі ДСЗ з цією метою. Однак слід врахувати дві особливості – відмінність уже існуючого обладнання та не дуже позитивний досвід експлуатації інвертора з точки зору створення перешкод. Якщо відмінність обладнання нівелюється розрахунком параметрів інвертора і застосування просто інших елементів, то до іншої проблеми слід підійти з усією серйозністю, оскільки за її вирішенням стоїть

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпека руху в цілому.

Під час роботи симетричних тиристорів у колах змінного струму виникають перешкоди з частотами до декількох мегагерц. Перешкоди можуть впливати на кола керування та елементи, розташовані поруч з тиристором. Тому необхідно вживати заходів для їх приглушення. Так, послідовно з тиристором необхідно включити індуктивну котушку  $L_{\phi}$  (рис. 4.6, лист 9), яка обмежує швидкість наростання струму, а паралельно до його кола підключити ємнісний фільтр для шунтування високочастотних сигналів.

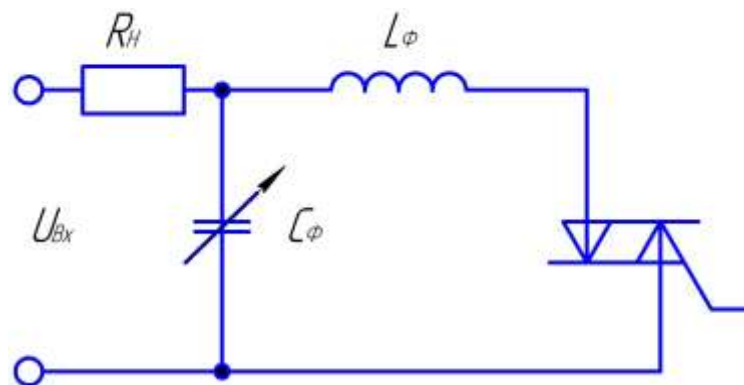


Рисунок 4.6 – Схема приглушення радіоперешкод симетричного тиристора

Для запобігання хибного вмикання тиристора через вплив наведень і перешкод кола керування слід відділити від основних, використовуючи екранування і заземлення, а також шунтуючи керуюче коло конденсаторами та резисторами. Також слід тиристорній пристрій захистити електростатичним екраном [3].

Принципова структурна силова схема секції проектного електровоза із застосуванням АІН, АТД та фільтром радіоперешкод зображена на рис. 4.7 та листі 9.

Так, створення нових тягових засобів (чи модернізація існуючих) у всьому світі зумовлене прагненням забезпечити раціональне, плавне та безконтактне регулювання швидкості руху електрорухомого складу, комплексну автоматизацію керування і економію електричної енергії.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

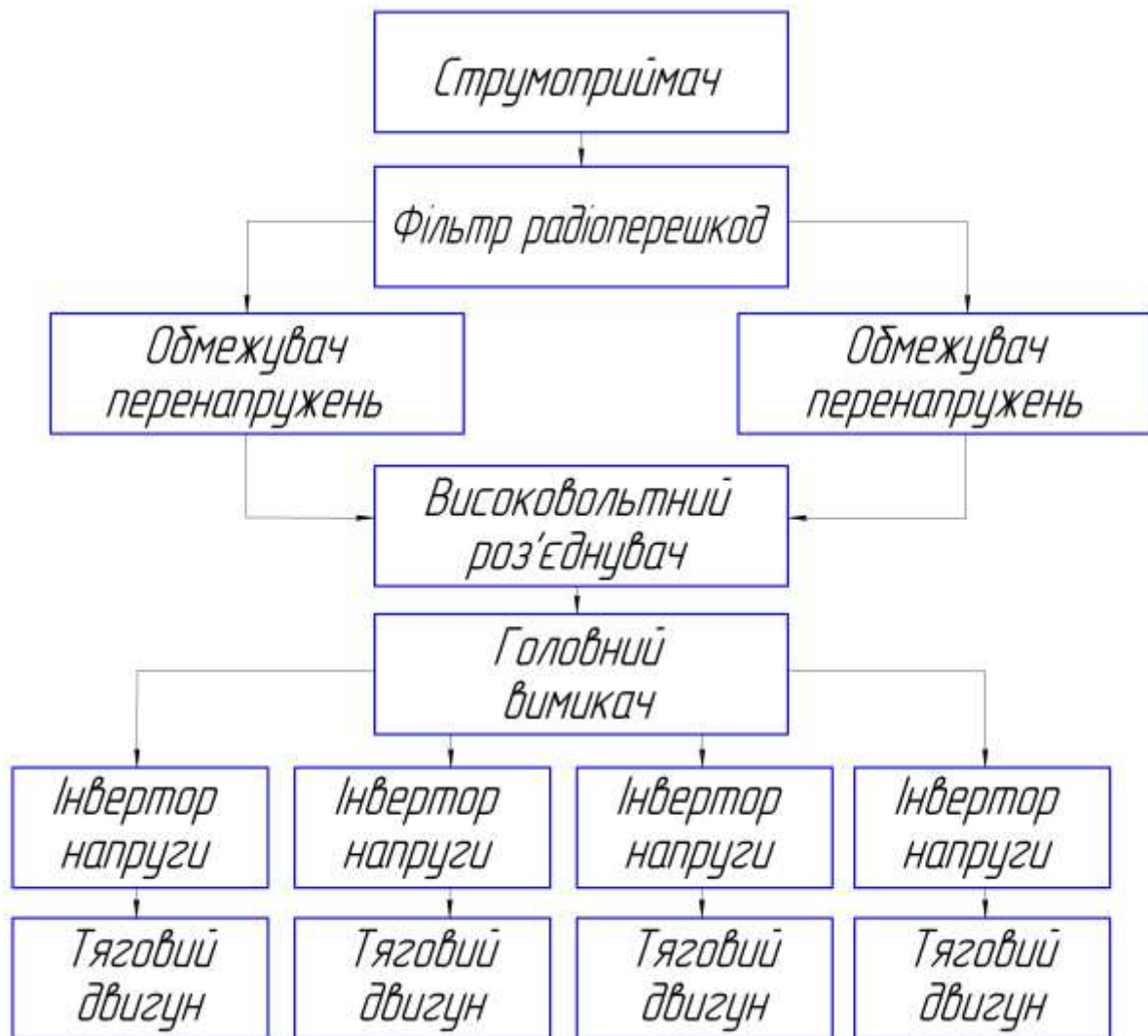


Рисунок 4.7 – Принципова структурна силова схема секції проектного електровоза

Цим вимогам в значній мірі задовольняє застосування тиристорного регулювання [4].

При експлуатації ЕРС нової концепції (електровоз ДС3), однак, виникають заважаючі впливи, які створюють ряд проблем, наприклад, в системах електропостачання, пристроях СЦБ і зв'язку. Ці обставини вимагають прийняти ряд рішень. Виникають нові напрямки досліджень впливу ЕРС на системи передачі інформації, мета яких – розробка заходів, які б зберегли усі технічні та економічні переваги тиристорного регулювання і при цьому виключили його вплив на інші пристрої.

Розглянемо проблему впливу перешкод на пристрої СЦБ і зв'язку, де вони найбільш небезпечні: за несприятливих обставин може бути виданий хибний сигнал про вільність колії і тим самим порушена безпека руху. Перешкоджаючий вплив спостерігався, правда, в меншій мірі ще й при локомотивах класичної концепції, тобто без тиристорного регулювання. Впровадження тиристорного регулювання на проектному електровозі значно підвищить рівень перешкоджаючих напруг.

Крім перешкод, які створюються обладнанням ЕРС, існує перешкоджаючий вплив, зумовлений іншими пристроями, які застосовуються на залізничному транспорті: мова йде про пристрої електричного опалення поїзда, статичних перетворювачах для централізованого електропостачання вагонів, електропневматичне гальмо та ін.

Безперебійна і надійна робота пристроїв СЦБ і зв'язку є основою забезпечення безпеки руху. Тому необхідно приділяти особливої уваги всьому, що може вплинути на надійне функціонування системи передачі інформації про вільність чи зайнятість ділянок. У першу чергу слід вивчити питання впливу на рейкові кола джерел перешкод і, перш за все, ЕРС з тиристорним регулюванням.

На роботу рейкових кіл впливають гармонійні складові основної частоти на ділянках змінного струму. Для теоретичного дослідження можна застосувати моделі, які відображають весь процес перешкоджаючих впливів і його розвиток.

Реалізація технічних заходів по боротьбі з перешкоджаючими впливами є кардинальною проблемою, оскільки від цього залежить реальна можливість використання технічних переваг і економічних показників з економії електроенергії ТРС з тиристорним регулюванням.

Перешкоджаючі сигнали, які виникають при експлуатації електровозів з імпульсним регулюванням і роботі інших джерел перешкод, впливають на апаратуру приймальних кінців рейкових кіл. Їх вплив може проявлятися в наступному:

- передача правильної інформації, що безпечно;
- передача хибної інформації «вільна ділянка» при зайнятій ділянці – це

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

небезпечно з точки зору безпеки руху;

– передача хибної інформації «зайнята ділянка» при вільній ділянці – безпечно з точки зору безпеки руху;

– пошкодження апаратури релейної частини рейкових кіл.

Щоб попередити передачу хибної інформації та пошкодження рейкових кіл окремих типів, необхідно для них визначити допустимі границі перешкоджаючих сигналів.

Перешкоджаючий сигнал характеризують амплітудою напруги у визначеному діапазоні частот. Залежність допустимих амплітуд для окремих рейкових кіл від частоти являє собою ступінчасту лінію з мінімумом в зоні робочої частоти.

Для визначення за ступінчастою характеристикою допустимого рівня перешкоди приймається до уваги єдина частота. У випадку, коли необхідно враховувати декілька перешкоджаючих сигналів на різних частотах, допускаються менші амплітуди.

Відношення  $A_{\text{пр}}^a / A_{\text{зав}}(f_0)$  характеризує необхідне відхилення обох сигналів; воно повинне задовольняти вимогу

$$\frac{A_{\text{пр}}^a}{A_{\text{зав}}(f_0)} > \frac{A_{\text{р}}^a}{A^{ab}}, \quad (4.39)$$

де  $A_{\text{пр}}^a$  – амплітуда сигналу спрацьовування приймача на робочій частоті;

$A_{\text{зав}}(f_0)$  – амплітуда допустимого перешкоджаючого сигналу на робочій частоті;

$A^{ab}$  – амплітуда сигналу для відключення приймача на робочій частоті.

Це значить, що  $A_{\text{зав}}(f_0) < A^{ab}$ .

У випадку, коли  $A_{\text{зав}} = A^{ab}$  якір реле повинен залишатися притягнутим. Для

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

певного значення  $A_{зав}(f_0)$  слід враховувати надлишкову напругу в рейкових колах при погіршеному електричному опорі поїзда та перешкоджаючий сигнал. Тому повинна виконуватися умова

$$A^a - A_{зав}(f_0) > A^{ab}, \quad (4.40)$$

де  $A^a$  – амплітуда робочого сигналу приймача на робочій частоті.

З економічної та технічної точки зору заходи на ЕРС є найвигіднішими, оскільки з урахуванням існуючих рейкових кіл вони дозволяють уже на стадії проектування ЕРС приймати такі рішення, при яких в експлуатації частоти перешкоджаючих напруг, які виникають при імпульсному регулюванні, не потрапляють в діапазони частот рейкових кіл.

На електрифікованих лініях змінного струму (напруга 25 кВ, частота 50 Гц) рейкові кола працюють на частотах, які не узгоджуються ні з основною частотою струму мережі, ні з його гармонійними складовими. Застосовуються в основному рейкові кола з робочими частотами 25, 75 та 275 Гц. Як наслідок, вплив на ці кола теоретично неможливий. Практично, однак, в деяких випадках він може проявлятися в рейкових колах, що підтверджено експлуатацією електровоза ДСЗ. Тому слід враховувати максимально можливі рівні гармонійних складових на частотах, найближчих до частоти робочого сигналу. Найскладніше справа полягає з частотою 100 Гц, яка при підвищеному рівні може вплинути на правильну дію рейкових колій, які працюють на частоті 75 Гц. Тому необхідно забезпечувати достатню симетрію тиристорних мостів. Як відмічалось, порушення симетрії викликає підвищений вміст парних гармонік. Він збільшується пропорційно зростаючій несиметрії мосту, яка виражається в мірі різниці кутів відкриття тиристорів.

Частоти керування імпульсного перетворювача обираємо таким чином, що вони не узгоджуються з частотами рейкових кіл. В експлуатації виникає небезпека виникнення перешкоджаючого впливу при зміщенні робочої частоти на

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

границю встановлених діапазонів в результаті частотної нестабільності перетворювачів, які живлять рейкові кола, особливо у однопиткових кіл 50 Гц.

Кожний діапазон включає в себе, крім визначеного інтервалу частот живильного перетворювача, також захисну зону 4 Гц з обох боків. Це необхідно для того, щоб виключити дзвінкову роботу реле при малій різниці між сигнальною частотою рейкових кіл і частотою, обумовленою тиристорним регулюванням на ЕРС. В цих захисних зонах зазвичай допускається велика напруга перешкод між рейками 0,05 В у власному діапазоні частот: від 68 до 86 Гц. У інтервалі 64-68 Гц допускається п'ятикратний рівень, тобто 0,25 В. Інші діапазони не мають точно встановлених захисних зон.

На основі досвіду експлуатації ЕРС з тиристорним регулюванням можна прийняти значення  $A_{\text{пр}}^a / A_{\text{зав}}(f_0)$  для різних рейкових кіл, що відображено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення  $A_{\text{пр}}^a / A_{\text{зав}}(f_0)$  для різних рейкових кіл

Тип рейкового кола	Значення $A_{\text{пр}}^a / A_{\text{зав}}(f_0)$ при частоті, Гц		
	50	75	275
Однопиткове	-	10	30,6
Двониткове	10	6,4	31
АЛСН	10	10	-

Крім описаних вище способів забезпечення надійної роботи СЦБ і зв'язку слід враховувати й інші, наприклад, застосування лічильників осей, точкову передачу інформації чи передачу інформації за допомогою колійного шлейфу.

При експлуатації класичних електровозів (до яких відноситься і ВЛ80<sup>Р</sup>) помилки в передачі інформації виникають в більшій мірі внаслідок порушення контакту між струмоприймачем і контактним дротом, або між колесом і рейкою, інколи при швидкій зміні тягового струму.

Тиристорне регулювання приводить до підвищення рівня перешкод і, тим самим, зростання середньої частоти помилок.

Розглядаючи заходи по боротьбі із перешкоджаючими впливами, зумовленими тиристорним регулюванням, можна визнати, що найдоцільніше здійснювати захисні заходи безпосередньо на тяговому рухомому складі. Обґрунтований вибір частот керування імпульсного перетворювача сприяє тому, що у більшості випадків відпадає необхідність у здійсненні яких-небудь наступних заходів по боротьбі з перешкоджаючими впливами [19].

Впроваджуючи на проектному електровозі АТД і, як наслідок, імпульсне регулювання, необхідно гарантувати обмеження перешкоджаючих впливів, тобто, бути впевненими в тому, що ні в яких випадках не відбудеться хибного спрацювання пристроїв СЦБ і зв'язку. Це значить, що економія електроенергії, яка досягається при експлуатації локомотива з імпульсним регулюванням, повинна прийматися до розрахунку з урахуванням не лише витрат на їх розробку і проектування, але і витрат на створення ефективних заходів по боротьбі з перешкоджаючими впливами.

По відношенню до ЕРС можна виділити наступні рекомендації:

- на лініях, електрифікованих на змінному струмі, застосовувати частотно-фазне регулювання;
- встановлювати відповідні фільтри для приглушення перешкоджаючих гармонійних складових;
- застосовувати обладнання, яке забезпечує автоматичне відключення тягових двигунів при струмі перешкод, що перевищує встановлену межу;
- забезпечити необхідне екранування з метою обмеження високочастотних перешкод.

#### **4.7 Фазно-частотне регулювання АТД**

Управління асинхронним електродвигуном в частотному режимі до недавнього часу було великою проблемою, хоча теорія частотного регулювання була розроблена ще в тридцятих роках. Розвиток частотно-регульованого

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

електроприводу стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Поява силових схем з IGBT-транзисторами, розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем управління дозволила різним фірмам Європи, США і Японії створити сучасні перетворювачі частоти доступної вартості.

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

Застосування перших чотирьох пристроїв не забезпечує високої якості регулювання швидкості, неекономічне, вимагає великих витрат при монтажі та експлуатації.

Статичні перетворювачі частоти є найбільш досконалими пристроями управління асинхронним приводом в даний час.

Принцип частотного методу регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту  $f_1$  напруги живлення та при незмінному числі пар полюсів  $p$ , можна змінювати кутову швидкість магнітного поля статора відповідно до виразу

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}. \quad (4.41)$$

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

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

Для отримання високих енергетичних показників асинхронного двигуна – коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності – необхідно одночасно з частотою змінювати і напругу, що підводиться (рис. 4.8).

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

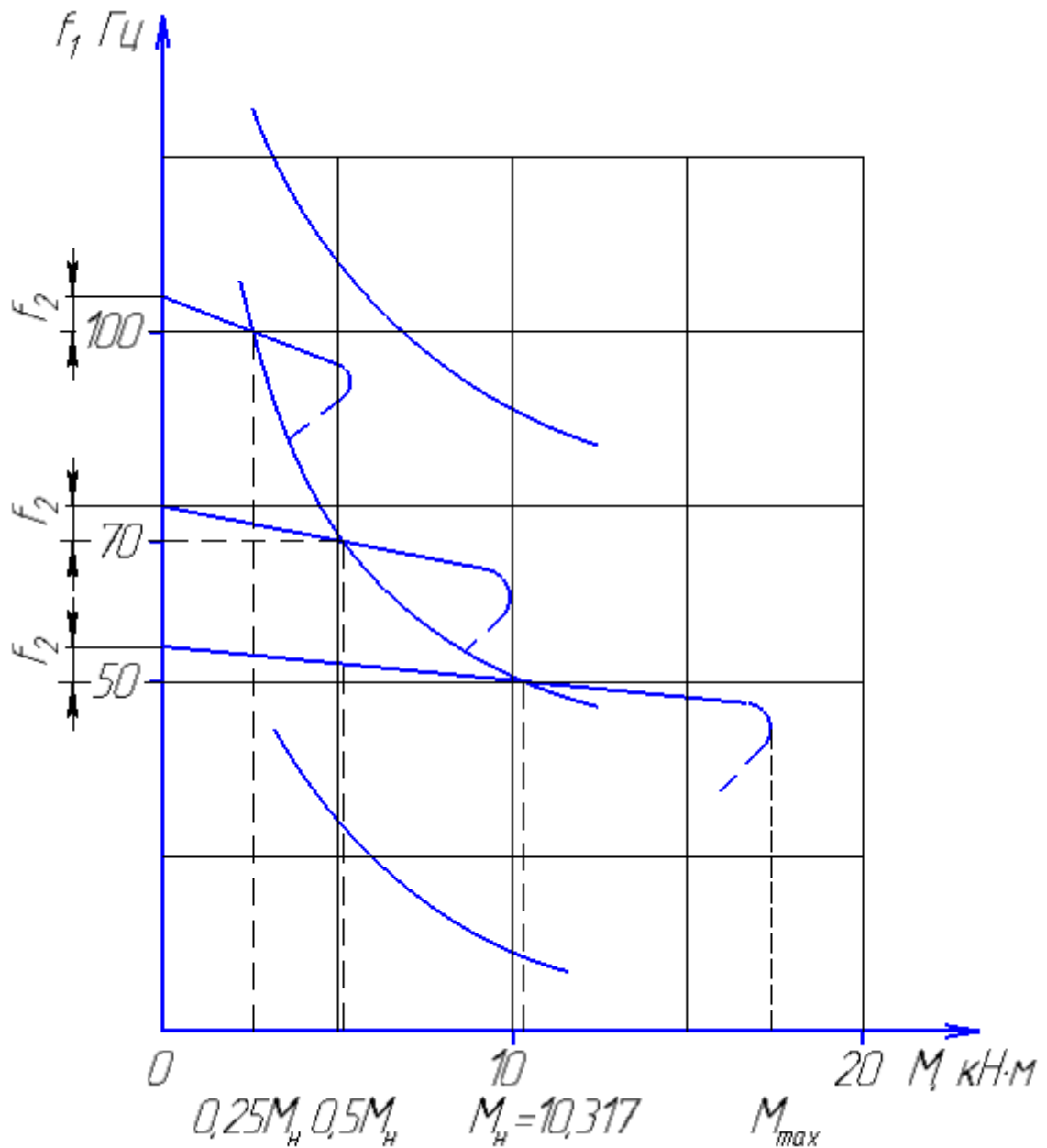


Рисунок 4.8 Залежність моменту від частоти

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

$$\frac{U_1}{f_1} = const. \quad (4.42)$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для вентиляторного характеру моменту навантаження це стан має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (4.43)$$

При моменті навантаження, назад пропорційному швидкості:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const. \quad (4.44)$$

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

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

Кожен з мережевих роз'єднувачів з'єднаний перемичками з блоком попередньої зарядки. Блок попередньої зарядки складається з контактора попередньої зарядки і опору. При запуску перетворювача через нього заряджається конденсатор проміжного контуру перетворювача перш, ніж буде замкнений мережевий роз'єднувач. Таким чином запобігає великий кидок пускового струму, який виник би при включенні вхідної напруги на розряджені конденсатори. Мережевий роз'єднувач включається, коли напруга проміжного контуру досягне 95% теоретичного значення зарядки.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

Випрямляч 4QS складається з двох паралельно включених фазних модулів. Фазний модуль містить силові напівпровідникові прилади (IGBT-транзистори), а також шунтуючі (захисні) діоди і розвантажувальні елементи. IGBT-транзистор виконує функцію потужного вимикача, що дозволяє виконувати комутаційні операції з великою частотою. Розвантажувальні елементи служать для зменшення потужності втрат, які виникають в IGBT-транзисторах при кожному процесі включення і виключення.

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

Напруга проміжного контуру вища, ніж амплітудне значення напруги вторинної обмотки трансформатора. Таким чином, чотириквadrантний випрямляч працює як підвищувальний випрямляч. Роль дроселя виконує індуктивність розсіювання головного трансформатора. Тому відносна напруга короткого замикання трансформатора ( $u_k$ ) має бути порівняно високою.

Випрямляч 4QS працює таким чином, що вторинна обмотка трансформатора по черзі закорочується і підключається до проміжного контуру. При цьому виникає пульсація струму з піковими значеннями струму. За рахунок високої індуктивності розсіювання трансформатора пульсація струму згладжується і, тим самим, зменшуються пікові значення струму. Пульсації струму також

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

передаються і на первинну сторону трансформатора. Внаслідок цього виникають пульсації в контактних проводах і рейкових колах.

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

Тяговий перетворювач мінімізує паразитні струми додатково тим, що всі чотириквADRантні випрямлячі електровоза тактуються зі зміщенням.

Проміжний контур (ланка постійної напруги) з'єднує вхідні випрямлячі з вихідними інверторами. Напруга проміжного контуру постійна та підтримується конденсатором проміжного контуру. За допомогою постійного струму, який протікає в проміжному контурі, здійснюється переміщення потоку енергії між входом і виходом тягового перетворювача. Потік енергії може бути спрямований як від входу до виходу (режим тяги), так і в зворотному напрямку (режим рекуперації).

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

Відсмоктувальний контур складається з конденсатора відсмоктувального контуру, який вбудований в шафу тягового перетворювача, і дроселя відсмоктувального контуру, який вбудований в тяговий трансформатор електровоза.

Імпульсний інвертор виробляє з напруги проміжного контуру трифазну систему напруг. На виході тягового перетворювача знаходяться два вихідних інвертора, до кожного з яких підключений тяговий двигун. За допомогою імпульсного інвертора можна регулювати вихідну напругу і частоту. Таким

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чином, імпульсний інвертор являє собою регульоване джерело напруги.

Імпульсний інвертор складається з трьох фазових модулів аналогічних фазовим модулів чотириквadrантного випрямляча. IGBT-транзистори фазних модулів імпульсного інвертора, виконуючи функцію потужного високочастотного перемикача, дозволяють три вихідні клеми  $U$ ,  $V$  і  $W$  з'єднувати з «+» чи з «-» проміжного контуру за законом, який визначається системою управління. У тяговому режимі ці перемикання виконуються із заданою регульованою частотою і фазою таким чином, що на вихідних клеммах тягового перетворювача встановлюється трифазна синусоїдальна характеристика струму. Максимально можлива амплітуда вихідної напруги залежить від величини напруги проміжного контуру.

Так як зсув по фазі і частота напруги доволіно регульовані, то для тягового двигуна можливий режим рекуперації (двигун працює в режимі генератора). Інвертор віддає енергію в проміжний контур, яка передається через чотириквadrантний випрямляч назад в контактну мережу.

Напруга на виході імпульсного інвертора не є синусоїдальною, а містить вищі гармоніки. Хоча струм і згладжується індуктивністю розсіювання тягового двигуна, в ньому все-таки присутні вищі гармоніки, які викликають коливальні моменти і втрати в тяговому двигуні. За рахунок високої тактової частоти перемикань інвертора пульсація струму мінімізується.

У тяговий перетворювач вбудовані пристрій керування електроприводом, який управляє роботою чотириквadrантного випрямляча та імпульсного інвертора, а так само забезпечує функції захисту від юза і буксування, і центральний пристрій управління, який забезпечує управління електровозом.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **5 ЗАСТОСУВАННЯ НОВІТНЬОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ТЯГОВИХ І ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

### **5.1 Технічне обґрунтування застосування асинхронних тягових двигунів типу АД-914 на проектному електровозі**

В якості тягових двигунів на рухомому складі застосовуються колекторні машини постійного чи пульсуючого струму. Такі тягові електродвигуни (ТЕД) володіють певними позитивними якостями. Одночасно вони мають і ряд серйозних недоліків. Ці недоліки полягають у відносно невисокій надійності колекторного вузла та щіткового апарату; обмеженій за умовами комутації і механічній міцності потужності у відведених габаритах; високих витратах на технічне обслуговування в умовах експлуатації та ремонт; підвищеній масі двигуна при порівняно низьких значеннях обертового моменту, що обмежує використання опорно-осьового підвішування ТЕД в умовах жорсткої колії; підвищених витратах кольорового металу та активних матеріалів; порівняно невисокій реалізації зчіпної ваги локомотива [8].

Усунення вказаних недоліків, зняття обмеження по потужності, забезпечення гранично високого використання зчеплення колеса з рейкою можуть бути досягнуті переходом на безколекторні, зокрема асинхронні, тягові двигуни (АТД).

Порівняльний аналіз колекторних і асинхронних ТЕД для діапазону потужностей від 100 до 1500 кВт, виконаний фірмою ВВС (Швейцарія), за рядом показників дозволив виявити наступне:

- тангенціальна сила, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для АТД у 1,5-2 рази більша, ніж для колекторних ТЕД, і досягає 5 Н/см<sup>2</sup>;
- потужність, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для АТД у 2 рази більша та досягає 0,25-0,3 кВт/см<sup>2</sup>;
- лінійна швидкість ротора АТД може досягати 80-90 м/с, що перевищує

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

допустимі значення лінійної швидкості для колекторних машин;

– при збереженні частоти обертання ротора АТД на рівні частоти обертання якоря колекторного двигуна можливе збільшення моменту АТД приблизно на 50%;

– по питомій потужності АТД в 2-2,5 рази переважає колекторні ТЕД, а їх ККД на 1,5-2% вищий ККД колекторних.

Ці показники добре узгоджуються з даними, наведеними в табл. 5.1 для колекторного ТЕД типу НБ-418К6, який застосовується на серійному електровозі ВЛ80<sup>Р</sup>, та АТД типу АД-914, який застосовується на електровозі ДС3.

Таблиця 5.1 – Порівняльні характеристики тягових електродвигунів

Тип двигуна	Позначення	Потужність, кВт	Повна маса, кг	Маса міді, кг	Питома маса, кг/кВт
колекторний	НБ-418К6	790	4350	586	5,52
асинхронний	АД-914	1200	2380	381	1,98

Технічна характеристика тягового двигуна АД-914 наведена у табл. 5.2 та на листі 8 при живленні його від синусоїдальної напруги.

Таблиця 5.2 – Технічна характеристика тягового двигуна АД-914 при живленні його від синусоїдальної напруги

Параметр	Величина в залежності від режиму роботи двигуна		
	пуск	тривалий	максимальна швидкість
1	2	3	4
Потужність на валу, кВт	1200	1200	1200
Напруга лінійна, В	1645	1870	1870

Продовження табл. 5.2

1	2	3	4
---	---	---	---

Сила струму, А	490	450	415
Момент обертаючий, Н·м	11900	10360	3960
Частота обертів, хв <sup>-1</sup>	945	1105	2900
Частота напруги, Гц	48,0	56,0	146,8
ККД, %	94,5	95,5	95,1
Коефіцієнт потужності, в.о.	0,88	0,88	0,92
Вентиляція	незалежна		
Витрати охолоджуючого повітря, м <sup>3</sup> /с	1,12		

Порівняння техніко-економічних параметрів електродвигуна АД-914 з кращими світовими зразками наведено у табл. 5.3 та на листі 8.

Таблиця 5.3 – Порівняння техніко-економічних параметрів асинхронних двигунів різного виробництва

Параметр	Величина			
	АД-914	НТА-1200	BQG-484	4FA-3858
Тип електродвигуна	Україна	Росія	Німеччина	Італія
Потужність $P_2$ , кВт	1200	1200	1400	1100
Напруга лінійна $U_{л}$ , В	1870	1870	2125	1090
Струм фазовий $I$ , А	450	500	460	780
Момент обертаючий, Н·м	10360	8800	7540	7500
ККД, %	95,5	95,1	94,7	93,0
Частота обертань $N$ , хв <sup>-1</sup> (ном./макс.)	1105/2900	1305/2600	1780/4225	1407/4000
Маса $G$ , кг	2380	2600	2380	2200
Показник використання маси $m = G / M$ , кг/Н·м	0,229	0,295	0,294	0,273
Витрати повітря $Q$ , м <sup>3</sup> /с	1,12	1,5	1,5	1,25

Із табл. 5.3 видно, що питомий показник використання маси електродвигуна АД-914 при вищому ККД та меншим витратам повітря майже на 30% нижчий, ніж

у електродвигуні НТА-1200 розробки ВАТ ВЕЛНІІ.

Важливим показником ефективності впровадження асинхронного тягового приводу є зниження витрат на утримання електровоза в умовах експлуатації [9].

Великий практичний інтерес являє собою питання використання зчіпної ваги локомотива та підвищення його тягових властивостей. За даними фірми ВВС електровоз Е-1200 (з асинхронними ТЕД) при рушанні поїзда з місця реалізовував силу тяги 355 кН на 27% більше, ніж електровоз ЕА-1000 (з колекторними ТЕД). Це положення також переконливо підтверджується даними по витраті піску. У процесі експлуатації електровоз ЕА-1000 витрачав 504 кг/10<sup>6</sup> т-км піску, а електровоз Е-1200 – лише 176 кг/10<sup>6</sup> т-км

Багато суперечливих суджень висловлювалось про розподіл навантажень між паралельно працюючими АТД при розбіжності діаметрів бандажів колісних пар. Випробування електровозів ВЛ80<sup>а</sup>-338 та ВЛ800<sup>а</sup>-751 показали, що при допустимій у експлуатації різниці в діаметрах коліс 10 мм розбіжність у навантаженнях не перевищує 8-10%, а при різниці 5-6 мм у діапазоні номінальних навантажень – 4-6%. Цей показник не гірший відповідного показника серійних електровозів з колекторними ТЕД.

Підвищення надійності АТД завдяки усуненню колекторно-щіткового вузла повністю визначається самою конструкцією асинхронної машини. Як відомо, АТД з коротко замкнутим ротором має лише одну обмотку статора, виконану з ізоляцією. Тому АТД не потребує періодичних оглядів кваліфікованими слюсарями-мотористами. Його обслуговування зводиться лише до запресування змащення у підшипниках.

При застосуванні в електричній тязі асинхронного тягового приводу можуть бути реалізовані наступні переваги:

- 1) значне спрощення тягового двигуна у порівнянні з колекторним і підвищення його надійності (відпадає необхідність щоденного огляду колекторно-щіткового вузла);
- 2) підвищення надійності кузовного електричного обладнання внаслідок застосування безконтактних пристроїв перетворення потужності;
- 3) поліпшення тягових властивостей електровозів завдяки використанню

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

жорсткої тягової характеристики при буксуванні. Є дослідні результати, які показують можливість збільшення коефіцієнту зчеплення на 20-40% [8];

4) збільшення потужності та моменту тягового електродвигуна при тих же габаритних розмірах (відсутні колектор, обмотки додаткових полюсів і компенсаційна);

5) можливість повної автоматизації режиму ведення поїзда;

6) підвищення продуктивності ЕРС внаслідок реалізації переваг по пп. 3-5;

7) скорочення витрати міді на виготовлення тягових двигунів. За результатами проектування останніх зразків колекторних тягових двигунів пульсуючого струму та асинхронних тягових двигунів витрата міді на виготовлення останніх знижується у 2-2,5 рази [10].

В основі роботи АТД лежить взаємодія магнітного поля, яке наводиться у обмотці ротора, з обертовим магнітним полем, яке отримується у результаті живлення трифазної обмотки статора трифазною напругою. Відомо, що у порівнянні з машиною постійного струму асинхронний двигун має деякі переваги, такі як більша потужність завдяки більшій довжині активної частини ротора, автоматичний перехід у режим гальмування при перевищенні ротором частоти обертання магнітного поля. Він також надійніший і менше вимогливий у експлуатації.

Однак значною проблемою, яка обмежує застосування АТД на вітчизняному рухомому складі, до сьогоднішнього дня залишається складність живлення: для роботи необхідна трифазна змінна напруга. Іншою суттєвою проблемою є важкість регулювання його частоти обертання. Єдиним оптимальним способом є регулювання частоти живлячої напруги. Однак для збереження перевантажувальної здатності двигуна необхідно разом з частотою змінювати і діюче значення напруги так, щоб виконувалась умова  $U_1 / f_1 = U'_1 / f'_1$ , при виконанні якої виходить сімейство характеристик [11].

Таким чином необхідно мати можливість живлення двигуна трифазною напругою регульованої величини та частоти. Для цього існує статичний перетворювач. Живлення кожного АТД на проектному електровозі пропонуємо

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94



перетворюється автономним трифазним дворівневим (доточковим) інвертором напруги та подається до обмотки статора АТД. При роботі на ділянках постійного струму перетворювач 4QS не функціонує, а інвертор напруги підключається до контактної мережі.

Слід зауважити, що живлення проектного електровоза і від мережі постійного струму розглянуте в даній роботі як варіант подальшої модернізації наявного рухомого складу.

Тяговий перетворювач дозволяє виконувати і електродинамічне гальмування. Для переведення АТД у режим рекуперативного гальмування необхідно зменшити частоту обертання магнітного поля статора шляхом зменшення частоти живлячої напруги. В результаті машина перейде в режим генератора, створюючи гальмівний момент. Вироблена змінна напруга при цьому випрямляється у вузлі інвертора, який працює в режимі випрямляча.

При роботі на ділянках постійного струму струм рекуперації надходитиме безпосередньо в контактну мережу. На ділянках змінного струму він попередньо перетворюватиметься у змінний перетворювачем 4QS, працюючим в режимі інвертора.

Якщо у фідерній зоні немає споживача, здатного повністю поглинати всю вироблену електроенергію, збільшується напруга в контактній мережі. У цьому випадку відбувається перехід на замісне реостатне гальмування, для чого в роботу вступає імпульсний гальмівний регулятор, який підключає паралельно ланці постійної напруги гальмівний резистор.

Відмінною особливістю такого способу є можливість оперативної зміни величини струму реостатного контуру при зміні струму рекуперації. В результаті струм двигуна (а значить, і гальмівна сила) підтримується на заданому рівні. Так функціонує «слідкуюча» схема рекуперативно-реостатного гальмування. Алгоритм роботи у кожному конкретному випадку задається системою керування тяговим перетворювачем. Гальмівні резистори – штатні для електровоза ВЛ80Р.

Відмітимо можливість суттєвої зміни ємності фільтрового конденсатора при роботі декількох інверторів з однаковою вихідною частотою. При кількості

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

інверторів  $N$  і у випадку, якщо кожен з них має індивідуальний фільтровий конденсатор, загальна ємність складе  $NC$ . Значного зменшення ємності можна отримати, якщо інвертори об'єднати по входу та здійснювати комутації інверторів по чергово із зсувом у часі на  $T_K / N$ . Струм  $I$  залишиться тим же, а частота комутацій збільшиться в  $N$  раз. У порівнянні з індивідуальними для кожного інвертора фільтрами (із загальною ємністю  $NC$ ) при застосуванні по чергової комутації і спільного фільтра ємність фільтрового конденсатора зменшиться в  $N^2$  раз. Слід, однак, мати на увазі, що зі збільшенням частоти пульсацій допустиме значення напруги  $U_c$  для конденсаторів у певній мірі знижується.

Реалізація режиму по чергової комутації декількох інверторів, які мають спільний фільтр, є ефективним рішенням [12]. Пропонуємо на електровозі ВЛ80<sup>Р</sup> кожну пару інверторів, які живлять два двигуни одного візка, оснастити спільним фільтром і ці два інвертори комутуватимуть по чергово через 30°. Таке рішення дозволить зменшити ємність фільтрового конденсатора в 4 рази.

## 5.2 Розрахунок тягових і швидкісних характеристик проектного електровоза з асинхронним приводом для швидкісного руху

При застосуванні нового електрообладнання на проектному електровозі змінюються його тягові та швидкісні характеристики. Для обґрунтування доцільності впровадження запропонованого нами електрообладнання ми пропонуємо дослідити динаміку вказаних змін.

Приведемо параметри обраного нами тягового двигуна АД-914 до обода колеса електровоза.

Номінальний момент асинхронного двигуна  $M_H$  визначається виходячи з потужності  $P_H$  і частоти обертання ротора  $n_H$  в тривалому режимі роботи АТД, які вибираємо з урахуванням даних обраного АТД типу АД-914.

$$M_H = 9,5 \cdot \frac{P_H}{n_H}, \quad (5.1)$$

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $P_H$  – номінальна потужність тягового двигуна;  $P_H = 1200$  кВт;

$n_H$  – частота обертання ротора в тривалому режимі роботи АТД;  $n_H = 1105$  хв<sup>-1</sup>.

$$M_H = 9,5 \cdot \frac{1200}{1105} = 10,317 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Оскільки ми пропонуємо застосувати візки з електровоза ДСЗ для покращення динамічних властивостей ЕРС, то і параметри тягового редуктора залишимо без змін. Зокрема передаточне число

$$\mu = \frac{z_2}{z_1}, \quad (5.2)$$

де  $z_1$  – кількість зубців ведучої шестерні;  $z_1 = 19$  шт.;

$z_2$  – кількість зубців веденої шестерні (зубчастого колеса);  $z_2 = 78$  шт.

$$\mu = \frac{78}{19} = 4,105.$$

Передаточне число із умови забезпечення заданої швидкості  $V_p$  на розрахунковому підйомі

$$\mu = \frac{F_{\text{дв н}} \cdot D_K}{2M_H}, \quad (5.3)$$

де  $F_{\text{дв н}}$  – тривала сила тяги одного КМБ, кН;

$D_K$  – діаметр рушійних коліс електровоза за колом кочення, м; приймаємо колеса з новими бандажами, тобто  $D_K = 1250$  мм;

$M_H$  – момент обертання ротора АТД в тривалому режимі, кН·м.

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідси можна знайти дотичну силу тяги одного КМБ

$$F_{\text{дв н}} = \frac{2M_{\text{н}} \cdot \mu}{D_{\text{к}}}; \quad (5.4)$$

$$F_{\text{дв н}} = \frac{2 \cdot 10317 \cdot 4,105}{1250} = 67,8 \text{ кН.}$$

Тривала (розрахункова) дотична сила тяги електровоза

$$F_{\text{др}} = F_{\text{дв н}} \cdot \kappa, \quad (5.5)$$

де  $\kappa$  – кількість рушійних осей електровоза; приймаємо  $\kappa = 8$  осей.

$$F_{\text{др}} = 67,8 \cdot 8 = 542,4 \text{ кН.}$$

Передаточне число розраховується також із умови, що при конструкційній швидкості руху (максимальній частоті обертання коліс) електровоза частота обертів ротора тягового двигуна не перевищує допустиму, вказаному в технічному паспорті АТД заводом-виробником.

$$\mu = \frac{n_{\text{дв max}}}{n_{\text{к}}}, \quad (5.6)$$

де  $n_{\text{дв max}}$  – максимально допустима частота обертання ротора АТД; для

АД-914 приймаємо  $n_{\text{дв max}} = 2900 \text{ хв}^{-1}$ ;

$n_{\text{к}}$  – максимальна частота обертання коліс електровоза,  $\text{хв}^{-1}$ ;

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{\text{к}} = \frac{2900}{4,105} = 706,4 \text{ хв}^{-1}.$$

Для проектного електровоза з асинхронним приводом можна знайти конструкційну швидкість з виразу

$$n_{\text{к}} = \frac{1000 \cdot V_{\text{к}}}{60 \cdot \pi \cdot D_{\text{к}}}; \quad (5.7)$$

$$V_{\text{к}} = \frac{60 \cdot 3,14 \cdot 1,250 \cdot 706,4}{1000} = 166,3 \text{ км/год.}$$

Оскільки локомотивами швидкісного руху вважаються такі, конструкційна швидкість яких 160 км/год і більше, то можемо зробити висновок, що електрообладнання, яке ми пропонуємо встановити на проектний електровоз, покращить швидкісні характеристики локомотива та розширить його експлуатаційні можливості.

Розрахункову швидкість проектного електровоза можна знайти зі співвідношення

$$V_{\text{р}} = \frac{n_{\text{н}} \cdot V_{\text{к}}}{n_{\text{дв max}}}; \quad (5.8)$$

$$V_{\text{р}} = \frac{1105 \cdot 166,3}{2900} = 63,4 \text{ км/год.}$$

Розглянемо можливість збільшення середньої маси поїзда при застосуванні асинхронних двигунів на проектному електровозі.

Для розрахунків приймемо чотиривісні вагони вагою 86 т з роликowymi підшипниками. Масу вантажного складу визначаємо, виходячи з повного використання тягових якостей локомотива.

Визначимо розрахункову масу поїзда на ділянках з рівнинним ( $\leq 6\%$ ) та

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гірським (> 6‰) профілем колії.

Усі необхідні дані для розрахунку приймаємо згідно з ПТР та зводимо у табл. 5.4 та зображуємо на листі 10 [13].

Таблиця 5.4 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Величина за серією локомотива	
	ВЛ80Р	проектний
Сила тяги при зрушенні складу з місця $F_{\text{дзруш}}$ , Н	677675	680000
Розрахункова сила тяги $F_{\text{др}}$ , Н	502272	542400
Розрахункова маса $P$ , т	192	192
Розрахункова швидкість $V_p$ , км/год	43,5	63,4
Конструкційна швидкість $V_k$ , км/год	110	166,3
Передаточне число $\mu$	4,19	4,105

При розрахунку маси складу величини основного питомого опору локомотива та складу  $\omega'_0$  і  $\omega''_0$  визначаємо для розрахункової швидкості локомотива. Питомі сили відносимо до 1 кН ваги поїзда, складу, вагона, локомотива.

Для вибраного розрахункового підйому масу складу в тоннах розраховуємо за формулою:

$$Q = \frac{F_{\text{др}} - (\omega'_0 + i_p) \cdot P \cdot g}{(\omega''_0 + i_p) \cdot g}, \quad (5.9)$$

де  $F_{\text{др}}$  – розрахункова сила тяги локомотива, Н;

$P$  – розрахункова маса локомотива, т;

$\omega'_0$  – основний питомий опір локомотива, Н/кН;

$\omega''_0$  – основний питомий опір складу, Н/кН;

$i_p$  – крутизна розрахункового підйому, ‰;

$g$  – прискорення вільного падіння;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Розрахунок маси складу для обох електровозів виконаємо для різної крутизни розрахункового підйому в трьох точках (0‰, 6‰, 10‰) і порівняємо отримані значення.

Основний питомий опір локомотива розраховують за формулою:

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V_p + 0,0003 \cdot V_p^2, \quad (5.10)$$

де  $V_p$  – розрахункова швидкість локомотива, км/год.

$$\omega'_{0 \text{ ВЛ80P}} = 1,9 + 0,01 \cdot 43,5 + 0,0003 \cdot 43,5^2 = 2,90 \text{ Н/кН};$$

$$\omega'_{0 \text{ пр}} = 1,9 + 0,01 \cdot 63,4 + 0,0003 \cdot 63,4^2 = 3,74 \text{ Н/кН}.$$

Основний питомий опір складу з чотиривісними вагонами розраховується за формулою:

$$\omega''_0 = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2}{q_0}, \quad (5.11)$$

де  $q_0$  – навантаження від колісної пари 4-вісного вагона на рейку, т/вісь.

$$q_0 = \frac{g}{4}, \quad (5.12)$$

де  $g$  – маса 4-вісного вагона бруто на підшипниках кочення; приймаємо  $g = 86 \text{ т}$ .

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q_0 = \frac{86}{4} = 21,5 \text{ т/вісь};$$

$$\omega''_{\text{о ВЛ80P}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 43,5 + 0,0025 \cdot 43,5^2}{21,5} = 1,26 \text{ Н/кН};$$

$$\omega''_{\text{о4 пр}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 63,4 + 0,0025 \cdot 63,4^2}{21,5} = 1,60 \text{ Н/кН}.$$

При  $i_p = 0\%$

$$Q_{\text{р ВЛ80P}}^0 = \frac{502272 - (2,90 + 0) \cdot 192 \cdot 9,81}{(1,26 + 0) \cdot 9,81} = 40193 \text{ т};$$

$$Q_{\text{р пр}}^0 = \frac{542400 - (3,74 + 0) \cdot 192 \cdot 9,81}{(1,60 + 0) \cdot 9,81} = 33088 \text{ т}.$$

Розрахунки для інших значень  $i_p$  аналогічні, тому зведемо їх в табл. 5.5, враховуючи що у відповідності з [13] масу необхідно округлити до 50 або 100 т.

Таблиця 5.5 – Результати розрахунку маси складу за серією локомотива

Розрахунковий підйом $i_p$ , %	Маса складу за серією локомотива $Q$ , т			
	ВЛ80P		проектний	
	розрахована	прийнята	розрахована	прийнята
0	40193	40200	33088	33100
6	6817	6800	6814	6800
10	4327	4300	4398	4400

За результатами розрахунку будемо графік залежності маси складу від

розрахункового підйому  $Q = f(i_p)$  для обох типів локомотива (рис. 5.2, лист 7).

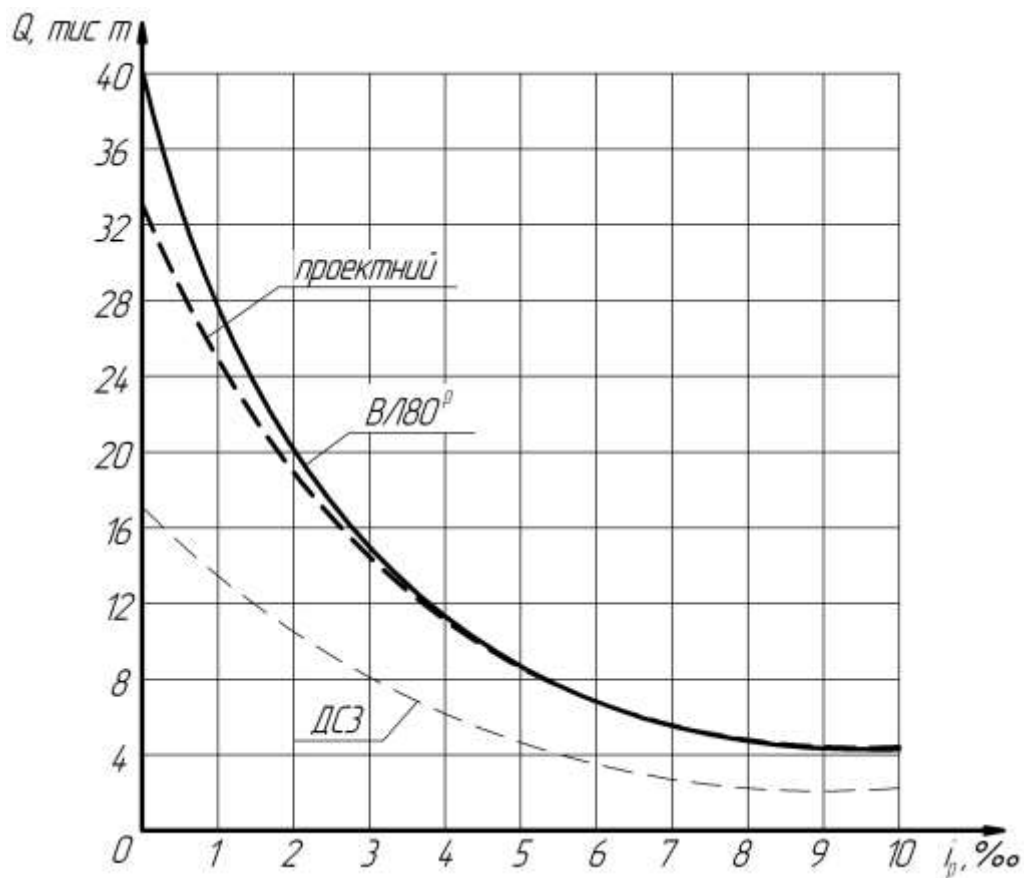


Рисунок 5.2 – Графік залежності маси складу від розрахункового підйому

$Q = f(i_p)$  для електровозів ВЛ80<sup>Р</sup>, ДСЗ та проектного

Як видно з графіка на рівнинних ділянках колії ( $i_p \leq 6\text{‰}$ ) проектний електровоз з асинхронним приводом поступається серійному ВЛ80<sup>Р</sup> за критерієм перевізної здатності по тоннажу. Здавалося б ми опинились у глухому куті та наші пропозиції недоцільні. І при збільшенні потужності тягових двигунів ми доб'ємось зворотного ефекту. Але подивимось глибше на це питання. По-перше, при існуючих провізних спроможностях ділянок маса складу не досягає значень 30-40 тис т, а при існуючих нормах (7-8 тис т на рівнинних ділянках колії) показники електровозів майже ідентичні. По-друге, на гірських ділянках запропонований нами асинхронний привід на проектному електровозі показує

себе вже з кращого боку, тому доцільніше такі електровози експлуатувати в гірських районах важкої промисловості. По-третє, і що найважливіше, ми досягаємо значного збільшення розрахункової швидкості (на 33%), що безпосередньо впливає на швидкість доставки вантажу та прибутковість від даних заходів.

В [8] показано, що добова продуктивність електровозів пропорційна потужності тягових двигунів розрахункового режиму. Гранична потужність колекторних двигунів 800 кВт, а потужність асинхронного тягового двигуна, наприклад АД-914, дорівнює 1200 кВт. При асинхронному приводі можна скоротити час на ремонтні операції і збільшити добовий час роботи електровоза на 30%, тоді можливе збільшення продуктивності його в 2 рази. Підвищену продуктивність можна використовувати або на збільшення дільничної швидкості, або на приріст маси поїзда. При збільшенні маси поїзда для електровоза при однаковому числі осей виникає проблема зчеплення з неминучим збільшенням зносу бандажів, рейок і підвищення пошкоджуваності устаткування електровоза [9]. Крім того, на ряді станцій потрібно подовження допоміжних колій. Переважає використання продуктивності електровоза на збільшення дільничної швидкості і скорочення доставки вантажів. Згідно існуючим нормам, ділянкова швидкість для електровоза ВЛ80<sup>Р</sup> порядку 46-48 км/год, а в розрахунковому режимі – 51,6 км/год. У перспективі за рахунок удосконалення поїзної роботи дільнична швидкість зрівняється з розрахунковою. Можна бути впевненим, що для перспективного проектного електровоза ділянкова швидкість складе 65 км/год, що істотно вище реалізованих зараз. Відомо, що підвищення дільничної швидкості руху вантажних поїздів на 1 км/год приносить додатковий прибуток близько 70 млн грн.

Крім того, збільшення маршрутних швидкостей вантажних поїздів підвищить добовий пробіг електровоза, а також дозволить підвищити масово швидкості пасажирського руху при поєднанні його з вантажними перевезеннями. Важливо, що збільшення швидкості доставки вантажів – це вимога ринку і можливість скорочення парку вагонів на ті ж перевезення. Цікаво відзначити, що

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

залізничники Китаю, вирішуючи ту ж задачу – у них експлуатуються електровози ВЛ80 – прийшли до параметрів електровоза з асинхронним приводом, які майже співпадають з визначеними нами [10].

Оцінено ефективність запропонованого проекту в сфері виробництва: застосування більш досконалої технології призводить до зниження витрат. На ранніх стадіях розробок частка вартості перетворювачів в ціні електровоза була дуже значною, однак прогрес у розвитку електроніки стрімкий, і ситуація змінюється швидко. Різко скорочується кількість силових приладів за рахунок підвищення допустимих струмів і напруг.

Прилади серії IGBT з напругою 6,5 кВ використовуються всюди на електровозах останніх розробок [14]. Важливо і те, що в таких перетворювачах однакові модулі.

Можливості вдосконалення силових приладів ще не вичерпані. Наприклад, нанотехнології можуть спростити їх і знизити втрати. Вдосконалюється і мікроелектроніка, що дозволить забезпечити надійність систем управління режимами електровоза і далі розширити можливості діагностики обладнання.

Час підвести підсумок висловлених вище оцінок з ефективності використання асинхронного тягового приводу електровозів.

Плюси в сфері експлуатації. Збільшення ділянкової швидкості і швидкості доставки вантажів дозволить скоротити парк електровозів і вагонів за рахунок більш інтенсивного їх використання. Скорочення витрат і часу на ремонтні роботи за рахунок вдосконалення електричної частини електровозів з підвищенням їх надійності. Скорочення питомої витрати електроенергії до 25% [11] і підвищення безпеки руху за рахунок вискоефективного рекуперативного гальма; зменшення витрат гальмівних колодок. Збільшення швидкості руху пасажирських поїздів при сумісній роботі з вантажними поїздами. Ефективність рекуперативного гальма забезпечується відсутністю перемикачів в силовій схемі і зводиться лише до зміни програми управління користувачем. Завдяки цьому гальмування здійснюється не тільки на рідкісних крутих спусках, а й на частих режимах пригальмовування. Перераховане дозволить радикально поліпшити

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

експлуатаційні показники використання локомотивів і знизити собівартість перевезень.

Плюси в сфері виробництва. Гранична уніфікація електричного обладнання електровозів за рахунок складання з однакових модулів і однакових елементів систем управління. Швидке і якісне складання електровозів за рахунок використання готового набору комплектуючих вузлів. Підвищення надійності електровозів за рахунок виготовлення комплектуючих вузлів на спеціалізованих підприємствах. Перераховане дозволить знизити ціну електровоза при підвищенні його експлуатаційних показників. Завдяки спрощення структури електровоза з асинхронним тяговим приводом, високого ступеня уніфікації і модульному складанню ціна його в перспективі повинна бути істотно нижче ціни електровоза з колекторними тяговими двигунами. Підсумовуючи отриману ефективність, можна впевнено говорити про суттєвий вплив перевезень у системі Укрзалізниці на зниження частки транспортних витрат в ціні виробленої продукції, а з урахуванням екології та зниження питомих витрат енергії на перевезення значуща роль Укрзалізниці в сфері транспортних послуг на економічні показники країни безсумнівна. Зниження питомої витрати енергії в 5-7 разів в порівнянні з автомобільними перевезеннями дуже значимо в умовах повсюдного скорочення витрат. Висока ефективність вантажного електровоза з асинхронним приводом очевидна. Є потреба без зволікання почати його проектування, щоб виготовити невелику дослідну партію таких електровозів, освоїти їх в експлуатації і внести корективи у виробництво.

### 5.3 Розміщення обладнання та поздовжнє розважування проектного електровоза

При поздовжньому розважуванні надвізкової будови електровоз розглядається як плоска, така що перебуває в статичній рівновазі система вертикальних сил, які створюються вагами вузлів і груп деталей. При цьому розглядаємо наступні категорії навантажень.

$G_i$  – ваги вузлів (груп деталей), розташованих у кузові й на рамі, у тому числі власної ваги кузова й рами, кН;

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		107

$G_K$  – сумарна вага надвізкової будови електровоза, тобто кузова й рами з устаткуванням, кН;

$G_{KП}$  і  $G_{KЗ}$  – навантаження від кузова й рами з устаткуванням на опори відповідно переднього й заднього візків, кН;

$G_B$  – вага візка, кН;

$G_{П}$  – підресорена вага секції електровоза, кН;

$G_H$  – непідресорена вага секції електровоза (вага колісних пар, букс, частина ваги тягових електродвигунів, при опорно-осьовій підвісці, частина ваги підвішування й кожухів осьових редукторів), що жорстко передається на колію, кН;

$G_{ПВ}$  – підресорена вага одного візка, кН;

$G_{HB}$  – непідресорена вага, що припадає на один візок, кН;

$P_{Зч}$  – службова вага секції електровоза (зчіпна вага), кН;

$P_{сер}$  – середнє навантаження від однієї колісної пари на рейки, кН;

$P_{П}$  і  $P_{З}$  – повне навантаження на рейки від колісної пари переднього й заднього візків, кН;

$P_{ПП}$  і  $P_{ПЗ}$  – підресорене навантаження, що припадає на одну колісну пару переднього й заднього візків, кН;

$P_{НП}$  і  $P_{НЗ}$  – непідресорене навантаження, що припадає на одну колісну пару переднього й заднього візків, кН.

Основою для розрахунку поздовжнього розважування є схема екіпажної частини з необхідними розмірами (лист 6) і вагова відомість проектного електровоза з урахуванням пропозицій щодо розміщення нового обладнання (табл. 5.6). У ваговій відомості зведені ваги вузлів (груп деталей), розташованих у кузові й на рамі, включаючи ваги самих кузова й рами, ваги обох візків, непідресорену вагу електровоза, а також плечі моментів  $l_i$ , тобто відстані від центрів ваги вузлів (груп деталей) до деякої умовної осі, що визначає центр статичних моментів у плоскій системі вертикальних сил. Положення цієї осі може

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

вибиратися довільно, у будь-якому перетині системи вертикальних сил. Проведемо її через вісь переднього автозчеплення електровоза.

Таблиця 5.6 – Відомість поздовжнього розважування проектного електровоза і результати розрахунку

№ вузла	Назва вузла (групи деталей)	Вага, кН	Плече, м	Момент, кН·м
1	2	3	4	5
1	Щит живлення кіл керування	0,53	4,960	2,629
2	Серводвигун ЕКГ	0,44	7,389	3,251
3	Електроконтактор головний ЕКГ-8Ж	8,83	8,210	72,494
4	Перехідні реактори	4,41	8,210	36,206
5	Блок силових апаратів №2	19,42	11,400	221,388
6	Мотор-вентилятор №2	1,41	10,405	14,671
7	Чотириквadrантний перетворювач	26,97	15,051	405,9255

Продовження табл. 5.6

1	2	3	4	5
8	Блок силових апаратів №1	18,64	5,599	104,365
9	Мотор-вентилятор №1	1,41	6,612	9,323
10	Згладжуючий реактор №1	5,89	6,560	38,6384
11	Згладжуючий реактор №2	5,89	10,457	61,5917
12	Головний трансформатор	78,48	8,210	644,3208
13	Акумуляторні батареї	9,03	8,210	74,1363
14	Мотор-насос масла трансформатора	1,03	9,700	9,9910
15	Форкамера мотор-вентилятора №1	1,41	6,704	9,4526
16	Форкамера мотор-вентилятора №2	1,41	10,315	14,5442

17	Мотор-компресор	6,97	12,943	90,2127
18	Головний резервуар пневмосистеми №1	1,1	6,070	6,6770
19	Вимикач ВОВ-25	2,41	9,824	23,6758
20	Щит розподільчий	1,35	5,004	6,7554
21	Допоміжний компресор	0,16	12,135	1,9416
22	Струмоприймач	1,04	3,572	3,7149
23	Автономний інвертор напруги	18,232	8,700	158,6184
24	Головний резервуар пневмосистеми №2	1,1	10,933	12,0263
25	Блок апаратів допоміжних машин	24,92	12,127	302,2048
26	Рама електровоза з приналежностями	127,53	8,210	1047,0213

Продовження табл. 5.6

1	2	3	4	5
27	Кабіна машиніста з обладнанням	25,947	1,869	48,4949
28	Кузов з приналежностями	93,195	8,565	798,2152
29	Обслуговуюча вага	31,185	8,700	271,3095
	Надвізкова будова	$G_K = 520,339$	$X_{цт} = 8,636$	$\Sigma M_i = 4493,7961$
	Візок (два)	$G_B = 207,187 \times 2$		
	Непідресорена вага секції електровоза	$G_H = 170,694$		
	Службова вага електровоза	$P_{зч} = 934,713$		

Сумарну вагу кузова й рами з устаткуванням визначимо безпосередньо по ваговій відомості як суму ваг вузлів (груп деталей) по всій надвізковій будові

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

$$G_K = \sum_{i=1}^n G_i; \quad (5.13)$$

$$G_K = 520,339 \text{ кН.}$$

Службова вага електровоза знаходиться як сума ваг надвізкової будови й обох візків

$$P_{зч} = G_K + 2G_B; \quad (5.14)$$

$$P_{зч} = 520,339 + 2 \cdot 207,187 = 934,713 \text{ кН.}$$

Оскільки вся підресорена вага електровоза зосереджена у вагах візків, то

$$G_{пв} = G_B - \frac{G_H}{2}; \quad (5.15)$$

$$G_{пв} = 207,187 - \frac{170,694}{2} = 121,840 \text{ кН.}$$

Середнє навантаження від колісної пари на рейку визначається як частка від ділення службової ваги електровоза на кількість його колісних пар  $m = 4$ :

$$P_{сер} = \frac{P_{зч}}{m}; \quad (5.16)$$

$$P_{сер} = \frac{934,713}{4} = 233,678 \text{ кН.}$$

Відповідно ескізу розважування і ваговій відомості записуємо в табл. 4.6 статичні моменти, які створюються вагами вузлів (груп деталей) відносно умовної

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

осі моментів

$$M_i = G_i \cdot l_i, \quad (5.17)$$

а потім визначимо координату центра ваги надвізкової будови електровоза  $X_{\text{цт}}$  відносно умовної осі моментів

$$X_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{G_{\text{к}}}; \quad (5.18)$$

$$X_{\text{цт}} = \frac{4493,7961}{520,339} = 8,636 \text{ м.}$$

Навантаження від кузова й рами з устаткуванням на передній та задній візки визначаються обернено пропорційно відстаням від центра ваги надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки

$$G_{\text{кп}} = G_{\text{к}} \frac{a_3}{L_{\text{н}}}; \quad (5.19)$$

$$G_{\text{кз}} = G_{\text{к}} \frac{a_{\text{п}}}{L_{\text{н}}}, \quad (5.20)$$

де  $a_{\text{п}}$  і  $a_3$  – відстані від центра ваги надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки, м;

$L_{\text{н}}$  – відстань між умовними точками передачі вертикальних навантажень на візки;  $L_{\text{н}} = 7,500$  м [15].

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		112

$$a_{\Pi} = X_{\text{цт}} - \left( D + \frac{B}{2} \right), \quad (5.21)$$

де  $D$  – відстань від передньої осі автозчеплення до осі першої (у напрямку руху) колісної пари; приймаємо  $D = 3,381$  м [15];

$B$  – база візка; приймаємо  $B = 3,000$  м [15].

$$a_{\Pi} = 8,636 - \left( 3,381 + \frac{3000}{2} \right) = 3,755 \text{ м};$$

$$G_{\text{кз}} = 520,339 \cdot \frac{3,755}{7,500} = 260,536 \text{ кН};$$

$$a_3 = L_{\text{н}} - a_{\Pi}; \quad (5.22)$$

$$a_3 = 7,500 - 3,755 = 3,745 \text{ м};$$

$$G_{\text{кп}} = 520,339 \cdot \frac{3,745}{7,500} = 259,803 \text{ кН}.$$

Всі види навантажень від колісної пари на рейки визначаємо окремо для переднього й заднього візків, без урахування поздовжнього розважування візків. Оскільки розважування візків не виконувалося і було прийнято, що їх підресорена та непідресорена вага розподіляється по колісних парах рівномірно, то підресорені навантаження, які припадають на одну колісну пару, можна вважати рівними:

- для переднього візка (при кількості колісних пар у візку  $m_{\text{в}}=2$ ):

$$P_{\text{пш}} = \frac{G_{\text{кп}}}{m_{\text{в}}} + \frac{G_{\text{пв}}}{m_{\text{в}}}; \quad (5.23)$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		113

$$P_{\text{пз}} = \frac{259,803}{2} + \frac{121,840}{2} = 190,821 \text{ кН};$$

- для заднього візка

$$P_{\text{пз}} = \frac{G_{\text{кз}}}{m_{\text{в}}} + \frac{G_{\text{пв}}}{m_{\text{в}}}; \quad (5.24)$$

$$P_{\text{пз}} = \frac{260,536}{2} + \frac{121,840}{2} = 191,188 \text{ кН.}$$

Непідресорене навантаження від колісної пари на рейку для переднього й заднього візків вважається однаковим і визначається як частка від ділення непідресореної ваги електровоза на кількість його колісних пар

$$P_{\text{нп}} = P_{\text{нз}} = \frac{G_{\text{н}}}{m}; \quad (5.25)$$

$$P_{\text{нп}} = \frac{170,694}{4} = 42,674 \text{ кН.}$$

Повне навантаження від колісної пари на рейку для переднього й заднього візків визначається як сума підресореного й непідресореного навантажень

$$P_{\text{п}} = P_{\text{пз}} + P_{\text{нп}}; \quad (5.26)$$

$$P_{\text{п}} = 190,821 + 42,674 = 233,495 \text{ кН};$$

$$P_{\text{з}} = P_{\text{пз}} + P_{\text{нз}}; \quad (5.27)$$

$$P_{\text{з}} = 191,188 + 42,674 = 233,862 \text{ кН.}$$

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		114

Відносна різниця навантажень від колісних пар на рейки переднього й заднього візків

$$\Delta = \left| \frac{P_{\Pi} - P_3}{P_{\Pi}} \right| \cdot 100; \quad (5.28)$$

$$\Delta = \left| \frac{233,495 - 233,862}{233,495} \right| \cdot 100 = 0,2\%.$$

Отже, виконане нами поздовжнє розважування проектного електровоза показує, що при заміні візків та встановленні інвертора різниця навантажень від колісних пар на рейки переднього й заднього візків не перевищує 3%. Такі результати розрахунку можна вважати задовільними. Схема розважування проектного електровоза зображена на листі 6.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						115
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Проведені нами дослідження електрообладнання для електровозів змінного струму швидкісного руху дозволяє стверджувати, що одним з головних шляхів розвитку і удосконалення сучасного ЕРС, що працюють в режимі тяги і рекуперативного гальмування, є цілеспрямована зміна способів управління ВПП і радикальне удосконалення силової схеми ВПП шляхом заміни тиристорів на сучасні IGBT-транзистори і застосування нового алгоритму його управління, які направлені на значне підвищення коефіцієнту потужності тягових електроприводів електровоза і зниження гармонік напруги контактної мережі.

Таким чином, магістерська робота являє собою нове рішення важливої проблеми підвищення енергетичних показників електровозів і якості споживаної ними електричної енергії, реалізація рухомим складом більшої швидкості, збільшення потужності рухомого складу при зменшенні габаритів та ваги силових агрегатів локомотива.

В роботі розроблено нову структуру і запропоновано нову схему ВПП, виконану на основі IGBT-транзисторах з частотою комутації, яка відповідає частоті живлячої мережі, а також змінено алгоритм управління. Запропоновано встановити новий потужніший тяговий асинхронний електродвигун АД-914, який збільшить потужність електровоза майже в півтора рази і дозволить реалізувати більші швидкості локомотивом. Для реалізації більшої швидкості пропонується переробити конструкцію візка, зокрема застосувати візки з електровоза ДСЗ, які добре себе зарекомендували з точки зору надійності та динамічних якостей.

Розрахунок тягових і швидкісних характеристик проектного електровоза з асинхронним приводом для швидкісного руху показав, що при застосуванні асинхронних двигунів типу АД-914 на проектному електровозі розрахункова швидкість збільшиться із 43,5 км/год до 63,4 км/год, конструкційна відповідно із 110 км/год до 166,3 км/год. Дотична потужність електровоза збільшиться у півтора рази, це дасть можливість перевозити вантажі більшої маси по важчим ділянкам профілю колії. Підвищення перевізної швидкості вантажів дуже

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		116

прибуткова справа, але вона не досліджена в Україні і їй не приділяють значну увагу. Але в інших передових державах швидкість перевезення значно вища і це приносить значно вищі прибутки.

Розрахунки показали, що на рівнинних ділянках колії ( $i_p \leq 6\%$ ) проектний електровоз з асинхронним приводом поступається серійному ВЛ80<sup>Р</sup> за критерієм перевізної здатності по тоннажу. Але, по-перше, при існуючих провізних спроможностях ділянок маса складу не досягає значень 30-40 тис.т, а при існуючих нормах (7-8 тис.т на рівнинних ділянках колії) показники електровозів майже ідентичні. По-друге, на гірських ділянках запропонований нами асинхронний привід на проектному електровозі показує себе вже з кращого боку, тому доцільніше такі електровози експлуатувати в гірських районах важкої промисловості. По-третє, і що найважливіше, ми досягаємо значного збільшення розрахункової швидкості (на 33%), що безпосередньо впливає на швидкість доставки вантажу та прибутковість від даних заходів, що дуже актуально в умовах розвитку швидкісного руху.

При заміні електрообладнання на проектному електровозі виникає необхідність розрахунку розважування електровоза. Розрахунок показав, що при заміні візків та встановленні інвертора різниця навантажень від колісних пар на рейки переднього й заднього візків становить 0,2%, що не перевищує допустимих норм 3%.

Отже, після проведених теоретичних досліджень можемо зробити висновки про доцільність розробки автономного інвертора напруги для живлення асинхронних двигунів типу АД-914, які ми пропонуємо до встановлення на проектний електровоз змінного струму.

Результати аналізу схеми роботи АІН та розрахунку його основних складових дають уявлення про можливість створення такого перетворювача на основі комплектуючих вітчизняного виробництва. Це значно спрощує впровадження передових технологій на ТРС та разом з цим підвищує ефективність застосування морально застарілих електровозів і покращує їх тягово-економічні характеристики.

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
						117
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В результаті розрахунку інвертора нами була розроблена математична модель миттєвих значень струму фази А та зображена крива миттєвих значень струму  $i_A$  в залежності від часу  $t$  (періоду).

Пропонуємо на проектному електровозі кожну пару інверторів, які живлять два двигуни одного візка, оснастити спільним фільтром і ці два інвертори комутуватимуть по чергово через  $30^\circ$ . Таке рішення дозволить зменшити ємність фільтрового конденсатора в 4 рази.

Розглядаючи заходи по боротьбі із перешкоджаючими впливами, зумовленими транзисторним регулюванням, можна визнати, що найдоцільніше здійснювати захисні заходи безпосередньо на тяговому рухомому складі. Обґрунтований вибір частот керування імпульсного перетворювача сприяє тому, що у більшості випадків відпадає необхідність у здійсненні яких-небудь наступних заходів по боротьбі з перешкоджаючими впливами.

					0032.190111.000.04MP.ПЗ	Арк.
						118
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Высокоскоростной электрический транспорт мировой опыт/ В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко. – Х.: Издательство ХПИ, 2007. – 159 с.
2. Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги: підручник / Під ред. к-та техн. наук, доц. В. Н. Сердюка; УДУНТ; ННІ «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». – Дніпро, 2022. – 385 с.
3. Безрученко В.М. та ін. Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Д.: ДНУЗТ, 2003. – 252 с.
4. Електричне обладнання локомотивів: метод. вказівки до курсового проекту / уклад.: В.Н. Красильников, Н.І. Капіца та ін. – Д.: ДДТУЗТ, 2017 – 57с.
5. Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
6. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги. Том 1. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – 580 с.
7. Прикладная теория цифровых автоматов/ К. Г. Самофалов и др. – К.: Вища школа, 1987. – 375 с.
8. Корякин А. В. Обеспечить надежность парка локомотивов // Локомотив. – 2007. – № 8.
9. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Графическое изображение электрорадиосхем: Справочник. - Киев: Техника, 1986.- 120с.
10. Бобирь Д. В., Сердюк В.Н. Електричне обладнання тепловозів: навчальний посібник /Під ред В.Н. Сердюка; УДУНТ;ННІ Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп. Дніпро, 2023.-250 с.
11. Мощные Полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратов, В. М. Петухов. – К.: Радио и связь, 1988. – 576 с.

					0032.190111.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		119