

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

 /Дмитро БОСИЙ/

« 20 » 12 2021 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи
електроспоживання**

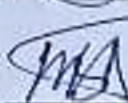
Тема **Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з
живленням підвищеною напругою через перетворювач на ділянці
Дніпро-П'ятихатки**

Theme **Expediency investigation of power supply of the catenary with high
voltage supply through the converter on the Dnipro-Pyatihatka section**

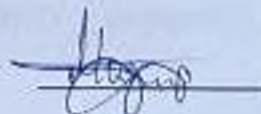
Керівник дипломної роботи

доцент  Віталій ЛЯШУК

Нормоконтролер

доцент  Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2021

 Євгеній МАХОРТОВ

Student

Makhortov Yevhenii

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

 Дмитро Босий

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студента групи ЕС2021 Махортова Євгенія Юрійовича.

1 Тема дипломного роботи: «Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювачі на ділянці Дніпро-П'ятихатки.»

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломного роботи: технічні параметри пристроїв стабілізації напруги.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): дослідити існуючі способи стабілізації напруги контактної мережі, визначити можливості стабілізації напруги за допомогою тягового трансформатора, дослідити режими роботи випрямного агрегату зі стабілізуючими властивостями.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП.	17.09	5
1.	СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
2.	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДЛЯНЦІ ДНІПРО-П'ЯТИХАТКИ ПРИ ЖИВЛЕННІ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	11.11	40
3.	МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ	01.12	20
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи



Віталій Ляшук

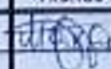
Завдання прийняв до виконання



Святослав Махортов

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИБОРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	10
1.1 Обґрунтування необхідності вибору систем електричного живлення постійного струму підвищеної напруги.....	10
1.2 Характеристики підстанцій на ділянці «Дніпро – П'ятихатки».....	12
1.3 Існуючі системи тягового електропостачання 3,3 кВ.....	14
1.4 Удосконалення системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ за допомогою фідера постійного струму підвищеної напруги 24 кВ.....	20
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНЦІ ДНІПРО-П'ЯТИХАТКИ ПРИ ЖИВЛЕННІ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	22
2.1 Підвищення напруги в контактній мережі та на с.р.с.....	22
2.2 Підвищення пропускної спроможності та електричної тяги на постійному струмі.....	22
2.3 Загальні схеми електропостачання на постійному струмі.....	23
2.4 Живлення контактної мережі 3,3 кВ від підсилюючого проводу напругою 6 кВ через перетворювач 6/3 кВ.....	24
2.4.1 Розподільна система живлення.....	25
2.5 Методи підсилення системи електропостачання.....	26
2.6 Система тяги постійного струму підвищеної напруги.....	29
2.7 Отримання напруги 6 кВ постійного струму.....	32

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювач на ділянці Дніпро-П'ятихатки	Лист	Лист	Листів
Розробив		Е. Махортов					5	61
Керівник		В. Ляшук		20.12.				
Н. Контр.		В. Перцевий						

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ /Дмитро БОСИЙ/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи
електроспоживання**

Тема **Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з
живленням підвищеною напругою через перетворювач на ділянці
Дніпро-П'ятихатки**

Theme **Expediency investigation of power supply of the catenary with high
voltage supply through the converter on the Dnipro-Pyatihatka section**

Керівник дипломної роботи

доцент _____ Віталій ЛЯШУК

Нормоконтролер

доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2021

_____ Євгеній МАХОРТОВ

Student

Makhortov Yevhenii

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро Босий

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи ЕС2021 Махортова Євгенія Юрійовича.

1 Тема дипломної роботи: «Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювачі на ділянці Дніпро-П'ятихатки.»

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри пристроїв стабілізації напруги.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): дослідити існуючі способи стабілізації напруги контактної мережі, визначити можливості стабілізації напруги за допомогою тягового трансформатора, дослідити режими роботи випрямного агрегату зі стабілізуючими властивостями.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП.	17.09	5
1.	СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
2.	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНЦІ ДНІПРО-П'ЯТИХАТКИ ПРИ ЖИВЛЕННІ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ	11.11	40
3.	МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ	01.12	20
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи _____

Віталій Ляшук

Завдання прийняв до виконання _____

Євгеній Махортов

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 61 сторінок, складається з 3 розділів, та містить 28 ілюстрацій, 2 таблиці, 17 використаних джерел.

Мета та призначення роботи: в даній роботі особливу увагу хотів би звернути на використання методу перетворення напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти для перетворення напруги рівня 6,6кВ в напругу 3,3кВ для живлення електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи перетворювача напруги.

Задача дипломної роботи: для того щоб можливо було збільшити обсяг перевезень на залізниці необхідно нарощувати їх проїзну здатність. Для реалізації цієї мети здійснюються заходи щодо збільшення швидкості руху та вагових норм поїздів, створюються нові електровози більшої потужності, розробляються способи посилення електропостачання тяги постійного струму.

В наш час підвищення енергетичної ефективності електрифікованих ліній в умовах реформування залізничного транспорту являється є однією з найважливіших проблем.

Ключові слова: ВИСОКА ЧАСТОТА, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, НАПРУГА, ЕЛЕКТРИЧНА ТЯГА, ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ, ПРОЇЗДНА ЗДАТНІСТЬ, РЕФОРМУВАННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИБОРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	10
1.1 Обґрунтування необхідності вибору систем електричного живлення постійного струму підвищеної напруги.....	10
1.2 Характеристики підстанцій на ділянці «Дніпро – П'ятихатки».....	12
1.3 Існуючі системи тягового електропостачання 3,3 кВ.....	14
1.4 Удосконалення системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ за допомогою фідера постійного струму підвищеної напруги 24 кВ.....	20
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНКІ ДНІПРО-П'ЯТИХАТКИ ПРИ ЖИВЛЕННІ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....	22
2.1 Підвищення напруги в контактній мережі та на е.р.с.....	22
2.2 Підвищення пропускної спроможності та електричної тяги на постійному струмі.....	22
2.3 Загальні схеми електропостачання на постійному струмі.....	23
2.4 Живлення контактної мережі 3,3 кВ від підсилюючого проводу напругою 6 кВ через перетворювач 6/3 кВ.....	24
2.4.1 Розподільна система живлення.....	25
2.5 Методи підсилення системи електропостачання.....	26
2.6 Система тяги постійного струму підвищеної напруги.....	29
2.7 Отримання напруги 6 кВ постійного струму.....	32

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Є. Махортов				Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювач на ділянці Дніпро-П'ятихатки	Лім.	Лист	Листів
							5	61
Керівник	В. Ляшук							
Н. Контр.	В. Перцевий							

3.МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ.....	34
3.1 Схема імпульсного перетворювача постійного струму.....	34
3.2 Перетворювачі на транзисторах IGBT.....	40
3.3 Технологія GTO.....	46
3.4 Технологія IGBT.....	48
3.5 Схема заміщення ділянки тягової мережі після впровадження системи 6/3 кВ на ділянці П'ятихатки-Залізнякове.....	50
3.6 Розрахунок перегінної пропускної спроможності з урахуванням рівня напруги	53
Висновок.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ВСТУП

Актуальність роботи. В даний час підвищення енергетичної ефективності електрифікованих ліній в умовах реформування залізничного транспорту є однією з найважливіших проблем, над вирішенням якої працюють не один рік

Стрімкий розвиток перетворювальної техніки на базі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (*IGBT*) в тягових системах рухомого складу почався на початку 1990-х років з застосування її для нижнього діапазону потужності. Розширення області використання тягових перетворювачів на базі транзисторів *IGBT* залежало від можливостей підвищення замикаючої здібності і величини струму що між ними пропускається. Ряд ключових технічних рішень, внесених за минуле десятиліття в конструкцію і технологію виробництва транзисторів, сприяв їх безперервного вдосконалення. Серйозну проблему для розробників представляла механічна компоновка напівпровідникових приладів (транзисторів *IGBT*, діодів) у загальному корпусі з урахуванням високих вимог до тяговим системам, обумовлених циклічним зміною навантаження. Для вирішення цього завдання знадобилися ретельні дослідження і випробування. Тягові перетворювачі на базі транзисторів *IGBT* вигідно відрізняються двома особливостями, важливими як для залізниць, так і для виробників.

Збільшення обсягу перевезень по залізницях диктує необхідність нарощування їх проїзної здатності. Для цього здійснюються заходи щодо збільшення швидкості руху та вагових норм поїздів, створюються нові електровози більшої потужності, розробляються способи посилення електропостачання тяги постійного струму. Така система забезпечує не тільки підвищення якості електроенергії, що споживається, та стабілізацію напруги на шинах тягових підстанцій, але й вирішує задачі стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу; фільтрацію низькочастотних

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

неканонічних і канонічних вихідних гармонік з метою зменшення встановленої потужності або повної відмови від використання громіздких дроселів, фільтрів та резонансних контурів; швидкодіючий захист при коротких замиканнях у тяговій мережі при реалізації бездугового відключення комутаційних апаратів. Таким чином робота, що направлена на подальше підвищення ефективності перетворювальних агрегатів вольтододаткового типу без додаткових тягових трансформаторів для підстанцій постійного струму залізниць України, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступними темами: «Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювачі на ділянці Дніпро-П'ятихатки»

Мета і завдання роботи. Забезпечення стабільного рівня напруги у тяговій мережі при живленні підвищеною напругою через перетворювачі

Об'єкт дослідження. Система тягового електропостачання постійного струму.

Предмет дослідження. Незалежне регулювання і стабілізація напруги по фідерам міжпідстанційної зони

Методи дослідження. Методи статистичного аналізу, аналітичне дослідження режимів напруги. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCAD. Для моделювання роботи системи стабілізації з програмних пакетів обрана OrCAD 9.2. Середя OrCAD 9.2 .

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист: Вперше пропонується структурна схема тягового агрегату для підстанцій з вольтододатковими перетворювачами на кожен фідер, які використовують широтноімпульсну модуляцією з частотою 5 кГц на *IGBT* , і можливістю

регулювання рівня напруги, незалежно, по кожному фідеру.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень можуть бути використані при впровадженні швидкісного руху на території України, для забезпечення необхідного рівня напруги та пропускної здатності.

Результати можна використати при впровадженні пристроїв поліпшення якості електроенергії на електроенергетичних об'єктах електрифікованих залізниць.

Розроблені методики та результати експериментальних досліджень можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів з електроенергетичних спеціальностей.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на науково-практичній конференції.

Публікації за тематикою роботи.

Махортов Є.Ю., Дослідження доцільності електропостачання контактної мережі з живленням підвищеною напругою через перетворювач на ділянці Дніпро-П'ятихатки / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 11 с.

1 СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

На сьогоднішній день сформовані дві системи живлення електрифікованого транспорту: постійного та змінного струму. Розвиток та формування кожної з цих систем обумовлювалися станом розвитку науково-технічного прогресу на визначений період часу. При цьому потрібно звернути увагу на те, що система постійного струму з моменту своєї появи майже не зазнала змін структурно, а зміни відбувались здебільшого, в елементній базі устаткування. А от система змінного струму, навпаки, з самого початку свого існування постійно зазнає різного роду покращень та удосконаленням.

Безсумнівно, кожна з цих систем електричної тяги по своєму змінюється і розвивається та має свої переваги та недоліки.

Звичайно, наукові суперечки з приводу того, яка з цих систем електрифікації краща, ведуться дуже давно, але детального й комплексного порівняльного аналізу цих двох систем до сих пір не було виконано.

Система тягового електропостачання на змінному струмі за рахунок зменшення числа тягових підстанцій і перерізу контактної підвіски виявилася в сукупності на 12–15% дешевшою за систему постійного струму, але електровози змінного струму в 1,5 разу дорожчі за електровози постійного.

Витрата міді в контактній мережі при змінному струмі в 2 рази менше, ніж при постійному, але в кожному електровозі змінного струму, міді на 5,5 т більше, ніж в електровозі постійного струму. І тут загальний баланс не на користь змінного струму.

1.1 Обґрунтування необхідності вибору систем електричного живлення постійного струму підвищеної напруги

Останнім часом у всьому світі набирає популярність та стрімко розвивається швидкісний та високошвидкісний залізничний рух. Все більше країн створюють цілі мережі спеціалізованих швидкісних магістралей як у

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

межах країни, так і міжнародні швидкісні лінії.

У той же час впровадити швидкісний рух та збільшити обсяг вантажних та пасажирських перевезень на лініях, електрифікованих на постійному струмі, неможливо без прийняття заходів спрямованих на підсилення системи тягового електропостачання.

У зв'язку з цим і з тим що силова керована напівпровідникова техніка продовжує свій розвиток, все більш актуальним залишається пошук рішень які допоможуть в подальшому підвищити рівень напруги в мережі електричної тяги постійного струму до 12, 18, 24 кВ, що допоможе створити більш ефективну систему електропостачання постійного струму.

Виходячи з вище сказаного особливо актуальним залишається питання модернізації ділянок тягової мережі які вже не перший рік працюють з напругою 3,3 кВ для підвищення потужності у зв'язку з переходом на швидкісний рух і дотримування норм напруги в контактній мережі для повноцінного руху поїздів.

Живлення електричних ланцюгів електрифікованого транспорту здійснюється від повітряної контактної мережі постійного струму напругою 3,3кВ $\pm$ 0,5кВ. Номінальна напруга на виході тягової підстанції становить 3,3кВ, максимальне – 3,8 кВ.

Доскональне вимірювання рівня напруги в тяговій мережі на ділянці «Дніпро – П'ятихатки», шляхом отримання зовнішніх характеристик, підтвердило необхідність застосування системи живлення 6/3 кВ для зменшення втрат електроенергії та нормалізації рівня напруги на даній ділянці.

Проведені вимірювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях на ділянці «Дніпро – П'ятихатки» на Придніпровській залізниці показали, що в реальності вона піднімається до 3,8 кВ. Така підвищена напруга негативно позначається на дорогому комутаційному і перетворювальному електроустаткуванню рухомого складу і часто

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

призводить до виходу його з ладу. З іншого боку, зниження напруги контактної мережі призводить до перегріву обмоток тягових двигунів. Ясно, що стабілізація напруги мережі живлення залізничного транспорту дозволяє значною мірою підвищити якість їх роботи, безпеку, надійність та знизити витрату електроенергії.

Виконання цього завдання з реконструкції та модернізації існуючих ліній з доведенням швидкості руху пасажирських поїздів на них до 200 км / год. Все таки можливо та доволі реально, так як в даний час на залізниці України коефіцієнт використання пропускної спроможності дуже незначний. Це в свою чергу вказує а те що, на лініях які поєднують в собі пасажирський і вантажний рух вже можуть курсувати пасажирські поїзди з максимальною швидкістю 200 км / год. Потрібно враховувати, що за будь-яких зовнішніх умов і будь-якої швидкості руху повинен забезпечувати надійний струмоз'єм при величині струму на лінії постійного струму напругою 3 кВ від 1500 А до 2800 А.

1.2 Характеристики підстанцій на ділянці «Дніпро – П'ятихатки»

Зовнішні характеристики даних підстанцій були зняті експериментальним шляхом на підстанціях: П'ятихатки, Залізнякове, Вільногірськ,Верхівцеве, Верхньодніпровськ, Кам'янське, Баглій, Сукачівка, Діївка, Горяїнове, Дніпро.

Напруга і струм були зафіксовані через певний проміжок часу і побудовано по точкам в різні моменти часу при різних значеннях навантаження .

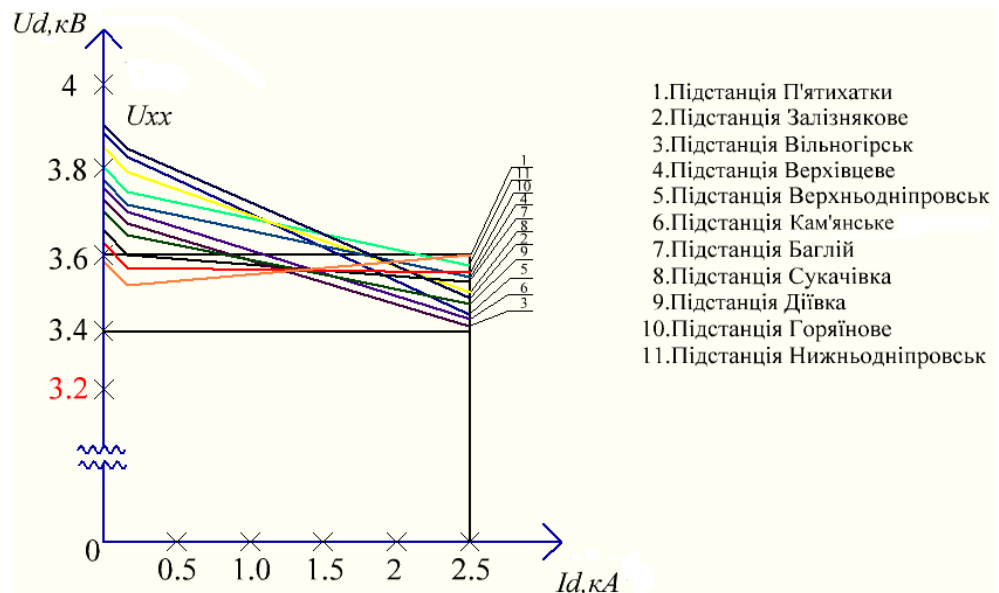


Рисунок 1.1 – Зовнішні характеристики підстанцій до модернізації
 (в даний момент часу)

Для модернізації, ми робимо заміну тягових підстанцій П'ятихатки, Залізнякове на перетворюючі пристрої з 6 кВ на 3 кВ в заміну цих підстанцій.

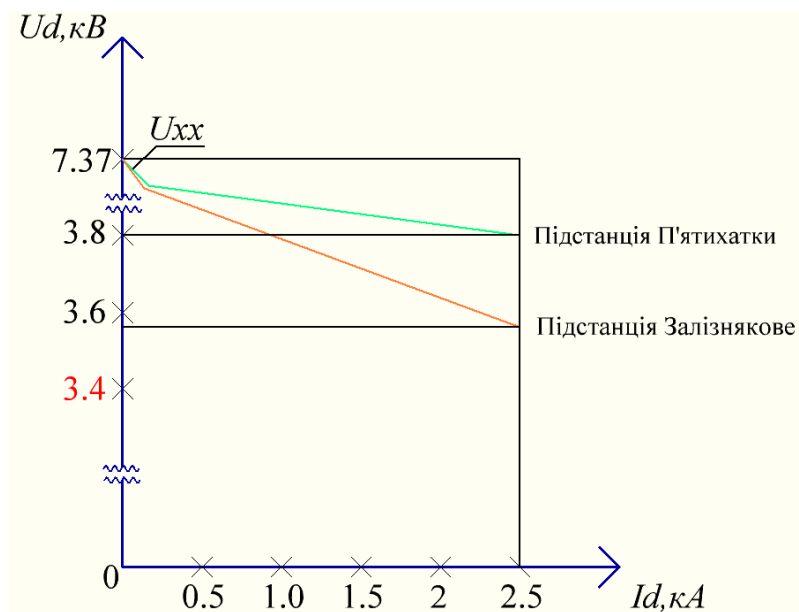


Рисунок 1.2 – Зовнішні характеристика підстанцій після модернізації і встановлення перетворювачів 6/3 кВ

Наведена нижче зовнішня характеристика перетворювача, яка має вигляд горизонтальної лінії, за рахунок стабілізації напруги на виході з перетворювача.

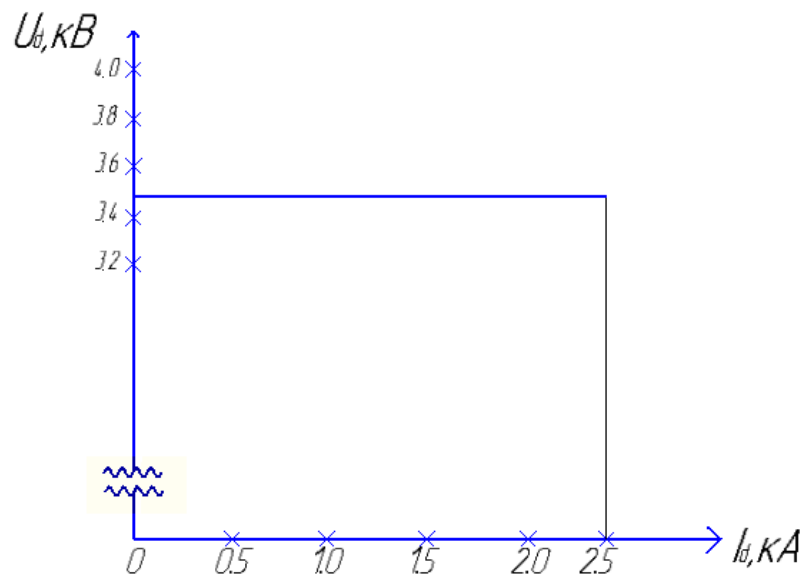
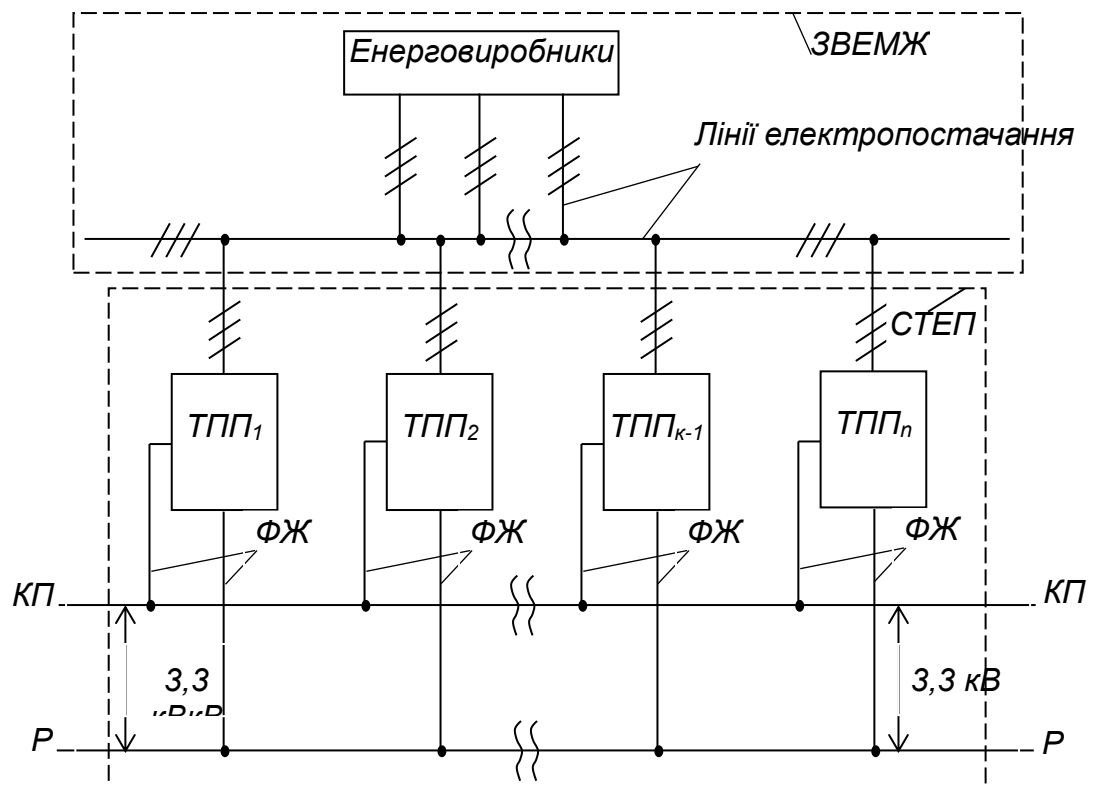


Рисунок 1.3 - Зовнішня характеристика перетворювача на 6/3 кВ

1.3 Існуючі системи тягового електропостачання 3,3 кВ

На сьогоднішній день залізниця України характеризується тим, що по системі постійного струму напругою 3,3 кВ електрифіковано майже половина від загальної довжини електрифікованих ліній, а якщо буди більш точним то це 4603 км ліній.

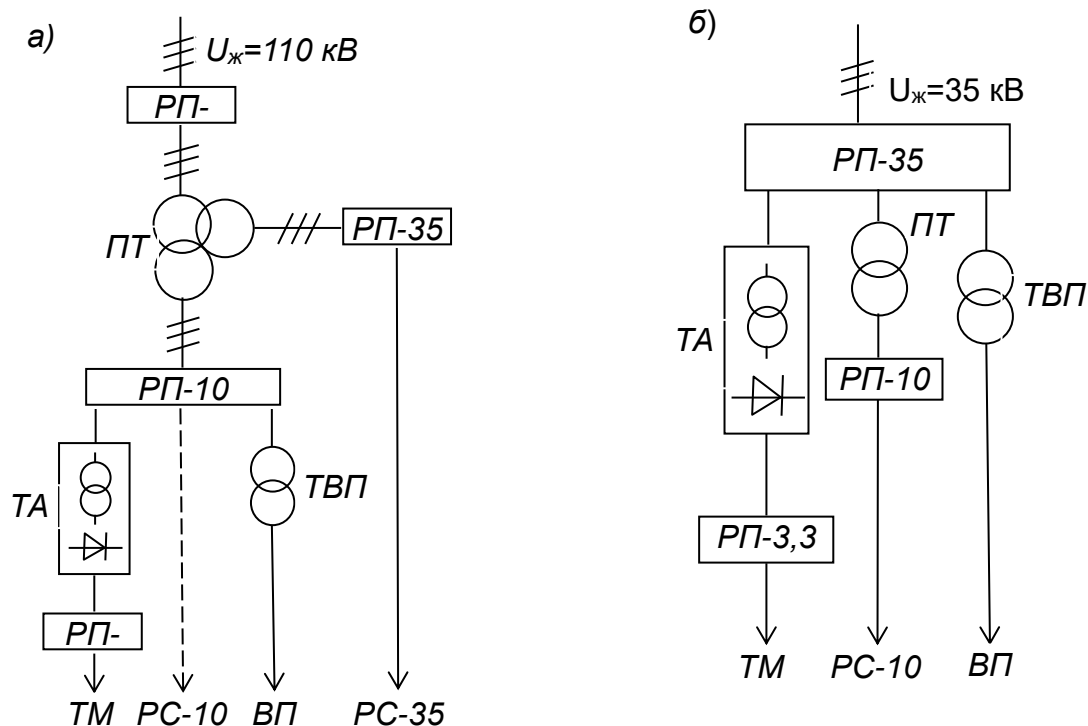
Структурно, система тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ (СТЕП) складається із тягових перетворювальних підстанцій (ТПП), живлення яких забезпечується централізовано від зовнішніх високовольтних енергомереж трифазної змінної напруги промислової частоти (ЗВЕМЖ) та тягової мережі (ТМ), що включає в себе фідери живлення (ФЖ), контактний провід (КП) і рейки (Р) (рис. 1.4).



ТПП_i – тягові перетворювальні підстанції; ФЖ – фідери живлення; КП – контактний провід; Р – рейки; ЗВЕМЖ – зовнішня високовольтна енергомережа живлення системи тягового електропостачання

Рисунок 1.4– Структура системи тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ (СТЕП)

На тягових перетворювальних підстанціях (ТПП) постійного струму напруги 3,3 кВ при напрузі живлення $U_{\text{ж}}$ більшої за 35 кВ для живлення тягової мережі (ТМ) використовується, як правило, двоступенева трансформація (рис. 1.4, а) [11]. При цій трансформації живляча напруга $U_{\text{ж}}$ понижується трьох обмотковим трифазним трансформатором (ПТ), одна із вторинних обмоток якого через розподільний пристрій (ПР-35) живить напругою 35 кВ районні споживачі (РС), а друга (тягова) – через розподільний пристрій (РП-10) живить напругою 10 кВ тягові перетворювальні трансформатори випрямлячів тягових агрегатів (ТА) та трансформатори власних потреб.



а) з двоступеневою трансформацією при живленні напругою більше 35 кВ ($U_{ж}=110 \text{ кВ}$);

б) з одноступеневою трансформацією при живленні напругою 35 кВ і менше ($U_{ж}=35 \text{ кВ}$).

Рисунок 1.5– Структурні схеми тягових перетворювальних підстанцій постійного струму напруги 3,3 кВ

Випрямлена напруга від тягового агрегата (ТА) через розподільний пристрій РП-3,3 і живлячі фідери поступає в тягову мережу (ТМ).

При двох обмоткових трифазних понижуючих трансформаторів (ПТ) районні споживачі (РС) живляться від його тягової обмотки через розподільний пристрій РП-10 (на рис. 1.5, а показано пунктиром).

Структурна схема тягової перетворювальної підстанції постійного струму напруги 3,3 кВ з одноступеневою трансформацією, живлення якої забезпечується від енергосистеми напругою 35 кВ і менше (рис. 1.5, б) є дещо простішою і більш енергоефективною з точки зору втрат потужності у енергетичному каналі тягового електропостачання у порівнянні з структурною схемою тягової перетворювальної підстанції із двоступеневою

трансформацією (рис. 1.5, а). Це і робить перспективним перехід на одноступеневу трансформацію на тягових перетворювальних підстанціях глибокого вводу про що свідчить закордонний досвід модернізації тягового електропостачання реконструйованої швидкісної лінії [11].

На вже існуючих ділянках, які електрифіковано на постійному струму 3 кВ, пристрої електропостачання нерідко обмежують пропускну та провізну здатності по нагріванню проводів контактної при організації руху великовагових поїздів, що в свою чергу сприяє втраті їх механічної міцності, і зниженню напруги на струмоприймачі електровозу нижче мінімального допустимого для нормальної експлуатації 2700 В [9]. Зниження напруги на струмоприймачі в свою чергу призводить до перевитрат електричної енергії на тягу, витрат швидкості руху потягів і навіть в деяких випадках до перегріву проводів контактної мережі. Для того щоб виправити вище перелічені недоліки, при електрифікації нових вантажонапружених ліній доводиться скорочувати відстань між тяговими підстанціями і застосовувати перетини проводів контактної мережі, що сприяє появі недоліків економічного характеру, тобто збільшення вартості робіт та додаткові витрати кольорових металів.

В зв'язку з цим вкрай необхідними стають заходи по підвищенню техніко-економічних показників роботи системи електропостачання тяги та всієї електрифікованої ділянки. На довгих міжпідстанційних зонах вантажонапружених ділянках збільшення перерізу контактної мережі не дає такого очікуваного ефекту якого хотілось би і не забезпечує номінальної напруги на електровозі 3000 В[11].

Здавалось би, значна кількість факторів вказує на те що для досягнення поставленої цілі необхідна істотна реконструкція системи електричної тяги 3 кВ. Але встановлені в системі постійного струму великі потужності дають підстави говорити про її життєздатність в умовах підвищення транспортних потоків та необхідність досліджувати шляхи

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

раціонального використання даних потужностей. При цьому необхідно максимально реалізувати переваги та недоліки системи з мінімальними додатковими капітальними вкладеннями.

Крім того, вирішення проблеми вдосконалення системи постійного струму 3 кВ має ряд переваг, по-перше, дозволяє зберегти існуючі промислові та сировинну бази та не потребує відкриття нових галузей; по-друге, дозволяє практично без істотних доповнень використовувати існуючу систему технічного обслуговування пристроїв системи постійного струму та, по-третє, забезпечує отримання економічного ефекту від введення швидкісних потягів і потягів підвищеної маси.

Серед основних переваг системи електричної тяги 3 кВ необхідно виділити те, що в системі постійного струму при напрузі 3 кВ у контактній мережі енергія до тягових двигунів передається без зміни рівня напруги на електровозі. Тому не потрібно буде використовувати складні механізми що дозволить не ускладнювати конструкцію електровоза і вони будуть виходити простими.

Тягове навантаження постійного струму для трифазної мережі зовнішнього електропостачання є симетричним і тому не впливає на несиметрію струму і напруги в трифазній мережі зовнішнього електропостачання.

Але наряду з перевагами системи тягового електропостачання постійного струму 3,3 кВ вона має також ряд недоліків: низька напруга у тяговій мережі, що при високих потужностях електрорухомого складу призводить до значного підвищення струму в тяговій мережі, збільшуються втрати електроенергії та напруги, використанню проводів контактної мережі з більшою площею перерізу, має обмеження і відстань між тяговими підстанціями до 15 км, а на ділянках з гірським профілем до 8...10 км, саме тому ускладнюється проблема великовагового руху поїздів; значні втрати активної електроенергії створюються великими величинами споживаних

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмів; при живленні ТП від 110 (220) кВ потрібна проміжна трансформація 110 (220) / 10 кВ; при електричній тязі постійного струму має місце інтенсивна електрокорозія підземних металевих споруд, в тому числі опор контактної мережі; шестипульсові випрямлячі тягових підстанцій мають низький коефіцієнт активної потужності $\cos\phi$ 0,88...0,92, що погіршує якість електричної енергії в мережі змінного струму 10 кВ.

При цій напрузі тягові перетворювальні підстанції на вантажонапружених лініях розміщуються на відстані меншій за 20...25 км одна від іншої, площа зрізу контактного проводу приймається 300...600 мм² у мідному еквіваленті на одну колію [7]. Особливо критичним цей недолік стає при впровадженні на лініях, електрифікованих на постійному струмі, швидкісного руху із швидкостями більшими за 160 км/год, для яких жорстко нормується на рівні 2,9 кВ напруга на струмоприймачах електрорухомого складу [9].

Для вирішення цієї проблеми доцільно виконувати зменшення відстані між тяговими перетворювальними підстанціями та подальше нарощування площі зрізу контактного проводу [8]. При цьому спостерігається, не зважаючи на підсилення контактної мережі, зменшення напруги в середині міжпідстанційної зони на струмоприймачах швидкісного електрорухомого складу до 2,7 кВ тобто за межі нормуємої величини 2,9 кВ. Із вище вказаного саме останнє і не дає можливість реалізувати проектну розрахункову швидкість на цій лінії.

Одним із шляхів усунення цього недоліку в рамках прийнятої на Україні системи централізованого тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ є використання на міжпідстанційних зонах розподіленого живлення тягової мережі, що у порівнянні з централізованим живленням не потребує побудови додаткових тягових перетворювальних підстанцій і, отже, розширення мережі зовнішнього електропостачання. При використанні розподіленого живлення тягової мережі у міжстанційних зонах

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовують два засоби [9]:

- підсилення живлення за допомогою перетворювальних пунктів послідовного типу, які включаються у розріз контактної мережі на ділянках між тяговими підстанціями і живлення яких забезпечується від трифазної системи живлення районних споживачів ЛЕП-35(10) [6];

- підсилення живлення за допомогою перетворювальних пунктів паралельного типу, які підключаються до тягової мережі на ділянках між тяговими підстанціями і живлення яких забезпечується від спеціального фідера тягових підстанцій підвищеної напруги постійного струму (у порівнянні з напругою тягової мережі) [8].

Виходячи з вище сказаного особливо актуальним залишається питання модернізації ділянок тягової мережі які вже не перший рік працюють з напругою 3,3 кВ для підвищення потужності у зв'язку з переходом на швидкісний рух і дотримування норм напруги в контактній мережі для повноцінного руху поїздів.. Доскональне вимірювання рівня напруги в тягової мережі на ділянці «Дніпро – П'ятихатки», шляхом отримання зовнішніх характеристик, підтвердило необхідність застосування системи живлення 6/3 кВ для зменшення втрат електроенергії та нормалізації рівня напруги на даній ділянці. Виконання цього завдання з реконструкції та модернізації існуючих ліній з доведенням швидкості руху пасажирських поїздів на них до 200 км / год. цілком реально, так як в даний час коефіцієнт використання пропускної спроможності залізниць України дуже незначний. Отже, на лініях з поєднаним пасажирського і вантажного руху вже можуть курсувати пасажирські поїзди з максимальною швидкістю 200 км / год.

1.4 Удосконалення системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ за допомогою фідера постійного струму підвищеної напруги 24 кВ

Для підвищення енергетичної ефективності електричної тяги постійного струму для забезпечення швидкісного руху найбільш

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перспективним способом є підсилення системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ за допомогою фідера постійного струму підвищеної напруги 24 кВ і пунктів живлення контактної мережі на перегоні 24/3 кВ. При цьому на тяговій підстанції встановлюється додаткова випрямна установка 24 кВ. На пункті живлення встановлюється перетворювальний модуль 24/3 кВ постійного струму, що складається з автономного інвертора й перетворювального агрегату 3 кВ, а живляча лінія прокладається по опорах контактної мережі. Цей спосіб можна застосовувати як на ділянках, що знову електрифікуються, так і на вже існуючих ділянках постійного струму, оскільки він дозволяє використовувати існуючий електрорухомий склад, розрахований на напругу 3 кВ [9].

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНЦІ ДНІПРО-П'ЯТИХАТКИ ПРИ ЖИВЛЕННІ ПІДВИЩЕНОЮ НАПРУГОЮ ЧЕРЕЗ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

2.1 Підвищення напруги в контактній мережі та на е.р.с

Підвищення рівня напруги в тяговій мережі стає можливим за умови застосування й широкого впровадження перспективних видів електрорухомого складу з імпульсними та тиристорними перетворювачами, що дозволяють виключити жорсткий зв'язок між напругою в тяговій мережі постійного струму й на тяговому двигуні. Зважаючи на це електрорухомий склад розробляється на основі безколекторних тягових двигунів трифазного струму з живленням від контактної мережі постійного струму за допомогою автономних інверторів. На вході інвертора включається тиристорний перетворювач, що забезпечує узгодження з контактною мережею за рівнем напруги[9].

2.2 Підвищення пропускної спроможності та електричної тяги на постійному струмі

Рівень напруги в контактній мережі постійного струму 24 кВ, дозволяє різко підвищити пропускну спроможність та ефективність електричної тяги постійного струму у т. ч. значно збільшити відстань між підстанціями, зменшити переріз дротів тягової мережі, зменшити втрати електроенергії в пристроях електропостачання, повністю усунути не симетрію живлячої напруги. Усе вищевказане та відсутність індуктивних втрат на постійному струмі може перевищити за ефективністю всі системи змінного струму. Саме тому відбувається поступове вдосконалення та еволюція підходів до електрифікації швидкісних магістралей на змінному струмі до переходу на більш якісну та досконалу систему постійного струму 24 кВ[9].

Для побудови високошвидкісних магістралей зі швидкістю руху 400 км/год найбільш перспективною є система електропостачання постійного струму 24 кВ розподіленого типу. Застосування цієї схеми, окрім указаних

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переваг, дозволить реалізувати концепцію розподіленого керування активним інтелектуальним обладнанням, яке може адаптивно змінювати характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії й оптимізувати режим функціонування системи тягового електропостачання в загальній енергосистемі держави.

2.3 Загальні схеми електропостачання на постійному струмі

Система електропостачання є складовою частиною ЕТ і до складу якої входять тягова підстанція, контактна мережа, рельсові лінії, кабельні лінії та інші елементи системи електропостачання.

Електрифікований транспорт споживає в загальному балансі країни близько 10-12% усієї вироблюваної електричної енергії, а в самій системі електропостачання ЕТ витрачають близько 10% споживаної транспортом електричної енергії.

Тому важливо вміти правильно вибрати параметри системи електропостачання, щоб забезпечити мінімум втрат електроенергії в ній. Система електропостачання ЕТ як за вимогами до неї, так і за умовами роботи відрізняється від системи електропостачання промислових підприємств.

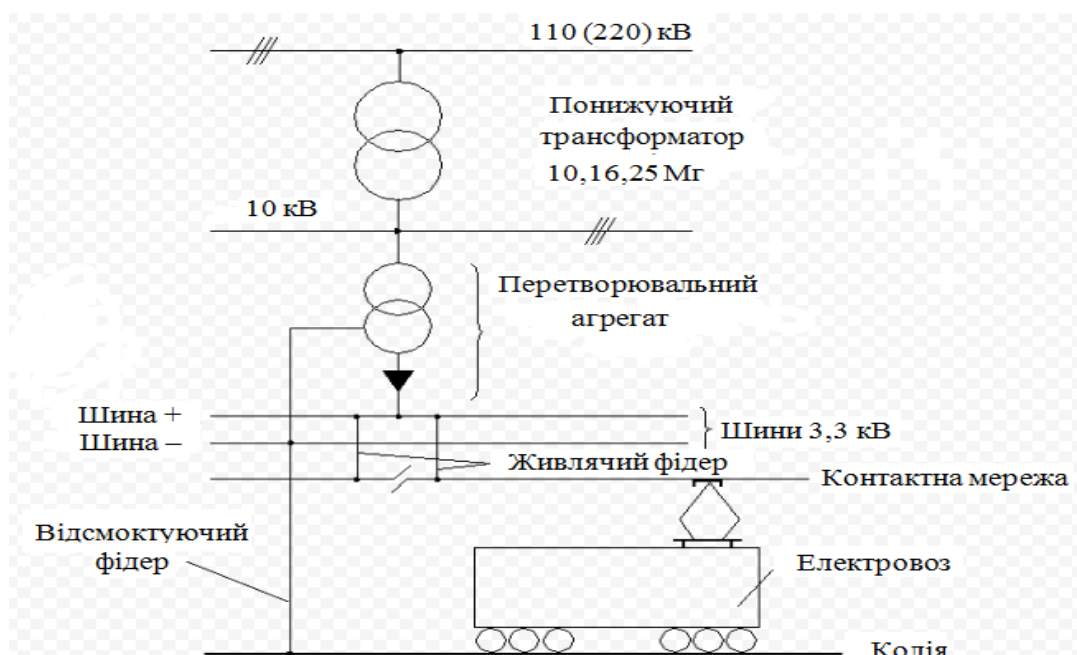


Рисунок 2.1 – Схема електропостачання на постійному струмі

2.4 Живлення контактної мережі 3,3 кВ від підсилюючого проводу напругою 6 кВ через перетворювач 6/3 кВ

В результаті проходження важкими електрорухомими складами ділянок залізниці з великими відстанями між тяговими підстанціями постійного струму або довгих консольних ділянок призводить до обмеження потужності, що розвивається локомотивами та зниження напруги в контактній мережі у струмоприймачів. Для забезпечення пропускну здатності при русі великовагових складів і забезпечення швидкісного руху потрібне збільшення потужності живлення контактної мережі за допомогою будівництва додаткових підстанцій між існуючими тяговими підстанціями. Відсутність достатньо потужної мережі змінного струму поблизу ділянки залізниці та спорудження додаткової підстанції вимагає значних капіталовкладень. Живлення контактної мережі постійного струму на ділянці між вже діючими тяговими підстанціями доцільно виконувати через перетворювач з підвищеною входною напругою, живлений по ізолюваному від контактної мережі посилюючого проводу. Такий принцип побудови системи енергопостачання консольного живлення був реалізований в 1971 році на ділянці закордонної залізниці.

В якості перетворювача використовувався автономний інвертор на тиристорах звичайного типу з трансформатором, працюючим на підвищеній частоті 800 Гц, і вихідним випрямлячем.

Застосування сучасних *IGCT* тиристорів дозволяє значно підвищити надійність перетворювача і зробити більш простою його схему. Перетворювач постійного струму підвищеної входної напруги в постійний струм напругою контактної мережі 3,3 кВ являє собою багатофазний перетворювач постійного струму, виконаний за схемою з широтно-імпульсним регулюванням напруги на накопичувальних дроселях, що дозволяє забезпечити більш високу якість електропостачання контактної мережі.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4.1 Розподільна система живлення

В значній мірі підсилити тягове електропостачання може не тільки впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподільного живлення.

Принципом будови цих систем були сформульовані проф. К. Марквардтом ще в середині минулого століття. Саме ця ідеологія має бути покладена в розробку нової системи електропостачання та використовується при побудові системи постійного струму (6 кВ)[6].

При її застосуванні живлення контактної мережі здійснюється за допомогою перетворювальних пунктів, які підключаються до поздовжньої лінії електропередачі підвищеної напруги. Економічний ефект досягається за рахунок таких факторів, як зменшення втрат енергії, зменшення перерізу проводів контактної мережі, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі та збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови систем розподіленого живлення.

Під розподільною схемою живлення контактної мережі розуміється така, при якій споживачі на найбільш навантажених зонах отримують живлення не тільки від найближчих але, і віддалених тягових підстанцій [3]. Найбільш досконалою виходить схема з одноагрегатними підстанціями (автоматичними перетворюючими пунктами) (рис. 2.2).

Перетворюючий пункт в розподіленій системі з живлячою лінією змінного струму представляє собою звичайну одноагрегатну тягову підстанцію.

Проводячи аналіз схеми розподільної системи електропостачання з живлячою лінією високої напруги (див. рис 2.2) можна виділити наступні підсистеми:

- тягова і живляча мережі;

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- рухомий потяг з електровозом постійного струму;
- перетворюючий пункт змінно-постійного струму;
- трансформаторна підстанція, яка живить поздовжню лінію.



Рисунок 2.2 – Розподілена система тягового електропостачання 3,3 кВ з високовольтною живлячою лінією

2.5 Методи підсилення системи електропостачання

Розглянемо наступний метод підсилення системи електропостачання шляхом встановлення в фідерній зоні двох вольтододаткових пристроїв, які вмикаються в розтин контактної мережі (ВДП) (рис. 2.3);

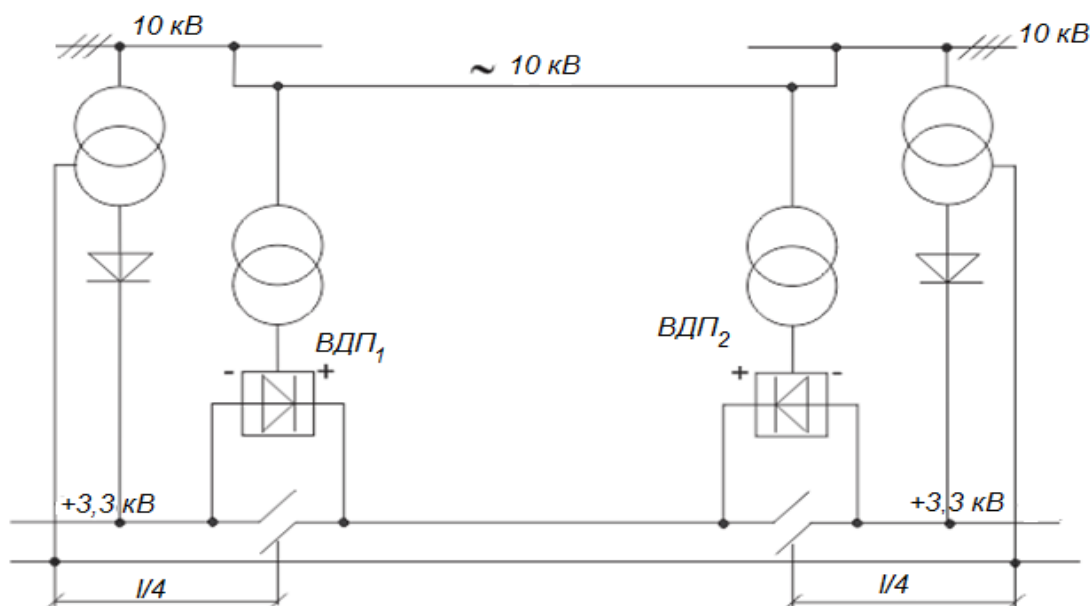


Рисунок 2.3 – Підсилення системи електропостачання за допомогою ВДП

1) спорудження двох одноагрегатних підстанцій 10 кВ з вольтододатковими пристроями на фідерах (ДП-10 + ВДП) (комбінація третього та четвертого варіантів) (рис. 2.4) [10].

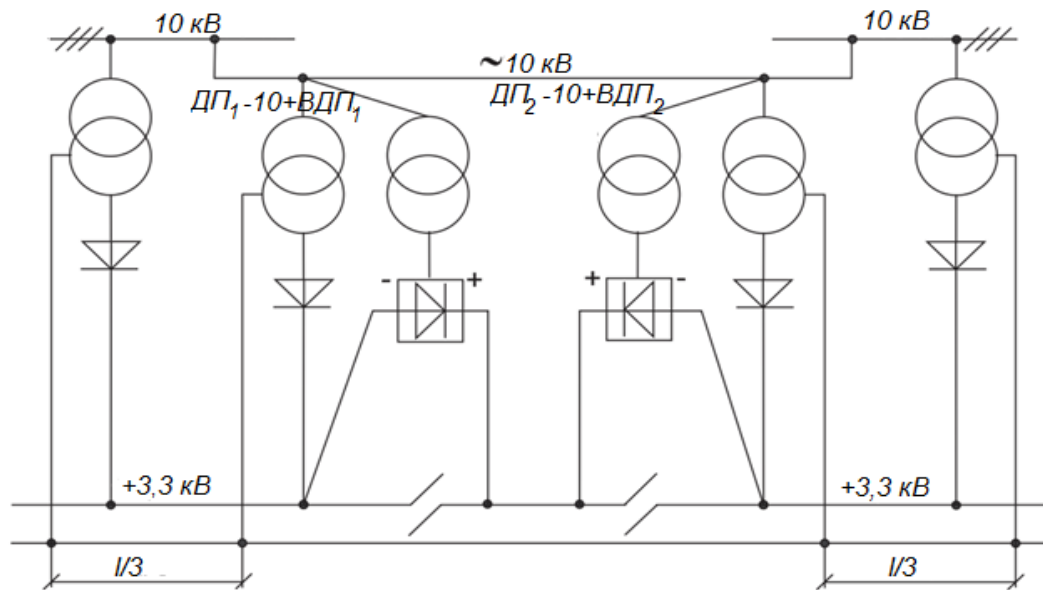
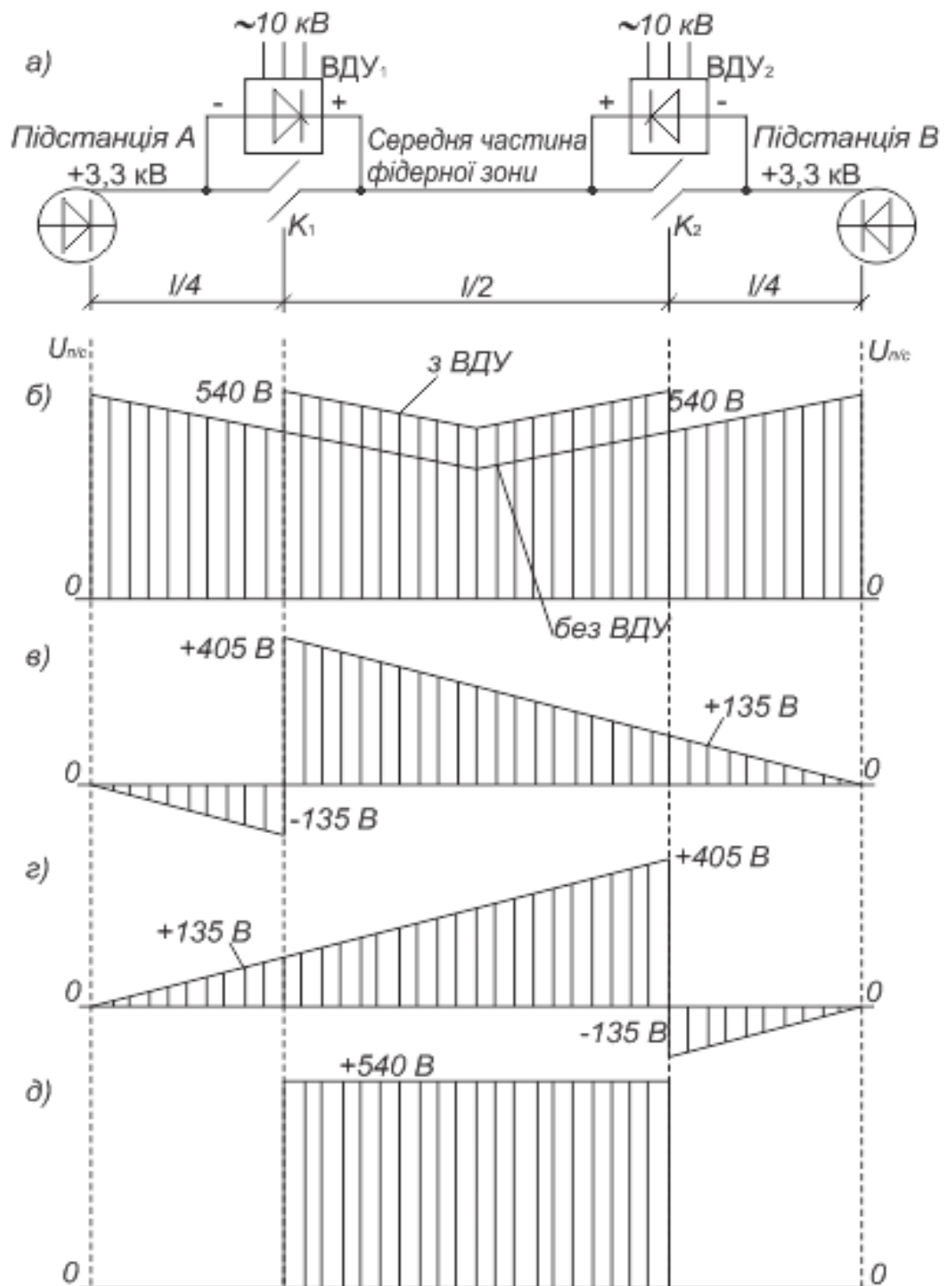


Рисунок 2.4—Підсилення системи електропостачання за допомогою
ДП-10 + ВДП

Розподіл напруги при встановленні в фідерній зоні двох вольтододаткових пристроїв представлений на рис. 2.4.



а – схема ввімкнення; б – напруга контактної мережі вздовж ділянки при одному потязі посеред зони; в – додаток напруги за допомогою ВДП₁; г – додаток напруги за допомогою ВДП₂; д – додаток напруги від двох ВДП

Рисунок 2.5 – Підвищення напруги за допомогою ВДП

Основними вимогами до методики порівняння різноманітних методів підсилення системи енергопостачання являється необхідність отримання

об'єктивної картини основних технічних показників порівнюваних варіантів. Тому, насамперед, порівняння повинно бути виконане в однакових умовах для всіх варіантів які порівнюються. В результаті електричних розрахунків отримані основні технічні показники порівнюваних варіантів, такі як: необхідна потужність пристроїв підсилення, втрати електричної енергії в пристроях електропостачання (в контактній мережі, на тягових підстанціях, в пристроях підсилення), рівень напруги в контактній мережі на струмоприймачі електрорухомого складу

Для того, щоб порівняння варіантів підсилення виконати в однакових умовах, в основу електричних розрахунків було покладено вирішення миттєвих схем розташування навантаження (потягів), одночасно для всіх варіантів підсилення. Кожна миттєва схема вирішувалась чотири рази, один раз так званим «нульовим» варіантом при існуючих параметрах пристроїв енергопостачання, тобто без пристроїв підсилення, а потім ще три рази відповідно для трьох розглядуваних варіантів підсилення.

В якості розрахункового графіку руху було розглянуто графік при інтенсивному русі потягу, тобто відповідний руху потягів з мінімальними інтервалами в обох напрямках для двоколійних ділянок і частино-пакетний графік з двох потягів в пакетах, які рухаються з мінімальним інтервалом в напрямку найбільшого струмоспоживання та одного потягу в зворотньому напрямку для одноколійних ділянок.

2.6 Система тяги постійного струму підвищеної напруги

Збільшення електричних навантажень в системі тягового електропостачання, викликаний збільшенням обсягів виконуваної роботи, видів системи тягового електропостачання постійного струму на граничні режими роботи, що не задовольняють при цьому необхідних розмірів руху.

У зв'язку з цим стали більш інтенсивно досліджуватися альтернативні системи тяги, крім систем з рівнем напруги в контактній мережі від 6 до 24 кВ. Ці системи вимагають застосування принципово нового електрорухомого

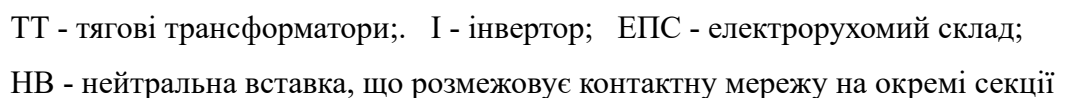
					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

складу, що має на борту керований перетворювач, що здійснює пониження напруги контактної мережі до рівня 1500 В.

Одним з альтернативних рішень є трьохпровідна система Т.П. Третяка. Суть її полягає в тому, що рівень напруги в контактній мережі постійного струму зберігається колишнім, що дозволяє і надалі використовувати колишній електрорухомий склад, але значна частина електроенергії подається до нього підвищеною напругою постійного струму 6 кВ за допомогою додаткового проводу, підвішеного з польового боку. Перетворення енергії постійного струму підвищеної напруги в енергію постійного струму 3 кВ здійснюється перетворювачами, розміщеними вздовж електричного залізничного полотна. Схема такої системи наведена на рис. 2.6 .

В даний час одним з перспективніших вважається тяговий привід на асинхронних електродвигунах, переваги яких не одноразово були підтверджені досвідом їх використання на залізницях Європи. Цьому сприяють успіхи у створенні замикаючих тиристорів (*GTO* і *IGCT*) і біполярних транзисторів з ізольованим затвором (*IGBT*) на робочу напругу 6 кВ, що використовуються компаніями *Siemens*, *Adtranz* та іншими.

Система електричної тяги постійного струму 15 кВ була запропонована в США близько чотири десяти років тому. В Італії розроблені системи тяги постійного струму 12 кВ, виконано порівняння систем тяги постійного струму 12 кВ і змінного 25 кВ, 50 Гц в цілому за капітальними витратами і доведено, що для системи постійного струму вони менше.



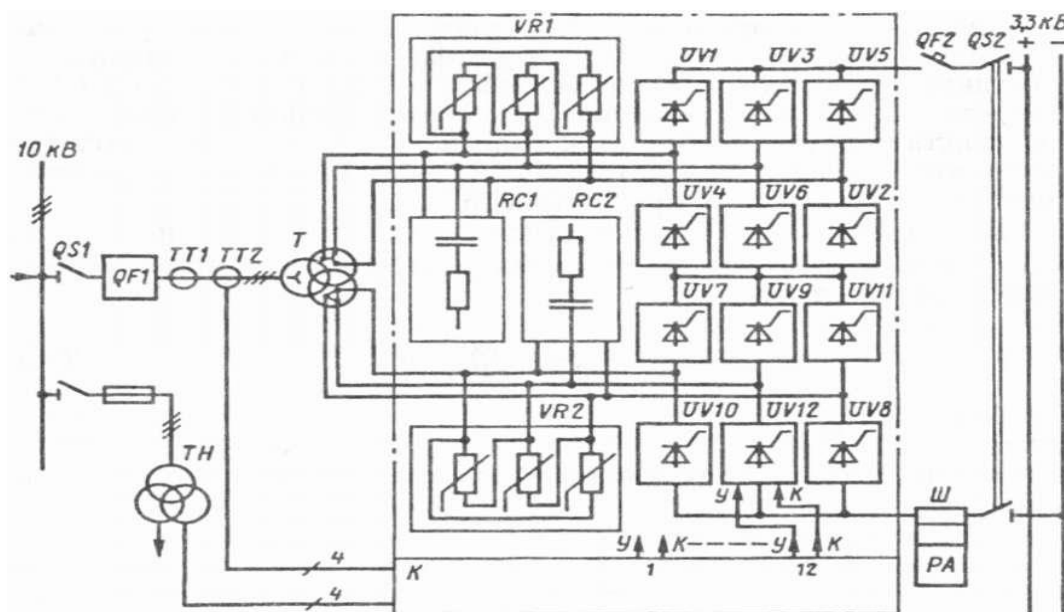
Сутність системи полягає в тому, що до двигуна енергія за допомогою тиристорів подається не безперервно, а порціями (імпульсами). Залежно від тривалості імпульсу і їх частоти середня напруга на двигуні буде змінюватися. Таке регулювання здійснюється за допомогою керованого теристора.

Система електричної тяги постійного струму підвищеної напруги знімає традиційні для системи змінного струму проблеми: знижений коефіцієнт потужності, асиметрію первинної мережевої напруги і присутність

вищих гармонік.[9].

2.7 Отримання напруги 6 кВ постійного струму

Для того щоб отримати напругу 6 кВ постійного струму можна використовувати вже існуючі тягові перетворювачі 3 кВ з'єднавши два агрегати послідовно. Одним із варіантів застосування тягових агрегатів в керованому випрямлячі В-ТПП-2,4к-4к-3/12-УЗ (рис. 2.7), розробленому в 1991 р. заводом "Електротехніка" на основі уніфікованих тиристорних секцій СТП з повітряним охолодженням і послідовним з'єднанням двох трифазних мостів, в секціях використовуються потужні таблеткові тиристири з тепловідводами на основі теплових труб. За допомогою мікропроцесорного програмованого контролера виконувалось керування тиристорами, що забезпечує контроль і захист тиристорної секції.



$QS1, QS2$ - роз'єднувачі; $QF1, QF2$ - високовольтні вимикачі; $TT1, TT2$ - трансформатори струму; TH - трансформатор напруги; T - перетворювальний трансформатор; $VR1, VR2$ - варисторні обмежувачі атмосферних перенапруг; $RC1-RC2$ - RC - кола для захисту від комутаційних перенапруг; $UV1-UV12$ - тиристорні плечі; K - контролер управління тиристорами.

Рисунок 2.7 – Схема дванадцятипульсового керованого випрямляча В-ТПП-2Б4к-4к-3/12-УЗ:

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3 МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ

3.1 Схема імпульсного перетворювача постійного струму

Перетворювач складається з наступних елементів: три діодних ключа, шість *IGCT*-тиристорних ключів, три накопичувальних дроселя і фільтрове обладнання. А сам перетворювач виконано за безтрансформаторною схемою Спрощена принципова схема представлена на рис.3.1.

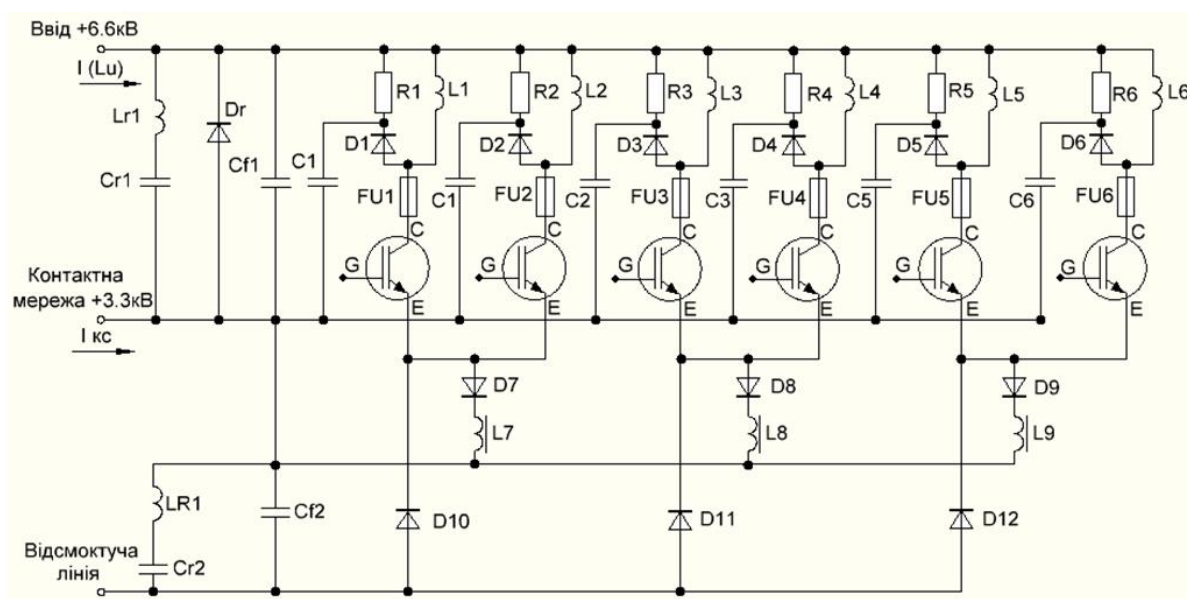


Рисунок 3.1 - Схема імпульсного перетворювача постійного струму

Для того щоб забезпечити мінімальні масогабаритні показники дросельного обладнання та теплового режиму напівпровідникових приладів була вибрана тактова частота роботи перетворювача яка становить 1000 Гц. Це означає що кожен з тиристорних ключів працює на частоті 167 Гц, така частота роботи в свою чергу дозволяє забезпечити охолодження силових приладів за допомогою радіаторів на теплових трубах з примусовим повітряним охолодженням. Використання регулятора крім того що він стабілізує вихідну напругу також дозволяє забезпечити обмеження вихідного струму при можливих перевантаженнях, а також забезпечує функції захисту в різних нештатних ситуаціях. При відмові одного або декількох каналів з відповідним зниженням вихідної потужності виконання перетворювача по

шестиканальній схемі забезпечує збереження його працездатності. Допустимий рівень психофотометричної напруги в контактній мережі забезпечується застосуванням аперіодичних та резонансних фільтрів.

Розрахунковий спектр гармонійного складу напруги контактної мережі для ділянки при постійної складової $U = 2720$ В наведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 - Розрахунковий спектр гармонійного складу напруги контактної мережі

Частота гармоніки, Гц	Амплітуда гармоніки, В
360	1,185
1000	1,210
2000	0,157
3000	0,970
4100	2,730
5100	2,266
6100	1,330
7100	0,967
8100	0,824
9100	0,481
10100	0,550

Розрахунок зроблений за таких умов:

- тактова частота перетворювача 1000 Гц;
- частота пульсацій вихідного струму перетворювача 1000 Гц;
- навантаження з еквівалентним опором 1 Ом знаходиться на відстані 10 км від перетворювального пункту;
- на виході перетворювача включений дросель 20 мкГн;
- паралельно контактної мережі включені три послідовних резонансних контури, налаштовані на частоти 1000, 2000 і 3000 Гц.

Електронний захист перетворювального устаткування з управління

IGCT-тиристорів побудовано з використанням широкосмугових вимірювальних датчиків струму в кожному з шести каналів. Короткі замикання які можуть виникати в високовольному обладнанні відключаються спеціальними швидкодіючими запобіжниками, які підключаються послідовно з кожним з силових тиристорних ключів. Зникнення вхідної напруги може призвести до появи неприпустимих напружень зворотного знаку на *IGCT*-тиристорах[4]. Для того щоб блокувати зворотню напругу використовуються шунтуючі діоди, що з'єднують контактну мережу 3,3 кВ із вхідними мережею підвищеної напруги. При коротких замиканнях на виході перетворювача відключається швидкодіючий вимикач і одночасно блокуються імпульси управління *IGCT*-тиристорами. При внутрішніх коротких замиканнях імпульси управління також блокуються і одночасно видається команда на вимикання живлення вхідної мережі. Для цієї ж мети послідовно з кожним з *IGCT*-тиристорів включений швидкодіючий запобіжник. Для підвищення швидкодії зняття шкідливого впливу перевантажень з напівпровідникових приладів використовується швидкодіючий короткозамикач, що з'єднує вхідну мережу з тяговим рейкою. Він включається по команді електронних захистів мікроконтролера. При цьому одночасно на тягову рейку замикається і контактна мережа 3,3 кВ через шунтуючі діоди. Перевантаження приладів у всіх аварійних ситуаціях при цьому легко блокуються електронним управлінням тиристорів. Розрахункові тимчасові діаграми електромагнітних процесів в перетворювачі представлені на рис.3.2 ... 3.6. [12].

Позначення кривих на діаграмах відповідають принциповій схемі (див. Рис.3.1).

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

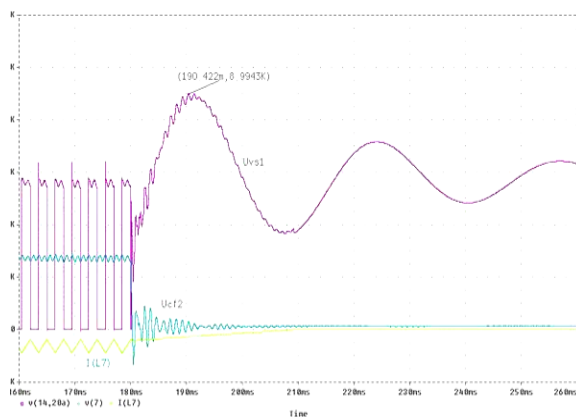


Рисунок 3.2 - Коротке замикання на виході перетворювача

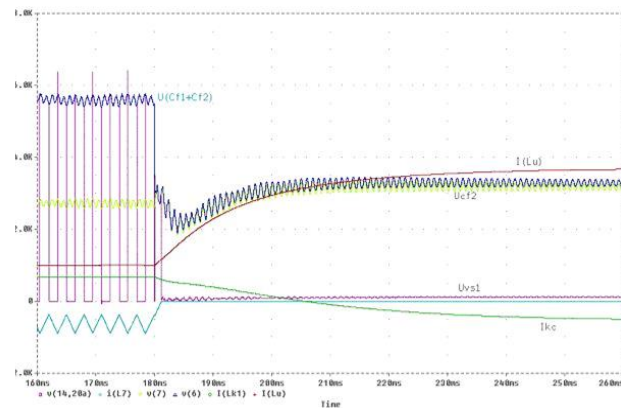


Рисунок 3.3 - Пробій конденсаторної батареї C_{f1}

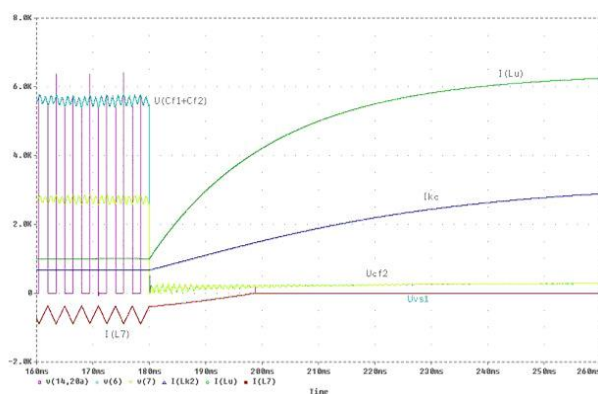


Рисунок 3.4 - Пробій конденсаторної батареї C_{f1} на землю VS1 при наростанні струму до рівня 4кА

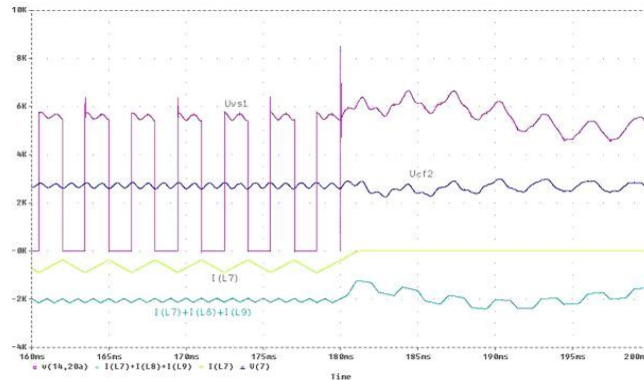


Рисунок 3.5 - Пробій діода D10 в момент включення VS1 і відключення V

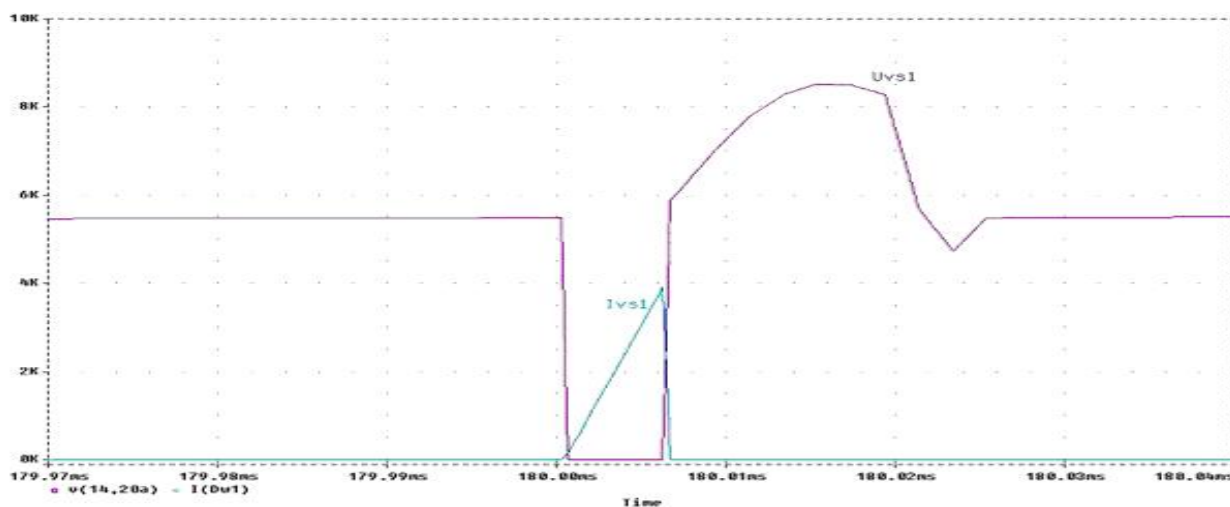


Рисунок 3.6 - Пробій діода D10 управління VS4 блокується

З даних осцилограм можна побачити, що максимальне значення

прямої напруги на тиристорному ключі не перевищує 9 кВ, зворотна напруга відсутня. Перевантаження по струму при штатному функціонуванні електронного захисту також відсутні. Виходячи з цього, результати розрахунків дозволяють нам зробити висновок, що перетворювач зберігає працездатність після аварійних відключень[12].

При розробці конструкції перетворювача використовувався досвід створення *IGCT*-тиристорного інвертора для частотного - регульованого електроприводу з вихідною напругою 6 кВ і потужністю 5 МВт. Фотографія такого перетворювача представлена на рис. 3.7

При побудові перетворювача використовують повітряні канали для охолодження напівпровідникових приладів. Конденсаторні батареї і шинні з'єднання між приладами виконані з мінімізацією індуктивностей контурів струмових ланцюгів при комутації таке виконання допомагає знизити перенапруги на напівпровідникових приладах. Для зниження перенапруг при комутації використовується також і високочастотний *LRD*-контур, виконаний відповідно до рекомендацій розробників *IGCT*-тиристорів. Загальний вид планування перетворювача, розміщеного в термостатовому модулі, наведено на рис.3.8

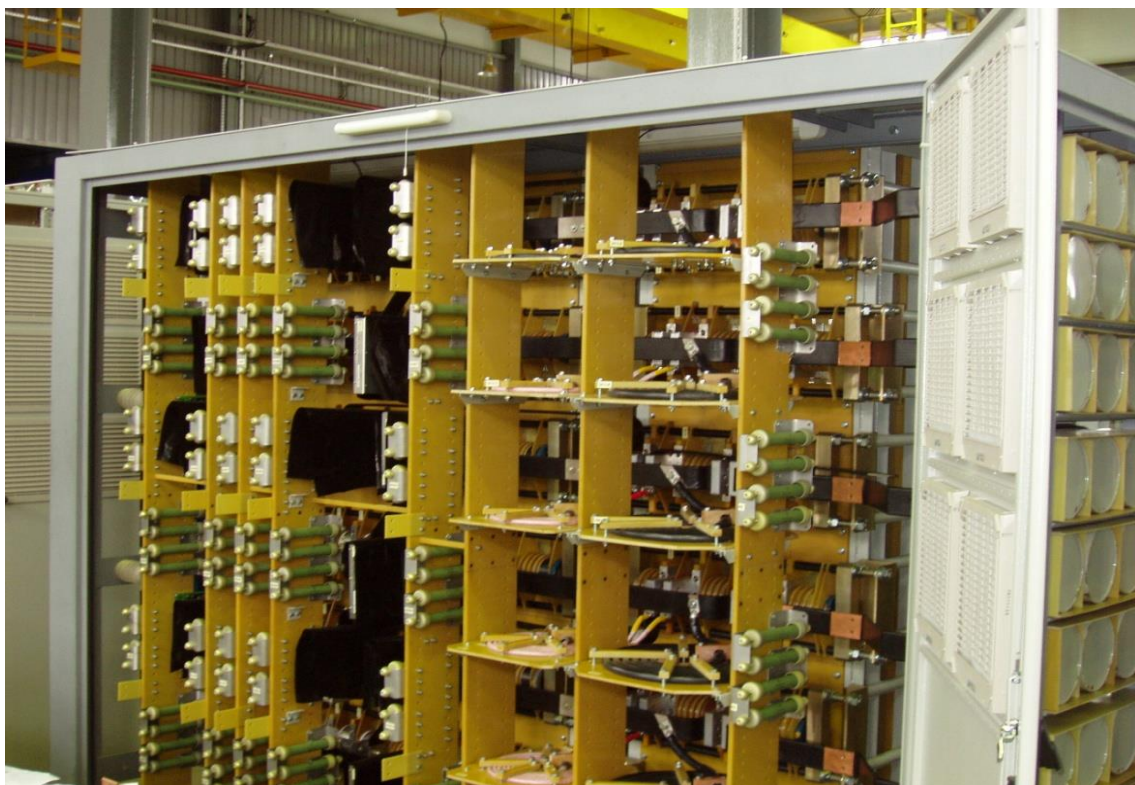


Рисунок 3.7 - Конструкція перетворювача на IGCT - тиристорах

Виходячи з розрахунку можна побачити, що застосування перетворювача і живлення його від підвищеної напруги по підсилюючому проводу ефективно за умови що відстань між сусідніми тяговими підстанціями не буде перевищувати 35...40 км.[12].

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

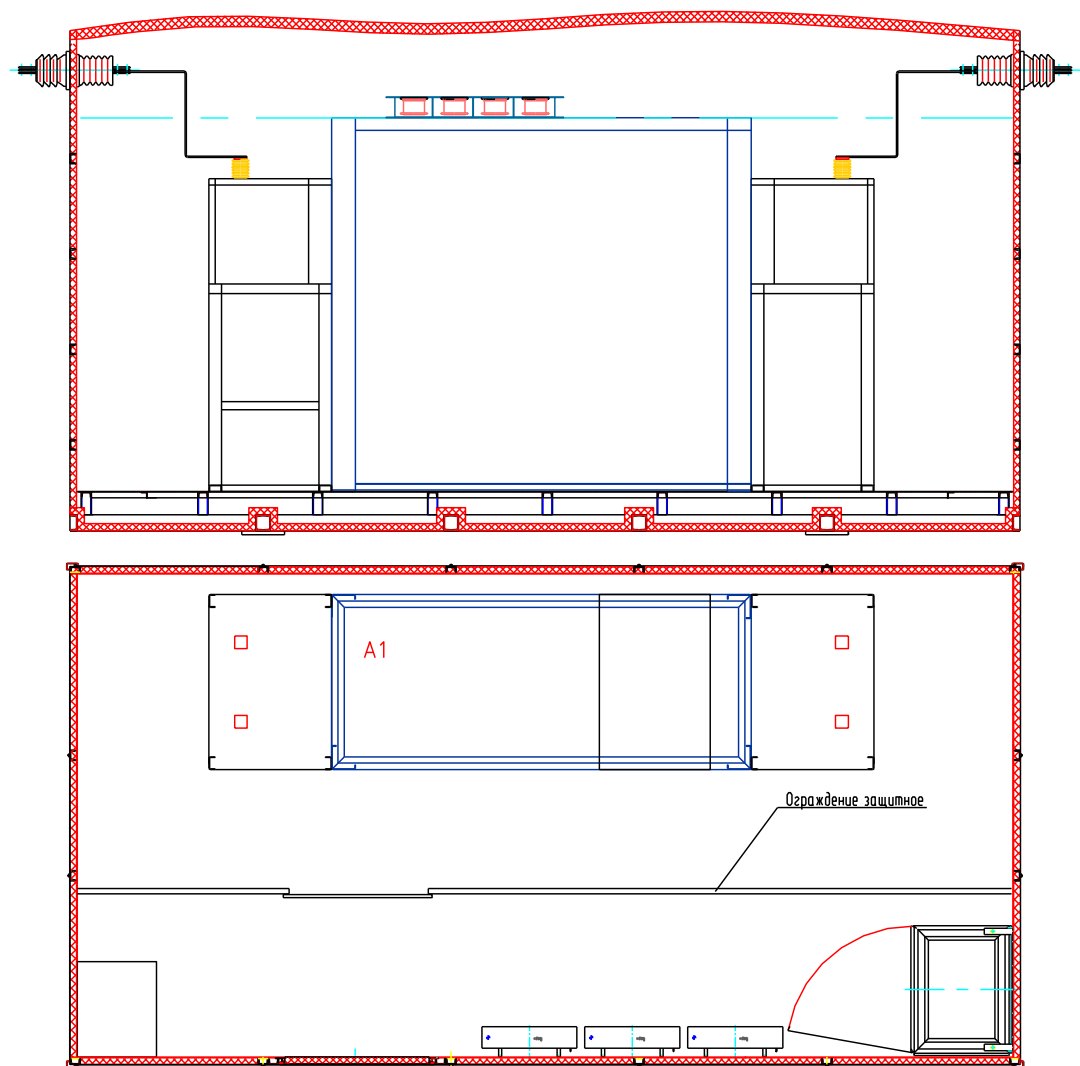


Рисунок 3.8 - Перетворювальний пункт в термостатовому модулі

3.2 Перетворювачі на транзисторах IGBT.

Раніше більшість спеціалістів вважали що транзистори *MOSFET* майже ідеальними приладами для того щоб використовувати даний пристрій у виробках силовій електроніки. Зараз буде актуально повторити одне суттєве застереження, яке ми уже відмітили вище: справедливість слів про ідеальність транзисторів *MOSFET* не викликає сумнівів, але за умови що робоча напруга силових ланцюгів перетворювачів не перевищує 250..300 (максимум – 400 В). При подальшому підвищенні робочої напруги необхідно буде обирати транзистори з більш високою величиною напруги «стік-витік», а це в свою чергу означає, що нам буде важко знайти в номенклатурі

серійного виробу такий прилад, який при високих допустимих напругах «стік-витік» матиме низький опір каналу у відкритому стані, і, відповідно, високий струм стоку. Максимальна величина допустимого напруги «стік-витік» більшості серійних транзисторів *MOSFET* сьогодні складає близько 800 В, але опір каналу у відкритому стані у них вимірюється вже одиницями Ом. Справедливості заради відзначимо, що іноді все-таки можна зустріти прилади з допустимою напругою «стік-витік» порядку 1000 .. 1200 В, але це – знову ж таки «штучний товар», не знаходить практичного застосування, а тому потихеньку зникаючий з ринку силових напівпровідників.

З'ясовується, на етапі виготовлення транзистора можливо об'єднати переваги біполярних приладів, як велика допустима величина напруги «колектор-емітер», і польових транзисторів – як мінімальні витрати енергії на управління. Об'єднання цих надзвичайно корисних властивостей відбувається завдяки спеціально розробленим технологічним прийомам, в результаті чого виходить біполярний транзистор з ізолюваним затвором. Лідируючи світові фірми розробили дуже багато технологічних прийомів отримання таких транзисторів, з різними внутрішніми структурами, проте на сьогоднішній день найбільшого поширення набули комбіновані транзистори епітаксильної структури *PT* і однорідної структури *NPT*. Сьогодні дані транзистори об'єднані загальним найменуванням *IGBT* (*insulatedgatebipolartransistor*) (рис. 3.9). Саме в структурі типу *IGBT* найбільш вдалим чином вдалося поєднати позитивні властивості чистих польових і біполярних приладів, що працюють у ключовому режимі.

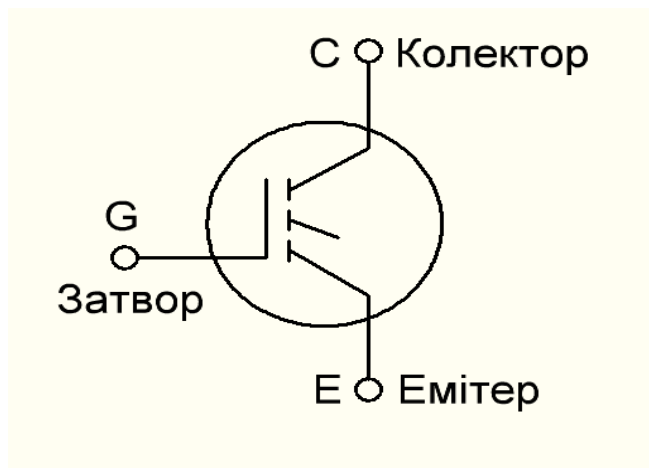


Рисунок 3.9 - Позначення транзистора *IGBT*

Давайте згадаємо, що на етапі виробництва польових транзисторів *MOSFET* в їх структурі обов'язково з'являється паразитний біполярний транзистор, який на практиці не має сенсу використовувати, тому що він часто просто погіршує позитивні динамічні властивості польового транзистора. Проведені дослідження показали, що можна додати до структури транзистора кілька нових елементів, завдяки яким він перетвориться в зовсім новий прилад зі своїми унікальними властивостями, а паразитний елемент як би зникне у внутрішній структурі і не матиме впливу на динамічні процеси, що протікають в силовому ланцюзі. На рис. 3.13 умовно показано внутрішній устрій *IGBT* транзистора, причому на рис. 3.13, а приведені всі «технологічні» елементи, що з'являються на етапі виготовлення[6]. Тут ми бачимо знайомий нам вхідний транзистор типу *MOSFET* *VT1*, ланцюг «стік-витік» якого зашунтувати паразитним біполярним р-п-р - транзистором *VT3* з резистором R_b в його власній ланцюга «база-емітер». Нові елементи – біполярний транзистор структури *nprn* *VT2* і польовий транзистор з керуючим р-п-переходом *VT4* останній транзистор виконує роль динамічного опору, який зменшується у включеному стані і пропускає струм через базову область транзистора *VT2*.

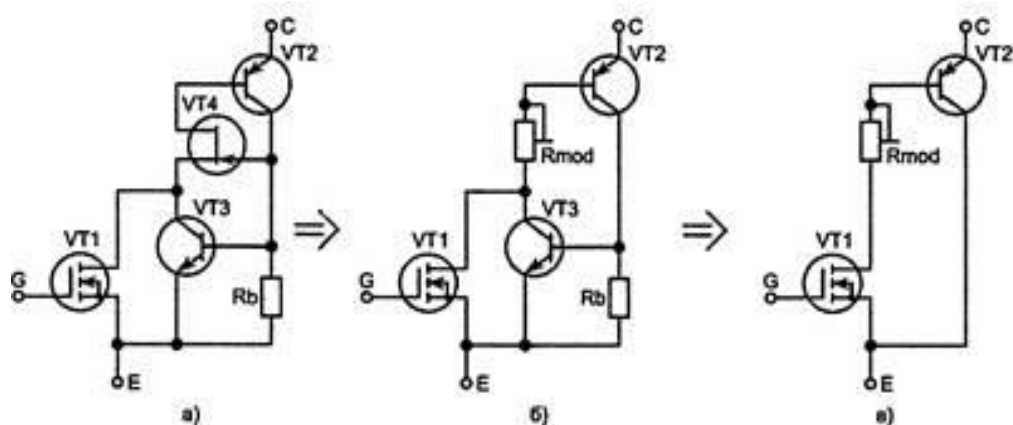


Рисунок 3.10 Спрощена еквівалентна схема IGBT транзистора

Перший крок до спрощення еквівалентної схеми IGBT транзистора зроблений на рис. 3.10, де транзистор VT4 замінений умовним резистором зі змінним опором R_{mod} . Тепер, глянувши на схему, можна побачити, що утворилася структура з біполярних транзисторів VT2 і VT3 може мати позитивний зворотний зв'язок, тому що струм колектора VT2 найбезпосереднішим чином впливає на струм бази VT3, і навпаки взагалі дана структура сильно нагадує 4-х шарову тиристорну структуру, а значить, можлива поява неприємного ефекту замикання цієї р-п-р-п - структури, що часто спостерігалось в перших зразках IGBT приладів до чого може привести замикання, довго пояснювати не потрібно – транзистор втрачає управління у відкритому стані, і силова схема може просто вийти з ладу.[4]

Дослідженню ефекту замикання 4-х шарових структур IGBT транзисторів було присвячено безліч наукових робіт, і сьогодні цей вельми неприємний ефект, завдяки розвитку технологій виробництва, можна вважати що пішли в історію даних приладів Виробники навчилися з ним успішно боротися, керуючи величиною R_b і R_{mod} , а також коефіцієнтами посилення VT2 і VT3 на стадії виготовлення дослідження також показали, що стійкість 4-х шарових структур до замикання знижується при збільшенні швидкості зміни напруги «Колетор-емітер» в одиницю часу, тобто замикання проявляється в моменти комутації ключів в силовій схемі, а значить, можна вжити заходів з обмеження швидкості наростання струмів додамо, що провідні світові фірми-виробники транзисторів IGBT («International Rectifier»,

«IXYS», «Motorola», «Intersil», «Semikron», «Mitsubishi», «Eupec», «Dynex» тощо) гарантують відсутність «замикання» біполярних структур, тому в їх технічній документації часто наводиться спрощена еквівалентна схема IGBT приладів.

На рис. 3.11 представлений розріз внутрішньої структури типового IGBT приладу біполярний транзистор утворюється тут шарами p^+ (Емітер), n (база), p (колектор), а польовий транзистор – шарами напівпровідника n (витік), n^+ (Стік) і металевою пластиною (затвор). Напівпровідникові шари p^+ і p мають зовнішні висновки, за допомогою яких транзистор підключається до електронній схеми.

Для розробки статичних перетворювачів електроенергії на основі транзисторів IGBT немає необхідності детально знайомитися з параметрами складових елементів напівпровідникового приладу. Досить уявити IGBT прилад у вигляді звичайного трьохелектродної елементу, що має типові параметри та характеристики, які можна отримати з технічної документації конкретного типомінала. Саме тому ми більш не зупинятимемося на розгляді різних внутрішніх структур IGBT приладів.

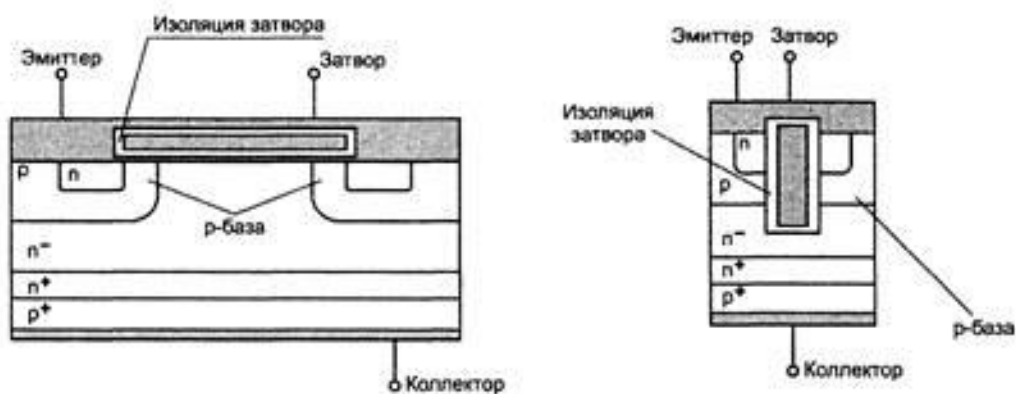


Рисунок 3.11 Внутрішня структура IGBT транзистора

Обмеження швидкості перемикання біполярних транзисторів з ізольованим затвором, як і простих біполярних транзисторів, визначається кінцевим часом життя неосновних носіїв в їх базових областях[5]. Якщо включення

транзисторів відбувається досить швидко, то необхідність виділення деякого часу на розсмоктування неосновних носіїв у базовій області уповільнює процес відновлення їх непровідного стану (виключення) для *IGBT*, процес виключення якого в цілому схожий на аналогічний процес для транзистора типу *MOSFET*, значна затримка вимкнення пов'язана з так званим «струмовим хвостом», коли залишковий струм колектора продовжує здійснювати коливальні рухи, наближаючись до нульового значення. Причина «токового хвоста» криється в накопиченні заряду базовою областю і його поступовому розсмоктуванні при остаточному переході внутрішнього *MOSFET* в режим відсічення. Чим небезпечний «струмовий хвіст» тим, що він веде до збільшення теплових втрат і вимагає збільшення так званого «мертвого часу» для полумостових і мостових силових схем в проміжках між фазами провідності ключових елементів.

Фірми - виробники елементної бази зробили дуже багато зусиль для оптимізації процесів розсмоктування неосновних носіїв у базовій області *IGBT* приладів, однак це завдання виявилось настільки суперечливою ідеєю зважаючи на діючі фактори, що вирішувати її довелося комплексно, тобто не тільки покращувати технологію виробництва, а й застосовувати схемотехнічні хитрощі. Звичайно, виробники елементної бази могли б залишити розробникам перетворювальної техніки можливість управління процесами розсмоктування неосновних носіїв, якби вивели назовні базу внутрішнього біполярного транзистора *VT2*. Але цей шлях знизив би споживчі якості транзисторів: надто складно тоді б застосовувати їх у конкретних схемах до того ж, як виявилось, виграш від такого рішення не настільки значний, тому цей базовий висновок традиційно роблять недоступним ззовні. Крім цього, вдалося виробити особливі технологічні прийоми, що дозволяють прискорити процес рекомбінації носіїв базової області, серед яких – зниження коефіцієнта посилення транзистора *VT2*.

					02.15.EC2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На жаль, в процесі оптимізації переключаючих властивостей *IGBT* приладів виникло ще одне істотне протиріччя: зниження коефіцієнта посилення значною мірою зменшує «струмовий хвіст», але збільшує напруга насичення відкритого транзистора, а значить, і статичні втрати у відкритому стані (втрати провідності). Збільшення коефіцієнта посилення, навпаки, знижує напругу насичення, але призводить до зростання «токового хвоста», а значить, і до зростання втрат перемикачів (динамічних втрат). Надмірне ж збільшення коефіцієнта може привести до різкого підвищення ймовірності виникнення замикачів. До деякої міри з небезпечним ефектом вдається боротися, варіюючи опору R_b і R_{mod} . Але перелічені проблеми цікавлять тільки виробників, а розробникам перетворювальної техніки важливі тільки результати їх вирішення.

На першому етапі впровадження ці елементи силової електроніки застосовували в схемах перетворювачів, які живлять допоміжні пристрої тягового пересувного складу. Надалі їх стали застосовувати для тягових перетворювачів легких, а потім і важких моторно-вагонних приміських поїздів, на електропоїздах міських залізниць і, нарешті, на електровозах великої потужності[8].

3.3 Технологія GTO

GTO є тиристором у якого погано розвинута структура керуючого електрода (затвора). Для того щоб увімкнути тиристор від блоку управління на затвор подається струм управління величиною в кілька ампер. Для замикачів *GTO* через контакт затвора необхідно пропустити значний струм, що досягає 20% розривного (анодного) струму. Після завершення рекомбінації носіїв заряду затвор стає з більшим опором, і схема управління тиристором підтримує на ньому напругу близько -15 В для забезпечення надійного замикачів.

Підтвердженням запертого стану тиристора для схеми управління являється високий опір ланцюга затвор - катод. Сигнали управління і

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролю передаються по двох волоконно-оптичним кабелям. Потужність блоку управління, приблизно 30 Вт для одного тиристора забезпечується загальним для всіх *GTO* блоком живлення з вихідною напругою ± 48 В, частотою 16 кГц, які мають криву прямокутну форму. У схемі блоку управління забезпечується поділ потенціалів. Для його підтвердження проводиться періодичний контроль з використанням випробувальної напруги 11 кВ.

Стандартні тиристори *GTO* з комутаційною напругою 4500 В, розраховані на прямий струм 3000 або 4000 А, та виконуються на базі кремнієвого кристалла діаметром 75 або 85 мм та контактної системи. Діаметр корпусу тиристора становить 108 або 120 мм. Для того щоб забезпечити гарний електричний та термічний контакт використовують силу притиснення між радіатором і корпусом близько 4 т.

Частіше за все таблеткові тиристори та допоміжні силові діоди разом з радіаторами в одну систему пристроєм, що забезпечує зазначену силу притиснення. Спиральні радіатори охолоджують в маслі або поліефірі. Також не виключено використання охолодження з використанням металевих радіаторів, що мають водяну сорочку, де циркулює деіонізована вода. Для того, щоб можна було застосовувати охолодження.

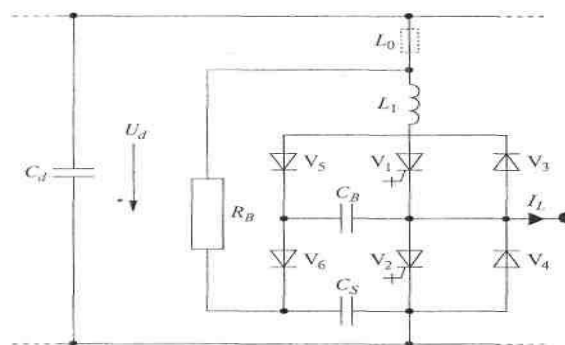


Рисунок 3.12 - Фаза перетворювача на тиристорах *GTO* з демпферної схемою Марквардта – Ундерланда

Швидкість наростання струму при включенні обмежується величиною

500 А/мкс за допомогою згладжуючи дроселів. При розмиканні ланцюга виникають стрибки напруги, які знижуються з допомогою безіндуктивної конденсаторної батареї до величини 500 В/мкс, щоб дати можливість тиристорі *GTO* повністю перейти в замкнений стан. Швидкодіючі тиристори (*FGTO*) допускають більш швидке вимкнення, тому для них використовується конденсаторна батарея меншої ємності. Обмежують дросели і конденсатори є елементами демпферного ланцюга.

Постійна часу демпферної ланки, забезпечує стійку комутацію тиристорів *GTO*, повинна бути в межах 50 - 200 мкс. Оскільки пробивна напруга *GTO* зі збільшенням температури знижується, то використання схеми з паралельно включеними тиристорами було б не логічно, так як вона є термічно нестабільною. У зв'язку з цим тиристори, які застосовуються в тягових перетворювачах, не слід з'єднувати ні паралельно, ні послідовно[3].

В аварійних ситуаціях, коли обидва *GTO* однієї фази виявляються відкритими, струм зростає настільки швидко і до таких значень, що спроба розриву ланцюга може призвести до руйнування тиристорів. Концепція захисту перетворювачів на тиристорах заснована на тому, що в аналогічній ситуації решта тиристори регулюються таким чином, що забезпечують контролююче гасіння надлишків енергії, запасеної в проміжковій ланці постійної напруги

При виникненні пробою однієї фази для захисту перетворювача пропонувалися також такі схеми захисту, які не вимагають перекладу решти тиристорів в режим регульованого гасіння енергії. Вони спрацюють на відключення перетворювача, однак вони не можуть працювати без наявності схеми обмеження миттєвого значення напруги (*MUB*)

3.4 Технологія IGBT

IGBT транзистори представляють собою електронні прилади, управляючі величиною електричного поля, що діє між ізольованим затвором і емітером. Для того щоб його регулювати потрібно невеликий струм, який

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє заряджати або розряджати ємність затвора.

Для *IGBT* не потрібні демпферні ланцюга, з іншого боку доводиться враховувати комутаційні втрати, які виникають при одночасній зміні напруження і викликаного струму. Час перемикання потужного транзистора *IGBT* становить 1-2 мкс. Завдяки цьому схема тягових перетворювачів значно спрощується в порівнянні з системою на замикаючих тиристорах. Також є і виключення, кілька розробок, в яких використані *IGBT* в поєднанні з найпростішими демпферними ланцюгами.

Падіння напруги на відкритому транзисторі *IGBT* при протіканні повного струму становить 4 В. Це дещо більше, ніж на тиристорах ОТО.

Тим не менш, незважаючи на більш високотактову частоту, втрати у всьому діапазоні від холостого ходу до максимального струму у перетворювачів на *IGBT* нижче, ніж у перетворювачів на *GTO*, так як у них відсутні пропорційні навантаженні втрати в демпферних ланцюгах.

В разі виникнення струмового перевантаження транзистора *IGBT* зниження напруги на ньому може значно перевищити 4В. В результаті чого може бути зруйновано напівпровідникову структуру під дією збільшеної потужності втрат. Для того щоб захистити *IGBT* від перевантажень використовується блок *GDU*, який контролює величину струму в ланцюг з емітер-колектор і в критичній ситуації дає команду на замикання. Таким чином, в *IGBT* використовується принцип захисту, зворотній тому який використовується в перетворювачах на тиристорах *GTO*, де при перевантаженні відбувається повне відмикання всіх тиристорів.

Для захисту *IGBT* від перенапруг використовуються навантажуючі резистори, які вмикаються в його ланцюг.

Якщо транзистори *IGBT* включаються паралельно схема залишається термічно стабільною. Таке включення використовується при особливо високих потужностях.

У конструкції перетворювачів на *IGBT* використовується модульний

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

принцип. При використанні такого принципу не потрібно об'єднувати вентиля стужкою, як у випадку таблеткових тиристорів. Транзистори володіють достатньою ізоляцією, в тому числі і відносно системи охолодження. *IGBT*-модулі класів напруги 1700 В (полегшення поїзда місцевого сполучення з напругою мережі 750 В), 3300 В (важкі приміські поїзди, напруга контактної мережі до 1500 В) і 6500 В (потужний магістральний рухомий склад на напругу до 3, 3 кВ) відповідають європейським стандартам. Компанія *Bombardier* випускає модулі IPM класу 4500В (напруга проміжної ланки 2,8кВ) з інтегрованим водяним охолодженням і приладом захисту *GDU*. В середині модуля напівпровідникові кристали включені паралельно за допомогою з'єднувачів із спеціальної легованого дроту.

Блок захисту *GDU* змонтований під потенціалом емітера. Він забезпечений блоком живлення потужністю 10 Вт, підключеним з поділом потенціалів.

Для захисту *IGBT* від перевантажень *GDU* в неперервному режимі контролює величину напруження емітер - колектор. Блок управляє процесами включення і виключення транзистора, а також його захисним замиканням. *GDU* надзвичайно важливий для забезпечення надійної роботи перетворювача. Розробляється програмований блок *GDU*, параметри якого можуть бути легко узгоджені з *IGBT* різних типів.

Блок *GDU* має значно менші розміри в порівнянні з блоком *GO* перетворювача на замикаючих тиристорах.

3.5 Схема заміщення ділянки тягової мережі після впровадження системи 6/3 кВ на ділянці П'ятихатки - Залізнякове

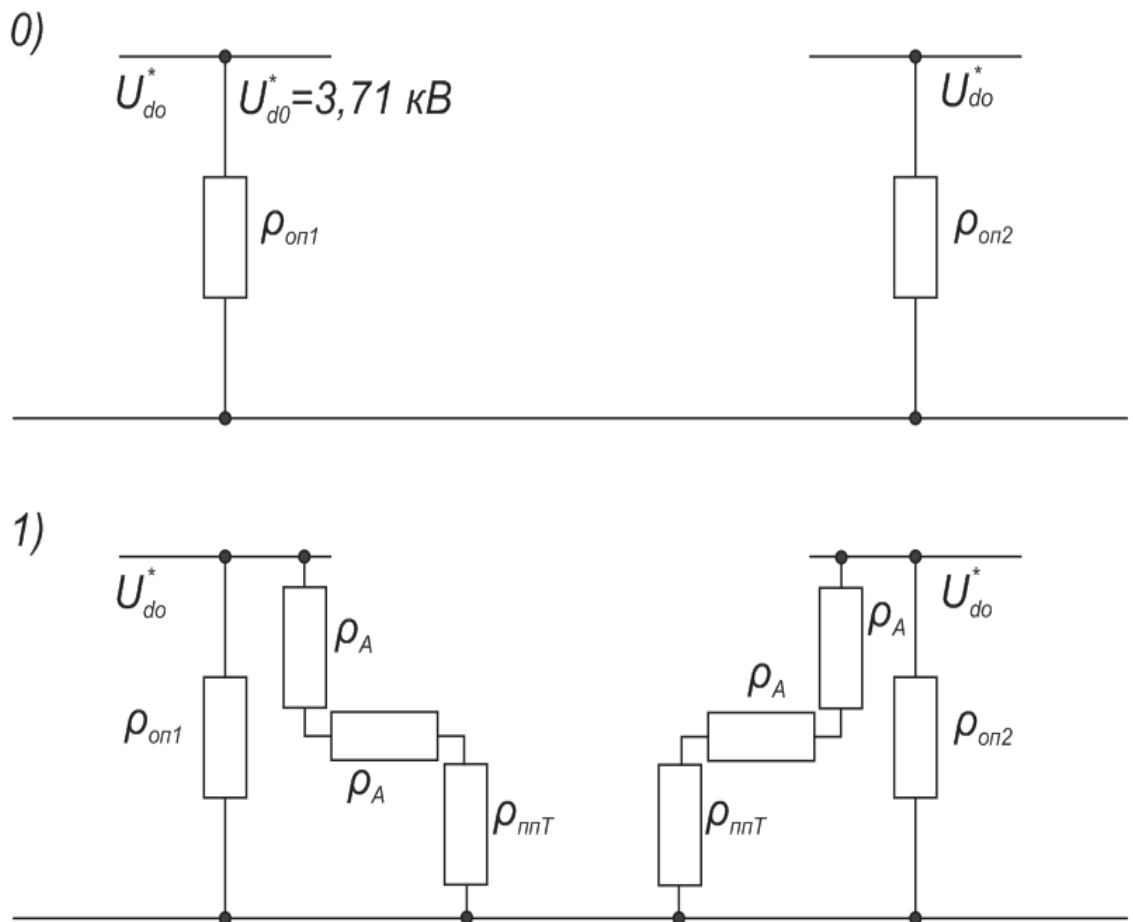
Всі необхідні для електричних розрахунків вихідні дані взяті відповідно до діючої електрифікованої ділянки постійного струму, яка має наступні характеристики:

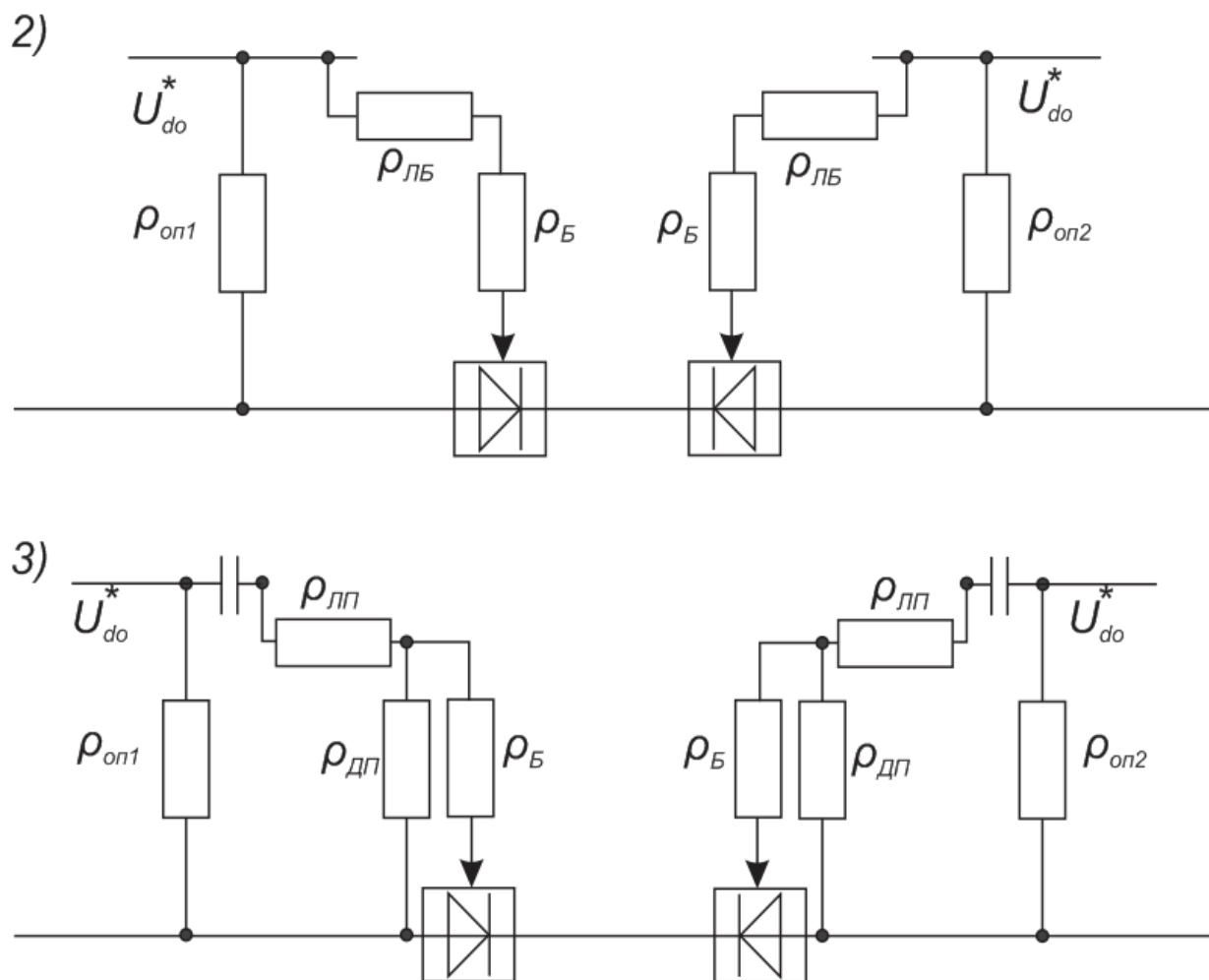
Проблемна ділянка яка знаходиться між

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

П'ятихатками – Залізняковим складає 2.5 км, відстань між підстанціями 18 км, (див. додаток А) .

Розміри руху і вага потягів приймалися відповідно проектам підсилення розглянутої ділянки. Характеристики джерел живлення тягової мережі приймалися і задавалися рівнем холостого ходу U_{d0} та кутовим коефіцієнтом в вигляді умовного опору ρ_{Σ} , які приведені до випрямленої напруги.





0 – без підсилення; 1 – ППТ; 2 – ВДП; 3 – ДП-10 + ВДП

Рисунок 3.13 – Схеми заміщення для всіх варіантів підсилення

Основні вихідні та розрахункові дані з визначення характеристик елементів підсилення зведені в табл. 3.2.

Як можна побачити на даній схемі, ми замінили ПСК і сусідню підстанцію перетворювачами 6/3 кВ.

Вживання сучасних транзисторів *IGBT* дозволяє значно підвищити надійність перетворювача і зробити його схему більш простішою

Після застосування системи 6/3 кВ можлива структурна схема живлення ділянки П'ятихатки - Верховівцево буде мати такий вигляд рис 3.14.

Таблиця 3.2 – Вихідні та розрахункові дані

Вихідні дані	ВДУ, ТМ-1000	ППТ, ТМРУ-6200
S_T , МВт	1	3,
I_{dH} , кА	2	3
ΔP_{cu} , МВт	0,017	0,0409
ΔP_{Fe} , МВт	0,00539	0,0241
U_k , %	5,8	8,9
I_μ , %	5	6,7
A_{cx} , -	2,43	2,43
a_{cx} , -	2	2
$r_{ол}$, Ом/км	30,44	20,176
$x_{ол}$, Ом/км	30,384	-
x_T , Ом	0,011	0,639
R_T , Ом	0,0027	0,0818
ρ , Ом	0,017	0,199
$k_{ТП}$ -	23,8	1,97
x_{Ao} , Ом/км	0,00074	-
R_{Ao} , Ом/км	0,000612	0,0217
ρ_{Ao} , Ом/км	0,00195	0,0219

При зростанні швидкості руху збільшується опір рухомому складу в свою чергу чим більше швидкість руху електрорухомого складу тим більший струм навантаження на підстанцію .В разі зниження напруги нижче допустимого рівня то необхідно застосовувати підсилення за рахунок перетворювачів 6/3 кВ і живити напругою 6 кВ по підсилюючому проводі вздовж путі.

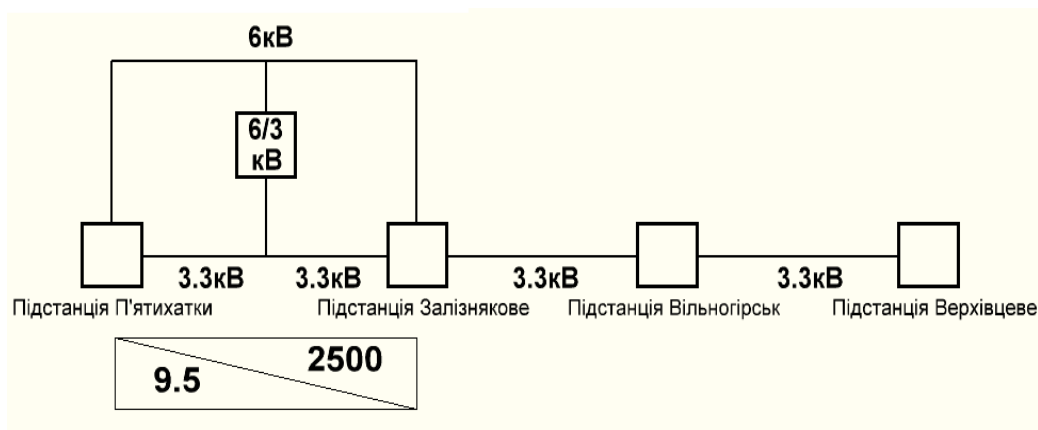


Рисунок 3.14 – Можлива структурна схема живлення ділянки П'ятихатки Верхівцеве після використання перетворювача 6/3 кВ

Для того щоб збільшити пропускну здатність при русі великовагових складів і забезпечення швидкісного руху потрібне збільшення потужності живлення контактної мережі за допомогою модернізації та удосконалення уже існуючих тягових підстанцій. Живлення контактної мережі постійного струму на даній ділянці між вже працюючими тяговими підстанціями логічно виконувати через перетворювач з підвищеною вхідною напругою, яка подається по ізолюваному від контактної мережі по підсилюючому проводу.

3.6 Розрахунок перегінної пропускну спроможності з урахуванням рівня напруги

Для того щоб визначити число пар поїздів які можна пропустити по ділянці за можливостями електропостачання розраховують перегінну пропускну спроможність. Іноді це називається: коригування пропускну спроможності по напрузі в тяговій мережі. Тяговий розрахунок, виконаний при номінальній напрузі і отримані криві руху поїзда: швидкість в залежності від часу $V(t)$, пройденої відстань $S(t)$ і споживаний струм $i_n(t)$ в залежності від часу, будуть відрізнятися від подібних розрахунків при іншій напрузі, що відрізняється від номінальної.

Насправді напруга на струмоприймачі електровоза постійно змінюється в залежності від його переміщення ділянкою і визначається не

тільки схемою живлення тягової мережі і відстанню від підстанції, а й наявністю на цій фідерній зоні інших поїздів, їх струмами, а також коливанням напруги мережі живлення.

Спочатку розглянемо вплив напруги при різких змінах і більш тривалих на споживані струми електрорухомого складу і швидкість руху поїзда.

На рисунку 3.15 показані характеристики електрорухомого складу з двигунами постійного струму послідовного збудження: швидкісні характеристики, залежності швидкості від струму $v(I)$ при різних напругах $U1$ і $U2$ і залежність сили тяги від струму $F(I)$.

Аналітичний вираз для швидкості:

$$v = \frac{U - I \cdot R}{C_1 \cdot \Phi}$$

де R - опір в ланцюзі двигуна;

$C1$ - коефіцієнт для даного типу двигуна;

Φ - магнітний потік двигуна.

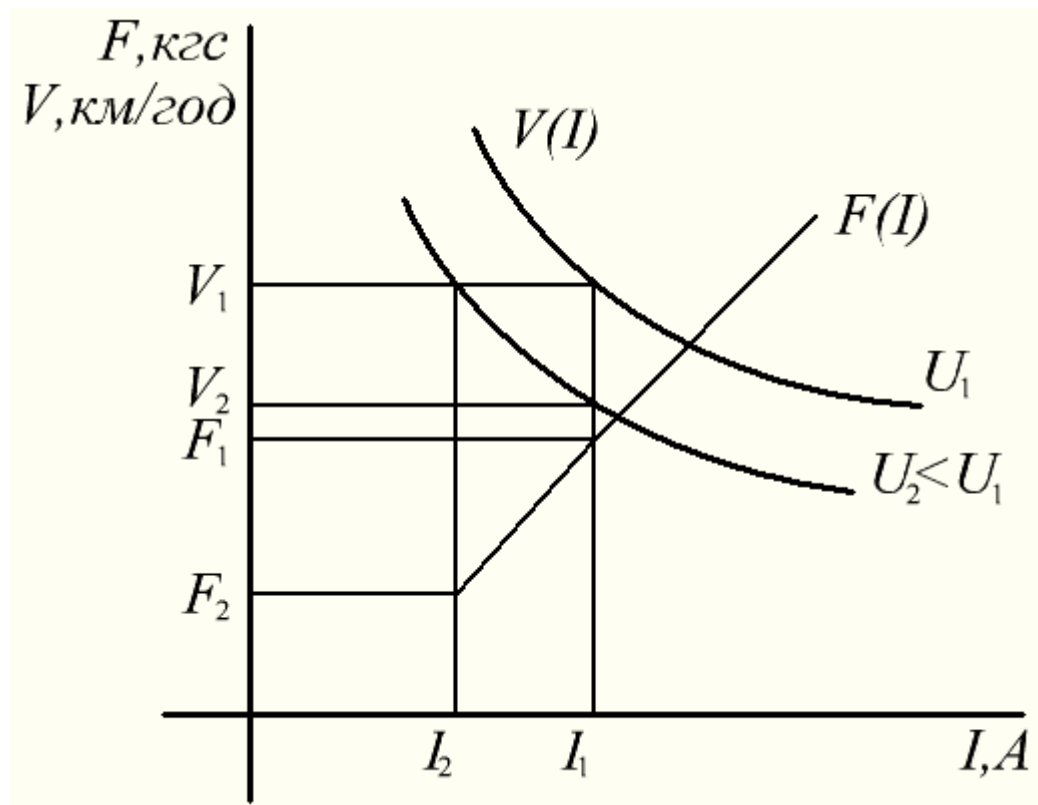


Рисунок 3.15. Характеристики рухомого складу

Швидкість регулюється зміною двох параметрів: підводиться до двигунів напруги і магнітного потоку. Після періоду пуску регулятори відключаються і зміна швидкості, в залежності від струму $V(I)$ буде підкорятися ходу так званої автоматичної характеристики, показаної на рисунку 3.15 в двох варіантах при різних напругах U_1 і U_2 .

Залежність швидкості поїзда від напруги на струмоприймачі очевидна.

При одном і том же навантаженні I :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{U_1 - I \cdot R}{U_2 - I \cdot R}$$

З огляду на мале значення $I \cdot R$ буде, мати:

$$V_1 / V_2 \approx U_1 / U_2$$

Таким чином, стала швидкість прямо пропорційна напрузі, що

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

підводиться.

Сила тяги не залежить від напруги і тому представлена однією функцією.

$$F = c_2 \cdot I \cdot \Phi$$

Нехай поїзд рухається по ділянці з усталеною швидкістю $V1$ при напрузі $U1$ (рисунку 3.15). При різкій зміні напруги, наприклад, зменшення з $U1$ до $U2$, швидкість поїзда $V1$ миттєво зміниться не може. Тому зменшується струм з $I1$ до $I2$ і сила тяги з $F1$ до $F2$. Зменшення сили тяги призведе до зменшення швидкості. При зменшенні швидкості струм і сила тяги збільшується до тих пір, поки не буде досягнута нова стала швидкість $V2$, при якій сума всіх сил, що діють на поїзд буде дорівнює нулю. Це станеться при колишньому струмі $I1$ (якщо ж вважати незначне зменшення опору руху при меншій швидкості)[7].

Таким чином, зміна напруги в тяговій мережі призводить до зміни швидкості руху поїзда і, отже, до часу ходу по ділянці. А це в свою чергу впливає на пропускну здатність.

Розглянемо спрощену залежність швидкості поїзда від часу $V(t)$ (рис.3.16). На початковій ділянці відбувається пуск, протягом якого швидкість збільшується від нуля до $V1$ - швидкості виходу на автоматичну характеристику. Потім швидкість, збільшується до деякого сталого значення $V = const$ протягом t_2 . За час t_3 поїзд рухається зі сталою швидкістю. Далі наступають періоди інерційного t_4 і гальмування t_5 .

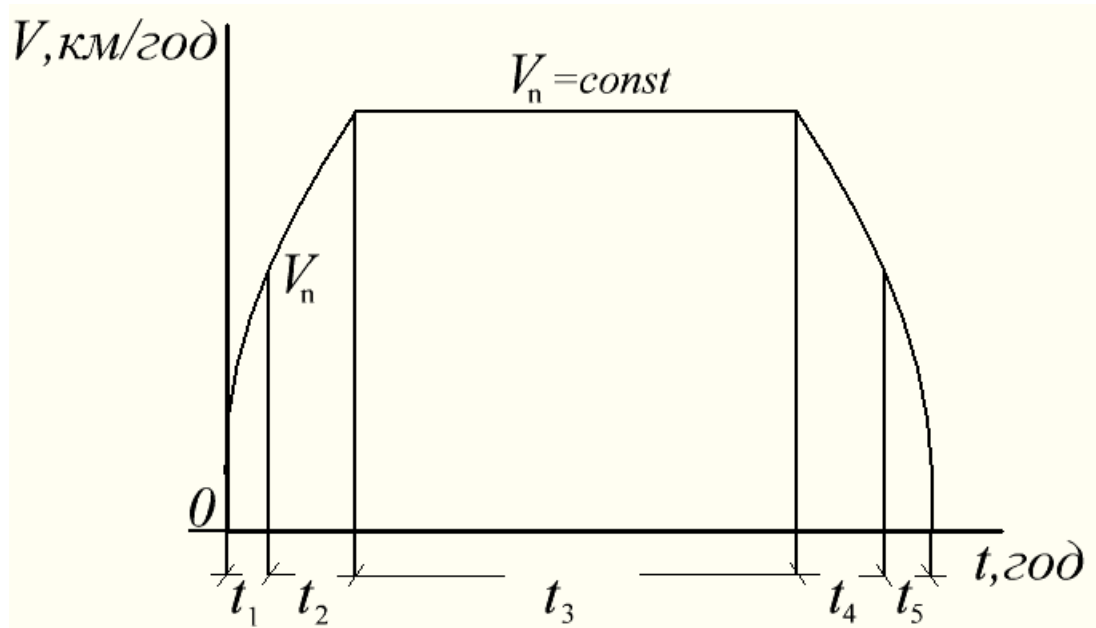


Рисунок 3.16. Залежність швидкості руху поїзда від часу

Під час пуску швидкість не залежить від напруги в тяговій мережі, але пуск при іншій напрузі закінчиться при швидкості V не рівної V_n . Стала швидкість руху лінійно залежить від напруги, а час ходу в режимі тяги, очевидно, буде обернено пропорційно напрузі[7]:

$$t_{T1} / t_{T2} = U_2 / U_1$$

де t_{T1} - час ходу під струмом при напрузі $U1$;

t_{T2} - то ж при напрузі $U2$;

При наявності пуску:

$$t_{T1} = t'_{T1} - t_n, t_{T2} = t'_{T2} - t_n$$

де t'_{T1} і t'_{T2} - час ходу під струмом з урахуванням пускового періоду t_n .

Якщо напруга $U1$ дорівнює номінальній $U_1 = U_n$, а напруга $U2$ - дійсному $U_2 = U_d$, то дійсний час ходу під струмом дорівнюватиме:

$$t_{T2} = t_{T1} \cdot U_H / U_D$$

Дійсний час ходу по ділянці:

$$t_D = (t - t_T) + t_T \cdot U_H / U_D$$

де t - розрахунковий час ходу поїзда з даного ділянки шляху (з тягових розрахунків);

t_T - час ходу під струмом, включаючи період пуску.

Якщо заданий інтервал між поїздами дорівнює $\theta = t$, то найбільше число поїздів за добу T (або пропускна спроможність) дорівнюватиме $N = T / \theta$ з урахуванням дійсного рівня напруги $\theta_D = t_D$, а $N_D = T / \theta_D$.

З огляду на зміни напруги за час ходу по ділянці, коригування пропускної спроможності виконують за середнім за час ходу по так званому лімітуючому перегону. В якості лімітуючого перегону вибирають ділянку тягової мережі з найменшими значеннями напруги на струмоприймачі електровоза. Наприклад, при двосторонньому живленні такий перегін знаходиться в середині зони між підстанціями, якщо стромоспоживання в цьому місці найбільше.

ВИСНОВОКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У моїй дипломній роботі було досліджено ефективність роботи системи електропостачання на ділянці Д – П при стабілізації напруги 3,3 кВ. Одним з найважливіших факторів у вирішенні даного питання є зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом стабілізації напруги в контактній мережі і встановленні перетворювачів 6/3 кВ для підсилення рівня напруги в контактній мережі без побудови нових підстанцій, а модернізації вже існуючих дозволить значно суттєво зменшити затрати. Тому створення перетворювачів напруги з великими струмовими навантаженнями є значною проблемою.

В даній магістерській роботі я намагався показати що можливе підсилення рівня напруги в контактній мережі за рахунок модернізації тягових підстанцій і встановлення між ними перетворювачів 6/3 кВ, для підсилення руху електрорухомого складу на складних ділянках місцевості. Також методи зменшення втрат електроенергії за рахунок використання тягових агрегатів з використанням стабілізації вихідної напруги, також надати необхідні відповіді та рекомендації щодо застосування силових напівпровідникових приладів, що забезпечують стабілізацію напруги на даній ділянці, та надійне виконання їм заданих функцій у заданих умовах. Використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту на сучасних *IGBT* транзисторах.

Викладена у дипломі методика являє собою зменшення капітальних затрат на будівництво нових підстанцій та прокладання нового полотна за рахунок модернізації вже існуючих новими пристроями. Таким чином вирішення цієї проблеми повинно базуватися на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації, та технічного розвитку, та енергоефективності на залізничному транспорті.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шапиро С. В. Резольвента Лагранжа и ее применение в электромеханике. Энергоатомиздат, 2008.
2. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленинград отделение, 1991. - 208 с.
3. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах / В. П. Дьконов [и др.]. М. СОЛОН-Р, 2002. 512 с.
4. Колпаков А. MELCOSIM IPOSIM EMISEL О выборе и замене модулей IGBT // Силовая электроника. 2005. №1.
5. Болтовский Б. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование «Поваренная книга». М.: Солонпресс, 2005. 200с.
6. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог – М.:Транспорт,1982. – 528с.
7. Гребенюк П.Т., Долганов А.Н. и др. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.:Транспорт,1985.-287с.
8. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. М.:Транспорт,1999.-464с.
9. Боравская Е.Н., Шапилов Е.Д. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт / Ковалёв И. П.. — СПб: ГИИПП «Искусство России», 2001.
10. Омеляненко В.И. д-р техн. Наук, НТУ «ХПИ», Н.Н. Калюжный, НТУ «ХПИ» Способ задания управляющих воздействий при стабилизации напряжения тяговой сети.
11. Павловский В.В., Куденко Г.Е. Инженерный расчет потерь мощности и энергии в электрических сетях, основанный на моделировании установившихся режимов.//Электрические сети и системы. -2004. -№3
12. Мартиненко, В. А., Нові високопотужні діоди і тиристори для промисловості, транспорту та енергетики. / В. А. Мартиненко, Г. Д. Чумаков / Силова електроніка. – 2005.

					02.15.ЕС2021.РД.2021–ПЗ	Лист 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Бей Ю. М., Мамошін П.П. та ін. Тягові підстанції: підручник для вузів залізничного транспорту. - М .: Транспорт, 1986 - 319 с.
14. Рогачёв К. Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [Электрон- ный ресурс] / К. Д. Рогачёв.
15. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. К.: Текст, 2006. – 488 с.
16. Алексеев А.Г. Исследование типов выводов управления запираемых тиристоров // Строительство - 2000: Материалы международной научно-практической конференции. / Рост. гос. строит. ун-т; Ростов-на-Дону, 2000. - С.111-112.
17. Алексеев А.Г., Мищенко А.В., Остренко В.С. Основные принципы построения формирователя импульсов для управления запираемым тиристором // Силовая электроника - как эффективное средство ресурсо- и энергосбережения, создания прогрессивных технологий: Материалы научно-технической конференции с международным участием / Запорожье, 1997 . - С.53.