

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри

_____ Гаврилюк В.І.
(підпис) (ПІБ)
2020 __р. _____ « ____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Спеціалізація «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема Дослідження електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання змінного струму на Одеській залізниці

Theme The investigation of electromagnetic compatibility of track circuits with the ac traction power system on the Odessa Railway

Керівник дипломної роботи доцент _____ Сердюк Т. М.

Студент групи АТ1926 _____ Роздорожний В.В.

Student АТ1926 _____ Rozdorozhnyi Vitalii

Дніпро
2020

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра АТ

Спеціалізація

Автоматика та автоматизація на транспорті

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри

Гаврилук В.І.

« _____ » _____ 2020_р.

—

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Роздорожний Віталій Вікторович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи

Дослідження електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання змінного струму на Одеській залізниці

Затверджена наказом по університету № 798ст від « 18 » 10. 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 18.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Електрична тяга змінного струму, кількість стрілок на станції – 37, кількість підходів до станції – 2, вид автоблокування – кодове змінного струму частотою 25 Гц, станційні рейкові кола - фазочутливі рейкові кола 25 Гц, які кодуються 25 Гц
Лінії основного живлення ВЛ СЦБ – 6кВ, резервного – ДПР 27,5 кВ. Тип проводу – АС-50. Довжина ділянки живлення – 30 км. Рейки Р65

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1. Аналіз причин виникнення електромагнітних завад в рейкових колах при електротязі змінного струму	25 %	
2 Удосконалення математичної моделі системи тягового електропостачання змінного струму	50 %	
3. Дослідження впливу тягового навантаження на якість електроенергії	75 %	
4. Електромагнітна сумісність високошвидкісного рухомого складу з пристроями СЦБ та зв'язку	100 %	

Студент

Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки: 71 листів, 8 таблиць, 17 рисунків, 30 літературних джерела.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, тяговий струм, гармоніка, струм електровозу, параметри якості електроенергії.

Завданням дипломної магістерської роботи є дослідження електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання змінного струму з пристроями залізничної автоматики.

В першому розділі проаналізовано причини виникнення електромагнітних завад в рейкових колах при електротязі змінного струму.

В другому розділі удосконалено математичну модель системи тягового електропостачання змінного струму для дослідження розподілу електромагнітних завад в контактній і рейковій мережах, визначення струму електровозу.

В третьому розділі дослідження впливу системи тягового електропостачання на якість електроенергії і оцінено параметри якості електроенергії в розподільчих мережах.

В четвертому розділі оцінено електромагнітну сумісність електрорухомого складу на пристрої СЦБ та зв'язку.

ЗМІСТ

Вступ	6
1. Аналіз причин виникнення електромагнітних завад в рейкових колах при електротязі змінного струму	9
1.1. Види електромагнітних завад та їх джерела	9
1.2. Шляхи проникнення перенапруг в апаратуру	11
1.3. Вплив електромагнітних завад на безпеку функціонування пристроїв залізничної автоматики	19
1.4. Висновки за розділом	21
2. Удосконалення математичної моделі системи тягового електропостачання змінного струму	23
2.1. Математичне моделювання розподілу тягових струмів в контактній і рейковій мережі	23
2.2. Результати моделювання	30
2.2.1. Розрахунок струму електровозу який споживається при заданому профілі дільниці	30
2.2.2. Розрахунок розподілу струмів та втрат напруг в контактній мережі для фідерної зони з однобічним живленням	37
2.3. Розрахунок розподілу гармонійних завад по довжині фідерної зони	39
2.4. Спектральний склад струму в мережі від випрямляючого електровозу	40
2.5. Висновки за розділом	41
3. Дослідження впливу тягового навантаження на якість електроенергії	44
3.1. Характеристика тягового навантаження при електричній тязі змінного струму в умовах швидкісного руху	46
3.2. Підвищення якості електроенергії в розподільчих мережах тягових споживачів	54
3.3. Висновки за розділом	57

4. Електромагнітна сумісність високошвидкісного рухомого складу з пристроями СЦБ та зв'язку	58
Висновки	67
Література	68

ВСТУП

У відповідності з стратегією розвитку інфраструктури України було створено програму «Drive Ukraine 2030» [1] планується провести інтеграцію транспорту України до європейської та світової транспортної систем шляхом впровадження новітніх технологій, розвитку інфраструктури і участі в проєкті «Новий шовковий шлях». Такий напрям розвитку Укрзалізниці передбачає оновлення локомотивів і вагонного парку, збільшення швидкості руху майже до 150 км /год, застосувати на сполученні Київ-Одеса, Київ-Львів, Київ – Харків, Київ – Дніпро колії європейського стандарту, співпраця із компаніями General Electric, Bombardier, Greenbrier. Також програма передбачає впровадження Hyperloop в Україні може сприятиме прокладанню таких напрямків через Київ, як Китай – Європа – Канада, Азія – Близький Схід – Європа – Північна Африка, Іспанія – Китай, що також ставить певні вимоги до якості електричної енергії.

Щодо міського транспорту пропонується перейти до повністю до електротранспорту. В якості автомобільного транспорту рекомендовано застосувати електромобілі (до 50%), побудувати Smart Country и Smart Road (інтелектуальні дороги для безпілотного транспортування із системою контролю трафіку Big Data).

А також в рамках ЕСУ і Drive Ukraine 2030 запропоновано залучати інвестиції для побудови в Україні Tesla Gigafactory з виробництва акумуляторних батарей та сонячних панелей.

Отже, реформування галузі інфраструктури йде пліч о пліч з реформуванням електроенергетики України і пред'являє нові жорсткі ринкові вимоги до споживачів. Залізничний транспорт повинен гармонійно вписатися в нові умови взаємовідносин з енергетикою.

На сьогоднішній день в світі електрифікована тягою постійного струму майже 30% від всіх залізниць, а змінного струму – 40 %. В Україні електрифіковано 47 % від усіх залізниць. Є залізниці з електрифікацією

змінним струмом 25 кВ 50 Гц і постійним струмом 3 кВ. Побудова нових залізниць в Україні передбачає електрифікацію змінним струмом 25 кВ 50 Гц.

Отже тема дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр», яка пов'язана з дослідженням електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання змінного струму 25 кВ 50 Гц з пристроями залізничної автоматики в умовах швидкісного руху є досить актуальною.

Мета – дослідити електромагнітну сумісність системи тягового електропостачання 25 кВ 50 Гц на роботу пристроїв залізничної автоматики і її вплив на параметри якості електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- удосконалити математичну модель системи тягового електропостачання залізниць змінного струму із швидкісним рухом поїздів;
- дати наукове обґрунтування уточненій методиці розрахунку розподілу тягового струму і їх гармонійних завад вздовж фідерної зони;
- проаналізувати вплив системи тягового електропостачання змінного струму 25 кВ 50 Гц на параметри якості електричної енергії в умовах швидкісного руху.

Об'єкт дослідження – дослідження електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями залізничної автоматики.

Предмет дослідження – система тягового електропостачання залізниць 25 кВ 50 Гц.

Наукова новизна полягає в удосконаленні формул розрахунку розподілу тягового струму і його гармонійних складових, обліку ємнісного та індуктивного впливу тягової мережі змінного струму на лінії і пристрої СЦБ, що дозволило більш точно визначити значення амплітуд гармонійних складових зворотного тягового струму. Відносна похибка розрахунків в порівнянні з уставками, що застосовуються на діючій ділянці, не перевищила 5 %.

Практичне значення отриманих результатів визначається наступним: оцінено параметри якості електричної енергії і вплив системи тягового електропостачання змінного струму на них в умовах швидкісного руху поїздів.

Особистий внесок здобувача. Всі результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені в роботі, отримані автором особисто або безпосередньо з його участю. Особистий внесок здобувача полягає в самостійному плануванні та проведенні досліджень, обробці отриманого матеріалу, формулюванні наукових положень і висновків.

Публікації. Результати магістерської роботи були апробовані на 80-ій Всеукраїнській конференції студентів та молодих вчених 2020 р. «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті». За результатами роботи опубліковано тези [23, 28].

1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД В РЕЙКОВИХ КОЛАХ ПРИ ЕЛЕКТРОТЯЗІ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1. Види електромагнітних завад та їх джерела

Провали, короткочасні переривання і викиди напруги електроживлення.

Провали напруги, короткочасні переривання живлення та викиди напруги тривалістю в межах від одного напівперіоду до декількох секунд можуть бути викликані:

- короткими замиканнями в низьковольтних електричних мережах, які усувається при функціонуванні плавких запобіжників або при спрацьовуванні пристроїв захисту багаторазової дії;

- аваріями на лініях середньої та високої напруги або іншому мережевому обладнанні, що супроводжується або не супроводжується автоматичним включенням;

- комутаціями навантажень в електричних мережах.

- ферорезонансними явищами, як наслідок стрибкоподібних змін напруги ЛЕП.

Наведені низькочастотні напруги.

Низькочастотні струми, що протікають в силових і сигнальних кабелях, в тому числі і тягових електродвигунах локомотива, можуть (залежно від сили струмів, умов розміщення та типу кабелів, а також інших умов) наводити низькочастотні перешкоди різного рівня в кабелях електроживлення і сигнальних кабелях, підключених до технічних засобів залізничної автоматики. Низькочастотні перешкоди різного рівня в кабелях електроживлення і сигнальних кабелях, підключених до пристроїв СЦБ.

Магнітне поле промислової частоти.

Магнітне поле промислової частоти створюють прохідні локомотиви (електровози змінного струму), прилеглі лінії електропостачання, особливо повітряні лінії, а також трансформатори, реактори та інше обладнання систем електропостачання.

Кондуктивні перешкоди мікросекундної і наносекундної тривалості.

Кондуктивні електромагнітні перешкоди можуть бути створені різними джерелами, характеристики яких визначають формування перешкод даної групи.

Мікросекундні імпульсні перешкоди великої енергії обумовлені насамперед грозовими розрядами і комутаційними процесами в електричних мережах. При цьому розглядають :

- імпульси, що викликаються дією блискавичних розрядів на повітряні розподільні системи;
- імпульси, що викликаються грозовими розрядами і поширюються в кабелях;
- імпульси, що виникають при спрацьовуванні плавких запобіжників в колах з індуктивними елементами за рахунок запасеної енергії в індуктивності відключаемого обладнання та системи електроживлення, а також при перекритті ізоляторів і при спрацьовуванні захисту;

Наносекундні імпульсні перешкоди пов'язані з явищем « іскріння », при « брязкоту » контактних систем при перемиканні навантажень в електричних мережах і можуть включати послідовність подій (пачки імпульсів).

Наведені напруги (незгасаючі коливання).

При розташуванні провідника, підключеного до пристроїв СЦБ, в електромагнітному полі, створеному роботою радіостанції, напруга електромагнітної перешкоди наводиться відносно опорного заземлення.

Амплітуда наведеної напруги (струму) залежить від довжини провідника, його висоти над землею, а також від інших факторів.

Радіочастотні електромагнітні поля.

Ці перешкоди, діють як на окремій частоті, так і одночасно на декількох частотах, здатні робити істотний вплив на функціонування пристроїв СЦБ через селективності зазначених або через можливі механізми виникнення резонансів.

Електростатичні розряди.

Електростатичні розряди відбуваються в результаті наближення зарядженого об'єкта (оператора) до пристроїв СЦБ. Рецептор електростатичного розряду спочатку піддається впливу електричного поля, обумовленого зарядом, потім, після пробою діелектрика, виникає розряд з перехідним струмом складної природи, який викликає імпульсне перехідне електромагнітне поле. Рівень перешкод, викликаних електростатичними розрядами, істотно залежить від провідності поверхонь і вологості повітря.

1.2.Шляхи проникнення перенапруг в апаратуру

Основні канали проникнення перенапруги в апаратуру залізнично автоматики:

- по колам живлення (220/380В) ;
- по входах рейкових кіл ;
- по лінійним колам ;
- по колам заземлення;
- вплив наведених перешкод комутаційного походження при штатній роботі приладів всередині об'єкта (РШ , поста ЕЦ)

Основні комплекси залізничної автоматики концентруються в службово -технічних будівлях і на об'єктах підлогового обладнання (релейні шафи , будки , шляхові ящики і т.д).

У службово -технічних будівлях розміщується апаратура СЦБ , заснована на застосуванні як релейних елементів так і мікропроцесорних , апаратура зв'язку , інформаційні системи і антенні пристрої .

На аркуші 1 представлені всі канали , що утворюють шляхи проникнення перенапруг різного виду і потужності (прямі і непрямі) в апаратуру залізничної автоматики постових пристроїв , релейні шафи , модулі ДИСК , КТСМ , пости маневрових районів і т.ін.

Канали проникнення перенапруги по колам живлення.

Найбільш потужний вплив високовольтних перенапруги виникає при атмосферних розрядах в повітряні ЛЕП. Високовольтні пристрої захисту від імпульсних перенапруг, встановлені на вході лінійних трансформаторів ЛЕП , забезпечують зниження імпульсних впливів поздовжньої хвилі перенапруги до рівня забезпечуючого захист ізоляції лінійного трансформатора. Однак , рівень залишкових перенапруги на проводах і між ними значно перевищує номінальне значення напруги ЛЕП , що трансформується на низьковольтні обмотки трансформаторів (з урахуванням коефіцієнта трансформації і ємнісних зв'язків) .

Відсутність засобів захисту від поперечної хвилі перенапруги (провід - провід) з боку низьковольтного виходу на лінійному трансформаторі , значно перевантажує пристрої захисту , які встановлені на вході навантаження СЦБ , тому не забезпечується їх нормальний режим функціонування .

Номінальна імпульсна напруга, що витримується, при прикладанні до вхідних кіл навантаження СЦБ не повинна перевищувати : для приймачів 230В - 4кВ ; для приймачів 380В - 6кВ .

Проникнення поздовжніх перенапруг (провід - земля) в колах живлення, при застосуванні лінійних трансформаторів ОМ посилюється спрацьовуванням пробивних запобіжників або при іскровому перекритті обмоток трансформатора. На відміну від лінійного трансформатора , що має заземлену екрановану обмотку , система живлення з трансформаторами ОМ ,

повинна мати посилену схему захисту шляхом установки додаткових каскадів на виході трансформатора.

Канали проникнення перенапруг в апаратуру рейкових кіл.

Апаратура рейкових кіл, як правило, піддається впливам поперечної хвилі перенапруги (провід - провід), яка трансформується через КТ або ДТ з підвищувальними коефіцієнтами трансформації. Рівень впливу поперечної хвилі залежить від умов розтікання струму імпульсу атмосферного перенапруження або імпульсу тягового струму в рейках. При значній різниці струмів в рейках, а це створює різницю потенціалів, яка прикладається до колійних обмоток КТ або ДТ, виникає струм перетікання тобто вирівнювання потенціалу між рейками. Струм перетікання в колійних обмотках КТ або ДТ трансформується в апаратуру рейкового кола. Пристрої числового кодового автоблокування з кодовими рейковими колами на релейній елементній базі, вважаються найбільш стійкими до впливів високовольтних перенапруг, в порівнянні з системами АБ побудованих на електронних елементах з тональними рейковими колами (АБТ, ЦАБ і т.п.).

Слід зазначити, що на ділянках з електротягою змінного струму пошкоджуваність АБ будь-якого типу значно вище, ніж на ділянках з електротягою постійного струму з наступних причин:

- резервне живлення пристроїв СЦБ виробляється, як правило, від ліній ДПР (в окремих випадках основне і резервне живлення здійснюється від лінії ДПР), які не мають гальванічної розв'язки з електротяговими мережами. Лінії ДПР є основним джерелом високовольтних перенапруг і перешкод найширшого спектра;

- високий рівень електромагнітного впливу гармонійних складових тягової мережі на кабельні мережі, і електронні прилади та елементи захисту (газонаповнені розрядники), а в окремих випадках і на оптоелектронні елементи.

Принцип побудови числового кодового автоблокування теоретично виключає пошкодження апаратури з боку рейкового кола при впливі

поздовжньої перенапруги (провід - земля) , так як існує гальванічна розв'язка між рейковою лінією і апаратурою РК обмотками трансформаторів КТ або ДТ. Однак , при критичному впливі перенапруги , при якому виникає потенціал напруги між обмотками КТ або ДТ ,що перевищує рівень міцності їх ізоляції (> 2кВ) відбувається іскровий пробій між обмотками (особливо в КТ) , чим порушується гальванічна розв'язка , а в інших випадках і пошкодження ізоляції між електричними колами приладів РК і рейкової лінією.

Одним з каналів проникнення перенапруги поперечної хвилі з рейкової лінії в коло живлення 220 В РШ виникає через схему кодування в момент замикання контактів (Т , ТІ) трансміттерного реле , далі через колійний трансформатор (ПОБС -3) , який в даному випадку , з боку впливу імпульсу перенапруги, працює з підвищувальним коефіцієнтом передачі (в 2-3 рази) і далі за схемою живлення ПХ - ОХ релейної шафи . Таким чином , впливаючий імпульс перенапруги накладається на мережу живлення релейної шафи . У результаті впливу трансформованого імпульсу (імпульсу , посиленого трансформатором при додаванні, за амплітудою з ПХ- ОХ) збільшується ймовірність пошкодження апаратури СЦБ в колах живлення 220 В , а також і в низьковольтних колах РШ.

Наявність у схемі рейкового кола РШ ємнісних елементів (кількість конденсаторів, їх ємність визначаються конкретним типом РК) та індуктивних елементів (РОБС , КТ) погіршує ситуацію в результаті виникнення перехідних процесів . Шляхи протікання струмів перешкод зображені на рис 1.1.

При проектуванні пристроїв захисту від впливу перенапруг з боку рейкової лінії, необхідно передбачати захист від поперечної хвилі перенапруги на виході трансформаторів КТ (ДТ) із застосуванням нелінійних опорів (варистори) . Елементи захисту повинні забезпечувати зниження рівня перенапруги, що приходить до величини що визначаються вимогами

електромагнітної сумісності (ЕМС) і технічними умовами на конкретні вироби.

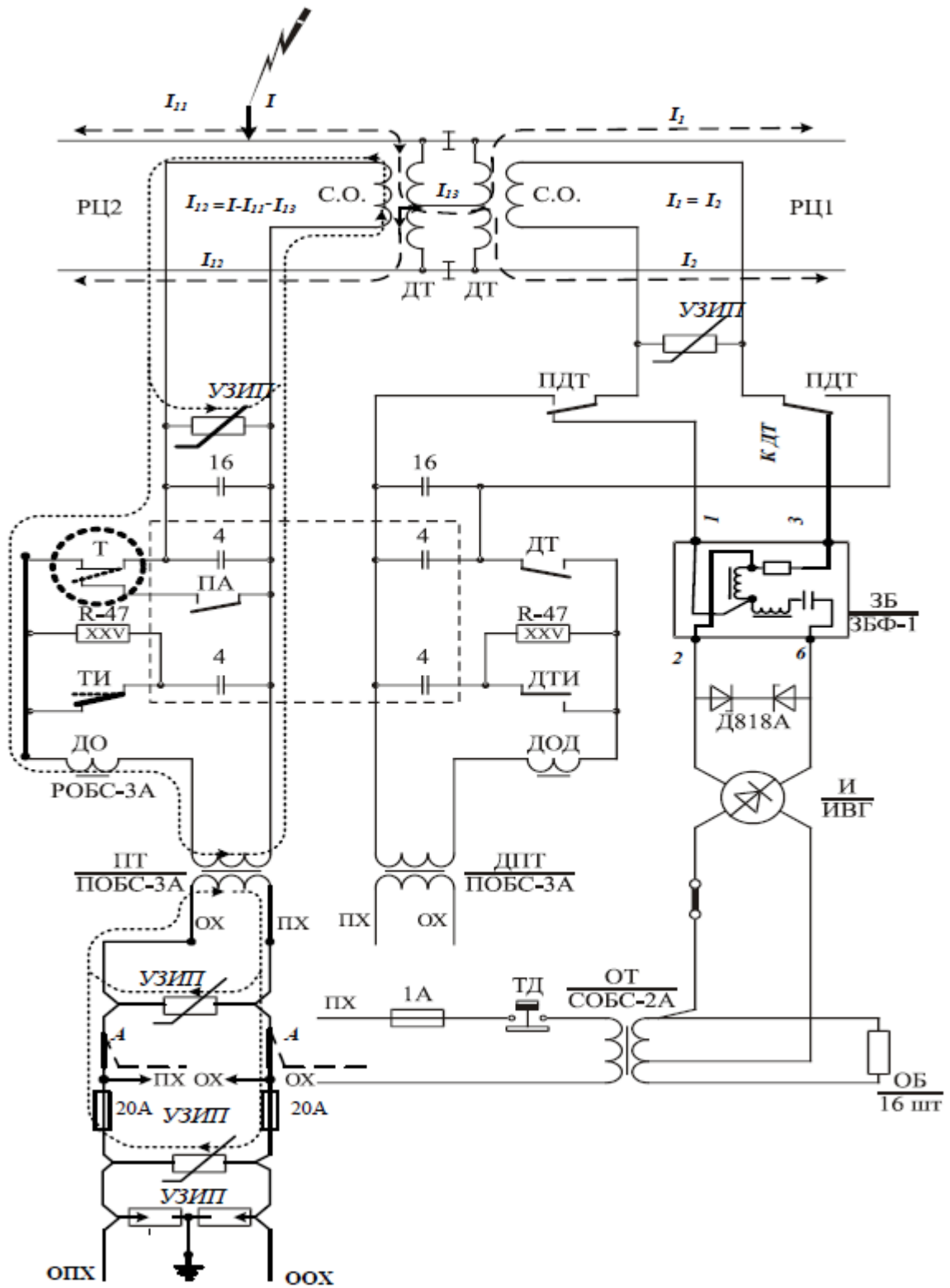


Рис. 1.1. Шляхи проникнення високовольтних перенапруг в схемі кодового рейкового кола АБ

Розміщення апаратури в РШ має виконуватися з урахуванням ЕМС між приладами і окремими вузлами схеми (зонування апаратури РШ). Для виключення не бажаних електромагнітних зв'язків , монтажні дроти , необхідно розміщувати в різних джгутах , а в деяких випадках , екрануватися (наприклад : дроти внутрішнього монтажу екрануються від проводів зовнішніх ланцюгів) . Електричний монтаж , що має прилади захисту , необхідно прокладати в окремому джгуті від незахищеного монтажу) . Прилади, що мають зовнішнє управління по кабельних лініях (прилади лінійних кіл , аварійні реле живлення і т.п) з метою зменшення довжини монтажу в джгутах РШ і зниження впливу на інші кола , повинні встановлюватися з максимальним наближенням до клем кабельних введів .

У типових рішеннях необхідно переглянути :

- для релейної шафи АБ прилади , які мають підвищену завадоємкість (ПН ; ПДТ ; ДТ- ДТИ ; Т- ТІ) необхідно переглянути їх розташування в РШ ;
- аварійні реле при будь-якій комплектації релейної шафи необхідно розташовувати на нижніх полицях ;
- монтажні дроти , що мають виходи до лінійних кіл (ІІ ; ЗС ; ДСН ; ЛВН) , необхідно прокладати в окремих джгутах по різних сторонах рами релейної шафи.

Канали проникнення перенапруги по лінійним колам.

На всі електричні кола лінійних пристроїв впливають, переважно, наведені напруги від зовнішніх ліній електропостачання: ЛЕП , контактна мережа та інших ліній , що знаходяться в зоні розташування кабельних і повітряних ліній ЗАТ . Ймовірність прямого атмосферного вплив на повітряні лінії найбільша. На кабельні лінії прокладені у землі або кабельній каналізації , атмосферний вплив робить , в основному , непрямий вплив (наведена електрика) . Рівень наведеної напруги на жилах кабелю залежить від конструкції кабелю тобто способу розміщення жил , наявність металевих оболонок , що створюють екранування жил і способу заземлення металевих оболонок магістрального кабелю.

Рівень наведених перенапруг на жили незахищеного кабелю значно вище, ніж у захищеного, особливо на ділянках з електротягою змінного струму.

Кабелі, з металевими оболонками значно знижують рівень наведеної напруги на жилах. Однак, на металевих оболонках виникає струм від наведеної напруги величина якого зростає в міру збільшення довжини кабелю, а при порушенні ізоляції оболонки (броні) до рейок, виникає додатковий шлях протікання тягового струму, величина якого може досягати при короткому замиканні контактної мережі декількох сотень ампер, що призведе до перегріву кабельної оболонки і броні, та до повного виведення його з ладу і спалаху, а при пробі на жили кабелю до загоряння апаратури. При досягненні величини струму на металевій оболонці більш від 10А і вище, створюються умови наведення напруги перешкоди на жили кабелю.

Для зниження величини блукаючого струму по металевих оболонках кабелів, найбільш ефективний спосіб - це секціонування оболонок шляхом установки ізолюючих муфт і заземлення оболонок, виділених ділянок з одного боку.

Залежно від стану лінійного кола в поточний момент часу (замкнуте або розімкнуте) і реальною електромагнітної обстановки, рівень наведеної напруги на проводах лінійних пар може відрізнятись в кілька разів. З цього випливає, що в замкнутому колі впливу піддаються приймач і джерело живлення одночасно, а в розімкнутому, з великим рівнем впливу, приймач (обмотка реле) або пристрій живлення.

Для зменшення впливу наведеної напруги запасних жил кабелю на робочі жили, особливо, довгих міжстанційних ланцюгів, запасні жили необхідно заземлювати з урахуванням створення протилежного напрямку стікаючого наведеного струму щодо сусідньої ділянки кабельної магістралі.

При проектуванні схеми захисту лінійних кіл необхідно передбачати захист від поперечної хвилі перенапруги на кожній парі, а запасні жили кабелю, які є накопичувачами енергії (антенною) із наявності ємнісного

зв'язку між жилами , рекомендується об'єднувати між собою з двох сторін і заземлювати через іскрові проміжки або розрядники з одного боку .

На ділянках з електротягою змінного струму з високим рівнем наведення напруги на кабельні лінії лінійних кіл , існує ймовірність спрацьовування газонаповнених розрядників від наведеної напруги контактної мережі (особливо при дугоутворенні на контактній мережі в аварійних режимах) . При проектуванні захисних засобів для лінійних кіл на ділянках з електротягою змінного струму застосовувати газонаповнені розрядники в найбільш відповідальних колах , що мають велику протяжність (більше 5км) і полярне управління (наприклад Н-ОН , К-ОК) , не рекомендується.

Проникнення перенапруги по колам заземлення.

По колам заземлення основний вплив перенапруги виникає в аварійних режимах роботи ліній електроживлення (коротке замикання в контактній мережі , замикання на землю різних ЛЕП , порушення каналізації тягового струму , протікання струмів сторонніх джерел електроживлення і т.д.) , а також при прямих і непрямих впливах атмосферних перенапруг.

При протіканні струмів короткого замикання або розтіканні енергії грозового розряду по поверхні землі і заземлюючих пристроїв РШ або постів ЕЦ , на заземлених клеммах елементів захисту виникає різниця потенціалів між клеммами пристроїв захисту від імпульсних перенапруг. При досягненні рівня різниці потенціалів на клеммах імпульсних перенапруг порогу його спрацьовування, відбувається іскрове перекриття проміжку імпульсної перенапруги (розрядників) . Іскрове перекриття проміжків розрядників утворює «містки » електричної дуги і розвиває струм короткого замикання (супроводжуваний струм) між полюсами джерела живлення , даного кола. Супроводжуваний струм має значну величину , яка залежить від потужності джерела живлення і опору сполучної лінії (проводів , монтажу) . При значній величині супроводжувачого струму розрядник руйнується і відбувається оплавлення (загоряння) підведеного до запобіжника монтажу.

Причина виникнення тривалого супроводжуючого струму - це відсутність в електричному колі його протікання обмежувачів струму, тобто елементів здатних обмежити величину струму до такої величини, яка дозволить знизити величину падіння напруги на клеммах розрядника до напруги його гасіння. З цією метою обмежувальними елементами можуть бути: послідовне включення з розрядником нелінійного опору (варистора), послідовно встановлені резистори або індуктивності, природне обмеження опором жил кабелю при великій його довжині або спеціального намотування необхідної кількості витків силового кабелю на клеммах підключення до потужних трансформаторів.

Час гасіння супроводжуючого струму на пристроях захисту не повинен перевищувати 1,1 с.

При проектуванні пристроїв захисту необхідно застосовувати розрядники з високим рівнем напруги гасіння або використовувати обмежувачі струму в колі розрядника (дисипативні елементи) або застосовувати розрядники з послідовним включенням нелінійних резисторів (варистори). На ділянках з електротягою змінного струму застосовувати газонаповнені розрядники необхідно з урахуванням рівня наведеного електромагнітного перенапруги від ліній контактної мережі, що визначається розрахунком з використанням методики розрахунку впливу тягової мережі електрифікованих залізниць змінного струму на лінії СЦБ.

1.3. Вплив електромагнітних завад на безпеку функціонування пристроїв залізничної автоматики

Серед найбільш важливих завдань надійності та безпеки функціонування СЦБ проблема їх електромагнітної сумісності (ЕМС) з навколишнім середовищем займає провідне місце.

Незалежно від виду виконання СЦБ (на релейно-контактній елементній базі або на мікропроцесорній основі) на пристрої СЦБ неминуче

впливають потужні імпульсні перешкоди, створювані грозовими розрядами, аварійними і комутаційними процесами в системах електропостачання. Багаторічний досвід експлуатації СЦБ переконливо показав, що енергії імпульсної завади достатньо, щоб зруйнувати ізоляцію елементів СЦБ до стану хорошої провідності ($1-10 \text{ Ом}^{-1}$). Але якщо в результаті пробою ізоляції виникає провідність, наприклад між загальним і фронтовим контактами реле I класу надійності, то ця подія має катастрофічні наслідки. Отже, імпульсна перенапруга впливає на безпеку функціонування СЦБ, побудованих на релейно-контактної елементній базі.

Електромагнітні реле, ймовірно, ще тривалий час залишаться в СЦБ навіть у тому випадку, коли значна частина пристроїв буде виконуватися на мікропроцесорах. Реле виконують функції елементів сполучення з виконавчими пристроями, наприклад централізації стрілок і сигналів на станціях, вихідних елементів компараторів (в електронному числовому кодовому автоблокуванні). Колійні приймачі рейкових кіл також виконуються у вигляді електромагнітних реле. Таким чином, в проблемі доказу безпеки мікроелектронних СЦБ існує завдання забезпечення ЕМС релейно-контактної елементної бази та доказу того, що задані ймовірнісні характеристики ЕМС будуть виконані.

Однією із причин актуальності задачі ЕМС в проблемі безпеки функціонування мікропроцесорних СЦБ являється висока чуттєвість елементів в мікросхемному виконанні. У результаті енергія перешкод, створюваних, наприклад, при контактній комутації електромагнітних реле I класу надійності з індуктивністю, що складає сотні генрі, виявляється в 20-40 разів вище енергії робочих сигналів в мікропроцесорах. При цьому через специфіку впливів джерел перешкод на рецептори (через електромагнітне поле і кондуктивно) важко заздалегідь передбачити можливі результати цих впливів. Досвід випробувань на ЕМС окремих мікроелектронних пристроїв інтервального регулювання руху поїздів показав, що ці пристрої під впливом перешкод переходили в стан небезпечної відмови.

Крім імпульсних комутаційних перешкод, які мають високу інтенсивність потоку, на мікропроцесорні СЦБ діють імпульсні перешкоди з низькою інтенсивністю потоку, утворені, як правило, електромагнітним впливом. Ці перешкоди по енергії недостатні для теплового пошкодження елементів пристроїв, але мають значення параметрів, що перевищують аналогічні показники імпульсних комутаційних перешкод. Досвід експлуатації експериментальних зразків апаратури електронного числового кодового автоблокування показав, що при достатній захищеності її від імпульсних комутаційних перешкод поява "рідкісних" перешкод призводило апаратуру в стан захисної відмови. Якщо в автоблокуванні припинення функціонування апаратури тягне за собою в основному збій графіка руху поїздів, то в станційних пристроях аналогічна подія змушує переводити управління рухом поїздів на більш небезпечний рівень. Відповідно, існує ще одне завдання забезпечення EMC мікропроцесорних і доказу виконання заданих ймовірнісних характеристик EMC.

1.4. Висновки за розділом

Зі збільшенням перевезень збільшується й тяговий струм, а відповідно і електромагнітний вплив на інші кола. Отже зі збільшенням використання електричної тяги, потрібно вирішити задачу захисту суміжних електричних ліній від впливу, що заважає або є небезпечним. На сьогодні вимоги до електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з кодовими рейковими колами значно зросли в зв'язку з широким використанням на залізничному транспорті нових науково-технічних рішень, пов'язаних з використанням мікропроцесорної техніки. Застосування схем керування, пристроїв регулювання тяги і гальмування, інформаційних шин, що охоплюють усі системи рухомого складу, диспетчерської та електричної централізації, побудованих на мікропроцесорній базі, ставить особливо високі вимоги до стійкості цих компонентів стосовно сторонніх

електромагнітних полів. Рівень завад, які виникають внаслідок роботи сучасної перетворювальної техніки, що використовується для управління роботою локомотиву, значно зріс, тому при комутації виникають коливання значних потужностей з високою тактовою частотою і токовими імпульсами великого значення. На залізничному транспорті додаткові складності при забезпеченні електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями СЦБ викликані високою щільністю компонування устаткування на рухомому складі, де силові обладнання і системи керування розташовуються поруч, рухом поїздів поблизу пристроїв зв'язку і сигналізації, а також трасуванням ліній зв'язку і СЦБ паралельно контактної мережі. Тому вирішення проблем електромагнітної сумісності пристроїв СЦБ з системою тягового електропостачання є актуальною задачею.

2. УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1. Математичне моделювання розподілу тягових струмів і їх гармонік в контактній і рейковій мережі

Для визначення спектрального складу випрямлення напруги та струму перетворюючого агрегату необхідно отримати їх реальну форму в квазіустановленому режимі. Допущення: індуктивність навантаження $L_n = 30$ мГн, тоді випрямлений струм не змінний у часі, це дає можливість розглянути процес комутації тільки з урахуванням параметрів трансформатора і вентилів. Але це не дає реальної картини електромагнітних процесів в перетворювачі та навантаженні і не дозволяє оцінити і досліджувати вплив всіх параметрів схем заміщення на форму струмів і напруги в гілках схеми. Аналітичний розрахунок перехідних процесів в силових колах перетворювача при кінцевій величині. Індуктивність навантаження призводить до громіздких виражень, необхідності вирішувати трансцендентне рівняння і без ЕОМ не можливе.

Математична модель системи тягового електропостачання представлена на рис. 2.1. Для оцінки ступеня впливу гармонік тягового струму [5, 9] на роботу рейкових кіл пропонується скористатися спрощеною схемою заміщення тягової мережі, представленої на рис. 2.2, на якому тягова мережа представлена контуром: контактна мережа-рейки. Передбачається, що зворотній тяговий струм повертається на підстанцію по рейковим ниткам і може бути як однопровідний, так і двопровідний. На схемі дві рейкові нитки одноколійної ділянки замінені одним колом і представлені контуром рейка - земля. Тяговий струм до електровозу передається по контактній мережі, яка включає в себе контактний дріт і несе трос, з'єднані між собою струнами по всій довжині анкерної ділянки. Контактна мережа у схемі заміщення також представлена одним дротом.

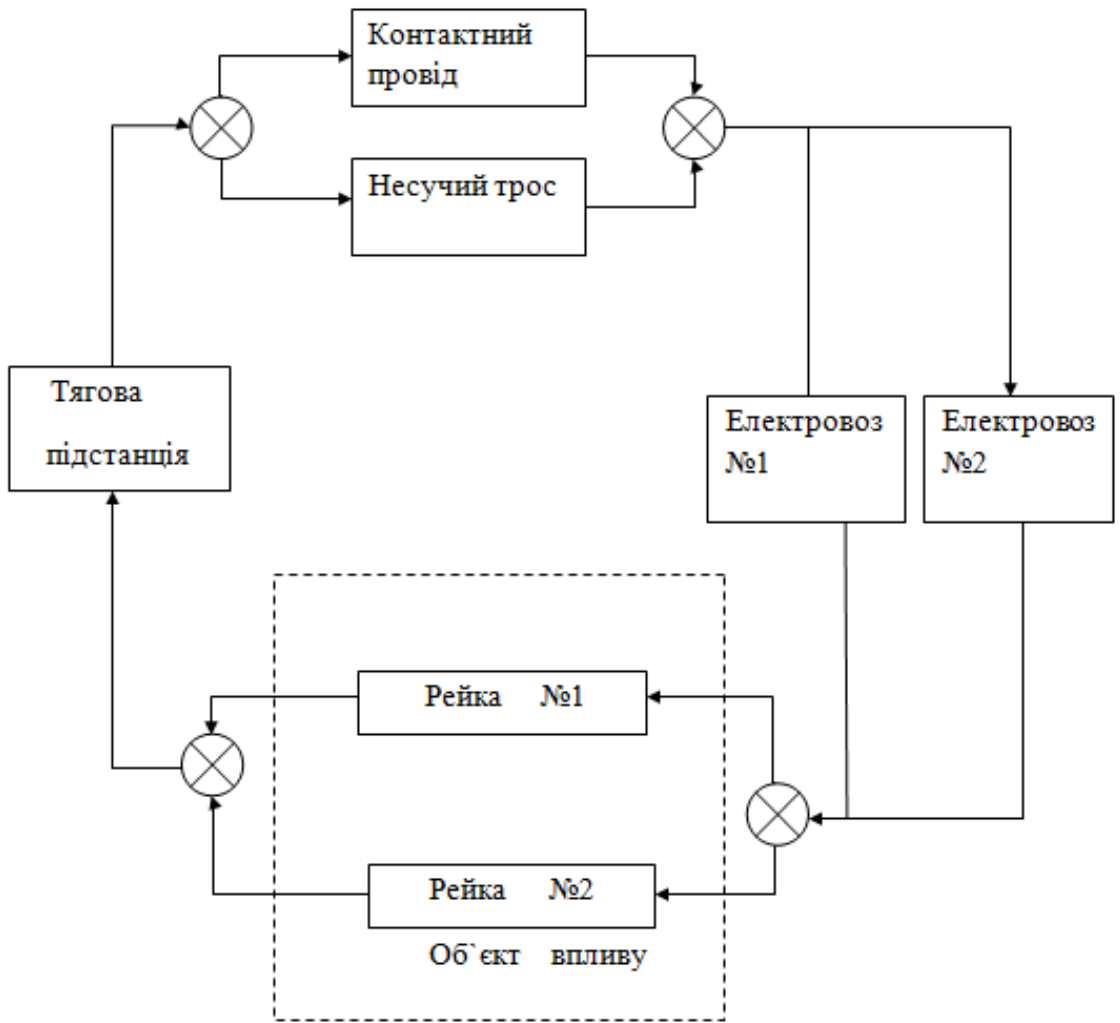


Рис. 2.1. Схема математичної моделі системи тягового електропостачання

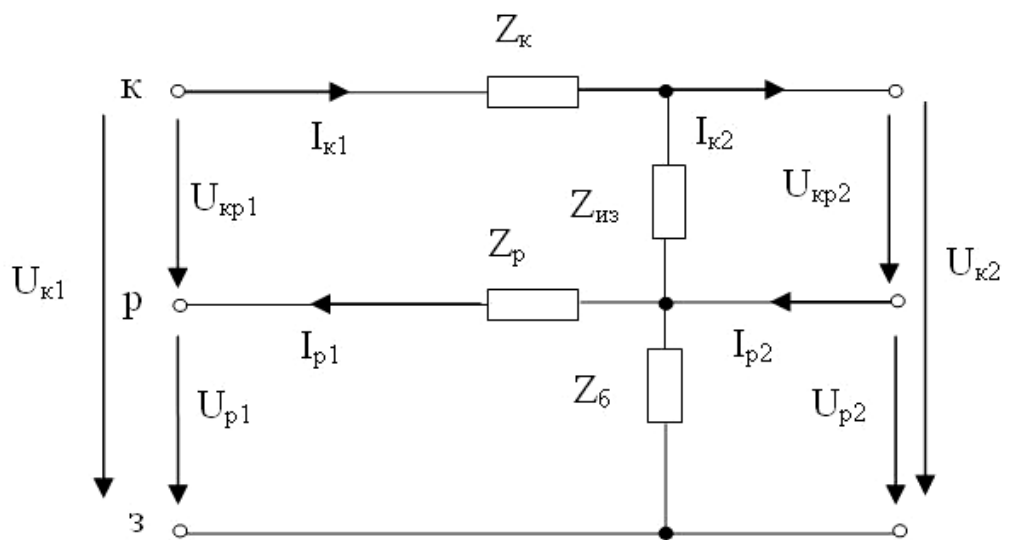


Рис.2.2. Схема заміщення тягової мережі

У результаті тягова мережа розглядається як шестиполіусник, в якому Z_k - опір контактної мережі, з урахуванням опору взаємоіндукції, Z_p - опір рейкової мережі з урахуванням опору взаємоіндукції в контурі: рейкові нитки - контактна мережа, $Z_{из}$ - опір ізоляції контактної мережі, що враховує заземлення на рейки різних залізничних конструкцій (головним чином опор контактної мережі, постів секціонування, роз'єднувачів, розрядників і т.д.), Z_b - опір баласту, який являє собою опір, який чиниться струму витoku від рейкових ниток через шпали, баласт і земляне полотно.

У загальному випадку опір дротів та ізоляції змінюється залежно від погодних та експлуатаційних умов у межах зазначених нижче.

Опір баласту (ізоляції рейкових ниток) складається з опорів рейок - рейкове скріплення - шпала - баласт - земляне полотно - земля і може бути визначене за формулою:

$$r_b = r_{нк} + \frac{\rho}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{a_{экв} \cdot a_p}\right), \quad (2.1)$$

де ρ - питомий опір ґрунту; $a_{экв}$ - еквівалентний радіус земляного полотна, рівний 1 м для одноколійної ділянки і 2 м - для двоколійної ділянки; a_p - постійна поширення рейкової мережі; $r_{нк}$ - перехідний опір рейок - земля [5].

Опір ізоляції рейкового кола становить при щєбєневому баласті 2 Ом • км, сухому і слабо промерзлому баласті 50 Ом • км, сильно промерзлому - 50 ... 100 Ом • км. Мінімальна опір ізоляції для нормального функціонування рейкових кіл має становити не менш 1 Ом • км [9, 7]

Перехідний опір рейок – земля $r_{нк}$ залежить від типу баласту і становить 0,5...1 Ом • км при чистому щєбєневому баласті, 0,3 ... 0,5 Ом • км при брудному щєбєневому баласті, 0,15 ... 0,3 Ом • км при піщаному баласті, 0,1 ... 0,15 Ом • км при баласті з домішкою глини. При збільшенні вологості перехідний опір зменшується в 1,5 ... 2,5 рази, при промерзанні збільшується у 3 ... 10 разів [6-9].

На електрифікованих залізницях до рейок приєднують споруди та конструкції, що мають зв'язок із землею [6]: опори контактної мережі, пости секціонування (ПСК), роз'єднувачі, розрядники, світлофори, релейні шафи та інше. Заземлення виконуються сталевим проводом діаметром 12 мм при електричній тязі постійного струму і 10 мм при електричній тязі змінного струму. В особливо небезпечних місцях (наприклад, опори контактної мережі з секційними роз'єднувачами, розрядниками, корпуси ПСК, пунктів паралельного з'єднання, опори і конструкції в небезпечних місцях та місцях, де виробляються посадка (висадка) пасажирів, на переїздах, мостах, шляхопроводах) заземлення виконують подвійним проводом [6].

Опір залізобетонних опор в суху погоду при високій температурі навколишнього середовища і при самих сильних морозах становить $10 \dots 10^3$ кОм, при вологій погоді і під час дощу опір знижується до $0,5 \dots 0,8$ кОм. Після дощу воно повертається до вихідного значення за 10 .. 15 год. Таким чином, в дощову погоду струми витoku сигнального та тягового струму різко зростають, а опір залізобетонних конструкцій знижується до декількох сотень Ом [6].

Опір заземлення залізобетонних опор становить 10 ... 40000 Ом. В основному воно залежить від провідності баласту в шарі між хомутами і арматурою, наявності електроізоляційних покриттів на фундаментах і заставних деталях. Штучні споруди мають опору: мости 0,2 ... 1000 Ом, шляхопроводи 0,15 ... 40 Ом, пішохідні містки і віадуки 0,4 ... 20 Ом. Опір заземлення релейних шаф світлофорних щогл - 20 ... 3000 Ом .

Опір рейкової мережі включає в себе активну і індуктивний опір рейок, опір електричних з'єднувачів і опір вторинних обмоток дросель-трансформаторів, що використовуються для пропуску зворотного тягового струму, а також опір взаємоіндукції контактна мережа - рейки. Величина цього опору залежить від типу контактної підвіски і визначена в .

Схема заміщення характерна для кожної гармоніки, що міститься у зворотному тяговому струмі. Нижче розглянуто питання розподілу напруги і

струмів по довжині тягової мережі для випадку, коли ділянка є однорідною, тобто опору проводів та ізоляції по довжині ділянки розподілені рівномірно. Система рівнянь для струмів і напруг в тягової мережі, складена за законами Кірхгофа має вигляд:

- Для тягової мережі

$$\begin{cases} \dot{U}_{kp1} = \dot{I}_{k1} \cdot Z_k + \dot{U}_{kp2} + \dot{I}_{p1} \cdot Z_p \\ \dot{I}_{k1} = \dot{I}_{k2} + \frac{\dot{U}_{kp2}}{Z_{uz}} \end{cases} \quad (2.2)$$

-для контура контактна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{k1} = \dot{I}_{k1} \cdot Z_k + \dot{U}_{k2} \\ \dot{I}_{k1} = \dot{I}_{k2} + \frac{\dot{U}_{kp2}}{Z_{uz}} \end{cases} \quad (2.3)$$

- для контура колійна мережа – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{p1} = -\dot{I}_{p1} \cdot Z_p + \dot{U}_{p2} \\ \dot{I}_{p1} = \dot{U}_{p2} \cdot \frac{1}{Z_b} + \dot{I}_{p2} \end{cases} \quad (2.4)$$

де $\dot{U}_{kp1}, \dot{U}_{kp2}$ - напруга контактна мережа - рейки, $\dot{U}_{p1}, \dot{U}_{p2}$ - напруга між рейками і землею; $\dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}$ - напруга в контурі контактна мережа - земля; $\dot{I}_{k1}, \dot{I}_{k2}$ - струм у контактній мережі; $\dot{I}_{p1}, \dot{I}_{p2}$ - струм в рейковій мережі (зворотний тяговий струм) на початку і в кінці кола відповідно.

Моделювання розподіл гармонік тягового струму по довжині фідерної зони за умови, що їх джерелами є неправильна робота випрямлячів (вихід з ладу одного з елементів групового діода) і згладжуючих фільтрів тягових підстанцій, було проведено для схеми заміщення, наведеною на рис.2.3.

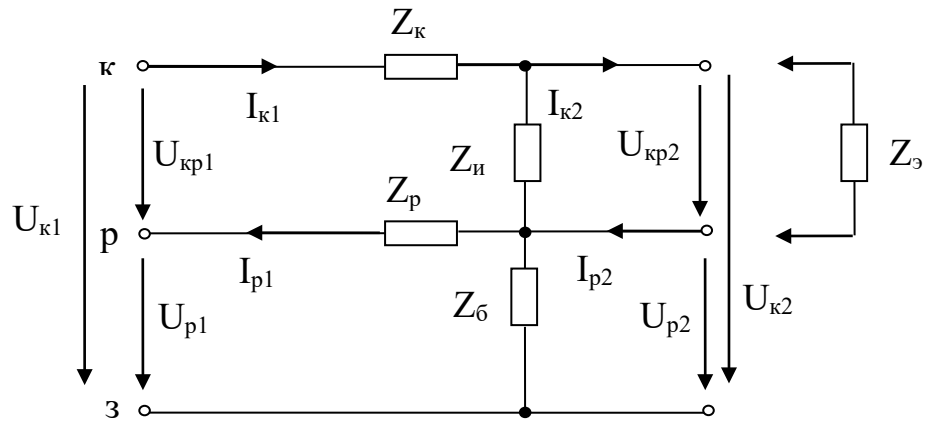


Рис.2.3. Схема заміщення однорідної тягової мережі

На даній схемі обидві рейки замінені однією, оскільки для пропуску зворотного тягового струму використовуються дві рейкові нитки з'єднані паралельно. Така схема заміщення є досить простою і зручною для розгляду питань розподілу гармонік, що містяться в тяговому струмі, по довжині фідерної зони та обліку їх впливу на роботу пристроїв автоматики (зокрема РК, її елементів і системи АЛС).

Найбільш поширеними варіантами електропостачання залізниць є одно-і двостороннє електропостачання електровозів, що знаходяться на фідерної зони. Пропонованою схемою заміщення зручно користуватися для випадку з одностороннім живленням. Якщо ж розглядати випадок з двостороннім живленням електровозів, то тут кожен елемент навантаження буде живитися від двох джерел (тягових підстанцій). При рівномірному розподіленім навантаженням, точка струморозподілу буде знаходитися в середині фідерної зони. При нерівномірно розподіленому навантаженні, як це має місце в реальному житті, вона буде зміщена в бік однієї з тягових підстанцій, тієї від якої споживається більший струм. До того ж у міру руху електровозів місцезнаходження цієї точки буде змінюватися.

Систему двостороннього електропостачання можна розділити умовно на дві з одностороннім живленням, при чому довжина такої фідерної зони буде обмежуватися точкою струморозподілу.

Для спрощення процесу моделювання будемо вважати навантаження зосередженою локально в заданій точці ділянки. Якщо брати випадок з двостороннім живленням, то точка струморозподілу буде знаходитися в середині фідерної зони, і розрахунок необхідно вести аналогічно системі з одностороннім живленням, але довжину фідерної зони вважати рівною половині живлячої ділянки. Криві струму і напруги в другій половині ділянки живлення будуть будуватися за тими самими значеннями, але узятими з протилежними знаками (тобто дзеркально відображені щодо точки струморозподілу, але побудовані в негативній півплощині). Знак в даному випадку буде говорити про живлення від однієї чи іншої тягової підстанції.

Електрична схема електровоза постійного струму (рис.2.4) включає в себе наступні елементи: опору струмоприймача R_{TK} і швидкодіючого вимикача $R_{\sigma B}$, активне $R_{дв}$ і індуктивне $X_{дв}$ опору двигуна, опір колісних пар $R_{кп}$.

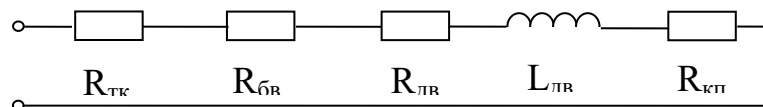


Рис.2.4. Електрична схема електровоза

Повний опір електровоза дорівнює:

$$Z_{эл} = R_{TK} + R_{\sigma B} + R_{кп} + R_{дв} + j \cdot \omega \cdot L_{дв} = R_{эл} + j \cdot X_{эл}, \quad (2.5)$$

Для спрощення розрахунків приймаємо:

$$R_{эл} = 0,5 \text{ Ом}, \quad X_{эл} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 20 \text{ Ом}.$$

Також для виконання розрахунків приймаємо такі значення опорів рейок: $Z_p = 0,11 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 8.021 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} / \text{км}$ (для рейкового кола з рейками Р65), баласту $Z_{\sigma} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, ізоляції опор $Z_{из} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ і контактної

мережі $Z_{\kappa} = 0,159 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 9,772 \cdot 10^{-4}$ Ом / км (для контактної підвіски типу ПБСМ95 + МФ-100).

Падіння напруги в колі електровоза визначалося по формулі (2.6)

$$\dot{U}_{\kappa p2} = \dot{I}_{\kappa 2} \cdot Z_{\text{ел}} \quad (2.6)$$

Струм в контактній мережі на початку лінії (2.7)

$$\dot{I}_{\kappa 1}(x) = \dot{I}_{\kappa 2} + \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{із}}(x)} \quad (2.7)$$

Струм витoku через ізоляцію опор є лінійною залежністю і описується виразом (2.8)

$$\dot{I}_{y \text{із}}(x) = \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{із}}(x)} \quad (2.8)$$

Зворотний тяговий струм в рейках в районі тягової підстанції визначається виразом (2.9)

$$\dot{I}_{p1}(x) = \dot{I}_{\kappa 2} + \dot{I}_{y \text{із}}(x) - \dot{I}_y \quad (2.9)$$

Потенціал рейок біля електровоза (2.10)

$$\dot{U}_{p2}(x) = \dot{I}_y \cdot Z_{\text{б}}(x) \quad (2.10)$$

Потенціал рейок біля тягової підстанції (2.11)

$$\dot{U}_{p1}(x) = -\dot{I}_{p1}(x) \cdot Z_p(x) + \dot{U}_{p2}(x) \quad (2.11).$$

2.2. Результати моделювання

2.2.1. Розрахунок струму електровозу

Для визначення витрати електроенергії на тягу і перевірки маси поїзда по нагріванню електроустаткування на планшеті з побудованими кривими $V(S)$ та $t(S)$ для електровозів постійного струму будують залежність струму, що споживається з контактної мережі, від відстані $I_c(S)$.

Розрахунок струмових характеристик електровоза постійного струму виконують на основі швидкісних характеристик $V(I)$, враховуючи, що струм електровоза:

$$I_e = m \cdot I_d, \text{ А} \quad (2.12)$$

де m - число паралельних кіл тягових двигунів, яка визначається схемою їх з'єднання та кількістю рушійних осей електровоза.

Число паралельних кіл тягових двигунів для восьмивісного електровоза ВЛ- 82^м, який має тільки „С” та „П” з'єднання дорівнює:

$$\text{„С” } m=1;$$

$$\text{„СП” } m=2;$$

$$\text{„П” } m=4;$$

Для прикладу розрахуємо декілька значень:

$$\text{На „С” з'єднанні: } I_e = 1 \cdot 68 = 68, \text{ А}$$

$$\text{На „СП” з'єднанні: } I_e = 2 \cdot 68 = 136, \text{ А}$$

$$\text{На „П” з'єднанні: } I_e = 4 \cdot 68 = 272, \text{ А}$$

Результати розрахунків зведемо у табл. 2.1.

На побудованих за даними табл. 2.1 залежностях $I_e(S)$ показують значення струму електровоза, які відповідають обмеженням тягової характеристики. При обмеженні сили тяги по зчепленню середнє значення струму електровоза повинне відповідати гранично припустимому значенню сили тяги електровоза. По тяговій характеристиці $F_k(V)$ визначаємо силу тяги електровоза, яка відповідає обмеженню по зчепленню (точки А, С₁, С₂, Д, Д₁, Е, Е₁, G, G₁, Н). Далі для кожної з обраних точок визначаємо силу тяги двигуна і за допомогою кривих $F_{кд}(I_d)$ знаходимо струми двигуна та визначаємо відповідні значення струму електровоза. Розрахунок зведемо у табл. 2.2.

Таблиця 2.1

Розрахунок струмової характеристики електровоза постійного струму

С,ПЗ		СП		П				
				I _e , А	ПЗ	ОЗ1	ОЗ2	ОЗ3
I _e , А	V, км/год	I _e , А	V, км/год		V, км/год	V, км/год	V, км/год	V, км/год
68	26,9	136	54,6	272	109,8	-	-	-
80	23,9	160	48,6	320	98,3	-	-	-
90	21,7	180	44,8	360	90,0	-	-	-
100	20,4	200	41,7	400	84,5	109,8	-	-
140	16,5	280	34,1	560	69,2	83,8	109,8	-
150	15,9	300	32,8	600	66,9	79,7	103,2	-
175	14,7	350	30,5	700	62,3	73,6	91,8	109,8
200	13,7	400	28,9	800	59,0	68,4	83,2	98,8
210	13,5	420	28,3	840	57,9	67,0	80,4	94,9
250	12,5	500	26,4	1000	54,5	62,0	71,4	83,4
300	11,5	600	24,5	1200	50,8	57,5	65,1	74,3
340	10,9	680	23,4	1360	48,6	54,9	61,6	69,4
350	10,7	700	23,1	1400	48,1	54,4	60,8	68,5
380	10,2	760	22,4	1520	46,8	52,7	58,9	66,1
400	10,0	800	22,0	1600	46,0	51,6	57,8	64,7
450	9,4	900	21,0	1800	44,4	49,6	55,3	61,5
500	8,9	1000	20,2	2000	42,8	47,9	53,4	59,0
550	8,5	1100	19,4	2200	41,5	46,4	51,6	57,1
600	7,9	1200	18,7	2400	40,4	45,0	50,3	55,4

Визначення витрат електроенергії та раціонального режиму ведення поїзду

Витрата електричної енергії на тягу поїзда визначається як:

$$A_m = \frac{U_m \cdot \sum_{i=1}^n (I_{ci} \cdot \Delta t_i)}{60000} \text{, кВт} \cdot \text{год} \text{,} \quad (2.13)$$

де U_m - напруга в контактній мережі, В;

I_{ci} - середнє значення струму електровоза;

Δt_i - час роботи при споживанні середнього струму I_c ;

n - кількість прямолінійних ділянок кривої струму.

Розрахунок зводимо в табл. 2.3 для руху поїзда із зупинками та табл. 2.4 для руху поїзда без зупинок.

Таблиця 2.2

Розрахунок обмежень струмової характеристики

Точки на $F_K(V)$	A	B	B1	B2	B3	B4	C	C1	Д	Д1	Е	Е1	G
З'єднання ТЕД	C	C	C→ СП	СП	СП→ П	П	П	П	П	П	П	П	G
Число паралельних кіл	1	1	1→2	2	2→4	4	4	4	4	4	4	4	4
F_K , кгс	48000	48000	48000	48000	48000	48000	46600	40000	51000	33600	45000	31400	40000
F_{KD} , кгс	6000	6000	6000	6000	6000	6000	5825	5000	6375	4200	5625	3925	5000
Режим збудження	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ПЗ	ОЗ1	ОЗ1	ОЗ2	ОЗ2	ОЗ3
I_D , А	520	520	520	520	520	520	500	580	637	425	575	435	565
I_e , А	520	520	1040	1040	2080	2080	2000	2320	2548	1700	2300	1740	2260

Таблиця 2.3

Розрахунок витрати електроенергії при русі без зупинок

Дільниця	Номер точок	I_e , А		I_{ec} , А	Δt_i , хв	$I_{ec} * \Delta t_i$, А*хв	$\sum I_{ec} * \Delta t_i$, А*хв
		I_{ep} , А	I_{ek} , А				
1	2	3	4	5	6	7	8
А-Б	1-2	520	520	520	1	520,0	16235
	3-4	1040	1040	0,8	0,65	0,5	
	5-6	2060	2060	2060	0,6	1236,0	
	6-7	2060	2000	2030	0,4	812,0	
	7-8	2000	1800	1900	0,6	1140,0	
	9-10	2340	1700	2020	0,2	404,0	
	11-12	2300	1780	2040	0,6	1224,0	
	13-14	2250	2060	2155	0,5	1077,5	
	14-15	2060	1900	1980	0,6	1188,0	
	15-16	1900	1600	1750	1,2	2100,0	
	16-17	1600	1350	1475	0,6	885,0	
	17-18	1350	1140	1245	0,9	1120,5	
	18-19	1140	1050	1095	1,4	1533,0	
	22-23	1000	1350	1175	0,7	822,5	
	23-24	1350	1600	1475	0,5	737,5	
24-25	1600	1350	1475	0,7	1032,5		
25-26	1350	1320	1335	0,3	400,5		
Б-В	31-32	1340	1350	1345	0,2	269,0	6529,0

	32-33	1350	1600	1475	0,2	295,0	
	33-34	1600	1750	1675	0,9	1507,5	
	34-35	1750	2200	1975	0,9	1777,5	
	35-36	2200	1950	2075	0,4	830,0	
	36-37'	1950	1750	1850	1	1850,0	
В-Г	37'-37	1750	1350	1550	0,5	775,0	15570,5
	37-38	1350	1320	1335	0,8	1068,0	
	38-39	1320	1600	1460	0,9	1314,0	
	39-40	1600	1950	1775	1,3	2307,5	
	40-41	1950	2200	2075	0,8	1660,0	
	41-42	2200	1750	1975	1	1975,0	
	43-44	2300	1700	2000	0,6	1200,0	
	45-46	2340	1800	2070	1	2070,0	
	50-51	2080	2100	2090	1,2	2508,0	
	54-55	2100	2520	2310	0,3	693,0	
А-Г					23,45	38333,0	

Таблиця 2.4

Розрахунок витрати електроенергії при русі з зупинками

Дільниця	Номер точок	I _e , А		I _{ес} , А	Δt _i , хв	I _{ес} *Δt _i , А*хв	ΣI _{ес} *Δt _i , А*хв
		I _{еп} , А	I _{ек} , А				
А-Б	1-2	520	520	520	1	520	14464,27
	3-4	1040	1040	0,8	0,65	0,52	
	5-6	2060	2060	2060	0,6	1236	
	6-7	2060	2000	2030	0,4	812	
	7-8	2000	1800	1900	0,6	1140	
	9-10	2340	1700	2020	0,2	404	
	11-12	2300	1780	2040	0,6	1224	
	13-14	2250	2060	2155	0,5	1077,5	
	14-15	2060	1900	1980	0,6	1188	
	15-16	1900	1600	1750	1,2	2100	
	16-17	1600	1350	1475	0,6	885	
	17-18	1350	1140	1245	0,9	1120,5	
	18-19	1140	1050	1095	1,4	1533	
	22-23	1000	1350	1175	0,7	822,5	
23-23'	1175	1500	1337,5	0,3	401,25		
Б-В	24'-25'	520	520	520	0,4	208	6322,5
	26'-27'	1040	1040	1040	0,6	624	
	28'-29'	2060	2060	2060	0,6	1236	
	29'-30'	2060	2000	2030	0,6	1218	
	30'-32'	2000	1800	1900	0,5	950	

	33'-34'	2340	1700	2020	0,7	1414	
	35'-36'	1340	1350	1345	0,5	672,5	
	36'-37'	1350	1600	1475	0,3	442,5	
	37'-38'	1600	1750	1675	1,1	1842,5	
	38'-39'	1750	2200	1975	1,1	2172,5	
	39'-40'	2200	1950	2075	0,4	830	
	40'-41'		1950	1750	0,6		
В-Г	42'-43'	800	675	737,5	0,5	368,75	27767,25
	44'-45'	2700	2680	2690	0,6	1614	
	46'-47'	2680	2580	2630	0,3	789	
	47'-48'	2580	2350	2465	0,7	1725,5	
	48'-48'	2860	2760	2810	0,6	1686	
	50'-51'	3200	2760	2980	0,3	894	
	52'-53'	3400	3000	3200	0,7	2240	
	54'-54'	3000	2400	2700	0,8	2160	
	54'-55'	2400	2100	2250	1,6	3600	
	55'-56'	2100	2200	2150	0,8	1720	
	56'-57'	2200	2400	2300	1	2300	
	58'-59'	2400	3000	2700	0,9	2430	
	60'-61'	3000	3000	3000	1	3000	
	62'-63'	3000	2400	2700	1,2	3240	
А-Г					28,65	53841,52	

Витрата електроенергії на власні потреби рівна:

$$A_{\text{вп}} = P_{\text{вп}} t, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (2.14)$$

де $P_{\text{вп}}$ - середнє значення потужності допоміжних машин,
кВт·год/хв,

$$P_{\text{вп}} = 1,67 \text{ кВт}\cdot\text{год/хв} [1].$$

t - час роботи електровоза на даному перегоні або ділянці, хв.

Для руху без зупинок:

$$t_{\text{АБ}} = 11,8 \text{ хв.}, t_{\text{БВ}} = 8,7 \text{ хв.}, t_{\text{ВГ}} = 13,0 \text{ хв.}, t_{\text{АГ}} = 33,5 \text{ хв.}$$

Для руху з зупинками:

$$t_{\text{АБ}} = 14 \text{ хв.}, t_{\text{БВ}} = 12 \text{ хв.}, t_{\text{ВГ}} = 15,4 \text{ хв.}, t_{\text{АГ}} = 41,4 \text{ хв.}$$

Повна витрата електричної енергії:

$$A = A_T + A_{ВП}, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.15)$$

де A_T - витрата електроенергії на тягу потягу, кВт·год;

$A_{ВП}$ - витрата електроенергії на власні потреби локомотива, кВт·год.

Питома витрата електричної енергії на кожному перегоні та ділянці в цілому визначається при русі з зупинками на проміжних станціях і при русі без зупинок за формулою

$$a = \frac{1000A}{(P + Q)S}, \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}, \quad (2.16)$$

де S - довжина перегону (або всієї ділянки), для якого виконується розрахунок.

Результати розрахунків зводимо в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Повні та питомі витрати електроенергії на дільницях

Перегін або ділянка	Довжина ділянки S , км	Рух без зупинок		Рух із зупинками	
		A , кВт·год	a , Вт·год/т·км	A , кВт·год	a , Вт·год/т·км
АБ	10,65	831,4	17,5	746,6	15,7
БВ	10	340,9	8,89	336,2	8,8
ВГ	10,1	800,8	20,7	1414,2	36,5
АГ	30,75	1973,1	16,7	2497	21,2

Отже можна зробити висновок, що навіть зупинка без стоянки істотно збільшує витрату електроенергії, а незаплановані зупинки потягів на перегонах, особливо з важким профілем також приводять до великої витрати електроенергії.

Результати розрахунків кривої тягового струму, який споживається електровозом на заданій дільниці при оптимальному економічному режимі ведення електровозу дано в табл.2.1 – 2.4. Цю криву тягового струму було використано для визначення розподілу тягового струму, його гармонійних складових і напруги по довжині фідерної зони дільниці з однобічним

живленням й електрифікованої змінним струмом 50Гц.

2.2.2. Розрахунок розподілу струмів та втрат напруг в контактній мережі для фідерної зони з однобічним електропостачанням

Відстань до локомотивів №1 та №2 від підстанції:

$$L1=7 \text{ км}$$

$$L2=20 \text{ км}$$

Довжина фідерної зони:

$$L=30 \text{ км}$$

Струми локомотивів №1 та №2:

$$I1=400 \text{ А}$$

$$I2=440 \text{ А}$$

Тип рейок Р65

Тип проводів контактної мережі - ПБСМ-95-МФ100

Номінальне значення напруги на шинах тягової підстанції:

$$U_k=27500 \text{ В.}$$

Також для виконання розрахунків приймаємо такі значення:

опір рейок: $Z_p = 0,11 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 8.021 \cdot 10^{-4} \text{ Ом / км}$ (для рейкового кола з рейками Р65), баласту $Z_b = 100 \text{ Ом} \cdot \text{км}$, ізоляція опор $Z_{из} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ і контактної мережі $Z_k = 0,159 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 9.772 \cdot 10^{-4} \text{ Ом / км}$ (для контактної підвіски типу ПБСМ95 + МФ-100).

Розрахуємо розподіл тягового струму по довжині фідерної зони дільниці з однобічним живленням довжиною 30 км:

Опір тягової мережі:

- активна складова опору тягової мережі

$$R = R_k + R_p \quad R = 0,11 + 0,159 = 0,269 \text{ Ом/км}$$

- реактивна складова :

$$X = X_k + X_p = j \times 2\pi f \times (8,021 \times 10^{-4} + 9,772 \times 10^{-4}) = j \times 2 \times \pi \times 50 \times (8,021 \times 10^{-4} + 9,772 \times 10^{-4}) =$$

- модуль опору тягової мережі:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad |Z| = 0,6218 \text{ Ом/км} \quad (2.17)$$

Струм фідера:

$$I_f = I_1 + I_2 \quad I_f = 840 \text{ А} \quad (2.18)$$

Визначимо падіння напруги в тяговій мережі до струмоприймачів поїздів №1 та №2. Падіння напруги до струмоприймача поїзда від струмів, якими живляться поїзди, які розташовані справа від нього:

$$\Delta U_{k1} = |Z| \times L_1 \times I_1 \quad \Delta U_{k1} = 1741 \text{ В} \quad (2.19)$$

$$\Delta U_{k2} = |Z| \times (L_1 \times I_1 + L_2 \times I_2) \quad \Delta U_{k2} = 7212 \text{ В} \quad (2.20)$$

Діаграма розподілення струмів та втрат напруг в контактній мережі показана на рис. 2.6. Падіння напруги на струмоприймачі не перевищує номінального допустимого по ГОСТ 2200 В.

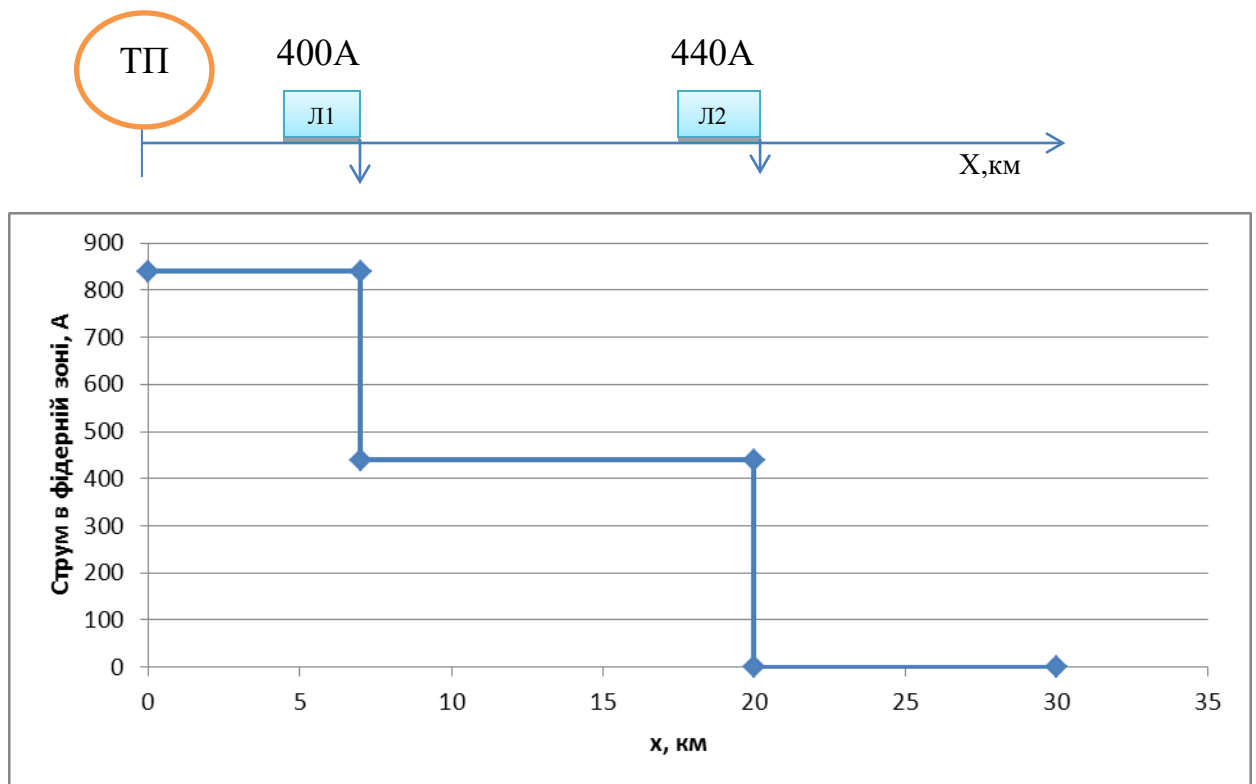


Рис. 2.5. Діаграми розподілення струмів в контактній мережі

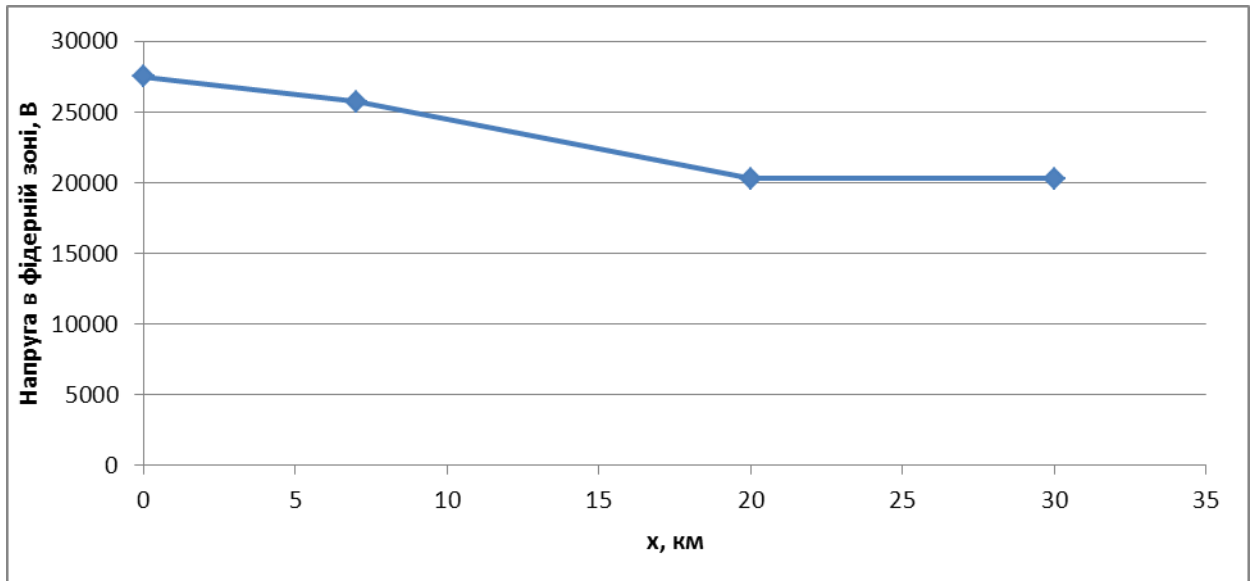


Рис. 2.6. Діаграми розподілення втрат напруг в контактній мережі

2.3. Розрахунок розподілу гармонійних завад по довжині фідерної зони

В процесі роботи регуляторів під час пуску тягових двигунів (більше 30с) в сигнальних каналах 25-375 Гц безперервно протікають струми завад, максимальна амплітуда яких залежить від частоти:

Частота, Гц	25	50	75	125	175	225	275	325	375
Амплітуда, А	4,7	1,1	6,2	3,8	2,6	2,0	3,4	2,6	2,2

Таблиця 2.6

Розрахунок опорів для гармонічних завад

Частота F, Гц	Активна складова опору R_T , Ом/км	Реактивна складова опору X_T , Ом/км	Модуль повного опору Z_T , Ом/км
25	0,269	0,280309	0,388503
75	0,269	0,840928	0,882905
125	0,269	1,401547	1,427128
175	0,269	1,962166	1,980519
150	0,269	1,681856	1,703233
250	0,269	2,803094	2,815971
350	0,269	3,924331	3,93354

Розрахунок напруг гармонічних завад

Частота F, Гц	Струм I ₃ , А	Падіння напруги на 1-му локомотиві U ₃ , В	Падіння напруги на 2- му локомотиві U ₃ , В
25	4,7	12,78174	36,51925
75	1,1	6,798368	19,42391
125	6,2	61,93736	176,9639
175	3,8	52,6818	150,5194
150	36,75	438,1566	1251,876
250	13,08	257,8303	736,6581
350	5	137,6739	393,354

2.4. Спектральний склад струму в мережі від випрямляючого електровозу

Джерелом гармонічних складових струму в системі електропостачання змінного струму являється перетворювальний агрегат електровозу. Гармонійний спектр мережевого (що споживається з тягової мережі) струму перетворювача електровозу змінного струму залежить від прохідної позиції, швидкості руху, рівня напруги на струмоприймачі, місця розташування електровозу на фідерній зоні.

Рекомендується в розрахунках приймати спектр у віддаленому від тягової підстанції кінці тягового плеча живлення. (таб.2.8.). Отримати уточнений спектр мережевого струму електровозу при будь-якому його розміщенні можна, розклавши в ряд Фур'є криву цього струму. При оцінювальних розрахунках можливо замінити реальну криву мережевого струму, кривою прямокутної форми з тим же діючим значенням з послідовним розкладенням в ряд Фур'є.

Струми у віддаленому від підстанції кінці тягового плеча живлення

Номер гармоніки, k	Частота струму F, Гц	Значення I _k , А, для ділянок	
		Одноколіїної	Двоколіїної
1	50	147	147
3	150	36,75	36,75
5	250	13,08	12,24
7	350	5,0	4,46
9	450	3,5	3,04
11	550	2,26	1,93
13	650	1,62	1,34
15	750	1,17	0,96
17	850	0,9	0,73
19	950	0,71	0,57
21	1050	0,54	0,43
23	1150	0,40	0,32
25	1250	0,34	0,26
27	1350	0,28	0,22
29	1450	0,25	0,20
31	1550	0,23	0,17
33	1650	0,21	0,16
35	1750	0,19	0,14
37	1850	0,18	0,13
39	1950	0,16	0,12
41	2050	0,15	0,11

Примітка. Для електрорухомого складу з рекуперативним гальмуванням значення струмів гармонік підвищуються на 20%.

2.5. Висновки за розділом

Удосконалено математичну модель системи тягового електропостачання за рахунок введення в її схему заміщення опорів і

провідностей ізоляції дротів контактної та рейкової мереж, що дозволило враховувати дію перехідних процесів в тяговій мережі змінного чи постійного струму.

Результати моделювання тягової мережі, в якій рейкова мережа є неоднорідною, показали, що коли на ділянці знаходиться один електровоз, а її живлення однобічне, то струм в контактній мережі розподіляється подібно до однорідного, оскільки ні струм електровозу, ні падіння напруги на ньому, ні опори ізоляції не залежать від опору баласту. Зі збільшенням частоти гармоніки при рівних амплітудах спостерігається збільшення струму в контактній мережі, оскільки опір електровоза і контактної мережі має індуктивний характер і є прямо пропорційним частоті струму.

Виконано дослідження частотних характеристик релейних кінців перегінних і станційних рейкових кіл, які використовуються на ділянках з електротягою змінного струму. Виявлені найбільш небезпечні завади частотою 25, 75 і 100 Гц для колійного реле перегінного рейкового кола 25 Гц, які можуть привести до його помилкового спрацьовування. Запропонована математична модель, яка дозволяє оцінювати розподіл гармонік тягового струму по довжині фідерної зони. Визначено, що в якнайгірших умовах опиняються рейкові кола, розташовані в районі тягових підстанцій.

Більшість математичних моделей не враховують або зневажають, спрощують деякі параметри рейкових кіл та схеми заміщення електричних тягових мереж. Тому дуже важливо було уточнити схему заміщення так, щоб стало можливим враховувати більше число чинників, що впливають на розподіл гармонік струму і напруги в них, визначити джерела завад, що впливають на передачу сигнальних струмів по рейкових колах; теоретично проаналізувати розподіл гармонік напруги і струмів по довжині фідерної зони, знаючи спектральний склад тягового струму, визначений експериментально.

Запропоновано удосконалену математичну модель, яка дозволяє оцінювати розподіл гармонік тягового струму по довжині фідерної зони. Тяговий струм який споживається електровозом і залежить від профілю дільниці, режиму ведення електровозу, способу з'єднання тягових електродвигунів та їх типу. Аналогічно за вказаними вихідними даними було визначено спектральний склад зворотного тягового струму, який було порівняно з експериментальними даними. Визначено, що в якнайгірших умовах опиняються рейкові кола, розташовані в районі тягових підстанцій та ті на яких в даний час знаходиться електровоз. Теоретично проаналізовано розподіл гармонік напруги і струмів по довжині фідерної зони, знаючи спектральний склад тягового струму, визначений експериментально.

При цьому амплітуда гармоніки буде найбільшою і досягне свого максимального значення в місцях підключення відсмоктуючих фідерів.

Відносна помилка при порівнянні розрахованих і експериментальних даних (потенціалів рейок, струмів в рейковій мережі і витоку) при виконанні досліджень на однорідних ділянках тягової мережі з однобічним живленням дільниць в період їх інтенсивного завантаження не перевищувала $\pm 10\%$.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЯГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Тягове навантаження від високошвидкісних електрифікованих залізниць негативно позначається на якості електроенергії. Тягове навантаження вимагає живлення від енергосистеми з великою потужністю короткого замикання. При цьому вона впливає на роботу енергосистеми, і з цим впливом необхідно рахуватися. На високошвидкісних залізницях України використовується однофазна тягова система електропостачання з напругою 25 кВ 50 Гц і система тягового електропостачання 3кВ постійного струму. На основі аналізу поточного стану цих систем було проведено дослідження впливу тягового навантаження на небаланс споживаного струму і на стабільність енергосистеми в цілому.

Для отримання об'єктивної інформації про процеси в мережі на тяговій підстанції була встановлена система моніторингу якості електроенергії. Були проаналізовані дані про струми і напруги, оцінено вплив тягового навантаження на показники якості електроенергії. Дослідження показали, що найгірший вплив на якість електроенергії здійснює асиметрія струмів у трифазній системі. Оскільки регіональні мережі зазвичай мають секціоновані системи шин, включення однофазних трансформаторів в усі фази для балансування навантаження в трифазній системі не завжди приводить до бажаного результату. В роботі запропонований алгоритм управління системою тягового електропостачання, який дозволяє підвищити надійність роботи електромережі та якість електроенергії в ній. Отримані результати дозволяють говорити про доцільність застосування запропонованого підходу на практиці.

Високошвидкісні електропоїзди відрізняються великою пропускнуою здатністю і енергоефективністю, що дозволяє вважати їх екологічно чистим видом транспорту. У відповідності з стратегією розвитку інфраструктури України було створено програму «Drive Ukraine 2030» передбачається

будівництво високошвидкісних електрифікованих залізниць для підвищення пропускної здатності основних залізничних магістралей.

У порівнянні з традиційними електрифікованими залізницями високошвидкісні залізниці працюють з істотно більшою завантаженям, що вимагає більш надійних і потужних систем тягового електропостачання, які повинні бути стійкі до великих пікових навантажень.

Дослідження, що стосуються систем тягового електропостачання, в якому особлива увага приділялася проблемам вищих гармонік і небалансу. В результаті було виявлено, що тягове навантаження приводили до погіршення якості електроенергії в електромережах загального призначення.

Асоціація "Високошвидкісні магістралі" пропонує побудувати швидкісну залізницю з Китаю в Європу через Україну. Магістраль, за задумом авторів ідеї, з'єднає Піднебесну з 7 державами – Казахстаном, Узбекистаном, Туркменістаном, Азербайджаном, Грузією, Україною і Польщею. Ширина колії на всьому шляху повинна відповідати китайському стандарту, тобто 1435 мм замість 1520 мм, а швидкість руху поїздів повинна бути більше 250 км / год.

З 2018 року планувалось розпочати будову нової залізничної евроколії Одеса-Київ-Львів і Львів - Варшава. Це буде перший варіант швидкісної залізниці в Україні зі швидкістю 250 км / год. Відстань між населеними пунктами можна буде подолати за 2-2,5 години.

В таких умовах вплив тягового навантаження на якість електроенергії вже не можна ігнорувати. При цьому характер впливу на енергосистему нових навантажень відрізняється від впливу традиційних тягових підстанцій, зокрема рівень вищих гармонік став нижче, в той час як струми зворотної послідовності, навпаки, зросли. Таким чином, для вирішення проблем з якістю електроенергії та подальшого розвитку високошвидкісних залізниць необхідні подальші дослідження.

3.1. Характеристика тягового навантаження при електричній тязі змінного струму в умовах швидкісного руху

Для нормального функціонування високошвидкісних залізниць потрібна система електропостачання з великою потужністю короткого замикання. При цьому тягову електромережу може з'єднати із загальною енергосистемою через однофазні трансформатори, трифазні трансформатори, з'єднані в розімкнутий трикутник або зрівняльні трансформатори. Наприклад, Китаї в основному застосовуються однофазні трансформатори (рис.3.1) з причини їх низької ціни; в Україні, Росії, Білорусії – через трифазні трансформатори (рис.3.2).

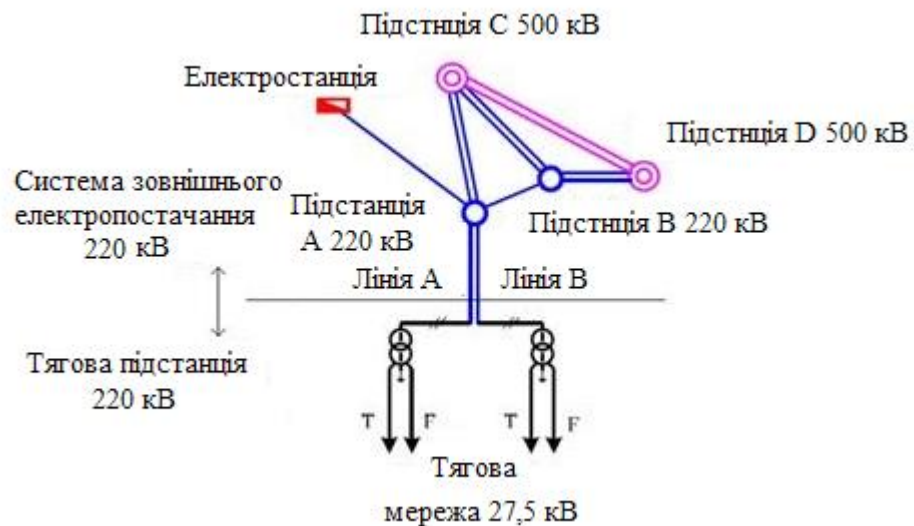


Рис.3.1. Система тягового електропостачання змінного струму при живленні тягової мережі від однофазних трансформаторів

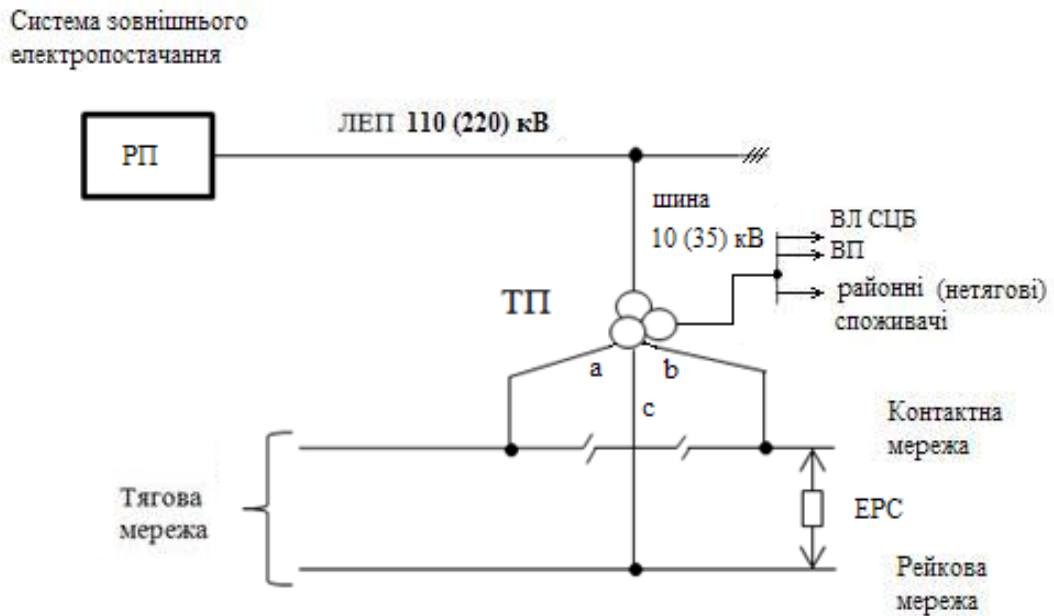


Рис.3.2. Система зовнішнього електропостачання змінного струму 25 кВ 50 Гц при живленні від трифазного трансформатора

Основним джерелом живлення в обох випадках (див. рис.3.1, 3.2) є високовольтні лінії електропостачання (ЛЕП 110 (220) кВ). Наприклад, лінії А та В живляться від вузлових підстанцій 500 кВ і електростанції 220 кВ. Для живлення тягової мережі використовуються два однофазних трансформатора, первинні обмотки яких підключені до фаз А і В ліній А і В (див. рис.3.1). У нормальному режимі роботи один з трансформаторів живить контактну мережу, а другий знаходиться в резерві. Один з виводів 27,5 кВ трансформатора заземлений, а другий розлучений по лініях Т і F. Зазвичай для живлення використовується лінія Т, а лінія F знаходиться в резерві (рис.3.1). Така схема електроживлення високошвидкісних магістралей застосовується в Китаї (дільниця Ухань-Ганчжоу) зі швидкістю руху близько 350 км/год.

Тягова підстанція може розглядатися як джерело струмів зворотній послідовності і струмів гармонік, поширення яких показано на еквівалентній схемі на рис.2. Для оцінки впливу тягового навантаження на якість електроенергії на підстанції А (220 кВ) встановлена відповідна система

контролю. Ця система контролює напругу на шині 220 кВ підстанції А, а також струм і потужність навантаження на лінії А (рис.3.3).

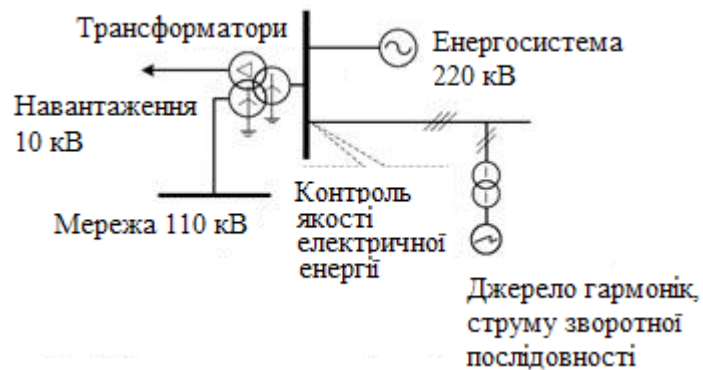


Рис. 3.3. Розповсюдження струмів гармонік і струмів зворотної послідовності від тягової підстанції

Основна частка навантаження тягової підстанції доводиться на власне електричну тягу, тобто на потужність, споживану поїздами на даній ділянці залізниці. Як правило, поїзд знаходиться в одному з трьох режимів: прискорення, рух з постійною швидкістю і гальмування до повної зупинки.

Графік навантаження, показаний на рис. 3, побудований для лінії А. Активна потужність змінюється в залежності від дорожньої ситуації. При прискоренні поїзда споживається найбільша активна потужність, а при гальмуванні вона навіть стає негативною, тобто віддається в мережу. Джерелом реактивної потужності переважно є розподілена ємність розподільного кабелю, яка не залежить від режиму роботи залізниці.

Оскільки активне навантаження тягової підстанції залежить від інтенсивності (графіку) руху поїздів, вона буде відчувати безперервні флуктуації, як показано на рис.3.4.

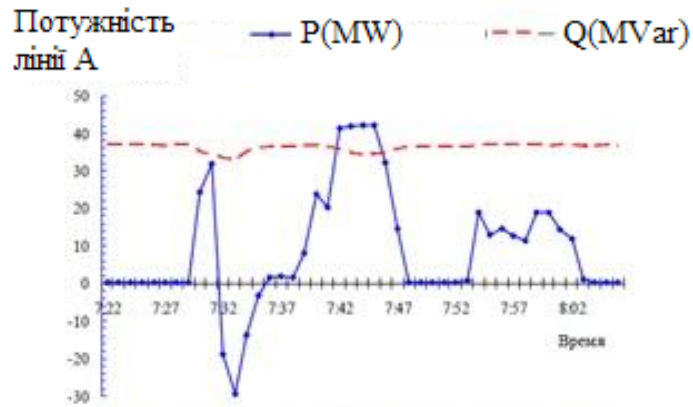


Рис.3.4. Зміна потужності тягового навантаження в часі

У нормальному режимі роботи залізниці живлення навантаження здійснюється через лінію А. З огляду на те, що розподілена ємність магістрального кабелю 220 кВ на землю вельми велика, і те, що розподіленої ємністю тягової мережі 27.5 кВ також не можна знехтувати, система тягового електропостачання може бути представлена спрощеною схемою заміщення, показаної на рис.3.5.

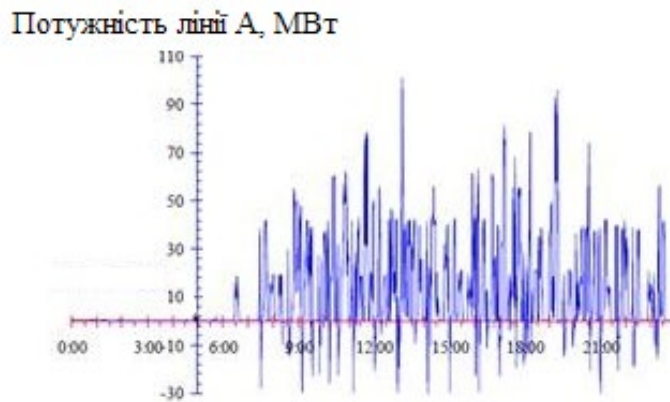


Рис. 3.5. Добовий графік споживання потужність тяговим навантаженням

На рис. 3.6 показаний струм навантаження, що йде по лінії А під час під'їзду поїзда до живильної секції, гальмування і повторного розгону. При цьому ситуація повністю відповідає схемі заміщення, показаної на рис. 3.5. Ємнісна складова струму фази С становить близько 80 А, а тяговий струм в

фазі В або С становить 150-200 А. Як наслідок буде спостерігатися значна асиметрія навантаження по струму.

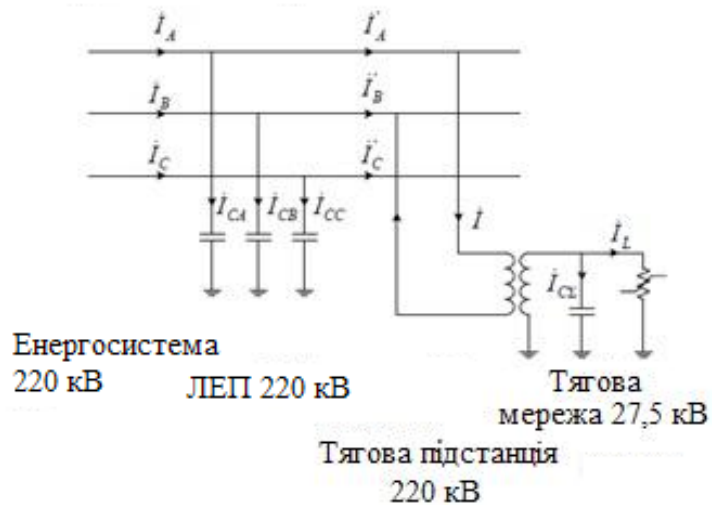


Рис. 3.6. Еквівалентна схема системи тягового електропостачання

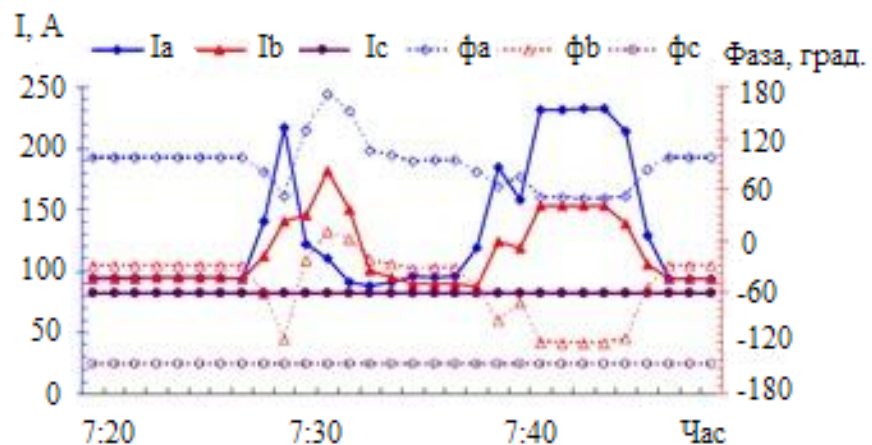


Рис.3.7. Струм споживання електропоїздом

На залізницях України, електрифікованих змінним струмом, асиметрія може досягати 15 – 20 %.

Оскільки напруга на шини підстанції А близька до напруги тягової підстанції, можна вважати, що розподілений ємнісний опір X_C кабельної ЛЕП щодо землі підключено безпосередньо до шини 220 кВ підстанції А. Відповідно, щодо шини 220 кВ підстанції А еквівалентна напруга в системі

складе $E_{\text{сист}}' = \frac{X_C}{X_C - X_{\text{сист}}} \bar{E}_{\text{сист}}$, еквівалентний імпеданс системи –

$X_{сист}' = \frac{X_C}{X_C - X_{сист}} X_{сист}$, а потужність короткого замикання –

$S_{кз} = \frac{U_{av}}{X_{сист}} E_{сист}'$. З огляду на, що тягове навантаження $P_H = U_{av} \cdot I$, і,

отримаємо вираз для коефіцієнта небалансу на шині 220 кВ:

$$K_H \approx \frac{P_H}{\sqrt{3} S_{сист}}, \quad (3.8)$$

З формули (3.8) можна бачити, що здатність системи витримувати тягове навантаження визначається її потужністю короткого замикання. Відповідно до вимоги коефіцієнт небалансу по напрузі не повинен перевищувати 2 %. Щоб виконати цю вимогу, при тяговому навантаженні 100 МВА потужність короткого замикання повинна становити не менше 2886.84 МВА, що важко реалізувати для мережі 110 кВ. Таким чином, тягова підстанція повинна інтегруватися в мережу 220 кВ.

Аналогічно, здатність системи витримувати імпульсне (короткочасне) навантаження також визначається потужністю короткого замикання. Чим більше потужність короткого замикання, тим слабкіше впливає на мережу тягове навантаження.

Також було проаналізовано вплив стрибків небалансу при тяговому навантаженні. На тяговій підстанції струм зворотної послідовності I_2 навантаження дорівнює струму прямої послідовності I_1 , і коефіцієнт небалансу по струму $K_i = I_2 / I_1 = 100\%$. Через симетрируючий вплив ємнісного струму в кабельній лінії, ступінь небалансу за струмом і напругою на підстанції А 220 кВ буде нижче. Графіки коефіцієнтів небалансу по току в лінії А і за напругою на шині 220 кВ показаний на рис. 3.8, 3.9. Коефіцієнти розраховані на основі реальних даних, отриманих від системи моніторингу якості електроенергії, встановленої на підстанції А.



Рис. 3.8. Залежність коефіцієнту небалансу за струмом в лінії А від часу (протягом доби)

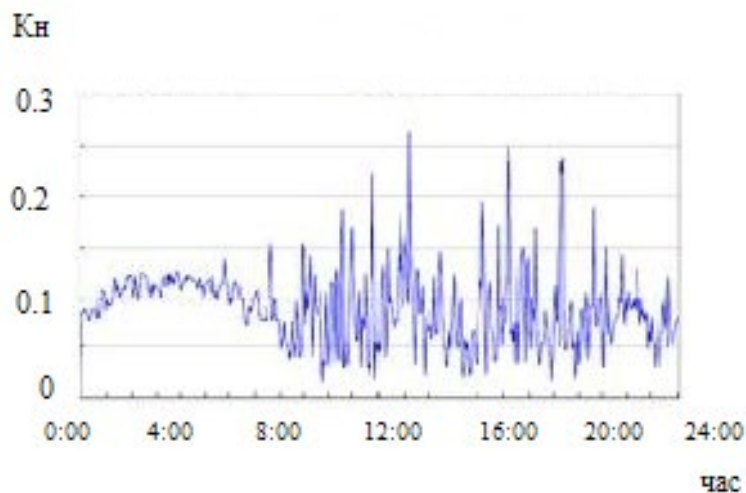


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнту небалансу за напругою на шинах тягової підстанції від часу (протягом доби)

З отриманих даних можна бачити, що максимальний коефіцієнт небалансу за струмом при великому тяговому навантаженні може бути понад 90 %, внаслідок чого коефіцієнт небалансу по напрузі може досягати 0.25 %. На практиці коефіцієнт небалансу по напрузі може успішно відповідати вимогам згідно з яким небаланс по напрузі не повинен перевищувати 2%.

У той же час не можна забувати і про вплив стрибків тягового навантаження на стабільність величини напруги. На рис. 3.10 показана

реальна ситуація з флікеру. Дози флікера, виміряні для інтервалів в 10 хвилин і 2 годин, не досягають граничних меж що доза флікера за 10 хвилин не повинна перевищувати 0.8%, а за 2 год - 0.6%. Відповідно до вищенаведеного аналізу, якщо одиночна тягова підстанція живиться від потужної енергосистеми, де виникають небаланс і просадки через тягове навантаження, можна зробити висновок що вони мало впливати на якість електроенергії. Відповідно показники якості електроенергії можуть укладатися в рамки вимог і стандартів.

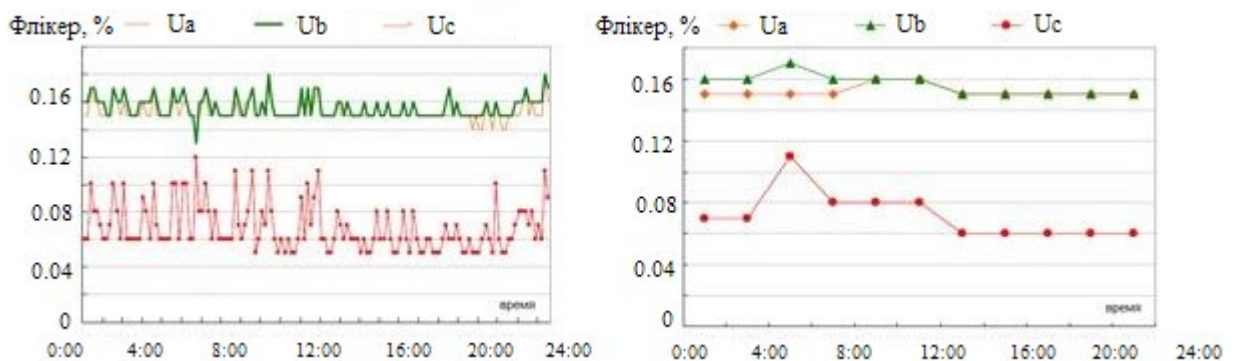


Рис. 3.10. Результати вимір флікеру на шинах тягової підстанції

Оцінемо вплив струмів гармонік. Для живлення тягових двигунів постійного струму від мережі змінного струму використовуються однофазні випрямлячі. Теоретичний аналіз показує, що випрямлячі з числом фаз k генерують струми гармонік з частотою $2k \pm 1$, і для двофазного випрямляча найбільший рівень матиме третя гармоніка. Гармоніки напруги і струму, переважно обумовлені впливом тягового навантаження. В період з 06:00 по 24:00, коли залізниця найбільш завантажена, рівень 3-й гармоніки (150 Гц) істотно вище, ніж в інший час. У той же час, струм гармонік викликає поява гармонік напруги на шині 220 кВ підстанції А, при цьому рівень 3-й гармоніки також вище, ніж у інших гармонік.

Напруга 3-й гармоніки коливається в межах 500 ... 800В, що відповідає відносному рівню менш 0.35%. При цьому коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги становить близько 0,7%. Це означає, що як рівень

гармонік, так і коефіцієнт спотворень укладаються у вимоги [14, 16]. Виходячи з вищенаведеного аналізу, можна стверджувати, що якщо тягова підстанція живиться від досить потужною енергосистеми, вплив тягового навантаження на якість електроенергії несуттєвий.

3.2. Підвищення якості електроенергії в розподільчих мережах тягових споживачів

Технічні заходи щодо підвищення якості електричної енергії спрямовані на забезпечення виконання умов електромагнітної сумісності системи електроживлення, прокладки кабелів, заземлення, грозозахисних приладів, обмеження комутаційних перенапруг, а також на усунення перешкод, що створюються випрямлячами і електромагнітними пристроями.

При проектуванні системи електроживлення технологічних установок або пристроїв автоматизації, що задовольняє електромагнітній сумісності, необхідно:

- а) забезпечити якість електричної енергії;
- б) виключити взаємний вплив приладів через систему електроживлення;
- в) виключити вплив елементів пристроїв великої потужності, таких як дугові печі, зварювальні агрегати, преси, перетворювачі вентильні.

Для забезпечення електромагнітної сумісності використовують:

- фільтри низьких частот;
- додаткові шунтуючі резонансні контури, налаштованих на вищі гармоніки;
- динамічні компенсаційні пристрої для згладжування імпульсного навантаження;
- симетрування мережі реактивними елементами;
- підключення потужних споживачів до мережі більш високої напруги.

При проектуванні системи електроживлення пристроїв вимірювань, управління і регулювання необхідно враховувати такі особливості:

- велика кількість компонентів малої потужності вимагає підвищеної якості напруги живлення;

- споживачі можуть мати мережеві елементи з некерованими випрямлячами і захисними конденсаторами великої ємності. Їх робота супроводжується значними пусковими струмами, а в стаціонарних режимах – імпульсними струмами, які заважають нормальному функціонуванню інших споживачів.

Для забезпечення електромагнітної сумісності і підвищення надійності системи електропостачання, використовують:

- мережеві заводопригнічуючі фільтри для згладжування перехідних напруг;

- стабілізатори напруги для вирівнювання коливань напруги і пригнічення вищих гармонік;

- системи безперебійного живлення, які вмикають при зменшенні і зникненні напруги мережі. Статична система безперебійного живлення складається з випрямляча, акумулятора-накопичувача енергії та інвертора і підключається на період від декількох хвилин до декількох годин;

- дизель-генераторні агрегати (ДГА), які вмикаються при тривалих перервах в електропостачанні і для живлення електроспоживачів першої і особливо важливої першої категорії.

Слід зазначити, що норми на електромагнітну сумісність (ЕМС) потребують корегування і подальшої розробки. В даний час нормують граничні значення показників якості електроенергії, які іноді називають показниками ЕМС обладнання. Для забезпечення ЕМС обладнання необхідно мати комплекс взаємно узгоджених норм, що застосовуватимуться як при проектуванні, так і при експлуатації електричних мереж і підприємств.

В системах електропостачання багатьох підприємств норми якості електроенергії не виконуються, що призводить до значних економічних збитків і соціальних витрат через:

- відставання зростання генеруючих потужностей і розвитку електричних мереж від зростання електричних навантажень;
- не налагоджена робота системи електропостачання з новим технологічним обладнанням і компенсуючими пристроями;
- відставання електротехнічної промисловості у випуску достатньої кількості і номенклатури технічних засобів з контролю і автоматичного регулювання напруги.

Усунення останнього недоліку є особливо актуальним у зв'язку зі специфічними властивостями електроенергії як товарної продукції: її не можна складувати, процес вироблення, передачі і споживання йде безперервно і одночасно. Так як не можна повернути назад постачальнику неякісну продукцію, то необхідно забезпечити безперервний контроль і автоматичне регулювання якості електроенергії на всіх рівнях ієрархії електроенергетичної системи.

3.3. Висновки за розділом

На основі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

- тягове навантаження, пов'язане з роботою високошвидкісної залізниці, носить коливальний характер і є джерелом вищих гармонік і струмів зворотній послідовності, що здійснює негативний вплив на енергосистему в цілому;
- система тягового електропостачання інтегрується в енергосистему з великою потужністю короткого замикання, що дозволяє нівелювати вплив тягового навантаження на якість електроенергії;
- найбільш істотним фактором, що впливає на якість електроенергії, є небаланс трифазного струму, обумовлений тягової навантаженням.

Коефіцієнт небалансу за струмом при наявності великого тягового навантаження може досягати 90%. Тому повинен проводитися моніторинг цього показника. Крім того, слід брати до уваги можливий вплив цього

небалансу за рахунок релейного захисту. Динамічний розвиток високошвидкісних залізниць може привести до значного підвищення частки тягового навантаження. При цьому виникає необхідність створення більш надійних систем електропостачання, що вимагає тісної взаємодії між мережевими операторами і залізничними компаніями для вирішення проблем, пов'язаних з будівництвом і експлуатацією високошвидкісних ліній.

Розглянуто алгоритм управління системою тягового електропостачання, який дозволяє підвищити надійність роботи електромережі та якість електроенергії в ній. Отримані результати дозволяють говорити про доцільність застосування запропонованого підходу на практиці.

4. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ РУХОМОГО СКЛАДУ З ПРИБОРАМИ СЦБ ТА ЗВ'ЯЗКУ

В останні роки роль електромагнітної сумісності значно зросла в зв'язку з використанням на рухомому складі комп'ютерних систем управління і статичних перетворювачів великої потужності.

Способи забезпечення внутрішньої сумісності на рухомому складі та зовнішньої (з пристроями, що належать і не належать до залізниці) на перший погляд можуть бути такими ж, як на промислових підприємствах. Багато компонентів обладнання тягового рухомого складу можна порівняти з застосовуваними в промислових пристроях приводу і системах автоматизації виробничих процесів. Багато в чому схожі й екологічні вимоги.

Проте забезпечення електромагнітної сумісності на рухомому складі має суттєві особливості, які в значній мірі визначають її концепцію.

Вимоги до рівня електромагнітної сумісності на сучасному рухомому складі містять ряд визначальних положень, яким на більшості промислових підприємств надається значно менше значення.

Головна відмінність у вимогах визначається тим, що розглянута з точки зору сумісності одиниця рухомого складу є зазвичай об'єктом, що рухається через міста і в природних ландшафтах на великі відстані. При цьому рухомий склад не повинен мати шкідливого впливу на навколишнє середовище і не піддаватися стороннім заважаючим впливам. Оскільки весь простір, що прилягає до залізничних ліній, ніколи не може бути повністю досліджено з точки зору електромагнітної сумісності і до того ж умови в ньому можуть постійно змінюватися, рухомий склад на відміну від стаціонарних промислових установок повинен виконуватися в розрахунку на експлуатацію в невивченою і змінного навколишнього середовищі.

Прагнення зробити рухомий склад залізниць загальнодоступним також веде до виникнення мінливих і заздалегідь точно не визначених умов. В особливій мірі це відноситься до проїзду пасажирів, що користуються

портативними радіостанціями і мобільними телефонами. Тут в особливій мірі повинні бути дотримані вимоги захищеності пристроїв рухомого складу від заважають впливів. В умовах промислових підприємств ця небезпека, як правило, усувається за допомогою організаційних заходів.

Якщо розглядати проблему з точки зору заважаючих впливів, випромінюваних рухомим складом, в цьому випадку вимоги повинні бути також надзвичайно високими. Так, для забезпечення безпечного проїзду в поїздах пасажирів з електростимулятором серцевої діяльності необхідні жорсткі норми на рівень статичних і низькочастотних магнітних полів. Це досягається шляхом значних витрат, так як в вагонах сучасних електропоїздів відстані від пасажирів до джерел таких полів (компонентів тягового приводу, провідників з великими струмами) невеликі.

Ще однією особливістю рухомого складу щодо електромагнітної сумісності є близьке розташування елементів силової електроніки від пристроїв СЦБ і зв'язку, що працюють на індуктивному принципі. Крутизна фронту імпульсів напруги в тягових перетворювачів, що працюють на тиристорах, становить 0,5 - 1 кВ / мкс, а на біполярних транзисторах з ізольованим затвором - від 3 до 10 кВ / мкс. Крутизна імпульсів струму становить відповідно 3 - 300 і 30 - 600 А / мкс. У проміжну ланку таких перетворювачів напруга постійного струму може підтримуватися на рівні від 600 В до 2,8 кВ. У безпосередній близькості від перетворювачів і підключених до них тягових двигунів, трансформаторів, гальмівних резисторів і силових кабелів повинні надійно працювати пристрої систем СЦБ, робочий рівень сигналів яких в залежності від частоти лежить між декількома амперами і міліампер (або А / м і мА / м) .

Для того, щоб забезпечувався надійний прийом в системах локомотивної радіозв'язку, рівень перешкод на антенах локомотивів не повинен перевищувати 0,3 мкВ. Максимальна відстань між антенами і компонентами силової схеми з комутуючими пристроями на тяговому рухомому складі не перевищує 3 - 5 м, в деяких випадках воно може бути

менше 1 м. Цим пояснюються екстремально жорсткі вимоги до заводовипромінювання силового обладнання в деяких частотних діапазонах. Нерідко ці вимоги значно вище, ніж в промислових нормах або в європейському залізничному стандарті EN 50121-3-1.

Концепція електромагнітної сумісності рухомого складу визначає загальні для будь-якого проекту правила технічної та дизайнерської розробки, а також заходи, виконання яких є обов'язковим при розробці окремих компонентів і одиниці рухомого складу в цілому. Концепція передбачає виконання наступних вимог:

- відсутність перешкод при нормальному функціонуванні всіх компонентів обладнання;
- виключення можливості виникнення перешкод при взаємодії рухомого складу з розташованими поблизу залізничними та іншими пристроями;
- обов'язкове виконання спеціальних вимог експлуатують рухомий склад компаній щодо електромагнітної сумісності;
- виконання вимог законодавства щодо заводовипромінювання рухомого складу і його сприйнятливості до перешкод;
- безумовне забезпечення безпеки людей.

На базі багаторічного досвіду експлуатації систем автоматизації і з урахуванням спеціальних вимог залізниць розроблена основна концепція забезпечення електромагнітної сумісності, яка поширюється майже на всі елементи рухомого складу:

- влаштування заземлення та з'єднання з корпусом;
- елементи екранування;
- електричні фільтри;
- системи передачі даних;
- приладові шафи і окремі прилади;
- кабельні розводки.

Для систем управління і регулювання основними способами забезпечення електромагнітної сумісності є з'єднання пристроїв з корпусом і екранування. Для силового обладнання в основному використовується екранування. Колишні способи з'єднання з корпусом і екранування пристроїв вже не можуть використовуватися, оскільки, з одного боку, широко розповсюдилися статичні перетворювачі являють собою принципово новий вид джерел електромагнітних полів, а з іншого боку, змінилися способи зниження завадовипромінювання, засновані на використанні мікропроцесорних і цифрових пристроїв.

Сучасна концепція забезпечення електромагнітної сумісності дозволяє за допомогою екранування надійно захищати системи і пристрої від низькочастотних магнітних полів, а також високочастотних електричних і електромагнітних. Одночасно з з'єднанням приладів систем управління з корпусом забезпечується поділ потенціалів живильної батареї і цих приладів, а також взаємне розділення потенціалів всіх приладів системи для того, щоб електронні блоки мали такий же потенціал, як всі сусідні пристрої і елементи екранування. Завдяки цьому істотно знижується заважає вплив зовнішніх джерел.

Захисні заходи на рухомому складі. Всі струмопровідні компоненти механічної частини вагона або локомотива пов'язані між собою струмопровідними сполуками. Вони утворюють так званий корпус, який має вихідний (умовний нульовий) потенціал, по відношенню до якого ведуться вимірювання. До нього приєднуються корпусу всіх приладів і компонентів. Необхідно прагнути до того, щоб з'єднання були нізкоімпедансними, тобто мали мінімальні значення індуктивності і активного опору. Всі екрани з'єднуються з струмопровідним корпусом приладу або вагона як мінімум з двох кінців. Ці сполуки також повинні бути нізкоімпедансними.

Електронні компоненти приладів управління отримують живлення через перетворювачі постійного - постійного струму, що реалізують поділ потенціалів. Корпуси окремих електронних блоків з'єднуються з корпусом

приладу, який виконує роль екрану, нізкоімпедансними провідниками. Якщо прилад вимагає екранування, воно повинно бути повним. Для екранування всі елементи слід з'єднувати нізкоімпедансними провідниками між собою і з корпусом приладу або вагона.

Будь-які провідні з'єднання між приладами системи управління виконуються з поділом потенціалів. Це саме можна сказати і до проводів довічних схем, які вимагають поділу з потенціалом батареї. Цілями цього заходу є мінімізація різниці потенціалів між електронними схемами і елементами екранування, створення замкнутої екрануючої оболонки. Це необхідно для підвищення захищеності від сторонніх заважають впливів і зниження помехоізлученія в навколишнє середовище.

Концепція забезпечення електромагнітної сумісності передбачає оснащення всіх приладів системи управління високочастотними мережевими фільтрами з боку харчування. Ці фільтри забезпечують придушення перешкод в смузі частот від 20 кГц до 100 МГц. Корпус фільтра також з'єднують з корпусом приладу з дотриманням зазначених вимог. Лінії передачі даних і сигналів часто можна захищати фільтрами, так як частотні діапазони корисної інформації і перешкод можуть взаємно перекриватися. До котушок всіх реле, контакторів, магнітних пускачів і інших подібних елементів електросхем підключають варистори, які обмежують піки напруги, що виникають при розмиканні їх кола механічними контактами. Таким чином, метою застосування фільтрів є підвищення стійкості до зовнішніх заважає впливам, що приходять по дротах, і обмеження передачі цим же шляхом перешкод в інші пристрої.

Всі інформаційні шини, призначені для передачі великих обсягів інформації з високою швидкістю, виконують безпотенційні і симетричними за величиною імпедансу щодо корпусу вагона. Завдяки цьому значно знижується чутливість до синфазних перешкод.

Іншим важливим засобом забезпечення електромагнітної сумісності на рухомому складі є екранування проводів, приладів і компонентів. При

оцінці ефективності екранування слід розрізняти засоби захисту від електричних і магнітних полів.

Електричне поле створює на ідеально провідній екранує оболонці еквіпотенціальною поверхнею, завдяки чому всередині оболонки електричне поле відсутнє. Однак у зв'язку з тим, що екран має кінцеве опір, яке до того ж залежить від частоти, ідеального екранування досягти важко. Зі збільшенням частоти електричного поля ефективність екранування падає.

Магнітне змінне поле індукує в замкнутій електропровідній оболонці вихрові струми, завдяки чому магнітне поле під оболонкою не виникає. Екранує ефект по відношенню до магнітного підлозі зростає зі збільшенням частоти, так як при цьому індуковані вихрові струми зростають.

Для забезпечення оптимального екранування проти магнітних і електричних полів екран повинен забезпечувати безперешкодне протікання струмів. Звідси випливає, що не замкнута повністю екранує оболонка, наприклад поєднана з корпусом з одного кінця, захищає тільки від статичних і низькочастотних електричних полів, а для захисту від електричних, магнітних і електромагнітних полів екрануюча оболонка повинна бути замкнута з усіх боків і з'єднана з корпусом з обох кінців. Виняток становлять дроти від датчиків частоти обертання, які закріплені на осі колісних пар, які проводять зворотний тяговий струм, а також кабельні розводки аудіо- і відеосистем. Їх екранує оплітку слід з'єднувати з корпусом тільки з одного кінця.

При екранування провідників слід дотримуватися таких умов:

- екрануюча оболонка кабелів і обплетення проводів повинні бути надійно з'єднані з корпусом приладу або приладового блоку, також є екраном. З'єднання має бути низькоомним і, перш за все, низькоіндуктивним;
- використання нульової жили кабелю замість корпусу для під'єднання екрануючої оболонки не допускається;
- екрануючу оболонку кабелю слід з'єднувати з корпусом приладу на його вході, щоб заважають струми з оболонки не потрапили в схему.

Екранування великих компонентів електрообладнання. Для забезпечення оптимального екранування корпусу тягового і допоміжного перетворювачів виготовляють металевими з додатковим екрануючим ущільненням кришок і люків. Вони заземлюється на корпус локомотива або вагона не менше ніж в чотирьох (тяговий перетворювач) або двох (допоміжний) місцях. В останньому випадку місця заземлення розташовують по діагоналі корпусу.

Гальмівний резистор закритий кожухом з перфорованого металевого листа. Отвори мають розмір 20 г 20 мм і розташовуються з кроком не менше 2 мм. Кожух заземлюється не менше ніж у двох місцях.

Шафи з електронними приладами виготовляють з металевого листа з екрануючим ущільненням дверей і люків і з'єднують з корпусом не менше ніж в чотирьох місцях. Прилади й блоки, які не ізолювані від корпусу шафи, з'єднують з ним заземлювачами, що відповідають вимогам електромагнітної сумісності.

Вимір завад для радіоприйому. Поряд із цим проводять вимір завад, які випромінює рухомий склад і таким чином діє на технологічний радіозв'язок, зокрема маневровий. Нерідко вони виявляються значно вище граничних значень, встановлених євростандартом. Для виміру цих перешкод досліджуваний локомотив або вагон встановлюють на ділянці, розташованій у зоні, вилученої від промислових підприємств і можливих джерел додаткових перешкод. Це дозволяє більш точно вимірювати рівні завад, у тому числі їхня нижня межа, що лежить у діапазоні 5 - 10 дБ·мкВ/м.

Відповідно до розділу 3-1 з EN 50121 припустимий зі зворотного впливу струмів вищих гармонік рухливого складу на контактну мережу встановлюють за згодою із клієнтурою. Для рухомого складу діють норми зворотного впливу. Подібні ж припустимі значення вказані в міжнародних стандартах МСЗ для діапазону частот 1 - 10 кГц. Для більше високих частот міжнародних норм не існує. Більшість державних і приватних залізниць, як правило, встановлюють свої норми. У зв'язку із цим існують різні методи й

умови проведення вимірів. Звичайно за допомогою одного або декількох трансформаторів струму однієї тягової одиниці або всього поїзда вимірюють споживаний з контактної мережі струм й оцінюють його якісні показники. Для цього можуть бути використані аналізатори гармонік, фільтри, цифрові процесори сигналів або персональні комп'ютери. Найпоширенішим є метод, заснований на застосуванні вузькосмугових фільтрів з безперервним формуванням ефективних значень завади й швидким розкладанням її спектра в ряди Фур'є.

Стандарти на EMC EPC. Зараз передбачається контроль виконання вимог електромагнітної сумісності на стадіях розробки, виготовлення й введення в експлуатацію рухомого складу. Виміру рівня завад на окремих електричних елементах устаткування служать для перевірки відповідності їх заявленим паспортним характеристикам у плані електромагнітної сумісності. Якщо виміри виконуються стосовно до одиниці рухомого складу в цілому, вони ставляться до розряду типових і повинні підтвердити, що всі вимоги до проектування й розробки дизайну відносно електромагнітної сумісності виконані й що локомотив або вагон є сумісним з навколишнім середовищем.

Виміри призначені для визначення сприйнятливості до впливів, що заважають, і здатності випромінювати завади. Остання перевіряється шляхом виміру магнітного поля, зворотного впливу тягового рухомого складу на мережу й інтенсивності завад радіоприйому. Методи вимірів магнітного поля ще перебувають у стадії розробки. Вони повинні розроблятися окремо для кожного проекту.

При виконанні вимірів на електричних компонентах устаткування варто керуватися встановленими нормами випромінювання завад:

- на виходах всіх пристроїв, що мають батарейне живлення, відповідно до європейського стандарту EN 55011 рівень завад у діапазоні радіочастот не повинен перевищувати 20 дБ;

- для входів і виходів силових кіл тягового устаткування, а також для більшості входів і виходів допоміжних пристроїв рівень завад не нормується;

- рівень завад на виходах всіх приладів системи керування не повинен перевищувати граничних значень, установлених стандартом EN 55011;

- допоміжні пристрої потужністю до 50 кВ·А не повинні випромінювати завади вище ніж 40 дБ·мкВ/м у діапазоні частот 30 Гц - 230 МГц й 47 дБ·мкВ/м у діапазоні 230 МГц - 1 ГГц;

- на тяговому інверторі й допоміжних пристроях потужністю більше 50 кВ·А виміри не виконуються, тому що завади, що випромінюються, враховується в результаті, отриманому для локомотива або вагона в цілому при вимірах, виконуваних відповідно до розділу 3-1 європейського стандарту EN 50121.

Визначення сприйнятливості встаткування до завад передбачає використання встановлених стандартом норм для завад, що передаються по проводам і поширюються у вигляді поля. Ці випробування в якості типових проводяться в лабораторних умовах. Перевірці підлягають всі електронні прилади керування, пристрої електропостачання, СЦБ і зв'язку, дисплеї, системи інформування пасажирів. При вимірах створюються умови, що відповідають експлуатаційним. Критерії оцінки витримуються в стандарті EN 50121-3-2.

Європейський стандарт EN 50121 встановлює гранично припустимий рівень завад, надаваних радіоприйому одиницею рухомого складу в цілому. Виміри відповідно до розділу 3-1 стандарту EN 50121 проводять однократно в рамках типових випробувань за допомогою спеціальних антен у діапазоні частот 9 кГц - 1 ГГц на відстані 10 м від рейок під час стоянки поїзда, а також при русі зі швидкістю 20 км/ч для приміських поїздів й 60 км/ч для поїздів далекого прямування.

ВИСНОВКИ

Удосконалено математичну модель системи тягового електропостачання залізниць змінного струму із швидкісним рухом поїздів.

Дано наукове обґрунтування уточненій методиці розрахунку розподілу тягового струму і їх гармонійних завад вздовж фідерної зони.

Проаналізовано вплив системи тягового електропостачання змінного струму 25 кВ 50 Гц та високошвидкісного електрорухомого складу на параметри якості електричної енергії в умовах швидкісного руху. Розкриті питання забезпечення його електромагнітної сумісності.

Тягове навантаження, пов'язане з роботою високошвидкісної залізниці, носить коливальний характер і є джерелом вищих гармонік і струмів зворотній послідовності, що здійснює негативний вплив на енергосистему в цілому;

Система тягового електропостачання інтегрується в енергосистему з великою потужністю короткого замикання, що дозволяє нівелювати вплив тягового навантаження на якість електроенергії;

Найбільш істотним фактором, що впливає на якість електроенергії, є небаланс трифазного струму, обумовлений тягової навантаженням.

Коефіцієнт небалансу за струмом при наявності великого тягового навантаження може досягати 90%. Тому повинен проводитися моніторинг цього показника.

ЛІТЕРАТУРА

1. Drive Ukraine 2030. Міністерство інфраструктури України. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/files/projects/str.html>
2. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Бондаренко В. О. Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками / В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин // Електротехніка і Електромеханіка, 2017, №1, 54 – 62 с.
4. Доманський І.В. Електрифікація залізниць – джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. – 2014. – №1. – С. 19-23, 31-33.
5. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниці 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 80 с.
6. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 54-63. doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
7. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения // К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
8. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии // М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
9. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог // М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

10. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
11. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – №1. – С. 26-34.
12. Крюков А.В. Электрические нагрузки нетяговых потребителей. /Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 149 с.
13. Гаврилюк, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку [Текст]: монографія / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк; за заг. ред. В. І. Гаврилюка; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – 193 с.
14. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. [Введ.01.01.2000]. – К.: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. – 31 с.
15. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933-55:2011 [Чинна з 31.10.2011]. - К.: Міненерговугілля, 2012. – 98 с.
16. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
17. Межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 61000-4-30 – 2017 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии (IEC 61000-4-30:2015, IDT). Москва: Стандартинформ, – 2018. – 61 с.
18. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.

- 19.Правила технічної експлуатації залізниць України [Текст]: Наказ № 258 від 25.07.2006, зареєстр. в Мін-ві Юстиції України від 25.10.2006 р. від № 1143/13017 ./ Мінпаливенерго України. – К., 2006.
- 20.ЦШ-0042: Пристроїв сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування [Текст]: Наказ № 347-ЦЗ від 26.04.2006/ Міністерство транспорту. – К., 2006.
- 21.Інструкція з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) ЦЕ-0033 [Текст]: Затв. Наказ Укрзалізниці від 09.02.2012. №048-Ц на заміну ЦЕ-0002. –К., 2012. – 53 с.
- 22.ЦШ-0060: Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування [Текст]: Наказ № 090-ЦЗ від 07.10.2009 / Міністерство транспорту. – К., 2009.
- 23.Рябова Л. Ю., Запорожець О. С., Лях Є. В., Черненко О. В. Резервне електроживлення пристроїв залізничної автоматики [Текст]// Тези 79-ої Всеукраїнської конференції студентів та молодих вчених 2019 р. «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті»" - Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2019.–С. 53-54.
- 24.Чередниченко А. С., Чайка Ю. С., Смірнов А. О. Модернізація електроживлення пристроїв залізничної Автоматики [Текст]// Тези 79-ої Всеукраїнської конференції студентів та молодих вчених 2019 р. «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті»" – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2019.–С. 49-50.
- 25.Говоруха Д.О, Давидюк Д.О., Сердюк К.М. Використання оптоволоконних ліній зв'язку на залізницях України [Текст] // Тези 11-ї Студентської міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2019, с. 9-10
- 26.Сердюк К. М., Чайка Ю.С., Лях Є. В. Модернізація схем електроживлення пристроїв залізничної автоматики та зв'язку [Текст] //

- Тези 11-ї Студентської міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2019, с. 27
27. Сердюк К. Н., Чепурний А. М., Логвінова В. О. Стратегія розвитку залізничного транспорту України. Модернізація систем залізничної автоматики та зв'язку [Текст] // Тези 11-ї Студентської міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2019, с. 28-29
28. Сердюк К. М., Черненко О. В., Рябова Л. Ю., Запорожець О.С. Електромагнітна сумісність пристроїв сигналізації, централізації та блокування з системою тягового електропостачання [Текст] // Тези 11-ї Студентської міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2019, с. 29-30
29. Сердюк Т. Н., Чепурний А. М., Логвінова В. О., Модліцький В. О., Гнедець О. П., Мауро Фелізіані. Стратегія розвитку залізничного транспорту. Модернізація систем залізничної автоматики та зв'язку України [Текст] // Тези XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (11.12.2019 – 12.12.2019, м. Дніпро) - Д.: ДИИТ, 2019.–С. 127.
30. Сердюк К. М., Модліцький В. О., Семененко Л. О., Сіданченко В. М., Роздорожний В.В. Виявлення електромагнітних завад та завад в тяговому струмі // Тези Всеукраїнської конференції студентів та молодих вчених 2020 р. «ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ» в рамках 80-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 23-27 березня 2020 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2020. – 59-60 с. – URL: http://ndch.diit.edu.ua/upload/Abstracts_ICTS_on_RT_2020.pdf