

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного
транспортів імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри

Гаврилюк В.І.
(підпис) (ПІБ)
р. _____ « _____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 27 «Транспорт»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

Спеціалізація «Системи керування рухом поїздів»

Тема Дослідження електромагнітної сумісності систем залізничної
автоматики і тягового електропостачання

Т
h
e
m
К

e Investigation of electromagnetic compatibility of railway automatics systems
and traction power supply

С

в
у
д
к
н
д
и
п
р
о
м
и
с
к

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра АТ

Спеціалізація

Системи керування рухом поїздів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

Гаврилюк
В.І.

р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Кузін Максим Михайлович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи

Дослідження електромагнітної сумісності систем
залізничної автоматики і тягового електропостачання

Затверджена наказом по університету № 798ст від _____ р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 18.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Електрична тяга, вид автоблокування – кодове змінного струму частотою 50 Гц, станційні рейкові кола – фазочутливі, довжина фідерної зони 20 км, $r_p=0.025$ Ом/км - питомий повздовжній опір однорідної рейкової мережі одноколіїної ділянки
Результати запису електромагнітних завад в рейкових колах записані з котушок вагону-лабораторії

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг	Кількість креслень
1. Аналіз існуючих електромагнітних завад у зворотному тяговому струмі		
Розробка математичної моделі розповсюдження гармонік тягового струму по довжині фідерної зони		
Експериментальне дослідження рівнів та спектрального складу зворотнього тягового струму		
Дослідження імовірності розподілу гармонік тягового струму		
5. Електромагнітна сумісність і аналіз параметрів якості електричної енергії споживачів тягових підстанцій		

Студент

Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки: 104 сторінок, 38 рисунків та 19 таблиць, 21 джерел літератури.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, якість електроенергії, математична модель, аналіз спектру тягового току, залізнична автоматика.

Задачею даної магістерської роботи була розробка математичної моделі системи тягового електропостачання ділянок з великою пропускною спроможністю.

В першому розділі був проведений аналіз видів завад в рейкових колах та виявлені найбільш шкідливі з них. Вивчено вплив тягової мережі на роботу систем автоматики.

В другому розділі проведений аналіз існуючих сучасних математичних моделей, та методів оцінки впливу тягової мережі на системи залізничної автоматики. Він показав, що зараз існує деяка кількість математичних моделей, але більшість з них не враховують або спрощують деякі параметри рельсових кіл та схеми заміщення електричних тягових мереж. Була розроблена математична модель, яка враховує більше число чинників, що впливають на розподіл гармонік струму і напруги в них.

У третьому розділі на підставі експериментальних даних, які були одержані при дослідженні перегону Дніпропетровськ – Нижньодніпровськ-Вузол, зафіксований спектр частот в рейкових колах, проведений аналіз отриманих даних, причин появи гармонік різної частоти.

Четвертий розділ присвячений імовірнісній оцінці розподілу гармонік тягового струму, який показав що гармоніки розподіляються по нормальному закону.

П'ятий розділ призначено аналізу параметрів якості електричної енергії на тягових підстанціях.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Аналіз існуючих електромагнітних завад у зворотньому тяговому струмі	6
1.1. Системи тягового електропостачання	6
1.2. Джерела електромагнітних завад в рейковій мережі	8
1.2.1. Грозові розряди	10
1.2.2. Зворотній тяговий струм	15
1.2.3. Системи зовнішнього електропостачання	16
1.2.4. Гармонійні завади	19
1.2.5. Спектральний склад тягового струму	22
1.3. Дослідження впливу електромагнітних завад на систему АЛС	25
1.4. Вплив зовнішніх електромагнітних полів на кола автоматики, телемеханіки й зв'язку	31
1.5. Норми небезпечних та заважаючих впливів. Нормування наведених напруг та струмів	34
1.6. Висновки за розділом	39
2. Розробка математичної моделі розповсюдження гармонік тягового струму по довжині фідерної зони	40
2.1. Існуючі розрахункові моделі і схеми заміщення системи тягового електропостачання	40
2.2. Математична модель системи тягового електропостачання ділянок з великою пропускнуою спроможністю	43
2.3. Моделювання розподілу падінь напруги і струму по довжині фідерної зони	50
2.4. Розподіл струмів та потенціалів в однорідних рейкових мережах	57
2.5. Висновки за розділом	60
3. Експериментальне дослідження рівнів та спектрального складу зворотнього тягового струму	62

3.1. Розробка алгоритму спектрального аналізу струму	62
3.2. Експериментальне дослідження джерел завад в рейковій лінії	64
3.3. Висновки за розділом	69
4. Дослідження імовірності розподілу гармонік тягового струму	71
4.1. Числові характеристики безперервних випадкових величин	71
4.2. Обчислення отриманих даних	78
4.3. Висновки за розділом	85
5. Електромагнітна сумісність і аналіз параметрів якості електричної	

е

ё

б

ђ

в

џ

п

р

Ѡ

Ѣ

Ѥ

Ѧ

Ѩ

Ѭ

Ѯ

Ѱ

Ѳ

Ѵ

Ѷ

Ѹ

Ѻ

Ѽ

Ѿ

Ѣ

Ѥ

Вступ

Електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму здійснюється від повітряних ліній поздовжнього електропостачання напругою 110, 35 кВ й у рідких випадках (при радіальному живленні) напругою 10 кВ.

При установці на тяговій підстанції понижуючого трансформатора й наступному випрямленні змінного струму спектральний склад потенціалу шин тягової підстанції в режимі холостого ходу щодо землі (напруга на шинах) складається з напруги нульової частоти й напруг непарних канонічних гармонік. При наявності несиметрії живлячої напруги на шинах тягової підстанції можуть виникати напруги парних гармонік.

З метою зниження магнітного впливу тягової мережі постійного струму, що заважає, й підвищення КПД електрорухомого складу на тяговій підстанції встановлюються фільтр-пристрої. Дану обставину слід враховувати й при аналізі питань, пов'язаних з визначенням і контролем показників якості електричної енергії.

Одним із засобів зниження заважаючого впливу тягових мереж на кабельні й повітряні лінії зв'язку й підвищення ККД електрорухомого складу (ЕРС) є створення пасивно-активного фільтра. Тому через наявність гармонік на шинах тягової підстанції, а також у випадку неякісного виконання фільтр-пристроїв у напрузі тягової мережі, навіть у режимі холостого ходу, з'являються канонічні гармоніки.

Через нелінійний характер параметрів елементів схеми при впровадженні на електрорухомому складі систем регулювання напруги на струмоприймачі, а також асинхронного приводу, навіть при відсутності на струмоприймачі ЕРС гармонічно, що змінюються напруг, струм, споживаний електрорухомим складом, містить як постійну складову, так і струми інших частот.

У цьому зв'язку проблема визначення параметрів якості електричної енергії в системі тягового електропостачання розпадається на наступні завдання:

- оцінка параметрів якості електричної енергії в точки зору загального приєднання при відсутності навантаження в системі тягового електропостачання;
- розрахунок параметрів якості електричної енергії в крапки загального приєднання при роботі ЕРС як у режимі споживання, так і у режимі рекуперації;
- визначення зміни показників якості електричної енергії за рахунок електромагнітного впливу тягових мереж постійного струму на повітряні лінії поздовжнього електропостачання на ділянках їхнього зближення з тяговими мережами;

- оцінка гальванічного впливу тягових мереж постійного струму на високовольтні лінії із заземленої нейтраллю. Даний вплив, як показують розрахунки, необхідно враховувати в районах зі скелястими й вічномерзлими ґрунтами;

- визначення внеску в показники якості електричної енергії пристроїв зв'язку, СЦБ й автоблокування при їхньому живленні від високовольтних ліній ВЛ 6 (10) кВ. Ці лінії на електрифікованих ділянках живляться безпосередньо від шин тягового трансформатора (іноді для поділу мереж використовується подвійна трансформація).

Очевидно, що для оцінки внеску в показники якості електричної енергії електрифікованих залізниць постійного струму необхідно розробити методику розрахунку струморозподілу в системі тягового електропостачання при розгляді ЕРС як джерела струму, що генерує в контактну мережу струми, що змінюються за гармонійним законом відповідних частот.

Отже, проблема дослідження електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання із суміжними пристроями СЦБ та зв'язку є досить актуальною і потребує детального опрацювання.

Мета – визначити умови роботи і параметри системи тягового електропостачання, при яких виникають найбільші електромагнітні перешкоди на апаратуру рейкових кіл, які проникають через живлячий і сигнальний кінець рейкового кола.

Обраний напрям дослідження відповідає Концепції комплексної Програми розвитку залізничного транспорту України на 2007 – 2020 рр., яка є основою цільових програм оновлення та розвитку засобів залізничної автоматики. Магістерська робота на тему: «Дослідження електромагнітної сумісності пристроїв залізничної автоматики з системами тягового електропостачання» пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок».

1. Аналіз існуючих електромагнітних завад у зворотньому тяговому струмі

1.1. Системи тягового електропостачання

Електропостачання електрифікованих залізниць виконується від районних підстанцій та високовольтних ліній електропередач через тягові підстанції. Тягові підстанції, окрім живлення локомотивів, використовуються для електропостачання інших користувачів на залізничному транспорті через спеціальні високовольтні лінії.

Під споживачем електроенергії у енергосистемі мається на увазі дільниця електропостачання, яка за класифікацією відноситься до споживача першої категорії. Такий споживач при будь-якій аварії в енергосистемі не повинен мати перерви в електроживленні. Разом з тим, для окремих підстанцій допускають перерву у живленні, якщо це відноситься тільки до однієї станції на дільниці і за часом не перебільшує двох годин.

Щодо системи зовнішнього електропостачання живлення тягових підстанцій України найчастіше здійснюється від районних підстанцій через ЛЕП 110, 220 кВ. У випадку з двоколовими лініями електроживлення опорні тягові підстанції, які мають схему розподільовача 110-220 кВ, який дозволяє робити переключення без перерви живлення, а також перемикачі на вводах з головною та обхідною шинами і обхідні перемикачі рекомендується розташовувати не рідше ніж через три (для системи тяги зі змінним струмом) або п'ять (для системи тяги з постійним струмом) підстанцій проміжного типу, разом з районними. Необхідно забезпечувати можливість розташування на території проміжних підстанцій секціонуючі апарати в тій лінії електропередачі, яка її живить.

У випадку одноколових ліній, рекомендується виконувати транзитний пропуск ліній електропередач через розподільовачі 110 и 220 кВ всіх тягових підстанцій, встановлюючи силовий перемикач між входом та виходом ЛЕП на

підстанцію. У ролі опорних підстанцій можуть бути джерела живлення – центри та потужні районні підстанції енергосистеми.

Якщо тягова підстанція живиться окремими лініями від підстанції енергосистеми або вона одна підключається до високовольтної лінії між двома опорними підстанціями, вона може бути виконана як відпаєчна.

Зараз існує три основних системи електрифікації залізниць змінним струмом: 27,5 кВ, 27,5 кВ з екрануючим та підсилюючим проводом та 2х25 кВ. На території України знайшли впровадження система 27,5 кВ та 27,5 кВ з екрануючим та підсилюючим проводом.

Система електропостачання змінного струму 27,5 кВ (порівняно з системою постійного струму 3,3 кВ) дозволила збільшити відстань між тяговими підстанціями в 2-3 рази, понизити переріз контактної мережі, а у зв'язку з цим і потужність підтримувальних її конструкцій. Відстань між підстанціями можна довести до 100 км, якщо живлення контактної мережі здійснювати від автотрансформаторних пунктів, розосереджених по перегону, ці пункти отримують енергію від тягових підстанцій як би по двопровідній системі електропостачання 50 кВ, створено. контактною мережею і додатковим проводом 27,5 кВ, підвішеним з польового боку опор контактної мережі. Така система електропостачання отримала назву 2*25 кВ.

Для системи електропостачання змінного струму є характерною наявність значного електромагнітного впливу на суміжні системи (лінії зв'язку, енергетики, трубопроводи тощо), що спричиняє за собою додаткові витрати по їх перевлаштуванню і захисту. Вплив викликається великою асиметрією протікання прямої і зворотної складової в контурі контактний провод- рейка-земля, оскільки через значну індуктивну складову опору рейок велика частина тягового струму протікає по землі. Тому максимально симетрувати систему тягового електропостачання, тобто зблизити відстань між прямим і зворотним проводами тягової мережі змінного струму для зниження впливу на суміжні споруди, прагнули із самого початку використання цього виду тяги на залізницях.

Як наслідок цього з'явилася система тягового електропостачання змінного струму 27,5 кВ з відсмоктуючими трансформаторами. Відсмоктуючий

трансформатор має коефіцієнт трансформації, рівний одиниці, що забезпечує рівний струм в контактній і рейковій мережах в місці його установки, а значить - відсутність струму в землі. Він як би "відсмоктує" струм із землі, звідси і його назва. Застосування відсмоктуючих трансформаторів знижує рівень електромагнітного впливу на суміжні споруди і пристрої до 4-6 разів. Ще більший ефект досягається від введення додатково відсмоктуючих проводів 13, підвішених на рівні контактних проводів і сполучених з рейками, що зближує коло прямих і зворотних струмів до 2-3 м.

Близький ефект по зниженню електромагнітного впливу досягається і при системі електропостачання 2х25 кВ, в якій, як вже відзначалося, передача енергії від тягових підстанцій до потягів йде в основному по двох ізольованих та підвішених над землею проводам.

Система тягового електропостачання 27,5 кВ з екрануючим та підсилюючим проводами. Підвішені поруч посилюючий та екрануючий проводи внаслідок взаємної індуктивності і великої довжини утворюють нібито розгорнутий відсасуючий трансформатор з помітним ефектом по зниженню електромагнітного впливу на суміжні споруди і пристрої. Така система має знижений загальний опір тягової мережі, що робить її техніко-економічно ефективнішою, ніж системи 27,5 кВ з відсмоктуючими трансформаторами.

Таким чином, в системі тягового електропостачання змінного струму є багато варіантів її реалізації (багато-провідні тягові мережі), кожен з яких дає ті або інші переваги при поетапному підвищенні енерговикористання на тягу потягів.

Джерела електромагнітних завад в рейковій мережі

В якості електромагнітної завади може бути будь-яке електромагнітне явище в широкому діапазоні частот, яке може негативно впливати на роботу апаратури.

В залежності від джерела електромагнітні завади можливо розділити на штучні та природні. Найбільш розповсюдженою природною завадою є

електромагнітний імпульс при грозовому розряді. Штучні завади можливо розділити на створювані функціональними та нефункціональними джерелами. Джерело завади є функціональним, якщо для нього самого утворена завада є корисним сигналом.

Серед чинників, що визначають надійність електроживлення, істотну роль грає захищеність елементів електроживлячих установок від ушкоджень при зовнішніх електричних діях понад допустиму межу. У практиці найчастіше зустрічаються два види електричних дій (рис. 1.1): імпульсні перешкоди, утворені грозовими розрядами, а також аварійними і комутаційними процесами, причому потужність імпульсних перешкод перевищує межу теплової стійкості елементів, що захищаються; струмові перевантаження, причинами яких є короткі замикання в колах розводки живлення, аварійні режими навантажень, феромагнітні процеси, блукаючі струми від промислових підприємств, пристроїв електротяги і інших джерел, живлення, що потрапляють в кола, наприклад, через пробиті розрядники, і здатні викликати перегрівання проводів.

Відомо, що на лінії електропостачання автоблокування доводиться в середньому 10-11 прямих ударів блискавки на кожні 100 км при 30 грозових годин у році. Кожен випадок прямого удару блискавки викликає спрацювання захисту і автоматичного включення резерву, а в деяких випадках - автоматичного повторного включення лінії під напругу. Отже, імпульсні процеси, викликані блискавкою, супроводжуються потім комутаційними процесами імпульсного характеру. Вимкнення ненавантажених або малонавантажених трансформаторів викликає появу імпульсних перешкод, що перевищують в 3-5 разів напругу в лінії. Наявністю цих перешкод, а також дією грозових розрядів обумовлена значна доля (до 40 %) випадків ушкодження пристроїв залізничної автоматики, пов'язаних з системами електропостачання.

Потужні імпульсні перешкоди мають первинний параметр впливу - підвищена напруга, тому їх іноді називають перенапругами. Результатом дії цих перешкод буває пробій ізоляції проводів і інших елементів схем, безповоротний пробій переходів в напівпровідникових приладах, насичення сердечників в трансформаторах і в інших магнітних елементах. Ефект насичення

магнітопроводів струмом потужних імпульсних перешкод часто не враховують при проектуванні пристроїв електропостачання, а на практиці це призводить до зниження надійності засобів живлення.

Явним методом захисту від потужних імпульсних перешкод є обмеження напруги на рівні, вищому, ніж робоча напруга, але меншому, ніж допустима напруга пробою ізоляції, напівпровідникових переходів або насичення магнітопроводів. Проте реалізація методу обмеження напруги натрапляє на ряд труднощів обумовлених неідеальністю характеристик обмежувачів. Крім того, немає повних і достовірних даних про параметри потужних імпульсних перешкод, що додатково ускладнює завдання вибору типу і розрахунку елементів обмежувачів.

Грозові розряди

Прямі розряди блискавки. Високовольтно-сигнальні лінії автоблокування напругою 6(10) кВ, а також лінії сигналізації та зв'язку в результаті великої протяжності та відносного підвищення над поверхнею землі є найбільш вразливими до дії розрядів блискавки. Ці лінії найбільш мало захищені від прямих ударів блискавки на відкритій місцевості та більш захищені – в лісосмузі, а також в населених пунктах. Спостерігається уразливість окремих ділянок і навіть поодиноких опор лінії, розташованих у місцях з підвищеною провідністю землі. Виявлення таких ділянок лінії має велике практичне значення, так як дозволяє встановити на них більш ефективний грозозахист.

При ударі блискавки в дріт хвиля струму блискавки відображається і проломлюється, а потім розповсюджується вздовж дроту в обох напрямках від місця удару. В кожному напрямку по дроту з хвильовим опором Z буде розповсюджуватись хвиля струму з амплітудою $I_m/2$. По мірі розповсюдження хвиля струму деформується, її фронт згладжується, а амплітуда затухає. При цьому дріт отримує деякий потенціал по відношенню до поверхні землі:

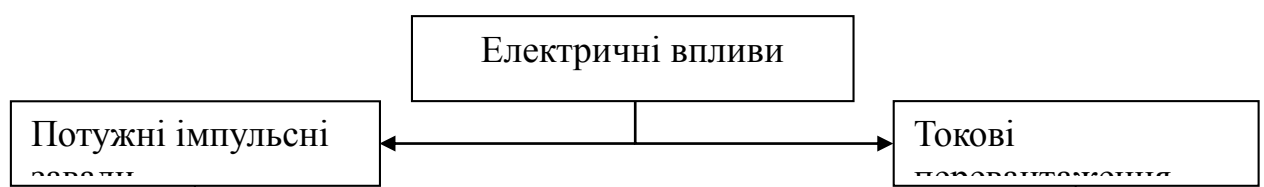


Рис. 1.1. Класифікація електромагнітних впливів та захист від них

д

е

На лініях з дерев'яними опорами ізоляція високовольтного проводу зумовлюється головним чином імпульсною електричною надійністю деревини опори.

На високовольтних лініях автоблокування з залізобетонними опорами максимальний потенціал проводу обмежується імпульсною електричною надійністю високовольтних ізоляторів. Одночасно з урахуванням електричної індукції деякий потенціал отримують і сусідні проводу. Значення цього потенціалу залежить від коефіцієнта ємнісного зв'язку між проводами та обчислюється наступним відношенням:

де U_1 - потенціал проводу, ураженого блискавкою, кВ; C_{12} - ємність між проводами, мкФ; C_{23} - ємність другого проводу відносно землі, мкФ; K_{12} - коефіцієнт ємнісного зв'язку між проводами.

с

При прямому ударі блискавки результуючий магнітний вплив хвиль, який розповсюджується по проводу в обох напрямках від місця удару, дорівнює нулю, так як в наслідок симетрії у сусідніх проводах з'являються струми однакової величини, але різного напрямку.

к

При відомій кількості прямих ударів блискавки та ймовірності появи струмів блискавки P_1 , визначають кількість імпульсних перекриттів міжфазної ізоляції високовольтно-сигнальної лінії автоблокування:

к

Імпульсне перекриття міжфазної ізоляції, довжина якого не більше 100мкс, не являє собою велику небезпеку, так як електрична стійкість міжфазної ізоляції повністю відновлюється. Але воно небезпечно в тому випадку, якщо іскра перейде до дугового розряду у результаті проходження по шляху імпульсного перекриття так званих супроводжуючих струмів, які з'являються під дією

робочої напруги лінії. Відомо, що ймовірність η переходу імпульсного

х

в

и

перекриття в дугу для ліній з дерев'яними опорами напругою 6(10) кВ не перевищує 0,1.

Кількість відключень лінії n дорівнює кількості випадків переходу імпульсного перекриття в силову дугу:

Найбільший вплив на лінійне обладнання, прилади та апаратуру оказує електромагнітна дія блискавки, так як в проводі виникають електромагнітні хвилі з амплітудою напруги до декількох тисяч вольт. Подібні хвилі виникають при прямому влучанні блискавки в залізничну колію. Оскільки рейки мають дуже низький рівень ізоляції і відносно велику ємність по відношенню до землі, то розповсюдження по ним вказаних електромагнітних хвиль відбувається з великим затуханням.

Непрямі розряди блискавки. Лінії сигналізації і зв'язку схильні не тільки до прямих, але і непрямих дій грозових розрядів, тобто розрядів, що відбуваються поблизу ліній. У цих випадках в усіх проводах виникають так звані індукційні перенапруження, пов'язані з розвитком грозового розряду, опусканням і наближенням до поверхні землі ступінчастого лідера, який несе частину заряду хмари. Припустимо, що лідер несе негативні заряди. Його електричне поле індукує на найближчій до лідера стороні проводу позитивні заряди, а на протилежній - негативні. Останні через провідимість лінійної ізоляції проходять в землю. В результаті в проводі зберігаються лише позитивні заряди, пов'язані з негативними зарядами лідера. Внаслідок малої швидкості поширення ступінчастого лідера в порівнянні зі швидкістю позитивних зарядів (рівною приблизно швидкості світла) струм в проводі, пов'язаний з рухом позитивних зарядів, малий, і потенціал, зумовлений падінням напруги цього струму на хвиловому опорі проводу, практично дорівнює нулю, тобто потенціалу далеких ділянок лінії.

В мить, коли ступінчастий лідер досягає поверхні землі, відбувається головний розряд блискавки. Цей розряд призводить до повного розпаду електричного поля ступінчастого лідера. При цьому позитивні заряди в проводі звільняються і розтікаються уздовж нього в різні боки від місця розряду (рис.

), створюючи в дроті хвилю напруги, що впливає на ізоляцію лінії. Цю хвилю, пов'язану з розпадом електричного поля лідера, називають індукованою напругою.

Амплітуда індукованої напруги залежить від амплітуди і крутизни струму блискавки, висоти підвісу дроту $h_{\text{ср}}$ і відстані a від місця розряду блискавки до лінії (ширина зближення):

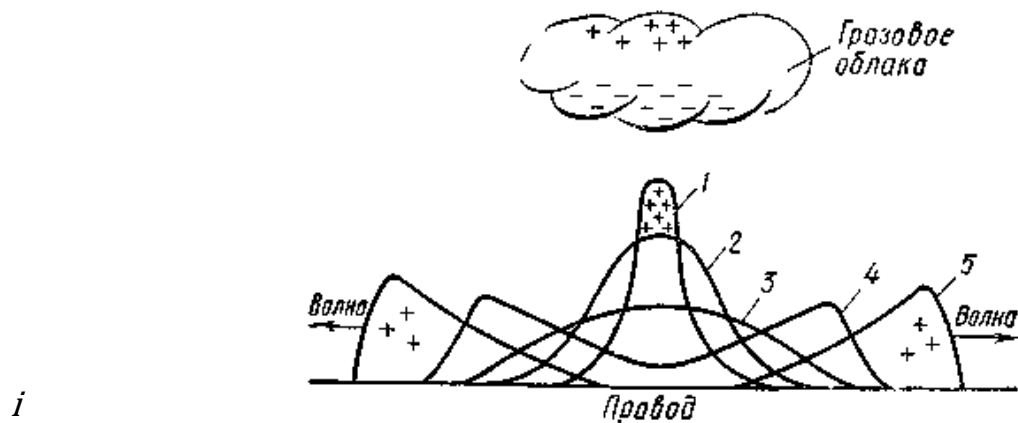


Рис. 1.2. Утворення хвиль індукційних перенапружень в проводі повітряної лінії ДСЦБ й зв'язку: 1-перед розрядом; 2-на початку розряду; 3,4-в момент розряду; 5-наприкінці розряду.

Враховуючи, що лінія "збирає" розряди блискавки з полоси шириною $6h_{\text{ср}}$, мінімальну відстань від лінії, на якій розряд блискавки може потрапити в землю, складає $3h_{\text{ср}}$. Підставляючи значення a в (1.5), отримаємо максимальні значення індуккованої напруги

U

З (1.6) видно, що при $I_m = 100$ кА в проводах можуть виникати індуковані перенапруження до 1200 кВ. Насправді вони не перевищують 400 кВ.

Індукована напруга виникає одночасно в усіх проводах приблизно з рівними амплітудами (незначна відмінність цієї напруги обумовлена неоднаковою висотою підвіски дротів), тому вони не небезпечні для міжфазної ізоляції лінії автоблокування.

i

Міра небезпеки напруги, що індукується грозовими розрядами, визначається не лише амплітудами перенапружень, але й частотою їх виникнення. Остання залежить від інтенсивності грозової діяльності в районі, де проходить траса лінії, а також від висоти підвісу дротів.

1.2.2. Зворотній тяговий струм

Вплив коротких замикань контактних мереж електричних залізниць постійного і змінного струму на рейкові кола (РК) автоблокування обумовлений тим, що на електрифікованих ділянках опори контактної мережі приєднані до однієї з ниток рейкової колії. Таке приєднання (безпосереднє або через іскровий проміжок багатократної дії) забезпечує роботу захисту на тяговій підстанції і виконання вимог техніки безпеки при експлуатації контактної мережі. Окрім цього, обидві нитки рейкової колії використовуються в якості зворотних провідників тягового струму, а також для живлення колійних приладів автоблокування і автоматичної локомотивної та переїзної сигналізації. Колійні прилади цих пристроїв включаються в рейкові кола, довжина яких змінюється від 400 до 2600 м. На кінцях РК встановлені дросель-трансформатори (ДТ). Первинні обмотки ДТ приєднують до кожної нитки рейкової колії, а вторинні - до колійних приладів автоблокування і автоматичної локомотивної сигналізації. Коефіцієнт трансформації ДТ залежно від типу РК і його включення (на живлячому або приймальному кінці рейкового кола) змінюється від 3 до 40. Для проходження зворотного тягового струму з одного блок-участка на інший середні точки первинних обмоток ДТ електрично сполучені між собою (рис. 1.2).

При нормальній роботі контактної мережі по кожній напівобмотці ДТ проходять струми в протилежних напрямках. При симетрії РК автоблокування ці струми рівні між собою, а тому будь-які зміни навантаження контактної мережі, супроводжувані змінами тягового струму, не зроблять будь-якого впливу на вторинні обмотки ДТ. Магнітні потоки, створені тяговими токами у сердечнику ДТ, взаємно компенсуються.

При асиметрії РЦ, наприклад, викликану знизенням опору ізоляції однієї з ниток рейкової колії із-за приєднання до неї опор контактної мережі або обриву стикових з'єднувачів, по полуобмоткам ДТ проходять тягові струми різної величини. В цьому випадку будь-яка зміна тягового струму супроводжується відповідними змінами результуючого магнітного потоку в сердечнику ДТ. Внаслідок електромагнітної індукції цей потік впливає на вторинну обмотку ДТ, індукуючи в ній напругу і струми, які залежать від швидкості зміни тягового струму, коефіцієнта трансформації, режиму роботи ДТ та ін.

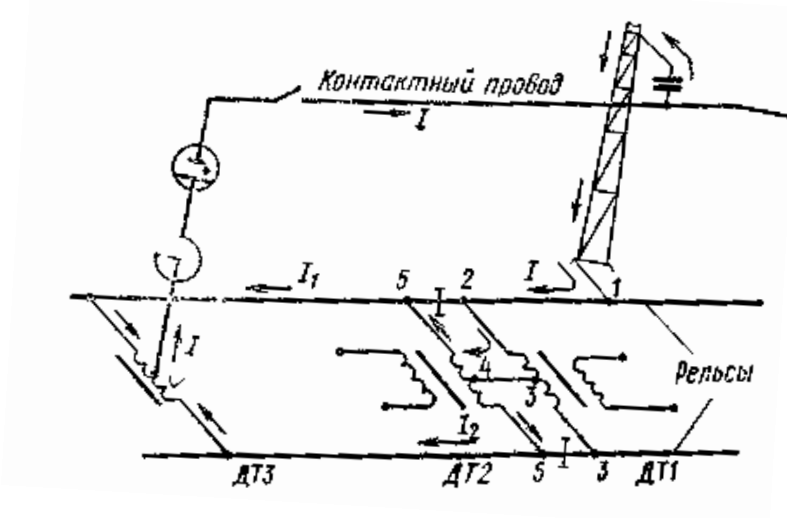


Рис. 1.3. Схема проходження тягового струму через дросель-трансформатор

1.2.3. Системи зовнішнього електропостачання

Для передачі електроенергії змінного струму на далекі відстані використовують високовольтні лінії (ВЛ) напругою від 3 до 1150 кВ. Звичайно це повітряні лінії, на яких підвішують одне або два трифазні кола, проводи яких розташовуються на опорах ВЛ горизонтально, вертикально або трикутником. ВЛ підрозділяються на симетричні лінії з ізолюваною і заземленою нейтраллю. Іноді нейтральні точки лінійних трансформаторів сполучають із землею через дугогасящу котушку. До несиметричних ВЛ відносяться лінії з двома фазовими проводами, коли в якості зворотного проводу використовують землю, а також симетричні ВЛ при роботі в неповнофазному режимі. Усі ці лінії можуть

викликати небезпечний електромагнітний вплив на лінії сигналізації та зв'язку, розташовані поблизу. У проводах цих ліній з'являються напруга і струми, які створюють небезпеку для здоров'я і життя обслуговуючого персоналу, викликають ушкодження апаратури і приладів, а також перешкоди, що порушують роботу пристроїв СЦБ і зв'язку.

У нормальному режимі симетричних ВЛ (при рівності навантажень фаз) напруги і струми в кожному фазовому проводі рівні за величиною і здвигнуті один від одного на 120° . Геометрична сума напруги відносно землі і сума струмів фазових проводів дорівнюють нулю. В цьому випадку вплив симетричних ВЛ безпечний.

У трифазній ВЛ з ізолюваною нейтраллю сума напруг фазових проводів відносно землі становиться рівній геометричній сумі напруги незаземлених фазових проводів ($U_0 = 1,73U_{\text{л}}$, де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга трифазної ВЛ). Така напруга створює навколо проводу l ВЛ змінне електричне поле (рис. 1.3, а), яке впливає на провід А лінії сигналізації та зв'язку (ЛСЗ). В залежності від відстані a між проводами і висоти їх підвісу b і c напруга, що індукується змінним електричним полем ВЛ, може бути небезпечною. Це вплив, обумовлений невірноваженою напругою фазових проводів по відношенню до землі, називають електричним впливом.

При заземленні одного з дротів трифазної ВЛ із заземленою нейтраллю в несправному проводі виникає струм короткого замикання $I_{\text{к.з.}}$, що досягає таких значень, при яких змінне магнітне поле ВЛ (рис. 1.4, б) індукує в ЛСЗ небезпечну подовжню ЕРС.

Вплив, пов'язаний з невірноваженим струмом в проводах ВЛ, називають магнітним впливом.

Електричне і магнітне поля є складовими електромагнітного поля. Умовний розподіл електромагнітного впливу на електричний і магнітний викликано практичними міркуваннями. Так, наприклад, заземлення фази ВЛ з ізолюваною нейтраллю зумовлює переважання електричного впливу, пов'язаного із збільшенням напруги фази. В цьому випадку струм в несправному проводі, рівний ємнісному струму, незначний за величиною і

його магнітним впливом практично нехтують. І, навпаки, заземлення фази ВЛ із заземленою нейтраллю супроводжується різким збільшенням струму в несправній фазі, який обумовлює магнітний вплив. При цьому електричний вплив ВЛ із заземленою нейтраллю малий.

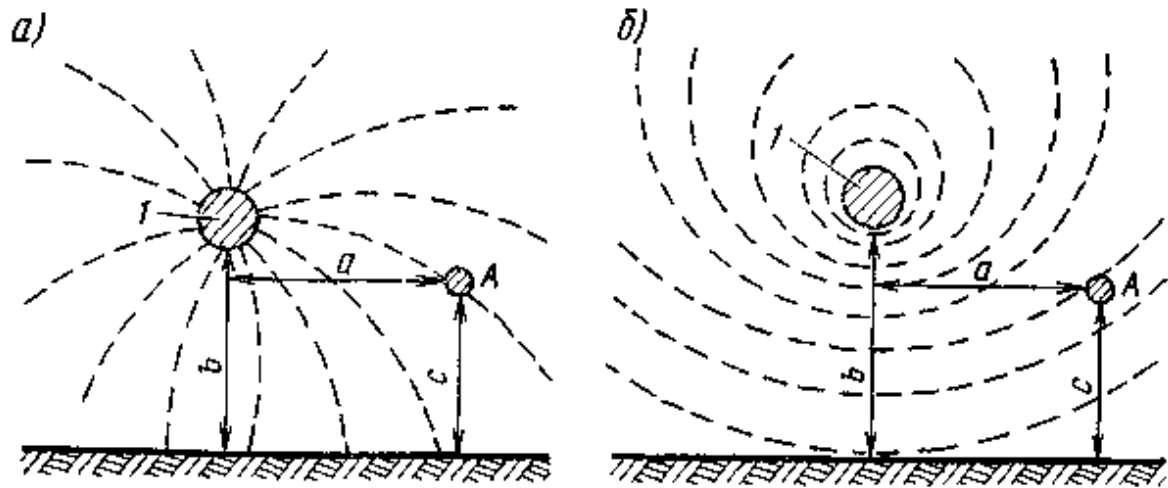


Рис. 1.4. Силлові лінії електричного та магнітного полів фазового проводу ВЛ

При магнітному впливі індукується подовжня ЕРС:

де $I_{к.з.}$ - впливаючий струм короткого замикання ВЛ, А; M - коефіцієнт взаємодукції між ВЛ і лінією ЛСЗ на 1 км ділянки зближення при частоті 50 Гц, Гн/км; l_n - довжина ділянки зближення ВЛ і ЛСЗ, км; ω - кутова частота, рад/с.

У разі електричного впливу трифазної ВЛ з ізолюованою нейтраллю (при однофазному замиканні на землю) величина середнього потенціалу на ізолюованому проводі:

де l - довжина лінійного проводу, км.

к За наявності суцільного ряду дерев або заземлених проводів і тросів введений потенціал декілька знижується через їх екрануючу дію.

Небезпека електричного впливу характеризується не лише потенціалом, але і розрядним струмом, що протікає через тіло людини, що торкнулася дроту ЛСЗ. Цей струм в однопровідному ланцюзі для випадку впливу ВЛ з ізолюованою нейтраллю при замиканні однієї з її фаз на землю:

де m - число заземлених сусідніх проводів.

4. Гармонійні завади

Джерелами гармонійних складових в системі електропостачання дороги постійного струму є перетворювальні агрегати тягових підстанцій і вольтододаткових пристроїв. Векторна величина напруги k -тої гармоніки тягової підстанції, В:

Тут k_{ck} — коефіцієнт згладжування фільтру тягової підстанції.

На тягових підстанціях України встановлюються, як правило, шестифазні випрямлячі, для яких амплітуди напруги гармонійних складових (рис. 1.4) обчислюють за формулою, В:

$$U_{Bk} = \frac{U}{\pi(k^2 - 1)} \left[1 + 2\sqrt{b_n^2 - b_n + 1} \times \cos k\alpha_n (-1)^{k/2} \right] \times \\ \times \sqrt{(-k \sin k\gamma \sin \gamma - \cos k\gamma \cos \lambda - 1)^2 + (k \cos k\gamma \sin \gamma - \sin k\gamma \cos \gamma)^2}$$

де U - напруга на виході випрямляча, що працює за схемою зірка - дві зворотні зірки зі зрівняльним реактором, рівне 2620 В; k — номер гармонійної складової випрямленої напруги; b_n — несиметрія фазної напруги тієї, що живить ЛЕП, визначається відношенням максимального значення фазної напруги на вторинній обмотці тягового трансформатора до мінімального; α_n — кут, що є функцією несиметрії, град:

При $b_n \leq 1,03$ напругу гармонік можна визначити по кривих рис. 4, а кутовою $\alpha_n = \arctg \frac{b_n - 1}{\sqrt{3}}$ нехтувати, тобто прийняти $\alpha_n = 0$. Кут комутації γ є функцією

струмів навантажень I_d , що доводяться на один агрегат, і визначається по формулі, град:

де I_d — випрямлений струм, А; $S_{кз}$ — потужність к. з. живлячій лінії на шинях $\gamma = 15.8$ тягової підстанції, МВ·А; $S_{п}$ — потужність знижувального трансформатора, кВ·А; $S_{т}$ — потужність тягового трансформатора, кВ·А; $e_{кп}$ та $e_{кт}$ — напруга к. з. відповідно понижуючого і тягового трансформатора у відсотках від номінальної напруги.

Початкова фаза φ гармонійною складовою, град:

Значення φ_k можна визначити також по кривих рис. 1.5.

$$\varphi_k = \arctg \frac{-k \sin k\gamma \sin \gamma - \cos k\gamma \cos \gamma - 1}{k \cos k\gamma \sin \gamma - \sin k\gamma \cos \gamma}.$$

Джерелом гармонійних складових струму в системі електропостачання змінного струму є перетворюючий агрегат електровоза. Гармонійний спектр (споживаного з тягової мережі) струму мережі перетворювача електровоза змінного струму залежить від ходової позиції, швидкості руху, рівня напруги на струмоприймачі, місця розташування електровоза на фідерній зоні, наявності інших електровозів на фідерній зоні. Рекомендується в розрахунках приймати спектр у віддаленому від тягової підстанції кінці тягового плеча живлення (табл. 1.1). Отримати уточнений спектр струму мережі електровоза при будь-якому його розташуванні можна, розклавши в ряд Фур'є криву цього струму [2].

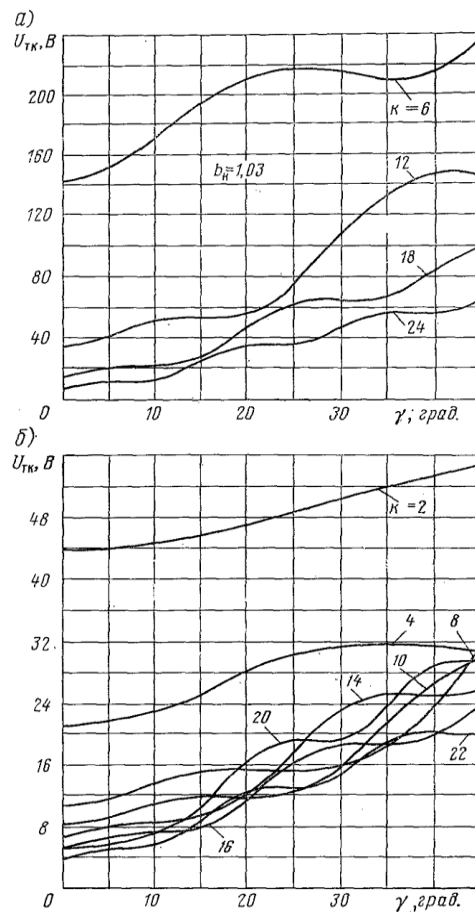


Рис. 1.4. Амплітуди гармонійних складових випрямленої напруги на виході шестифазного випрямляча залежно від кута комутації γ і номери гармонійної складової k для гармонійних кратних 6 (а) та інших, кратних 2 (б)

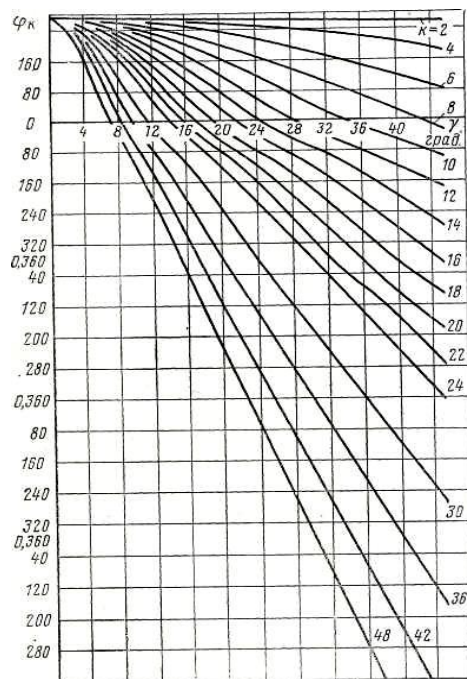


Рис. 1.5. Початкова фаза φ_k гармонійних складових залежно від γ та k

Струми I_k' у віддаленому від тягової підстанції кінці тягового плеча живлення

Номер гармоніки k	Частота струму f, Гц	Значення I_k' , А, для ділянок	
		одноколійного	двоколійного

Примітка. Для е. р. с. з рекуперативним гальмуванням значення струмів гармонік підвищуються на 20%

Спектральний склад тягового струму

Характеристика нелінійних елементів на нижній ділянці може бути зображена поліномом:

де $I_{вых,р.т.}$ - струм, обумовлений постійним зміщенням, $\Delta U_{вх}$ - зміна напруга сигналу на вході. При подачі на вхід гармонійної напруги

$\Delta u_{ex}(t) = U_{m,ex} \cos(\omega_0 t + \varphi)$ вихідний струм буде змінюватися за законом:

Закон зміни струму вже не буде гармонійним (рис.1.6).

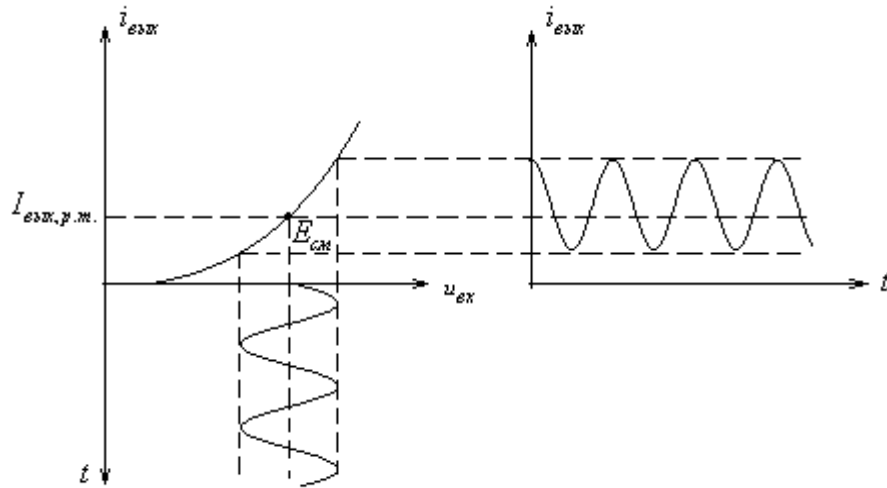


Рис.1.6. Закон зміни струму

Після тригонометричних перетворень можна вираз для струму привести до вигляду, зручному для збудови спектру (рис.1.7):

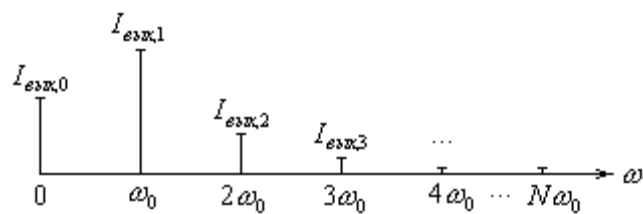


Рис.1.7. Спектр амплітуд гармонійних складових

Звідки амплітуди складників відповідно рівні:

Крапки відображають прирощення амплітуд за рахунок членів поліномів більше високих ступінів.

Таким чином можна відзначити наступні особливості перетворювання гармонійного сигналу:

- постійна складова струму та усі парні гармоніки включають в себе парні ступені амплітуди вхідного сигналу;
- амплітуди непарних складових струму являються сумою членів, обумовлених непарними ступенями полінома.

При створенні фізичної моделі системи тягового електропостачання в якості нелінійних елементів можуть бути використані біполярні транзистори або спеціальні діоди, які мають протяжливу нелінійну ділянку. Для визначення ділянки вихідних амплітудних характеристик, де вона квадратична, можна

побудувати графік $S(u_{ex}) = \frac{di_{ex}}{du_{ex}}$. Лінійна ділянка цієї характеристики і визначає квадратичну ділянку вихідних амплітудних характеристик. Експериментально квадратична ділянка нелінійного елемента може визначати, додавая гармонійний сигнал різної амплітуди та вимірювая постійну напругу на виході детектора або амплітуду гармоніки на виході у заданій робітничій точці. Лінійна ділянка здобутої амплітудної характеристики дасть можливість вибору режиму роботи нелінійного елемента, на квадратичній ділянці вихідних амплітудних характеристик.

1.3. Дослідження впливу електромагнітних завад на систему АЛС

Передача електричними сигналами повідомлень на локомотив по рейкових нитках ходового шляху схильна до дій зовнішніх перешкод. Перешкоди - це сторонні дії, що спотворюють передаванні сигнали і тим що перешкоджають їх правильному прийому. Перешкоди можуть мати різний характер. З усього їх різноманіття на передачу сигналів локомотивної сигналізації в першу чергу впливають імпульсні і гармонійні перешкоди.

Для передачі повідомлень в локомотивній сигналізації характерно, що струми корисних сигналів протікають в рейкових нитках шляху під приймальними котушками в зустрічних напрямках і ЕРС, індуковані в котушках при узгодженому включенні, складаються. Ця обставина створює сприятливі умови для захисту від багатьох зовнішніх перешкод, оскільки зазвичай зовнішні впливи діють на котушки в одному напрямі, тому наведені ними ЕРС прагнуть компенсувати один одного.

В першу чергу локомотивні пристрої піддаються постійній і сильній дії протікаючих по рейках тягових струмів та їх гармонік. Завдяки тому що тягові струми розповсюджуються по обох рейках в одному напрямі, ЕРС, індуковані в приймальних котушках, мають зустрічний напрям і взаємно компенсують один одного. Заважаюча дія проявляється лише тоді, коли струми в рейках становляться нерівними між собою або в приймальних котушках рівні струми індукують нерівні ЕРС.

Основними джерелами імпульсних перешкод в системі передачі електричних сигналів повідомлень на локомотиви, як показала багаторічна практика, являються самі локомотиви. Причинами, що викликають імпульсні перешкоди, зазвичай являються комутаційні процеси при отриманні струму, а також в колекторах машин, перетворюючих установках і інших елементах електричної схеми локомотиву.

На електрифікованих ділянках електровози, як рухомі споживачі електричної енергії, отримують її з контактної мережі. Отримання струму ведеться з контактного дроту через струмоприймач і з рейок ходового шляху колісними парами локомотива. Коло тягового струму, споживаного електровозом, проходить через раму локомотиву, візки і декілька паралельних кіл, утворених колісними парами локомотиву. У це коло входить багато електричних контактів у вузлах рухливого сполучення: в буксових підшипниках, зубчастих передачах, в зчленуванні кузова і візків і, головне, між колесами і рейками. Перехідні опори цих контактів не залишаються постійними. В першу чергу це відноситься до ділянок, де в зимових умовах наблюдається погіршення зчеплення між колесом і рейкою, що вимагає

підвищеного застосування піску щоб уникнути боксування. Пісок на рейках при збільшеній його витраті викликає відрив один від одного контактуючих поверхонь колеса і рейки. При цьому важлива товщина шару піску між ними. Якщо кількість піску не перевищує оптимально необхідного по зчепленню, то він втрачає кількість точок контакту і тим самим навіть покращує струмопровідність.

Погіршення умов зчеплення колеса з рейкою відбувається також при забрудненні поверхні голівок рейок.

На залізницях Півночі, Сибіру і Далекого Сходу (особливо в районах вічної мерзлоти і прилеглих до них) при сильних морозах на рейках осідають паморозь, сніжинки або дрібний сніг. Ці опади плавляться під колесом локомотива, що рухається, і миттєво примерзають до холодної рейки після проходу кожного колеса. Отже, колеса наїжджають на рейки, що обледеніли, що різко погіршує умови зчеплення. Застосування піску для поліпшення зчеплення призводить до того, що частина сильно зволоженого піску, особливо піску з підвищеним вмістом глини, спресовується і швидко примерзає до рейок, утворюючи чорний наліт. За наявності паморозі, сніжинок або дрібного снігу наліт може утворитися навіть при проході одного потягу.

Під час руху загальний струм, споживаний локомотивом, безперервно перерозподіляється між окремими його колісними парами із-за непостійності перехідного опору контактів колесо-рейка. При цьому характерне те, що тяговий струм поза локомотивом не перерозподіляється між рейковими нитками, залишаючись практично постійним. Перерозподіл його відбувається тільки між колісними парами внаслідок відносно малого перехідного опору контактів колесо-рейка локомотиву і малої індуктивності кіл розтікання в порівнянні з іншими елементами кола тягового струму.

Приймальні котушки локомотиву опиняються під дією магнітних полів тягових струмів, що протікають не лише в рейках під котушками, але і в колісних парах, рамі і інших частинах локомотиву.

Стрибкоподібний перерозподіл тягового струму між частинами локомотиву викликає такі ж різкі зміни, що пронизують приймальні котушки магнітних полів тягових струмів, що протікають через розташовані зблизька частини локомотиву. Дія цих струмів може бути природно несиметричним. Ступінь його залежить від віддаленості котушок від частин локомотиву, а також від симетричності їх розташування відносно впливаючих струмів.

Основним джерелом імпульсних перешкод, діючих на прийомні котушки, є перша колісна пара локомотиву, розташована в безпосередній близькості від них і що знаходиться в умовах, найбільш несприятливих для прийому струму, залежного від великого числа зовнішніх випадкових чинників. Так, із-за зміни опору контакту рейка-колесо прийом струму під час руху погіршується або покращується, а отже, різко міняється струм в колесі і магнітний потік, що проходить по сердечникові приймальних котушок. Було встановлено, що більше видалена пара котушок схильна до меншої дії перешкод. З цього виходить, що перешкоди створюються не асиметрією тягового струму в рейках. В іншому випадку зменшення струму в одній з рейок і таке ж збільшення в іншому викликали б поява в обох парах котушок однакової дії, що заважає, а то, як сказано вище, було різним. Це ж підтверджується вимірами напруги перешкод на одній і одночасно на обох котушках, коли обидві напруги виявлялися майже однаковими, рівними напрузі, що наводиться в одній котушці, розташованій ближче до колеса, в якому мінявся струм. Випробування дають основу вважати, що шлях проникнення імпульсних перешкод лежить не через рейки перед локомотивом під котушками.

Другий вид досить своєрідних імпульсних перешкод пов'язаний з намагніченням рейок. Рейки з об'ємним загартуванням при транспортуванні на рейкопрокатних заводах намагнічуються електромагнітними захватами кранів. На рейці завдовжки 25 м виявляються два намагнічені місця з різнойменними полюсами в кожному, що знаходяться на відстані 1,25 м один від одного. Таким чином, під час руху локомотиву його приймальні котушки через кожні 12,5 м перетинають дві пучності магнітних силових ліній різнойменних полюсів намагніченого місця рейки. Це супроводжується появою в котушці від кожного

полюса двостороннього імпульсу ЕРС, напрям якої у полюсів намагніченого місця обов'язково міняється. В результаті дії імпульсів перешкод на виході фільтру виникають коливання з частотою налаштування фільтру.

Частота дотримання імпульсів перешкоди, оскільки місця намагнічування розташовані уздовж шляху майже рівномірно через 12,5 м, повністю залежить від швидкості потягу. Наприклад, при швидкості потягу 24-28 км/год на локомотив впродовж часу прийому кожного електричного сигналу локомотивної сигналізації поступатимуть два різнополярні імпульси перешкоди, тобто число імпульсів буде пропорційне швидкості. Природно, таке ритмічне і часте дотримання перешкод веде до чисельного спотворення електричних сигналів, збоїв їх прийому з появою білого вогню, не унеможливаючи появи інших вогнів, що не відповідають сигналам в рейках.

Тривалість періоду дотримання різнополярних імпульсів перешкод залежить від відстані між магнітними полюсами намагніченого місця і швидкості руху потягу. Приблизно при швидкості 120 км/год тривалість періоду імпульсу перешкоди співпадає з періодом коливань сигнальної частоти 25 Гц, що створює умови для сильнішого прояву перешкоди. Якщо місця намагнічування рейок обох ниток не співпадають між собою, то частота імпульсів може бути значно більше і час між ними може бути різним. Напруженість магнітного поля уздовж рейки між полюсами місця намагнічування поблизу поверхні його голівки різко змінюється, досягаючи близько 30 Э у полюсів або 1-2 Э на висоті приймальної котушки. В той же час напруженість магнітного поля, що створюється сигнальним струмом в рейках силою 1 А, на тій же висоті рівна 0,01 Э.

Другий вид перешкод – гармонійні - зустрічається при усіх видах тяги. При електричній тязі змінного струму перешкоди створюються тяговим струмом частотою 50 Гц; на лініях з тягою постійного струму - пульсаціями тягового струму, лініями електропередачі (ЛЕП), що перетинають залізниці або йдуть уздовж них в безпосередній близькості; на ділянках з тепловозною тягою - лініями електропередач. Захист від цього виду перешкод будується на частотній селекції із застосуванням електричних фільтрів, застережливих дію коливань з

частотою, відмінною від частоти сигнального струму локомотивної сигналізації на приймальні пристрої.

Особливе місце займає проблема захисту від впливів лінії електропередачі на ділянках з електричною тягою постійного струму і тепловозною тягою, коли пристрої локомотивної сигналізації працюють на частоті 50 Гц, і тому методи частотного розподілу сигналу і гармонійної перешкоди непридатні.

Перешкоди від ЛЕП створюються її магнітним полем, мають синусоїдальний характер і проявляються в місцях зближення ЛЕП із залізницею у вигляді перетинів або взаємного паралельного розташування. Завдання сумісності вирішується виходячи з обмеженою по протяжності зони впливу ЛЕП в місці перетину і певної симетричності лінії передачі. Лінії, розташовані паралельно залізниці, зазвичай мають малу потужність, тому не вимагають особливих заходів захисту, тим більше відмінних від вживаних при перетині потужними ЛЕП. Змінне магнітне поле, що створюється струмами, поточними в дротах лінії передачі, наводить ЕРС в рейках, в котушках і металевих частинах локомотиву. Наведені ЕРС створюють в металевих частинах локомотиву вихрові струми, які у свою чергу своїм магнітним полем впливають на приймальні котушки.

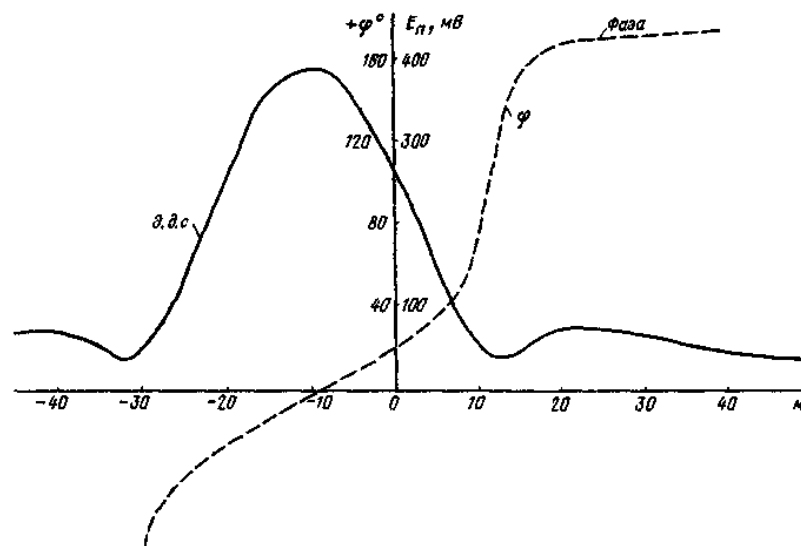


Рис. 1.8. Зміна ЕРС та фази перешкод в котушках АЛС, що наводиться ЛЕП з горизонтальним розташуванням проводів

В результаті котушки знаходяться одночасно під безпосереднім і непрямим впливами ЛЕП. При цьому, як показують дослідження, основний вплив - непрямий, що викликається в основному струмами, наведеними в рамі локомотиву, що робить його мало залежним від кута перетину ЛЕП із залізницею. Навіть при перетині під прямим кутом, коли прямий вплив стає зовсім незначним, непрямий вплив має істотне значення.

Наведений н струм, що замикається в рамі локомотиву, протікаючи по її подовжніх частинах в протилежних напрямках, як і в рейках, наводить в приймальних котушках ЕРС одного напрямку. В той же час ЕРС безпосереднього впливу спрямовані зустрічно один одному, при цьому в одній котушці погоджено з ЕРС непрямого впливу. Непрямий вплив наведених струмів в рейкових ланцюгах несуттєвий із-за малої зони дії такою, що перетинає ЛЕП на рейкову лінію.

Значення що наводиться в котушках ЕРС залежить від способу підвіски дротів ЛАП і струмів в них і міняється уздовж зони впливу. Зона впливу - ділянка шляху під тією, що перетинає залізницю ЛЕП, на межах якого ЕРС перешкоди стають менше чутливості підсилювача на відпуск імпульсного реле.

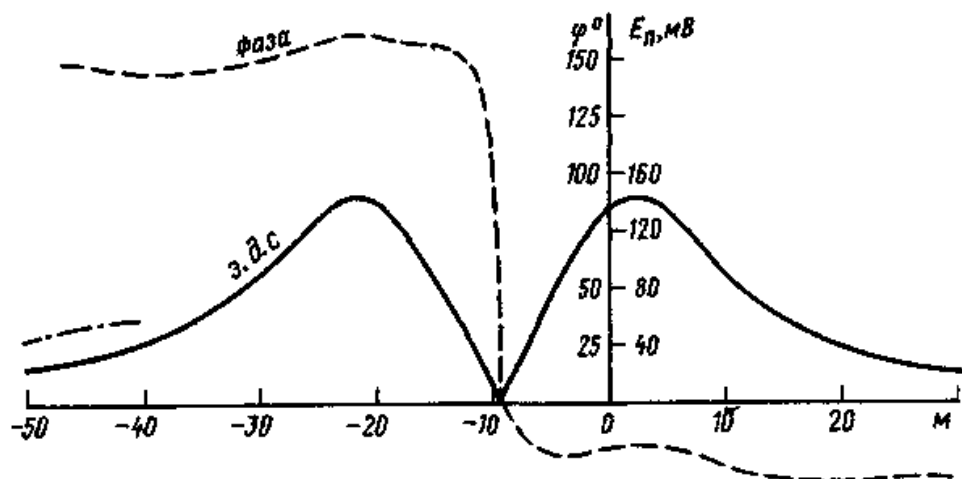


Рис. 1.9. Зміна ЕРС та фази перешкод в котушках АЛС, що наводиться ЛЕП з вертикальним розташуванням проводів

. Вплив зовнішніх електромагнітних полів на кола автоматики, телемеханіки й зв'язку

Джерела зовнішніх електромагнітних впливів на кола автоматики, телемеханіки й зв'язку досить різноманітні як по своїй природі, так і із впливу. Поряд з тяговими мережами електрифікованих залізниць, високовольтних ліній електропередачі, до них можна віднести й грозові розряди, які при різних умовах можуть створити як небезпечну дію, так заважаючи джерела - радіостанції, що створюють перешкоди в колах, різноманітні промислові джерела електромагнітних полів (двигуни, генератори, зварювальні агрегати й т.п.)

У табл. 1.2. наведені джерела зовнішніх впливів і зазначені режими їхньої роботи, що вимагають урахування при розрахунку небезпечних і заважаючи впливів, на кабельні й повітряні лінії.

Напруги й струми магнітного впливу визначають із урахуванням або без хвильових процесів залежно від виду лінії, її довжини, умов зближення й частоти струму.

У тяговій мережі електричних залізниць змінного струму присутні непарні гармоніки, кратні 50 Гц - 150, 250, 350, 450, 650, 750 Гц і т.д.[7, 8]

У тяговій мережі електричних залізниць постійного струму присутні гармоніки, кратні 50 Гц і кількості пульсацій випрямленої напруги – 300, 600, постійного струму присутні гармоніки обумовлені роботою випрямлячів тягових підстанцій (кратних 300 або 600 Гц залежно від схеми випрямлення).

Таблиця 1.2

Аналіз джерел завад та ступеню впливу на пристрої залізничної
автоматики

Джерела зовнішнього впливу	Режим роботи обладнання	Кабельні лінії автоматики, телемеханіки та зв'язку	Повітряні лінії автоматики, телемеханіки та зв'язку
----------------------------	-------------------------	--	---

		Небезпеч- ний вплив	Заважаю- чий вплив	Небезпеч- ний вплив	Заважаю- чий вплив
Тягова мережа змінного струму	Вимушений режим Режим кз				
Тягова мережа постійного струму	Номінальний режим Режим кз				
ВЛ з ізолюованою нейтраллю	Номінальний режим Аварійний				
ВЛ із заземленою нейтраллю	Номінальний режим Аварійний				
Мережі освітлення	Номінальний режим кз				
Промислові джерела завад	Номінальний режим				
Радіостанції	Передача				
Грозові розряди	Прямий удар Індуктивний вплив				

При несиметричності живильної напруги або несправності випрямлячів у тяговій мережі з'являються гармоніки кратні 50 Гц (рис. 1.10). Спектр струмів поздовжньої лінії електропередач основного живлення ВЛ СЦБ, прокладеної вздовж неелектрифікованої залізничної лінії, наведений на рис.1.11. Чим нижче частота гармонік струму, що впливає, тим більше їхня амплітуда.

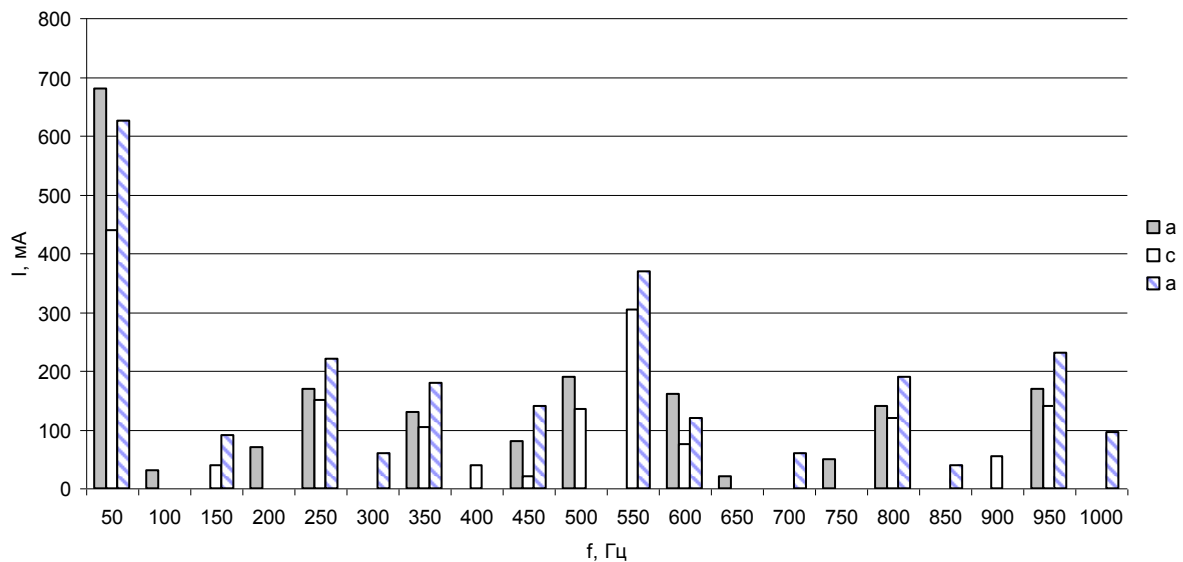


Рис. 1.10. Спектр струмів поздовжньої лінії електропередач, прокладеної уздовж залізниці , електрифікованої постійним струмом

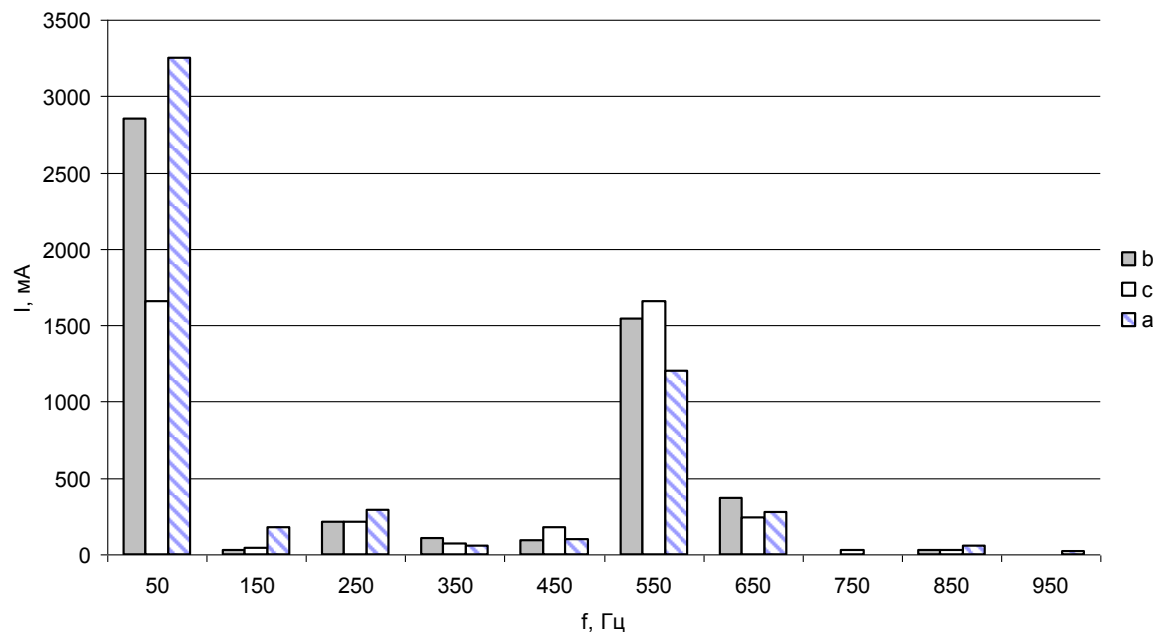


Рис. 1.11. Спектр струмів поздовжньої лінії електропередач, прокладеної уздовж неелектрифікованої ділянки залізниці

. Норми небезпечних та заважаючих впливів. Нормування наведених напруг та струмів

Вплив тягової мережі електрифікованої дороги приводить до появи напруг, котрі являють небезпеку для людей та обладнання, чи заважаючи роботі систем зв'язку. Очевидно, існують деякі пороги цих двох сортів наведених напруг, нижче

яких можна не рахуватися з впливом тягової мережі. Ці критичні значення зафіксовані в нормативних документах [1, 2] для господарства сигналізації та зв'язку залізниці, які необхідно знати і працівникам господарства електропостачання. Спеціальних норм в відношенні наведених напруг електричного і магнітного впливу для пристроїв електропостачання немає, оскільки основна ідеологія нормування небезпечних впливів основана на застосуванні спеціальних мір захисту від наведеної напруги, специфіка роботи персоналу господарства електропостачання зв'язана постійною небезпекою високої напруги та спеціальні міри захисту персоналу працюючого в низьковольтних установках тягового електропостачання. Спеціальні міри по захисту персоналу та абонентів систем сигналізації та зв'язку встановлюють заземлення металевих покриттів кабелів, використання ізолюючих захисних засобів та інші заходи. В даному розділі наведені норми небезпечних та заважаючих впливів для пристроїв сигналізації та зв'язку.

Норми допустимих небезпечних впливів складені на основі врахування трьох наступних факторів (в порядку зниження їх важливості): вимоги безпеки для обслуговуючого персоналу та користувачів; співвідношення напруг що наводяться з рівнем ізоляції лінії і приєднаного до неї обладнання; величини робочої (допустимої) напруги, вказаного в технічних умовах на кабель (в випадку кабельної лінії) чи вхідне обладнання.

Вимоги безпеки засновані на наступних міркуваннях. Відомо, що довгочасне протікання через тіло людини змінного струму не більше 2 мА не завдає помітного впливу. Якщо струм через тіло людини, яка доторкнулася до будь-якого місця ізольованого проводу зв'язку чи сповіщення, не буде перевищувати 2 мА, то на таких лініях можна не застосовувати спеціальних мір по захисті обслуговуючого персоналу та абонентів від небезпечного впливу тягової мережі. Величина струма визначається електричним впливом контактної мережі та протяжність протікання не обмежена в часі.

При коротких замиканнях в тяговій мережі в суміжних лініях виникають короткочасні напруги магнітного впливу, тривалість яких визначається часом спрацювання захисту в пристроях тягового електропостачання. Ступінь

небезпеки короткочасного впливу напруги на людину менше, ніж довготривалого, і залежить від тривалості дії напруги: чим коротший імпульс, тим він менш небезпечний. По цій причині нормують наругу цього виду впливу для найгіршого варіанту суміжної лінії зв'язку, коли лінія заземлена на віддаленому кінці, і враховують тривалість наведеної напруги, що визначається часом спрацювання захисту від короткого замикання. При тривалій дії напруги, що відповідає вимушеному режиму живлення міжпідстанційної зони (консольне живлення від однієї підстанції), ступінь небезпеки наведеної напруги найбільша. Спеціальні міри по захисті персоналу і абонентів не застосовуються в випадках, якщо при заземленні провода на протилежному кінці в лінії відносно землі виникають напруги, які не перевищують приведених в табл. 1.3.

Для збереження відповідності наведеної напруги з рівнем ізоляції лінії та приєднаного до неї обладнання необхідно, щоб амплітудне значення результуючої напруги між провідником і землею, обумовлене електричним і тривалим впливом, не перевищувало мінімальної статичної напруги пробою встановлених на провіднику розрядників. Окрім того, небезпечні напруги не повинні перевищувати 60% дослідної напруги ізоляції жил кабелю або ввідного обладнання по відношенню до землі при короткому замиканні в тяговій мережі.

Для збереження відповідності наведеної напруги та робочої (тривало допустимої) напруги при вимушеному режимі роботи тягової мережі не повинно перевищувати робочої напруги в лінії зв'язку.

Таблиця 1.3

Допустимі напруги, що індукуються по відношенню до землі
в проводах лінії зв'язку та провідного сповіщення

Л і н	Допустима напруга, вольт, в режимі роботи тягової мережі	Час відключення тягової мережі при
-------------	--	--

і я з в , я з к у	вимушений	К.З.	К.З., с, не більше
П о в і т р я н а з д е р е в , я н и м и			

О П О Р А М И , В Т О М У Ч И С Л І З З А Л І З О Б Е Т О Н			
--	--	--	--

Н и м и п р и с т а в к а м и			
П о в і т р я н а з з а л і з			

о б е т о н н и м и а б о м е т а л е в и м и о п о р а м			
---	--	--	--

И

к

а

б

е

л

ь

н

а

,

в

т

о

м

у

ч

и

с

л

і

в

о

л

о

к

о

н

н

о

- О П Т И Ч Н а з м е т а л е в и м и ж и л а м и д л я д и			
--	--	--	--

с т а н ц і й н о г о ж и в л е н н я			
---	--	--	--

Нормування заважаючи впливів проводиться для провідникових ліній зв'язку, працюючих на звукових частотах. При нормуванні необхідно враховувати несинусоїдальність струмів та напруг в тяговій мережі та несинусоїдальність напруг шумів що наводяться, спектр яких містить різні частоти. Найбільш представницьких характер несинусоїдальної наведеної напруги являється його енергетична характеристика – ефективне значення, яке, однак, повинно бути скоректовано з врахуванням наступних міркувань.

Частотна залежність коефіцієнта акустичної дії дана на рис. 1.12.

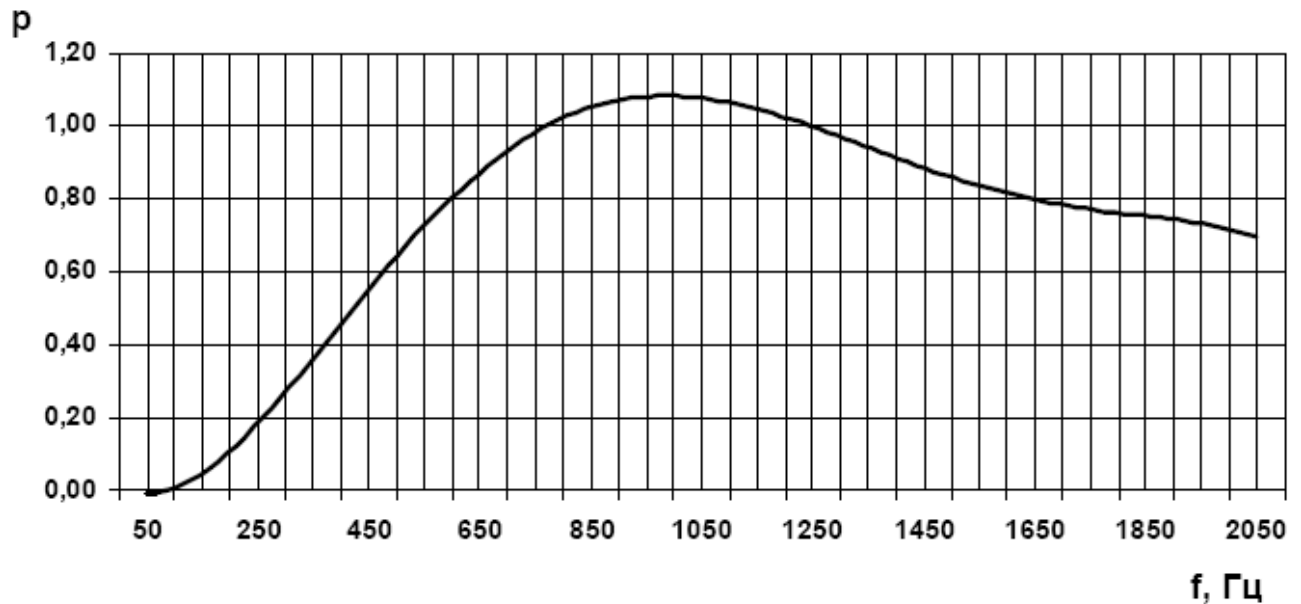


Рис. 1.12. Зразковий характер частотної залежності p_k

При передачі сигналів по каналах низької частоти телефонного зв'язку потрібно мати на увазі, що в таких системах, по-перше, діють ефективні фільтри звукових частот, які пропускають сигнал в відносно вузькому діапазоні частот, а по-друге, система телефон-людина сама по собі володіє частотно-вибірковою дією. Максимум чутливості цієї системи лежить на частоті 1 кГц, і в основному по останній причині прийнято порівняння акустичної дії струмів різних частот зі струмом частоти 800 Гц з допомогою коефіцієнта акустичної дії, який визначається відношенням $p_k = U_{800}/U_k$, де U_{800} , U_k – напруга сигналу частотою 800 Гц, частотою k (k – номер гармоніки що розглядається), які сприймаються з однаковою гучністю. Зразковий характер частотної залежності p_k показаний на рис. 1.5. Максимум залежності приходить на частоту 1 кГц, де p_k дещо більше одиниці.

Таким чином,

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

де U_n – дійсне значення напруги гармоніки n , використовується напруга

яка називається психофотметричною напругою шуму. Саме ця напруга нормується [1,2]; в якості прикладу в табл. 3 наведено декілька нормативних значень

В

Е

Д

псофометричної напруги шуму. Ці норми визначаються в основному рівнем сигналу що передається.

Таблиця 1.4

Допустимі значення напруги шуму що індукуються в каналах низької частоти

К а н а л з в' я з к у	Д і л я н к а з б л и ж е н н я	Т о ч к а к о л а	Рівень корисного сигналу, дБ	Напруга шуму, мВ
М а гі с т р а л ь н о г о т а з о н о в о г о з в'	П ід с и л ю в а л ь н а ді л я н к а	В х і д п і д с и л ю в а ч а		

я з к у				
Г р у п о в и й к а н а л н и з ь к ої ч а с т о т и М П С	Д і л я н к а в и б і р к о в о г о з , в я з к у	Л і н і й н і з а ж и м и т е л е ф о н н о г о а п а р а т у		

Вказані в табл. 3 напруги шуму відносяться до лінійних зажимів кіл с хвильовим опором 600 Ом, замкнутим по краям на согласовану навантаження. В випадку відмінності хвильового опору лінії $z_{\text{в}}$ від 600 Ом норму напруги шуму

п
е
р
е
р
а

При вимірюваннях психофотометричної напруги шуму використовують спеціальний фільтр, котрий має відповідну частотну характеристику, і вольтметр дійсних значень.

Норми небезпечних впливів визначаються в основному ступінню небезпеки наведеної напруги для людини, а також рівнем ізоляції лінії та робочою напругою лінії зв'язку.

Норми допустимих заважаючих впливів визначаються допустимим співвідношенням між напругою шуму та напругою корисного сигналу в лінії зв'язку.

. Висновки за розділом

Проаналізовано причини виникнення гармонійних та імпульсних завад в рейкових колах. Основними їх джерелами є випрямлячі тягових підстанцій та робота двигунів та систем тиристорного керування рухомого складу електровозів. На дільницях з електротягою змінного струму в зворотньому струмі з'являються гармоніки кратні 25 Гц, які виникають через роботу щітково-колекторного механізму тягового двигуна постійного струму. Несиметричність фазних напруг трифазного змінного струму веде до появи гармонічних складових, кратних 100 Гц.

Встановлено, що у тяговій мережі електричних залізниць змінного струму присутні непарні гармоніки, кратні 50 Гц - 150, 250, 350, 450, 650, 750 Гц і т.д. У тяговій мережі електричних залізниць постійного струму присутні гармоніки, кратні 50 Гц і кількості пульсацій випрямленої напруги – 300, 600, 900, 1200, випрямлячів у тяговій мережі з'являються гармоніки кратні 50 Гц.

В залежності від режиму роботи тягової мережі (номінального, вимушеного чи короткого замкнення) змінного струму можуть оказувати на пристрої СЦБ та зв'язку заважаючий чи небезпечний вплив, система тягового електропостачання постійного – заважаючий вплив. Небезпечну дію оказують на лінії зв'язку високовольтні лінії із заземленою нейтраллю й грозові розряди.

З усіх пристроїв СЦБ найбільш незахищеними від впливу тягової мережі є рейкові кола та надольні пристрої АЛС.

Великі навантаження в системі електропостачання вагонів, тягові й гальмові струми з тактовим регулюванням, а також ємнісні струми, що відгалужуються від кіл перетворювачів у системи заземлення, ведуть до утворення магнітних полів у рейках і підкузовній зоні рухомого складу. Ці поля можуть значною мірою ускладнювати нормальне функціонування пристроїв СЦБ і зв'язку, що працюють на індуктивному принципі, наприклад, лічильників осей, точкових і шлейфових систем АЛС, колійних приймачів.

2. Розробка математичної моделі розповсюдження гармонік тягового струму по довжині фідерної зони

2.1. Існуючі розрахункові моделі і схеми заміщення системи тягового електропостачання

Для того, щоб визначити ступінь впливу системи тягового електропостачання на роботу РК, необхідно визначити гармонійний склад і рівень завад в суміжних слабкострумових колах, що приводять до збоїв в їх нормальній роботі, і розробити математичну модель, що описує електромагнітні процеси, що протікають в тяговій мережі.

Вперше рівняння двохпровідної довгої лінії були одержані Кірхгофом і Хевісайдом. Проте широко поширеними вони стали тільки тоді, коли Пуанкаре досліджував їх рішення. Виводом телеграфних рівнянь займався і Карсон. Він виразив магнітне поле в повітрі і землі, а також електричне поле через струм в дроті і похідну потенціалу уздовж поверхні проводу. Аналіз напрямку розвитку теорії довгих ліній показав, що існує два основні напрями в розрахунках електричних режимів довгих ліній: рішення за допомогою гіперболічних функцій і використання колових схем.

Так, Соколов Н.І. і Соколова Р.Н. займалися дослідженням хвильових і напівхвильових ліній, оцінювали їх роботу із зміною частоти і можливості

роботи напівхвильових ліній без настройки. В результаті довгу лінію вони замінюють П-образним чотириполюсником для врахування взаємоіндукції. Рішенням є матриці опорів і провідності залежно від координати і коефіцієнта корисної дії [1].

Беляков Ю.С. розраховував взаємоіндукцію довгих ліній електропередач. При цьому для дослідження ним була вибрана двохпровідна лінія. По відомих нульових послідовностях опорів проводів (індуктивним) і ізоляції (місткісним) була одержана матриця вузлових провідностей. При рішенні використовувалася система з гіперболічними функціями.

Коровкін Н.В. і Селина Е.Е. досліджували хвильові процеси в системах з розподіленими параметрами методом синтетичних схем. Цей метод застосовний для ліній без втрат, які опромінюються магнітним полем. Система в цілому представляється як сукупність пристроїв, описаних телеграфними рівняннями, і сполучаючих кінцевих пристроїв, описуваних нелінійними схемами заміщення. Рішення зводиться до інтеграції систем звичайних диференціальних рівнянь великої розмірності або аналізу перехідних процесів в багатоланкових схемах. Аналіз проведений при дії на схему короткочасних імпульсів електромагнітного поля (до 1000 А) [2].

Дослідження довгих ліній високої напруги описаними вище способами не дозволяє враховувати вплив активного опору дротів і провідності ізоляції, і в результаті рішення не завжди є можливим визначити розподіл напруги і струму уздовж довгої лінії.

Аналіз існуючих схем заміщення тягової мережі показав, що найпоширенішою теорією в цій області є побудова математичної моделі, в якій тягова мережа замінюється чотириполюсником: одна довга лінія є контактною мережею, а друга – рейковою мережею. Розв'язуються системи рівнянь матричним методом.

Єрмоленко Д.В. і Павлов И.В. використовують хвильові параметри тягової мережі змінного струму, задаючись хвильовим опором і коефіцієнтом розповсюдження хвилі. Таке представлення тягової мережі дозволяє визначити напругу в будь-якій точці контактної мережі в межах фідерної зони для будь-якої

гармоніки при односторонньому або двосторонньому живленні, але не враховує індуктивні і ємнісні залежності між контактною мережею, лініями подовжнього електропостачання і рейками.

Кучумов В.А. і Широченко Н.Н. моделювали електромагнітні процеси в тяговій мережі за допомогою диференціальних рівнянь, враховуючи розподілену індуктивність дротів і місткість ізоляції, проте зневажали активним опором і провідністю тягової мережі [].

Також дослідженнями розподілу вищих гармонік по тяговій мережі змінного струму при різних схемах компенсуючих пристроїв займалися Шевцов Б.В. і Хетчинов А.І. Боків К.А створив вірогіднісно-статичну модель електромагнітної сумісності тягової мережі з інтегральними мікросхемами. Сумин А.Р. теоретично і експериментально дослідив розповсюдження зворотного тягового струму в землі і дав рекомендації по його обмеженню.

У роботах Косарева А.Б, Кононової Е.И., Котельникова А. В., Бичкова А.Н. розрахунок електромагнітного впливу на суміжні комунікації (лінії зв'язку, трубопроводи і ін.) виконується за допомогою схеми заміщення, в якій індуктивний і гальванічний вплив тягової мережі враховується розподіленими джерелами ЕРС і струму відповідно. Для розрахунку використовується матричний метод із застосуванням хвильових параметрів.

Професор У. Де-Фань запропонував математичну модель для оцінки заважаючого впливу електрифікованих ліній змінного струму напругою 25 кВ і 2х25 кВ на суміжні комунікації, схема заміщення якої включає активно-індуктивні опори дротів, а також враховує зв'язки ємностей між дротами багатодротового кола. Система диференціальних рівнянь, в якій враховані і опори взаємоіндукції, розв'язується матричним методом. [16]

У всіх вищезазначених роботах рейкова мережа розглядається як єдиний дріт з розподіленими параметрами, і тому при даних схемах заміщення не представляється можливим визначити величину струмів асиметрії і врахувати вплив різних чинників, у тому числі і гармонік тягової мережі, на роботу рейкових кіл.

Математичні моделі тягової мережі постійного струму розглянуті в роботах Бадера М.П., Семенчука С.П., Просецкого А.П., Мініна Г.А., Бабаєвой В.М. У цих роботах рейки представляються окремими проводами, у відмінності від всіх згаданих вище моделей. У схемі заміщення контактної мережі окремо не виділяються контактний дріт і трос, вони замінюються загальним. Також в схемі заміщення враховуються опори взаємоіндукції між рейками і контактною мережею, але не врахована провідність ізоляції контактна мережа - рейки, а лише провідність рейок щодо землі і між собою.

Отже, з метою оцінки впливу всіх видів завад на роботу рейкових кіл і системи АЛС, необхідно розробити комплексну математичну модель процесу їх розповсюдження в системі тягового електропостачання. Для вирішення даної задачі важливо уточнити схему заміщення електричних тягових мереж так, щоб стало можливим враховувати якомога 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.

2.2. Математична модель системи тягового електропостачання ділянок з великою пропускною спроможністю

Для аналізу електромагнітних процесів в тяговій мережі була розроблена комплексна математична модель, в якій рейковий ланцюг представлений шестиполюсником, а тягова мережа – $2 \cdot n$ -полюсником. Таке представлення електричного кола дозволяє враховувати вплив різних джерел завад і дію зовнішніх чинників, які приводять до зміни параметрів рейкової лінії і роблять вплив на роботу суміжних пристроїв системи залізничної автоматики і телемеханіки і ліній зв'язку.

При електричній тязі рейкові лінії використовуються не тільки як лінії зв'язку в пристроях залізничної автоматики, а і для пропуску зворотного тягового струму. Струм, споживаний електровозом, поступаючи в двохниткову

рейкову мережу, розгалужується на струми I_1 і I_2 , які мають однаковий напрям, але можуть відрізнятися по величині. При цьому частина зворотного тягового струму повертається на підстанцію не по рейкових лініях, а через землю. Величина струмів витоку визначається питомими провідностями контурів рейка – рейка, рейки – земля, контактна мережа – рейки, контактна мережа – земля [17].

Еквівалентна схема тягової мережі одноколійної ділянки, включає такі лінії: контактна мережа (несучий трос і контактний дріт замінені одним дротом, оскільки вони сполучені по всій довжині ділянки між собою паралельно струнами), рейки (рейка 1 і рейка 2) і земля і представлена на рис. 2.1. Початковими даними для моделювання є: величина напруги в контактній мережі досліджуваної гармонійної складової, величина струму і частота гармоніки, режим роботи локомотива (рекуперативний, тяговий), активний і реактивний опір тягової мережі на частоті досліджуваної гармоніки, довжина фідерної зони, спосіб електроживлення (односторонній або двосторонній), опір баласту, вид навантаження (рівномірно розподілена або локально зосереджена з урахуванням кількості електровозів на ділянці, в останньому випадку задається початкове і кінцеве положення електровоза на ділянці і крок переміщення).

Для даної схеми заміщення справедливі наступні системи диференціальних рівнянь, складені за допомогою методу контурних струмів для зовнішніх і внутрішніх контурів восьмиполюсника, який має один поперечний елемент (землю) і базисний вузол (б), а також методу вузлових потенціалів.

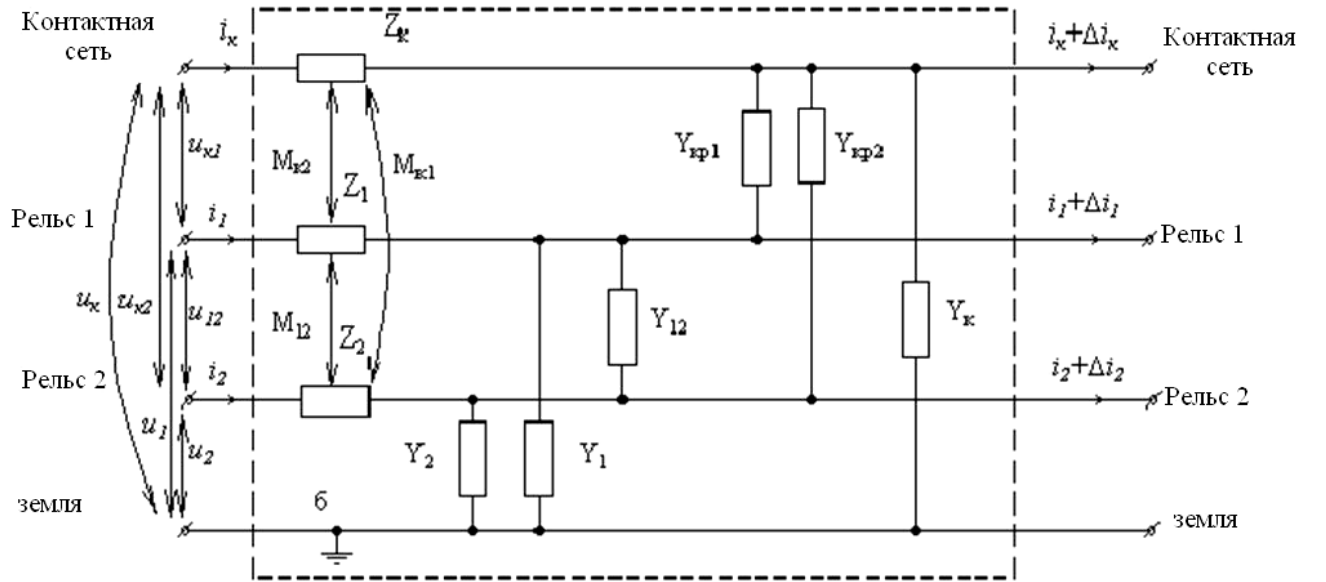


Рис. 2.1. Схема заміщення тягової мережі

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d\dot{U}_к}{dx} = \dot{I}_к \cdot \underline{Z}_к - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{м1к} - \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_{м2к}, \\ -\frac{d\dot{U}_1}{dx} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 - \dot{I}_к \cdot \underline{Z}_{м1к} - \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_{м12}, \\ -\frac{d\dot{U}_2}{dx} = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{м12} - \dot{I}_к \cdot \underline{Z}_{м2к}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d\dot{U}_{12}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_1}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\ -\frac{d\dot{U}_{к1}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_к}{dx} + \frac{d\dot{U}_1}{dx}, \\ -\frac{d\dot{U}_{к2}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_к}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\ -\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_1 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \underline{Y}_{кп1} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_к), \\ -\frac{d\dot{I}_2}{dx} = \underline{Y}_2 \cdot \dot{U}_2 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{кп2} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_к), \\ -\frac{d\dot{I}_к}{dx} = \underline{Y}_к \cdot \dot{U}_к + \underline{Y}_{кп1} \cdot (\dot{U}_к - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{кп2} \cdot (\dot{U}_к - \dot{U}_2), \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_k, \dot{U}_{12}, \dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}$ – комплексні значення падінь напруги на 1 км довжини контурів: рейка 1 – земля, рейка 2 – земля, контактна мережа – земля, рейка 1 – рейка 2, контактна мережа – рейка 1, контактна мережа – рейка 2, відповідно, В; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_k$ – комплексні значення струму на 1 км довжини в контурах рейок 1 – земля, рейка 2 – земля, контактна мережа – земля відповідно, А; $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_k$ – комплекс питомих опорів в тих же контурах відповідно, Ом/км; $\underline{Z}_{m1k}, \underline{Z}_{m2k}, \underline{Z}_{m12}$ – комплекс опорів взаємоіндукції в контурах контактна мережа – рейка 1, контактна мережа – рейка 2, рейка 1 – рейка 2, відповідно, Ом/км; $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_k, \underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{kp1}, \underline{Y}_{kp2}$ – комплекс питомих провідностей для контурів: рейка 1 – земля, рейка 2 – земля, контактна мережа – земля, рейка 1 – рейка 2, контактна мережа – рейка 1, контактна мережа – рейка 2, відповідно, См/км.

Опори контактної мережі $\underline{Z}_k$ і взаємоіндукції між провідниками $\underline{Z}_m$ рівні:

де r, x_g – активний і внутрішній індуктивний опір провідника відповідно, Ом/км; R – еквівалентний радіус провідника, м; D – відстані між центрами провідників, м; ω – кутова частота, рад/с; μ_0, μ – магнітна постійна і відносна магнітна проникність рейкової сталі, Гн/м; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м $\mu = 100$ Гн/м (для струму менше 100А); g_3 – провідність землі, См/м.

Повний опір рейки $\underline{Z}_p = r_p + j \cdot \omega \cdot L_p$ є сумою активної r_p і реактивної x_p складових :

де

L_p – індуктивність рейки, Гн/км; r_{an} – активний опір рейкової нитки довжки 1 км, Ом; r_{ac}, L_{ac} – активний опір і індуктивність одного з'єднувача відповідно, Ом і Гн; L_l, L_{an} – зовнішня (що викликається індуктивним зв'язком між рейками) і внутрішня (обумовлена наявністю магнітного потоку усередині

рейки) індуктивність рейки відповідно, Гн/км і Гн; k – коефіцієнт визначаючий відносну довжину цілої рейкової лінії на 1 км; n – число стиків на 1 км рейкової нитки.

При цьому активний опір рейкової нитки і індуктивність визначається по формулах:

Е

ρ – питомий опір рейкової сталі $\rho = 210 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$; u – периметр поперечного перетину, мм; a – відстані між осями рейок, см; b – радіус бібівалентного провідника, що має довжину кола, рівну периметру рейки, см.

Коефіцієнт, що визначає відносну довжину цілої рейкової лінії на 1 км, рівний

Б

Е

Число стиків, що доводиться на один кілометр рейкової нитки

М

Відстань між точками закріплення з'єднувача, м. Вона приймається рівною 12,5 або 25 м залежно від типу і довжини рейки.

Для спрощення кінцевих математичних виразів були введені допущення про рівність провідностей між контактною підвіскою і рейками, провідностей між рейками і землею, опорів рейок і взаємоіндукції між контактною підвіскою і

п

В

З

а

Е

Е

М

М

п

М

а

М

т

М

$$Z_{ан} = \frac{1}{u} \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu \cdot \rho \cdot \omega \cdot 10^3}$$

$$L = 0,4 \cdot \ln \frac{a-b}{r_{ан}} \cdot 10^{-3}$$

$$I_{ан} = 0,6 \cdot \frac{b}{\omega}$$

$$i_{ан} = \frac{1000 - n \cdot l_c}{1000}$$

При чому коефіцієнти a, b, c, d, m, g, f, h знаходяться окремо для цілих і уявних частин їх складових. Продиференціювавши $\frac{d\dot{U}_1}{dx}, \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \frac{d\dot{U}_k}{dx}$ і підставивши в них значення $\frac{d\dot{I}_1}{dx}, \frac{d\dot{I}_2}{dx}, \frac{d\dot{I}_k}{dx}$, була одержана система лінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

Після приведення системи до нормальної форми Коші і введення характеристичного визначника матриці даної системи, було одержано рівняння вигляду

$$\lambda^6 + \lambda^4 \cdot (-h - d - b) + \lambda^2 \cdot (-b \cdot c + d \cdot b - a \cdot g + h \cdot d + h \cdot b - m \cdot f) - a \cdot c \cdot f - g \cdot m \cdot b = 0 \quad (2.21)$$

Враховуючи (2.21) для дійсних і уявних частин змінних a, b, c, d, m, g, f, h знаходимо пару характеристичного коріння λ_i, λ_j , де i, j – цілі числа.

У результаті рішення системи рівнянь (2.6) для дійсної і уявної частин падінь напруг в рейках і контактній мережі має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{Re} \left[\dot{U}_1 \right] &= \sum_{j=1}^6 C_j^1 \cdot e^{\lambda_j \cdot x} \\ \text{Im} \left[\dot{U}_1 \right] &= \sum_{i=1}^6 A_i^1 \cdot e^{\lambda_i \cdot x} \\ \text{Re} \left[\dot{U}_2 \right] &= \sum_{j=1}^6 C_j^2 \cdot e^{\lambda_j \cdot x} \\ \text{Im} \left[\dot{U}_2 \right] &= \sum_{i=1}^6 A_i^2 \cdot e^{\lambda_i \cdot x} \\ \text{Re} \left[\dot{U}_k \right] &= \sum_{j=1}^6 C_j^k \cdot e^{\lambda_j \cdot x} \\ \text{Im} \left[\dot{U}_k \right] &= \sum_{i=1}^6 A_i^k \cdot e^{\lambda_i \cdot x} \end{aligned}$$

де $G_i^k, C_j^k, A_i^k, A_j^k, A_i^2$ – постійні інтеграції. Вони визначаються при розгляді конкретних схем заміщення, які відображають різні режими роботи тягової мережі.

Д

Л

я

$$\dot{U}_j = \text{Re} \left[\dot{U}_j \right] + \text{Im} \left[\dot{U}_j \right] \cdot i$$

$$\operatorname{Re}\left[\dot{U}_j\right]=i \cdot \sin(p \cdot x) \cdot\left(C_1^q-C_2^q\right)+e^{\alpha \cdot x} \cdot \cos(\beta \cdot x) \cdot\left(C_3^q-C_4^q+C_5^q-C_6^q\right)+$$

$$+i \cdot e^{\alpha \cdot x} \cdot \sin(\beta \cdot x) \cdot\left(C_3^q-C_4^q+C_5^q-C_6^q\right)+e^{\alpha_1 \cdot x} \cdot \cos(\beta_1 \cdot x) \cdot\left(A_3^q-A_4^q+A_5^q-A_6^q\right)+$$

де: $q=1, 2, k$ і означає вид визначуваної напруги (в рейках або контактній мережі).

По відомих $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_k$ з систем (2.2) і (2.1) були визначені закони

Таким чином, на основі уточненої схеми заміщення тягової мережі були одержані математичні залежності падінь напруг для контурів рейка 1 – земля, рейка 2 – земля, контактна мережа – земля, рейка 1 – рейка 2, контактна мережа – рейка 1, контактна мережа – рейка 2 і струмів в рейках і контактній мережі від координати в часі для аналізу електромагнітних процесів в контактній і рейковій мережі. Одержані математичні вирази дозволяють достатньо повно оцінити вплив різних джерел – завад і зовнішніх чинників – на роботу РК. Тягова мережа при моделюванні може прийматися як однорідною, так і неоднорідною.

При оцінці взаємодії тягових мереж багатоколійних ділянок і ліній подовжнього електропостачання з суміжними слабкострумовими пристроями автоматики восьмиполіусник перетворюється в $2n$ – поліусник. Порядок рішення системи рівнянь, відповідної складеному $2n$ – поліуснику, залишається таким же.

Моделювання розподілу падінь напруги і струму по довжині фідерної зони

Розрахунки, які проводяться для ділянок з локально зосередженим навантаженням, дозволяють набути значення напруги і струму в рейках для певного моменту часу. В загальному випадку напруга і струм зменшуються у міру видалення від локомотива, а їх зміна носить експоненціальний характер. Для

визначення середньої величини струму на ділянці за певний період часу необхідно застосовувати метод накладення, який дозволить одержати результуючу діаграму шляхом алгебраїчного підсумовування ординат окремих діаграм.

При розрахунках тягових мереж і визначенні впливу їх на рейкові кола, перш за все, представляють інтерес середні за часом величини, тому зосереджені навантаження замінюють рівномірно розподіленою.

Нижче представлені результати моделювання розподілу падінь напруги і струму по довжині фідерної зони завади частотою 50 Гц. Для моделювання була вибрана саме ця частота, оскільки вона відповідає частоті кодового струму, що посиляється в рейки при електротязі постійного струму.

Вихідними даними для розрахунку є:

r

p

$\Omega\text{м/км}$ - питомий поперевжний опір однорідної рейкової мережі одноколійної ділянки;

$R_2 \Omega\text{м} \cdot \text{км},$

$R_1 \Omega\text{м} \cdot \text{км},$

$r_0 = 0,5 \Omega\text{м/км}$ - питомий поперевжний опір від рейок до землі однорідної рейкової мережі з постійною відстанню;

l

s

км – поперевжний станції

Розподіл струмів і потенціалів в неоднорідних рейкових мережах.
Неоднорідність рейкових мереж в реальних умовах в основному обумовлена наявністю залізничних станцій з розгалуженими станційними коліями. В зв'язку з цим для визначення струмів і потенціалів на окремих ділянках неоднорідної рейкової мережі (з урахуванням станцій) необхідно скласти і вирішити систему рівнянь для цих ділянок.

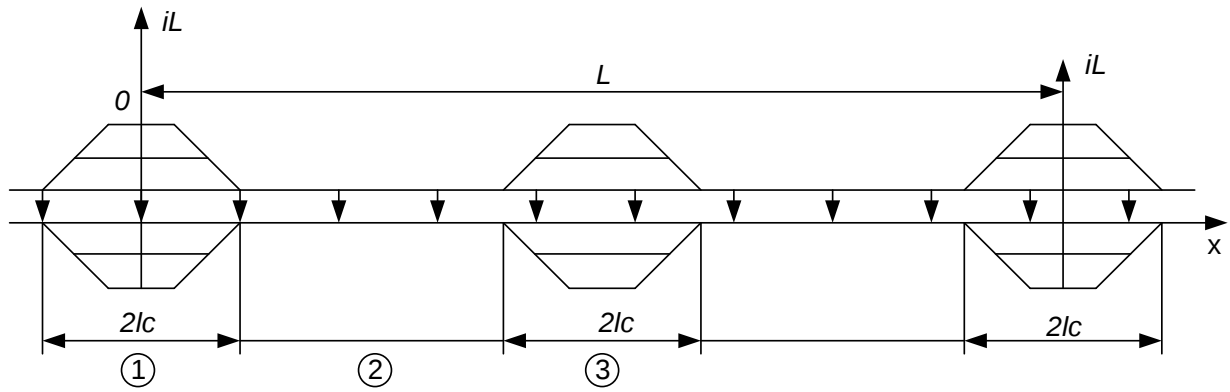


Рис. 2.2. Ділянка з неоднорідною рейковою мережею

$$\varphi_{p1} = A_1 \cdot e^{k_1 x} + B_1 \cdot e^{-k_1 x} + i \cdot r_{n1}$$

$$I_{p1} = -\frac{1}{Z_{e1}} (A_1 \cdot e^{k_1 x} - B_1 \cdot e^{-k_1 x})$$

$$\varphi_{p2} = A_2 \cdot e^{k_2 x} + B_2 \cdot e^{-k_2 x} + i \cdot r_{n2}$$

$$I_{p2} = -\frac{1}{Z_{e2}} (A_2 \cdot e^{k_2 x} - B_2 \cdot e^{-k_2 x})$$

$$\varphi_{p3} = A_3 \cdot e^{k_3 x} + B_3 \cdot e^{-k_3 x} + i \cdot r_{n3}$$

$$I_{p3} = -\frac{1}{Z_{e3}} (A_3 \cdot e^{k_3 x} - B_3 \cdot e^{-k_3 x})$$

Д

$\varphi_{p1}, \varphi_{p2}, \varphi_{p3}$ - потенціал неоднорідної рейкової мережі відповідно 1, 2 та 3-ї

зони, I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}

струм в неоднорідній рейковій мережі відповідно 1, 2 та 3-ї зони, А;

$k_1 = k_2 = k_3 = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}$ - коефіцієнт розповсюдження однорідної рейкової мережі відповідно 1, 2 та 3-ї зони;

i - питоме навантаження, А/км;

r_p - питомий повздовжній опір однорідної рейкової мережі одноколійної ділянки, Ом/км ;

r

n

r

$$Z_{e2} = Z_B = \sqrt{r_p \cdot r_n}$$

M - питомий поперечний опір однорідної рейкової мережі одноколійної ділянки, Ом·км;

$$Z_{B1} = Z_{B3} = \frac{M}{n}$$

E n

Кількість паралельно з'єднаних колій на станції;

E

$A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3$ – постійні коефіцієнти;

x

– Для визначення постійних коефіцієнтів A_i, B_i необхідно задати граничними умовами:

о

$$E_x = l_c$$

$$I_{p1} = I_{p2}$$

$$\varphi_{p1} = \varphi_{p2}$$

$$I_{p2} = I_{p3}$$

$$\varphi_{p2} = \varphi_{p3}$$

l_c – довжина міжстанційної зони, км;

l_c – половина довжини станції, км.

q Розрахунок ведемо методом рівномірно розподіленого навантаження.

а Підставивши граничні умови в рівняння (2.31) – (2.36), отримаємо систему рівнянь яку запишемо в матричному виді в табл. 2.1

д

й

Таблиця 2.1

x	A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B_3	C
а	1	-1	0	0	0	0	$m \cdot i \cdot \frac{L}{2 \cdot n}$
г	$m \cdot e^{k \cdot l_c}$	$-m \cdot e^{-k \cdot l_c}$	$-\frac{m}{n} \cdot e^{-k \cdot l_c}$	$\frac{m}{n} \cdot e^{-k \cdot l_c}$	0	0	0
в	$e^{k \cdot l_c}$	$e^{-k \cdot l_c}$	$-e^{k \cdot l_c}$	$-e^{-k \cdot l_c}$	0	0	$i \cdot (r_n - \frac{r_n}{n})$
к	0	0	$\frac{m}{n} \cdot e^{k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$-\frac{m}{n} \cdot e^{-k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$-\frac{m}{n} \cdot e^{k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$\frac{m}{n} \cdot e^{-k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	0
м	0	0	$e^{k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$e^{-k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$-e^{k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$-e^{-k \cdot (\frac{L}{2} - l_c)}$	$i \cdot (\frac{r_n}{n} - r_n)$
б	0	0	0	0	$e^{k \cdot \frac{L}{2}}$	$-e^{-k \cdot \frac{L}{2}}$	0

д

Підставивши в таблицю 2.1 початкові умови, отримаємо:

е

Таблиця 2.2

қ

и

A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B_3	C

Вирішивши систему лінійних рівнянь (див. табл. 2.1) отримаємо постійні

к

о А

е В

ф А

і В

ц А

і В

є Отримані коефіцієнти підставляємо в рівняння (2.31) – (2.36) і з інтервалом
н 1 км знаходимо струми та потенціали неоднорідної рейкової мережі. Результати
розрахунків заносимо до табл.2.3

и

Таблиця 2.3

$x, \text{ км}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varphi_p, \text{ В}$	-0.45	-0.42	-0.23	-0.08	0.01	0.15	0.23	0.24	0.318	0.332	0.333
$I_p, \text{ А}$	-9.99	-7.7	-6.63	-5.55	-4.54	-3.59	-2.69	-1.82	-0.97	-0.25	-0.24

1

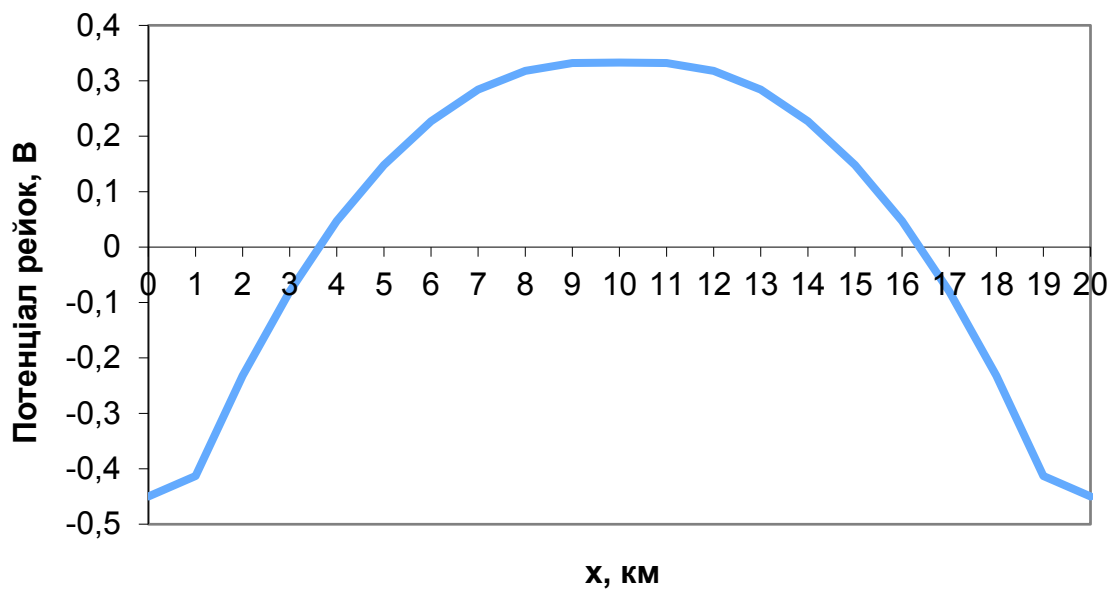


Рис. 2.3 Потенціал рейок неоднорідної рейкової мережі

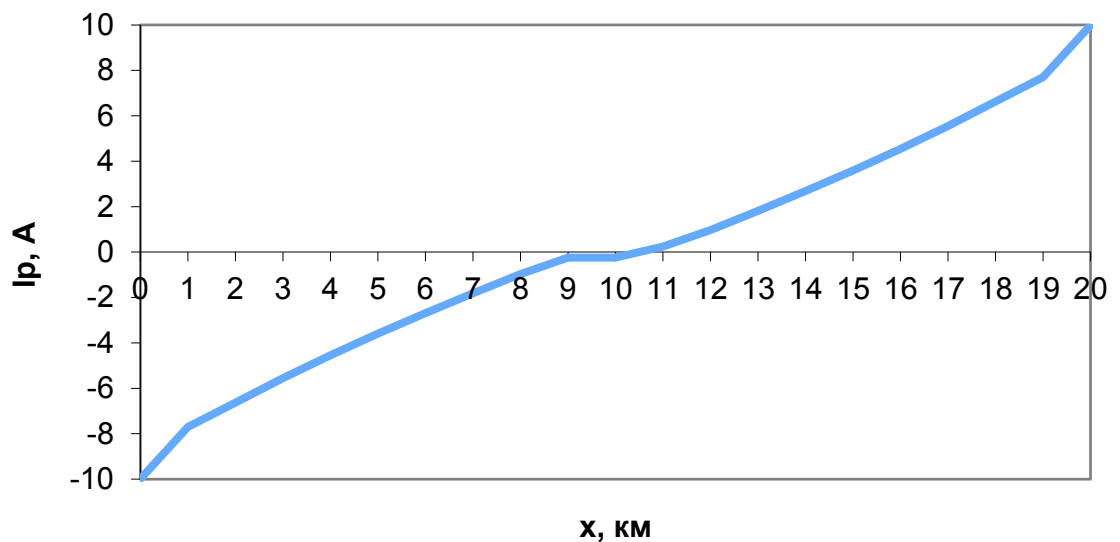


Рис. 2.4 Струм в рейках неоднорідної рейкової мережі

Розподіл блукаючого струму в землі (з урахуванням станції)

Тяговий струм, що протікає по землі, одержав назву блукаючого струму. Потрапляючи в підземельні металеві споруди, блукаючий струм викликає їх інтенсивне електрохімічне руйнування. В зв'язку з цим для оцінки корозійного стану підземних металевих споруд необхідно визначити картину розподілу блукаючого струму. Для представленої на рис.2.2 розрахункової схеми:

де I_{px} - струм в неоднорідній рейковій мережі, А (див. табл. 2.3);

$$I_{кх} = i \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)$$

- с

Результати розрахунків $I_{кх}$ та I_{px} заносимо до табл. 2.4

р

х

у

Таблица 2.4

Х	М			
Г	0	1	2	3
К	В			
ПМ				
ОІ	К			
Г _к	О			
О,	Н			
ЧД	Т			
НІ	а			
а _б	к	-1.3	-1.37	-1.4
,	т			
КД	н			

о

і

о

с

р

д

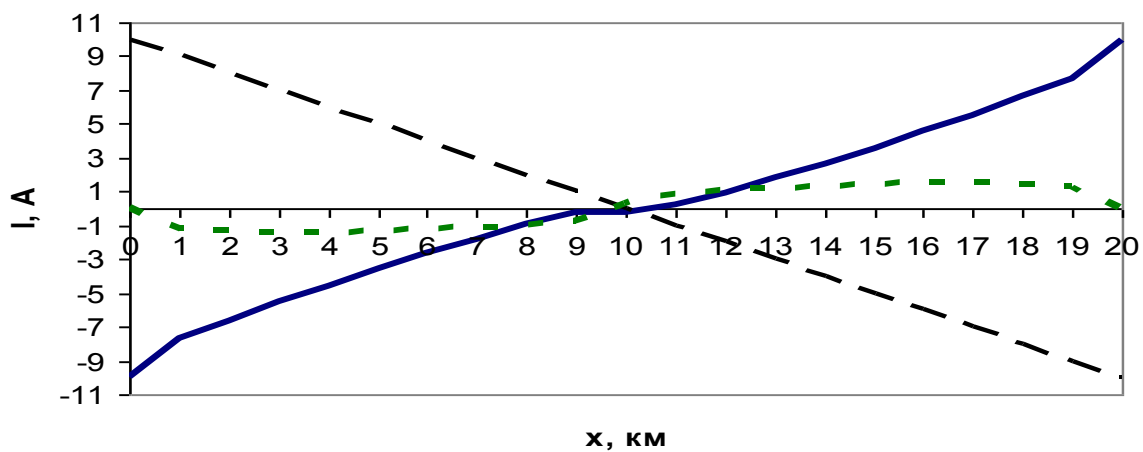
и

н

а

т

а



($0 \leq x$

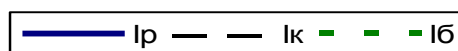


рис.2.5 Розподіл струмів частотою 50 Гц в неоднорідній рейковій мережі по довжині живлячої ділянки.

Наявність станційного розвитку приводить до локального збільшення витоку тягових струмів з бокових колій станції, що мають знижений перехідний опір від рейок до землі, що приводить до різкого збільшення блукаючого струму в зоні залізничних станцій.

Розподіл струмів та потенціалів в однорідних рейкових мережах

Корозійний стан підземної металевої споруди визначається середніми значеннями параметрів (густина поляризуючого струму, потенціал підземної металевої споруди і т.д.). В зв'язку з цим необхідно знати середні значення струмів і потенціалів рейкових мереж, які зручніше за все визначати по методу рівномірно розподіленого навантаження.

Потенціал однорідної рейкової мережі (без урахування станції) (рис.2.7) визначається по формулі

$$\varphi_{px}^* = i \cdot (r_n - m \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{ch(k \cdot (\frac{L}{2} - x))}{sh(k \cdot \frac{L}{2})})$$

де

$$\varphi_{px}^*$$

Струм однорідної рейкової мережі визначається по формулі
потенціал однорідної рейкової мережі, В;

$$I_{px}^* = -i \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{sh(k \cdot (\frac{L}{2} - x))}{sh(k \cdot \frac{L}{2})}$$

де I_{px}^* - струм однорідної рейкової мережі, А.

О

Блукаючий струм визначаємо за формулою

Т

$$I_{\delta x}^* = -(I_{\kappa x} + I_{px}^*)$$

О

I_{κ} і I_{px} підставляються з урахуванням знаку),

Ч

де I_{κ} - струм контактної мережі, А (див. табл. 3);

Н

I_{px} - блукаючий струм без урахування розвитку станції.

а

К

О

,												
A												
I												
y												
3												
,												
A												

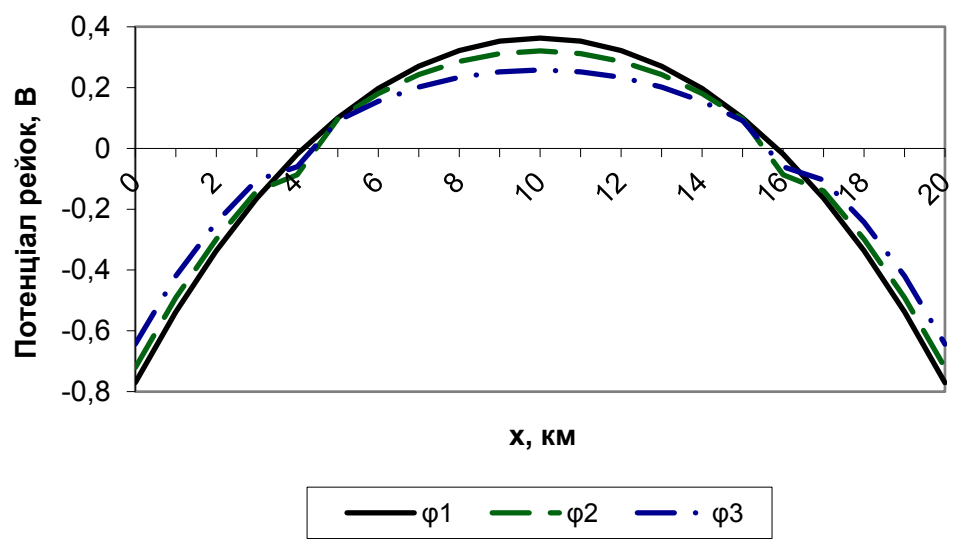


Рис.2.8 Розподіл потенціалу рейок від гармоніки 50 Гц по довжині фідерної зони

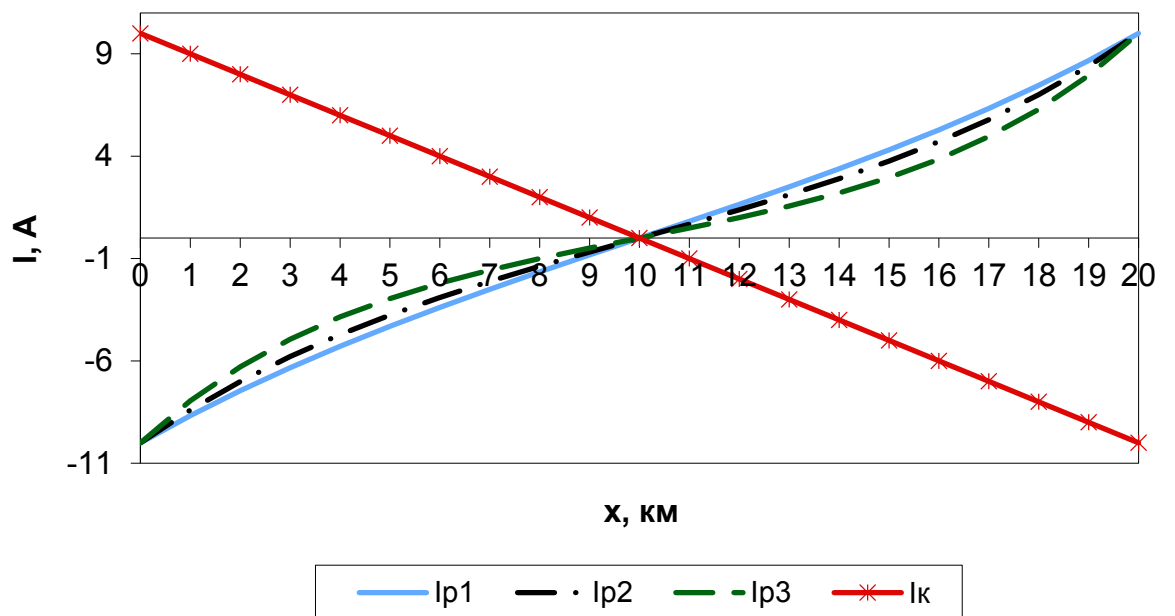


Рис.2.9 Розподіл струму від гармоніки 50 Гц в контактній та рейковій мережі по довжині фідерної зони

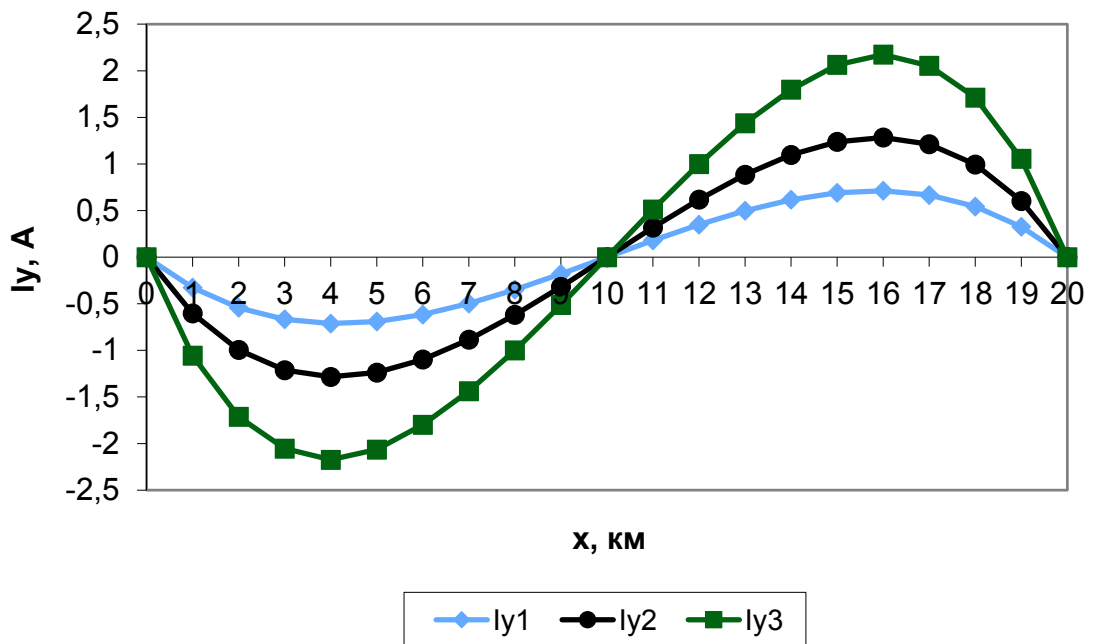


Рис.2.10 Розподіл струму витоку через баласт по довжині фідерної зони

. Висновки за розділом

Більшість математичних моделей не враховують або 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.

З розрахованих даних видно, що при рівномірно розподіленому навантаженні по довжині фідерної зони місце струморозділу живлення ділянки тяговими підстанціями знаходиться в середині фідерної зони. Найбільше значення амплітуди перешкоди спостерігається в рейкових ланцюгах тих, що примикають до тягових підстанцій. Струми витоку є максимальними в середині ділянки «тягова підстанція - місце струморозділу». Отже, знаючи довжину

рейкового кола в межах даної фідерної зони, ми зможемо оцінити ступінь впливу перешкоди на сигнальний струм кодової частоти.

Коли рейкова мережа є неоднорідною із-за наявності станцій на живлячій ділянці, розташованих по його краях, то криві розподіли струму в рейках і витоку міняють свою форму. В результаті під небезпечною дією струму гармоніки частотою 50 Гц виявлятиметься більше число рейкових ланцюгів. Найбільшому впливу перешкод піддаватимуться станційні рейкові ланцюги, оскільки вони розташовані по краях фідерної зони. 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 і неоднорідних ділянках тягової мережі з двостороннім живленням з великою пропускнуою спроможністю в період їх інтенсивного завантаження не перевищувала $\pm 10\%$.

3. Експериментальне дослідження рівнів та спектрального складу зворотнього тягового струму

3.1. Розробка алгоритму спектрального аналізу струму

Для оцінки гармонійного спектру струму в рейках, тобто визначення частот гармонійних складових сигналу, амплітуд цих гармонійних складових і їх початкових фаз була використана теорія Фур'є про можливість розкладення будь-якого процесу з періодом $T = \frac{1}{f}$ (де f - частота, Гц) в нескінченну, але рахункову суму окремих гармонійних складових.

У результаті досліджуваний сигнал, який є періодичним процесом, представляється у вигляді комплексного ряду Фур'є

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X^*(m) \cdot e^{j \cdot (2\pi f \cdot m \cdot t)}, \quad (3.1)$$

де $X^*(m)$ - комплексні значення гармонійних складових, m - номер гармонійної складової.

Таким чином, спектр періодичного коливання складається з частот, кратних частоті основної гармоніки $m \cdot f$. В нашому випадку частота основної гармоніки $f = 50$ Гц – частоті живлячої мережі.

Комплексне значення гармонійної складової:

$$X^*(m) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi m f \cdot t} dt = \frac{A_m}{2} \cdot e^{j \cdot \varphi_m}, \quad (3.2)$$

де A_m - амплітуда гармонійної складової частотою

φ_m - початкова фаза цієї гармоніки, що має форму косинусоїди.

Отже, весь початковий процес характеризується виразом

$$x(t) = A_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} A_m \cdot \cos(2\pi f \cdot m \cdot t + \varphi_m), \quad (3.3)$$

де A_0 - постійна складова. [6].

Для дослідження неперіодичних процесів було використано поняття прямого перетворення Фур'є - зображення:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi f t} dt. \quad (3.4)$$

Заміна процедури інтеграції підсумовуванням дає можливість застосовувати пряме перетворення Фур'є - зображення як для стаціонарних, так і довільних коливань. При цьому безперервний інтеграл замінюється сумою площ прямокутників, одна із сторін яких рівна дискретну за часом Δt , а друга миттєвому значенню процесу у відповідний момент часу. Безперервний час був замінений його дискретним значенням $(m-1) \cdot \Delta t$, де m - номер точки від початку процесу, а диференціал dt замінюється обмеженим приростом часу Δt . Безперервне значення частоти f замінюється дискретними значеннями $(k-1) \cdot \Delta f$, де k - номер значення частоти, $\Delta f = \frac{1}{T}$ - дискрет частоти, а T - проміжок часу, на якому задано процес.

У результаті пряме перетворення Фур'є обчислюється по формулі:

$$y(k) = \sum_{m=1}^n x(m) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot (m-1) \cdot (k-1) / n}, \quad (3.5)$$

де n - число точок в яких задано процес.

Для дослідження сигналу, знятого з локомотивних катушок, був розроблений алгоритм, представлений на рис. 3.1.

Оцифрований сигнал піддавався прямому швидкому перетворенню Фур'є.

Проте fft-процедура видає результат в частотному діапазоні від $-\frac{F_{\max}}{2}$ до

$\frac{F_{\max}}{2}$, тому потрібне вживання спеціального алгоритму для перебудови вектора частот і заміни місцями першої і другої половини вектора, одержаного в результаті перетворення Фур'є. Для цього, а також для побудови графіків

обчислювалися такі проміжні параметри, як розмір вектора оцифрованих даних дискрет часу dT і частоти, які визначаються з умов $dT = \frac{1}{F_{\max}}$ і $dF = \frac{1}{T}$, де $F_{\max}$ - максимальний діапазон частот, Гц, і T - тривалість процесу, с.

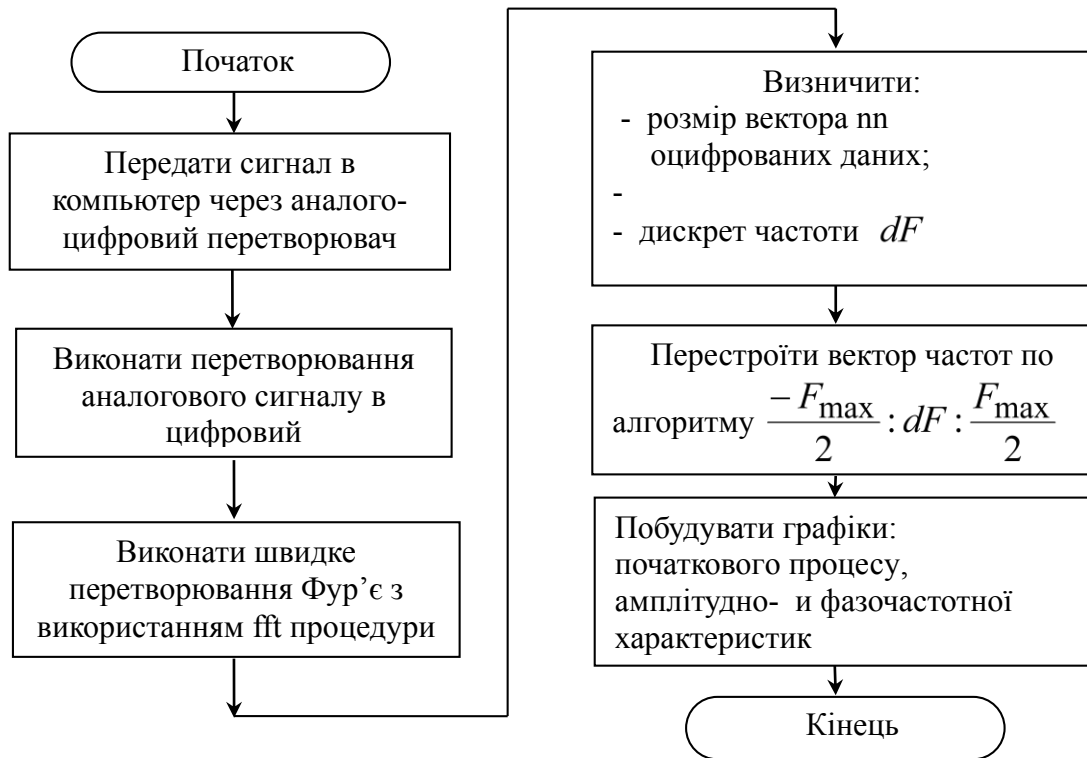


Рис. 3.1. Спрощений алгоритм дослідження амплітудно- і фазочастотної характеристик сигналу

3.2. Експериментальне дослідження джерел завад в рейковій лінії

На підставі експериментальних даних зафіксований спектр таких частот в рейкових ланцюгах при електротязі постійного струму 50, 75, 100, 150 Гц. Найбільш небезпечною серед згаданих вище є частота 50 Гц, оскільки вона збігається з кодовою несучою частотою.

Експериментальні дані, одержані при дослідженні перегону Дніпропетровськ – Нижньодніпровськ-Вузол з електротягою постійного струму, приведені на рис.3.2.

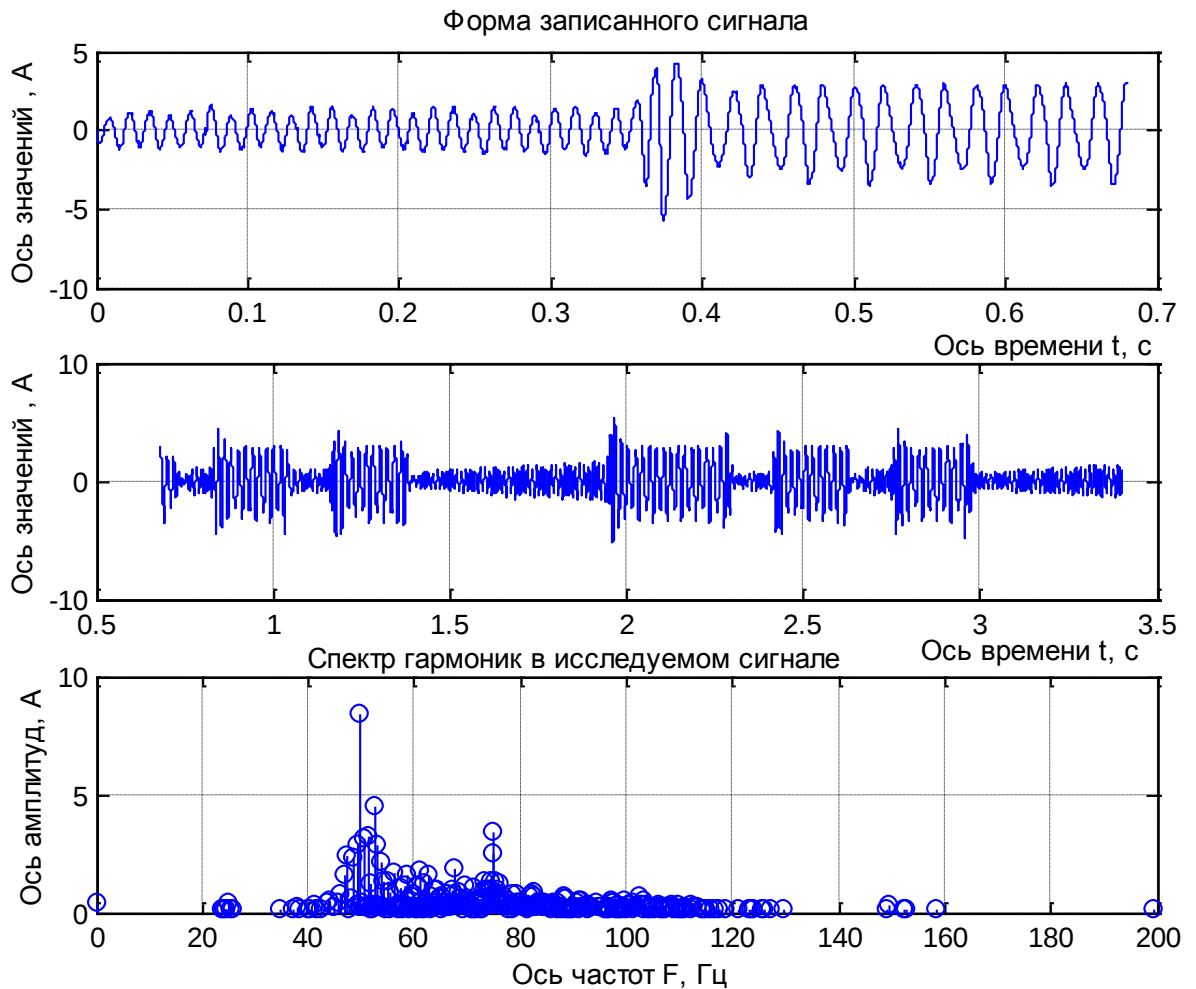


Рис. 3.2. Сигнал, записаний з котушок локомотивної сигналізації тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму

Сигнал записаний з однієї локомотивної котушки і є сумою кодового і тягового струму. Спектральний аналіз сигналу, записаного в паузі коду «3» показав присутність гармонік частотою 50 і 75 Гц. Причому завада частотою 50 Гц в паузі коду досягала значної величини (до 50% від корисного сигналу). Решта гармонік була відсутня.

Існують наступні причини виникнення завади частотою 50 Гц:

- вірогідна неоднаковість електричних силових кіл перетворювачів тягових підстанцій. Звідси витікає неоднаковість параметрів схем заміщення на інтервалах роботи фаз живлячої напруги, яка одержала назву “параметричної

несиметрії силових кіл перетворювача”. Це ж торкається і інверторних агрегатів;

- присутність гармоніки 50 Гц обумовлена несиметрією живлячої напруги;

- в процесі роботи регуляторів пуску тягових двигунів (більше 30 с) в сигнальних каналах безперервно протікають струми завад частотою 25...375 Гц, до складу яких також входить гармоніка 50 Гц;

- опір ізоляції рейкової лінії є далеко не ідеальним, тому в рейкових колах можуть бути присутні струми витоку з сусідніх РК при багатоколійних ділянках або на станціях;

- вживання одно- і дволанкових фільтрів не завжди сприяє придушенню всього спектру гармонік, а у ряді випадків приводить до посилення деяких з них, особливо 50 Гц [10].

Оскільки гармоніка 50 Гц спостерігалася в межах не одного РК, то можна зробити висновок, що дана завада міститься в тяговому струмі. Середнє значення її амплітуди в розділовій паузі коду «З» склало близько 50 % від мінімального значення корисного сигналу при якому колійне реле може встати під струм. Таке значення завади є вельми критичним, оскільки амплітуда кодового сигналу повинна бути не менше 2 А для рейкових кіл перегонів з електротягою постійного струму.

При проходженні локомотива по ділянці Дніпропетровськ – Нижньодніпровськ Вузол з електротягою постійного струму поблизу тягової підстанції, коли як датчик була використана локомотивна котушка тепловоза, було зафіксовано присутність гармонік частотою 600, 1200, 1800 і 2400 Гц в зворотному тяговому струмі в паузі коду «З». Відхилення в параметрах кодів знайдені не були.

Причиною виникнення завад даної частоти є робота дванадцятипульсового перетворювача, встановленого на даній тяговій підстанції, і несправність згладжуючого фільтру. Завади даної частоти на роботу

рейкових кіл не впливають. Осцилограми і спектр кодового і тягового струму в рейках, записаний на даній залізничній ділянці приведені на рис. 3.3.

При електротязі змінного струму на електровозах використовуються двигуни постійного струму з послідовним збудженням, як і на електровозах постійного струму. Таким чином, в зворотному тяговому струмі буде присутній спектр завад 25...375 Гц, обумовлений роботою щітково-колекторного механізму.

Для дослідження була узята ділянка з електротягою змінного струму, де використовуються кодові рейкові кола частотою 25 Гц. Спектральний склад зворотного тягового струму визначається якістю первинної напруги і роботою тиристорного перетворювача локомотива. Для аналізу використовувався сигнал, записаний з однієї котушки АЛС і є сумою кодового і зворотного тягового струмів.

Спектральний аналіз зворотнього тягового струму показав присутність гармонік частотою 25, 75, 105, 155, 255, 360, 465.3750, 5200 і 6200 Гц. Рівень завади, співпадаючої по частоті з кодовою несучою частотою 25 Гц, в паузі коду виявився значним. Було знайдено, що він може досягати 50 % від величини корисного сигналу. Осцилограма і спектр струму в рейках представлені на рис. 3.4, 3.5.

Таким чином, спектральний аналіз зворотнього тягового струму дозволяє не тільки виявити небезпечні з погляду нормального функціонування пристроїв автоматики гармоніки, але і несправності в роботі різних елементів системи тягового електропостачання (тягових двигунів, тиристорних перетворювачів локомотивів, устаткування тягових підстанцій постійного струму – випрямлячів або фільтрів і ін.).

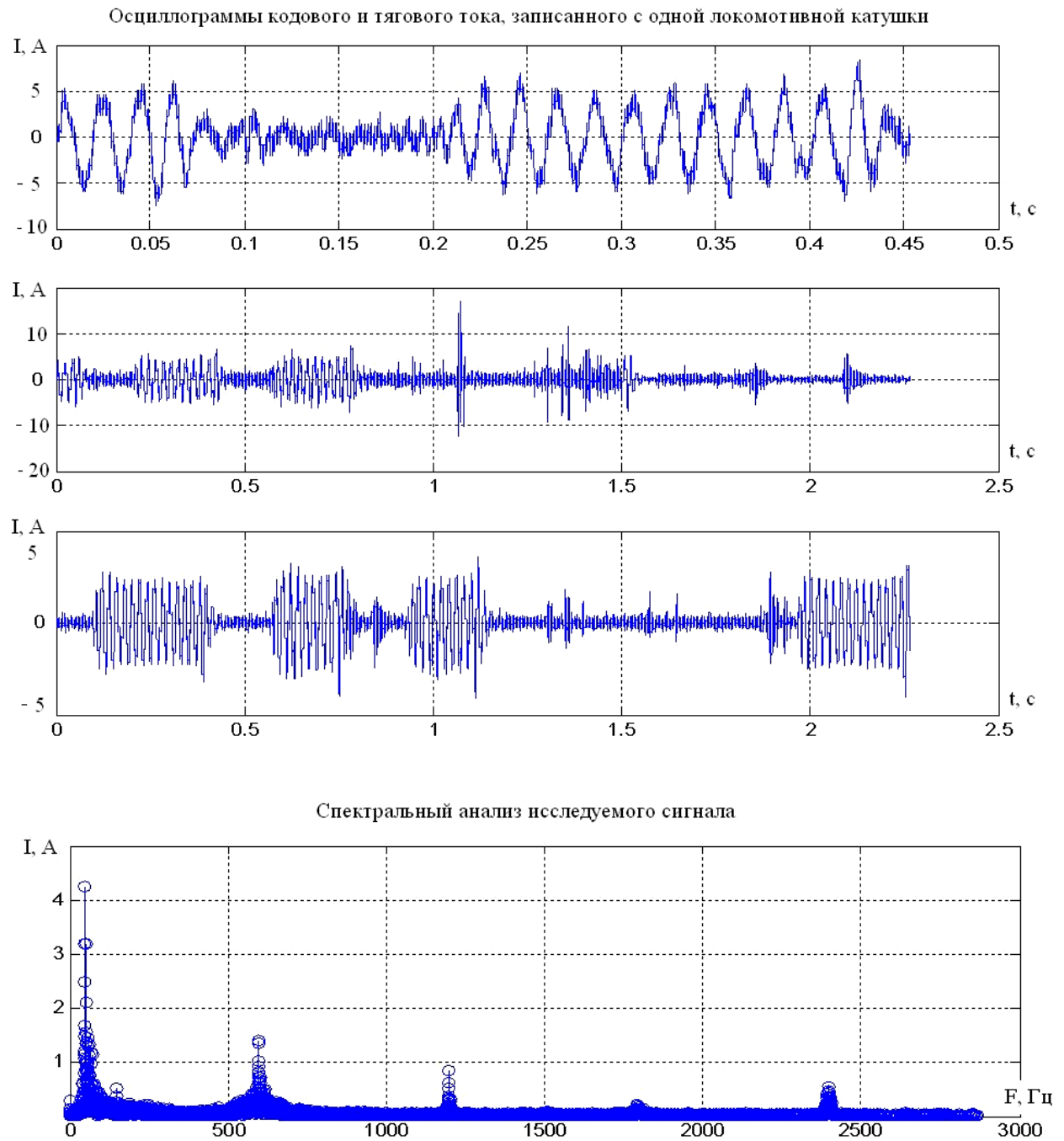


Рис. 3.3. Осцилограми і спектр тягового і кодового струму в рейках, записаного з однієї приймальної котушки тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму в районі тягової підстанції

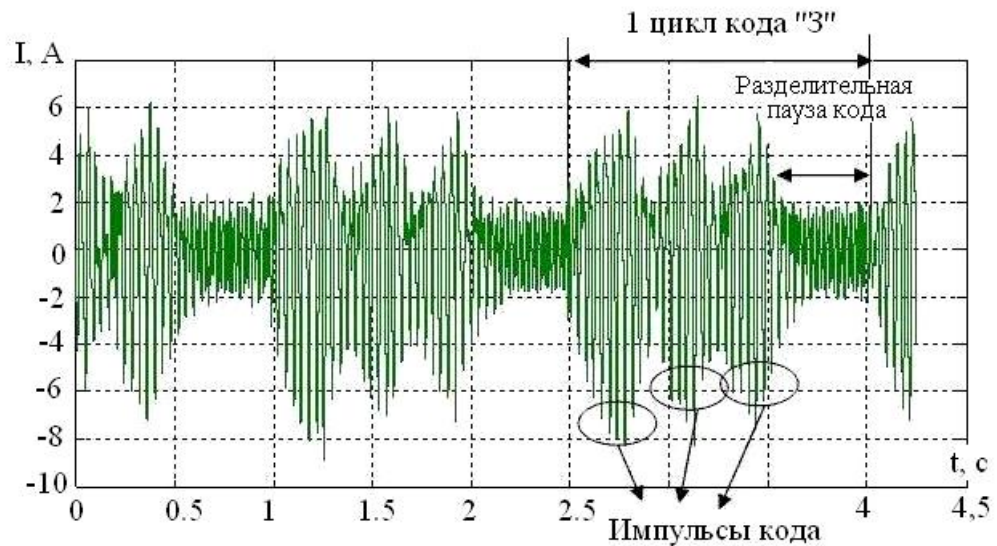


Рис. 3.4. Кодовий струм частотою 25 Гц після фільтрації



Рис. 3.5. Спектральний склад зворотного тягового струму при електротязі змінного струму

3.3. Висновки за розділом

Для оцінки гармонійного спектру струму в рейках, тобто визначення частот гармонійних складових сигналу, амплітуд цих гармонійних складових і їх початкових фаз була використана теорема Фур'є.

На підставі експериментальних даних, які були одержані при дослідженні перегону Дніпропетровськ – Нижньодніпровськ-Вузол з електротягою постійного струму, зафіксований спектр таких частот в рейкових ланцюгах при

електротязі постійного струму 50, 75, 100, 150 Гц. Найбільш небезпечною серед згаданих вище є частота 50 Гц, оскільки вона збігається з кодовою несучою частотою. Оскільки гармоніка 50 Гц спостерігалася в межах не одного РК, то можна зробити висновок, що дана завада міститься в тяговому струмі. Середнє значення її амплітуди в розділовій паузі коду «З» склало близько 50 % від мінімального значення корисного сигналу при якому колійне реле може встати під струм. Таке значення завади є вельми критичним, оскільки амплітуда кодового сигналу повинна бути не менше 2 А для рейкових кіл перегонів з електротягою постійного струму.

Також для дослідження була узята ділянка з електротягою змінного струму, де використовуються кодові рейкові кола частотою 25 Гц. Спектральний аналіз зворотнього тягового струму показав присутність гармонік частотою 25, 75, 105, 155, 255, 360, 465.3750, 5200 і 6200 Гц. Рівень завади, співпадаючої по частоті з кодовою несучою частотою 25 Гц, в паузі коду виявився значним.

Спектральний аналіз зворотнього тягового струму дозволяє не тільки виявити небезпечні з погляду нормального функціонування пристроїв автоматики гармоніки, але і несправності в роботі різних елементів системи тягового електропостачання.

4. Дослідження імовірності розподілу гармонік тягового струму

4.1. Числові характеристики безперервних випадкових величин

Розповсюдимо визначення числових характеристик дискретних величин на величини безперервні. Почнемо з математичного очікування.

Нехай безперервна випадкова величина X задана щільністю розподілу $f(x)$. Припустимо, що всі можливі значення X належать відрізку $[a, b]$. Розіб'ємо цей відрізок на n часткових відрізків довжиною $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ і виберемо в кожному з них довільну точку x_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Нам треба визначити математичне очікування безперервної величини по аналогії з дискретною; складемо суму добутків можливих значень x_i на ймовірності попадання їх в інтервал Δx_i (нагадаємо, що добуток $f(x) \Delta x$ приблизно дорівнює вірогідності попадання X в інтервал Δx):

Перейшовши до межі при прагненні до нуля довжини найбільшого з

ч

Математичним очікуванням безперервної випадкової величини X , можливі значення якої належать відрізку $[a, b]$, називають певний інтеграл

Якщо можливі значення належать всій осі Ox , то

П

е

По аналогії з дисперсією дискретної величини визначається і дисперсія безперервної величини.

Дисперсією безперервної випадкової величини називають математичне очікування квадрату її відхилення.

а Якщо можливі значення X належать відрізку $[a, b]$, то

якщо можливі значення належать всій осі x , то

Е

М

В

Середнє квадратичне відхилення безперервної випадкової величини визначається, як і для величини дискретної, рівністю

Можна довести, що властивості математичного очікування і дисперсії дискретних величин зберігаються і для безперервних величин.

М Легко отримати для обчислення дисперсії зручніші формули:

Нормальний закон розподілу імовірностей. Нормальним називають розподіл імовірності безперервної випадкової величини, який описується формулою

Ми бачимо, що нормальний розподіл визначається двома параметрами: a и σ . Достатньо знати ці параметри, щоб задати нормальний розподіл. Покажемо, що імовірнісний сенс цих параметрів такий: a є математичне очікування, σ — середнє квадратичне відхилення нормального розподілу.

а) За визначенням математичного очікування безперервної випадкової величини,

Введемо нову змінну $z=(x-a)/\sigma$. Звідси $x=\sigma z+a$, $dx=\sigma dz$. Взявши до уваги, що нові межі інтеграції рівні старим, отримаємо

Перше з доданків дорівнює нулю (під знаком інтеграла непарна функція; межі інтеграції симетричні відносно початку координат). Другий з доданків

Отже, $M(X) = a$, тобто математичне очікування нормального розподілу дорівнює параметру a .

б) За визначенням дисперсії безперервної випадкової величини, враховуючи, що $M(X) = a$, маємо

Введемо нову змінну $z = (x-a)/\sigma$. Звідси $x - a = \sigma z$, $dx = \sigma dz$. Взявши до уваги, що нові межі інтеграції рівні старим, отримаємо

I

Отже,

Отже, середнє квадратичне відхилення нормального розподілу дорівнює параметру σ .

Загальним називають нормальний розподіл з довільними параметрами a і σ

В

Нормованим називають нормальний розподіл з параметрами $a = 0$ и $\sigma = 1$. Наприклад, якщо X - нормальна величина з параметрами a і σ , то $U=(X - a)/\sigma$ -

н

Щільність нормованого розподілу

Функція $F(x)$ загального нормального розподілу

а функція нормованого розподілу

Функція $F_0(x)$ табульована. Легко перевірити, що

Ймовірність попадання нормованої нормальної величини X в інтервал $(0, x)$

Враховуючи, що $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = 1$, і, отже, через симетрію $\varphi(x)$ щодо нуля

$\int_{-\infty}^0 \varphi(x) dx = 0,5$, а значить, і $P(-\infty < X < 0) = 0,5$,

легко отримати, що

F

x

)

Дійсно,

Графік щільності нормального розподілу називають нормальною кривою (кривою Гауса).

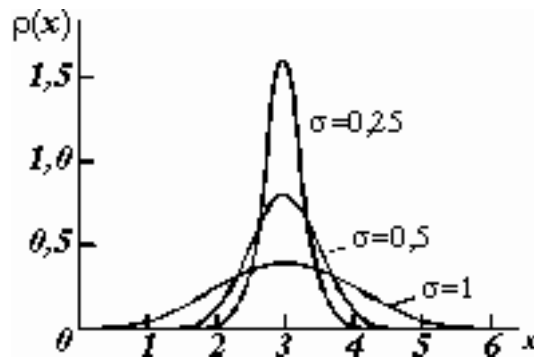


Рис. 4.1. Графік щільності нормального розподілу називають нормальною кривою (кривою Гауса).

Перевірка гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності. Критерій згоди Пірсона.

Якщо закон розподілу невідомий, але є підстави припустити, що він має певний вигляд (назвемо його A), то перевіряють нульову гіпотезу: генеральна сукупність розподілена згідно з законом A .

Перевірка гіпотези про передбачуваний закон невідомого розподілу проводиться так само, як і перевірка гіпотези про параметри розподілу, тобто за допомогою спеціальної підібраної випадкової величини - критерію згоди.

Критерієм згоди називають критерій перевірки гіпотези про передбачуваний закон невідомого розподілу.

Є декілька критеріїв згоди: χ^2 («хі квадрат») К. Пірсона, Колмогорова, Смірнова і ін. Обмежимося описом застосування критерія Пірсона до перевірки гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності (критерій аналогічно застосовується і для інших розподілів, в цьому полягає його гідність). З цією метою порівнюватимемо емпіричні (спостережувані) і теоретичні (обчислені в припущенні нормального розподілу) частоти.

Чи випадкова розбіжність частот? Можливо, що розбіжність випадкова (незначна) і пояснюється або малим числом спостережень, або способом їх угруповання, або іншими причинами. Можливо, що розбіжність частот не випадкова (значна) і пояснюється тим, що теоретичні частоти обчислені виходячи з невірної гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності.

Отже, хай по вибірці об'єму n отриманий емпіричний розподіл:

варіанти.....	x_i	x_1	x_2	...	x_s
емп. частоти. . .	n_i	n_1	n_2	...	n_s

Допустимо, що в припущенні нормального розподілу генеральної сукупності обчислені теоретичні частоти n'_i . При рівні значимості α потрібно перевірити нульову гіпотезу: генеральна сукупність розподілена нормально.

Як критерій перевірки нульової гіпотези приймемо випадкову величину

Ця величина випадкова, оскільки в різних дослідах вона набуває різних, заздалегідь не відомих значень. Ясно, що чим менше розрізняються емпіричні і теоретичні частоти, тим менша величина критерію (4.23), і, отже, він до певної міри характеризує близькість емпіричного і теоретичного розподілів.

Відмітимо, що зведенням в квадрат різниць частот усувають можливість взаємного погашення позитивних і негативних різниць. Діленням на n'_i досягають зменшення кожного з додатків; інакше сума була б настільки велика, що приводила б до відхилення нульової гіпотези навіть і тоді, коли вона справедлива. Зрозуміло, приведені міркування не є обґрунтуванням вибраного критерію, а лише поясненням.

Доведено, що при $n \rightarrow \infty$ закон розподілу випадкової величини (4.23) незалежно від того, якому закону розподілу підпорядкована генеральна сукупність, прагне до закону розподілу χ^2 з k ступенями свободи. Тому випадкова величина (4.23) позначена через χ^2 , а сам критерій називають критерієм згоди «хі квадрат».

Число ступенів свободи знаходять по рівності $k = s - 1 - r$, де s - число груп (часткових інтервалів) вибірки; r - число параметрів передбачуваного розподілу, які оцінені за даними вибірки.

$$\chi^2 = \sum (n_i - n'_i)^2 / n'_i$$

Зокрема, якщо передбачуваний розподіл - нормальний, то оцінюють два параметри (математичне очікування і середнє квадратичне відхилення), тому $r = 1$ і $k = s - 2$.

Якщо, наприклад, припускають, що генеральна сукупність розподілена за законом Пуассона, то оцінюють один параметр λ , тому $r = 1$ і $k = s - 2$.

Оскільки односторонній критерій «жорсткіше» відкидає нульову Гіпотезу, чим двосторонній, побудуємо правосторонню критичну область, виходячи з вимоги, щоб ймовірність попадання критерію в цю область в припущенні справедливості нульової гіпотези дорівнювала прийнятому рівню значимості α :

$$P[\chi^2 \succ \chi^2_{кр}(\alpha; k)] = \alpha$$

Таким чином, правостороння критична область визначається нерівністю $\chi^2 \succ \chi^2_{кр}(\alpha; k)$

Позначимо значення критерія, обчислене за даними спостережень, через $\chi^2_{набл}$ і сформулюємо правило перевірки нульової гіпотези.

Для того, щоб при заданому рівні значимості перевірити нульову гіпотезу теоретичні частоти, а потім спостережуване значення критерія:

о

$$\chi^2_{набл} = \sum (n_i - n'_i)^2 / n'_i$$

і по таблиці критичних точок розподілу χ^2 , по заданому рівню значущості α і ч

Я

Я

4.2. Обчислення отриманих даних

Експериментальні дані, одержані при дослідженні перегону Дніпропетровськ – Нижньодніпровськ-Вузол з електротягою постійного струму, приведені на рис.4.2.

п

е

н

і

в

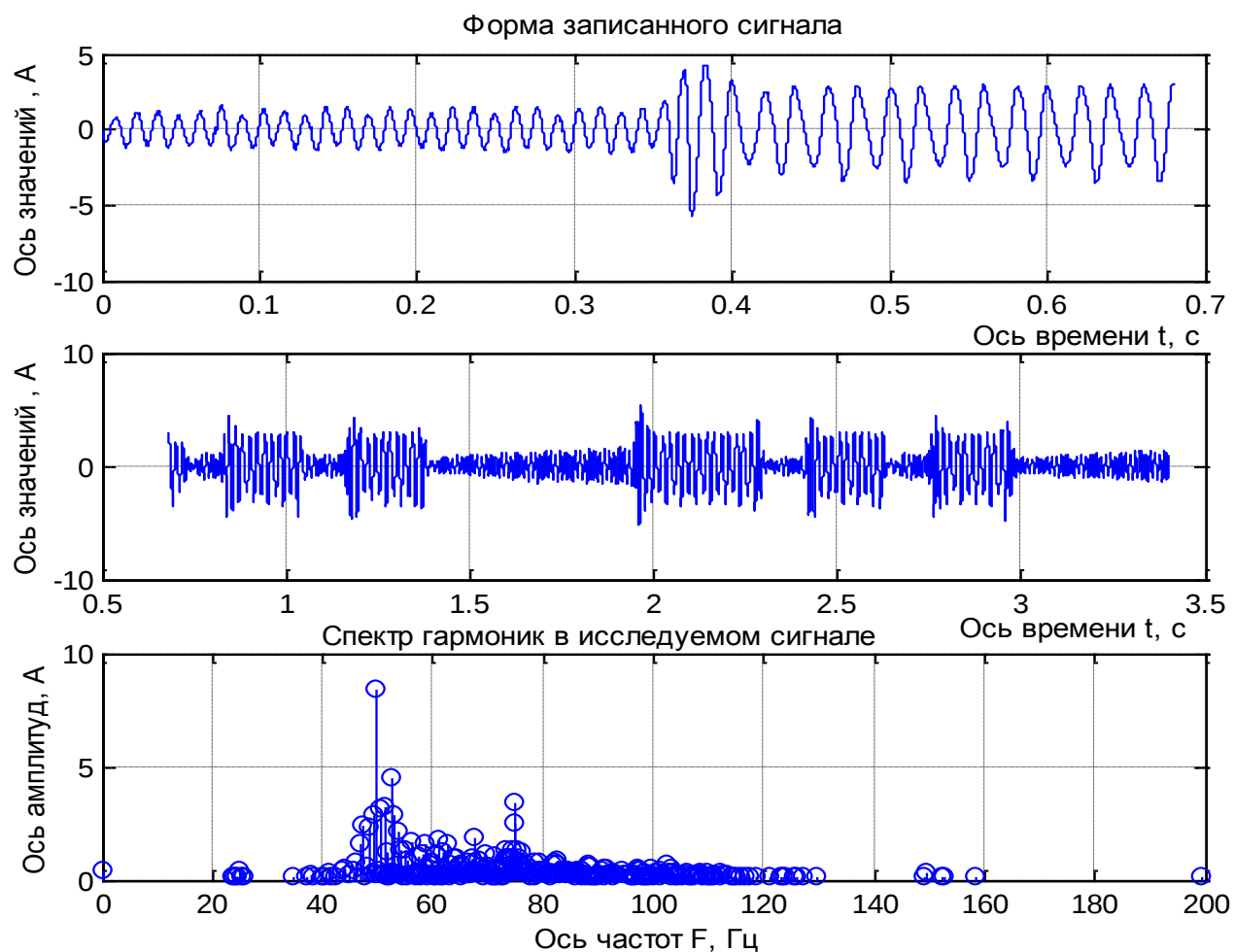


Рис. 4.2. Сигнал, записаний з котушок локомотивної сигналізації
тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму
Отримані в результаті вимірювань дані представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Частота, Гц	Амплітуда, А	Частота, Гц	Амплітуда, А	Частота, Гц	Амплітуда, А	Частота, Гц	Амплітуда, А	Частота, Гц	Амплітуда, А
45,3	1,3	51,6	2,0	56	1,5	57,4	1,7	57,9	2,0
49,7	1,4	51,7	1,1	56,6	2,1	57,5	2,0	58,0	1,2
51	2,3	54,1	1,9	56,7	1,2	57,6	1,5	58,1	1,0
51,1	1,2	55,3	1,2	57,2	1,1	57,7	1,5	58,2	1,3
51,2	1,0	55,4	1,7	57,3	7,4	57,8	1,3	58,3	1,1

За отриманими даними будуюмо діаграму, представлену на рис.4.3.

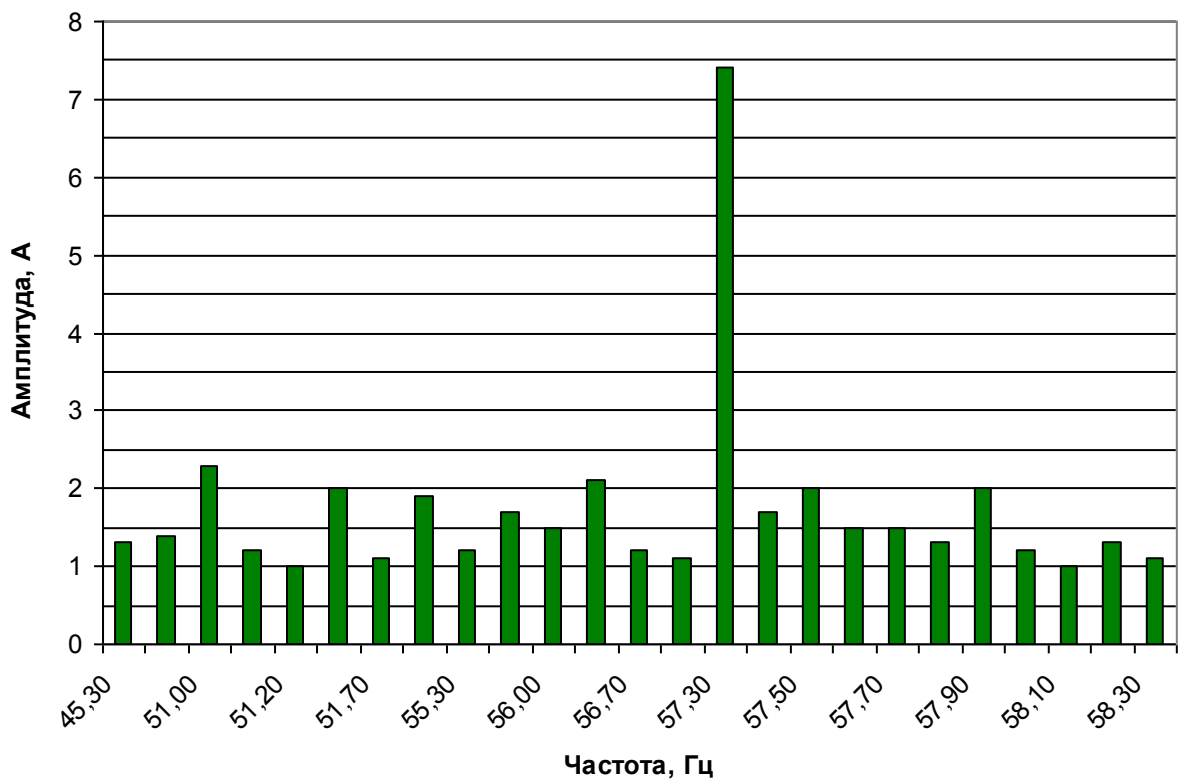


Рис.4.3. Діаграма розподілу амплітуд гармонік 50 Гц

Проведемо статистичну оцінку величини амплітуд гармонік 50 Гц. Результати показані на рис.4.4.

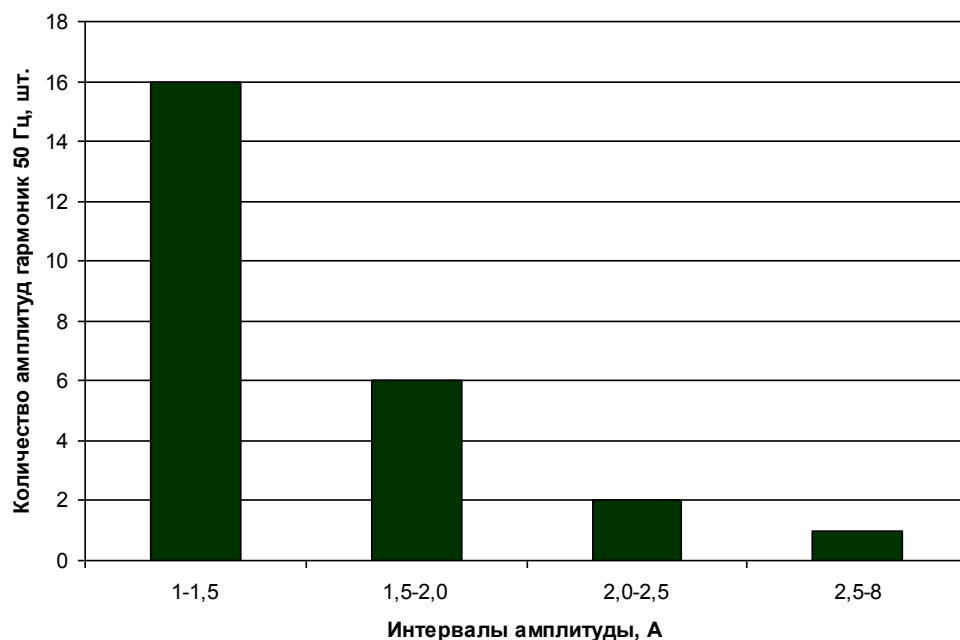


Рис.4.4. Кількісна оцінка величини гармонік 50 Гц

Розрахуємо імовірнісні характеристики амплітуд струму частотою 50 Гц. Побудуємо діаграму ймовірності попадання амплітуди в певні інтервали, рис.4.5.

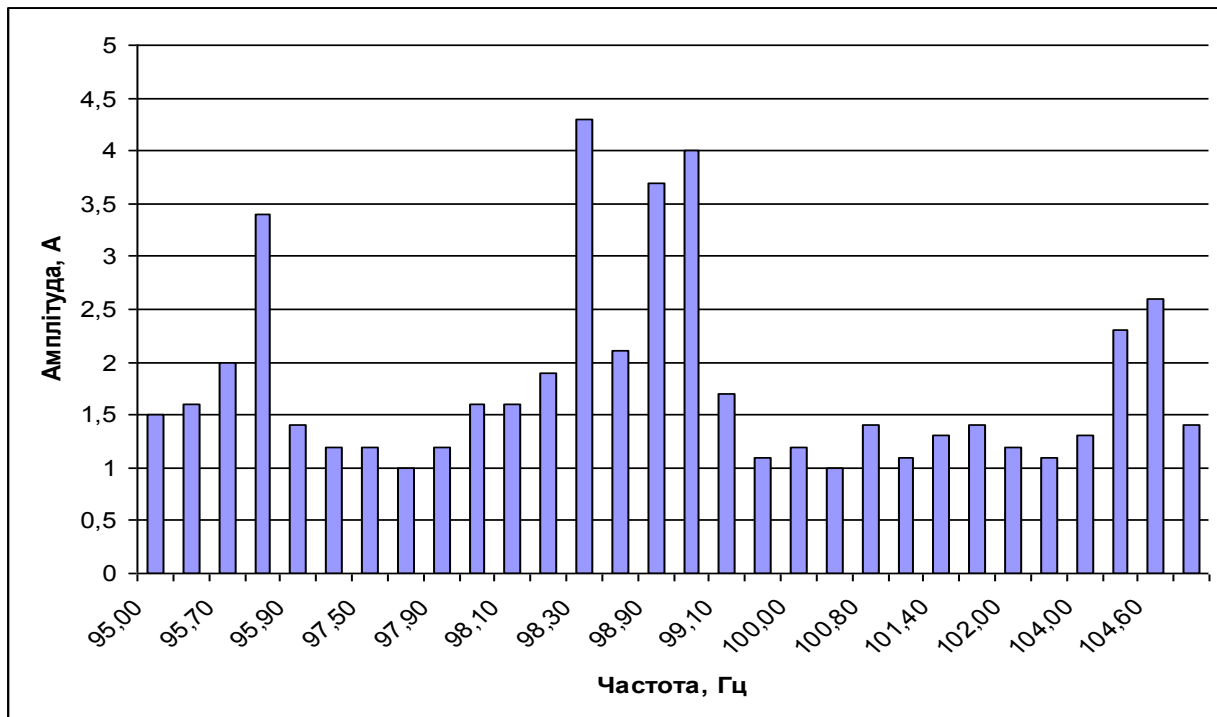


Рис. 4.6. Діаграма розподілу амплітуд гармонік 100 Гц

Проведемо статистичну оцінку величини амплітуд гармонік 100 Гц. Результати показані на рис. 4.7.

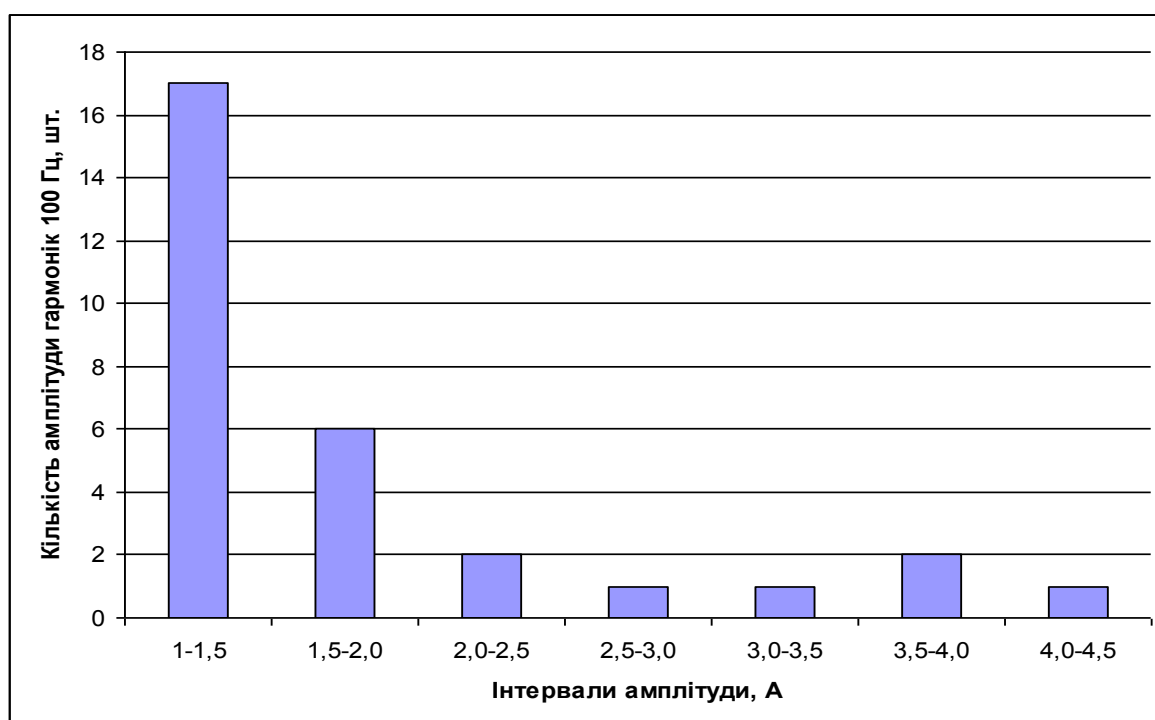


Рис. 4.7. Кількісна оцінка величини гармонік 100 Гц

Розрахуємо Імовірнісні характеристики амплітуд струму частотою 100 Гц. Побудуємо діаграму імовірності попадання амплітуди в певні інтервали, рис. 4.8.

Т о т а , Г ц									
А м п л і т у д а , А									

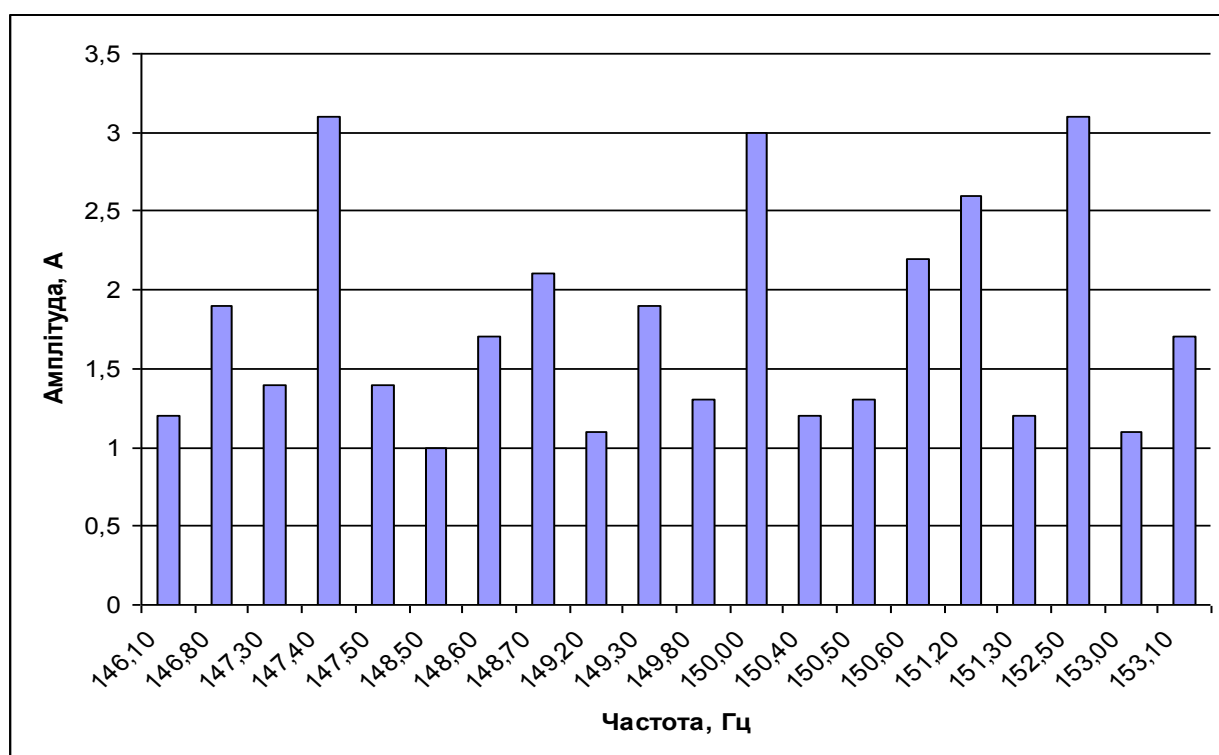


Рис. 4.9. Діаграма розподілу амплітуд гармонік 150 Гц

Проведемо статистичну оцінку величини амплітуд гармонік 150 Гц. Результати показані на рис. 4.10.

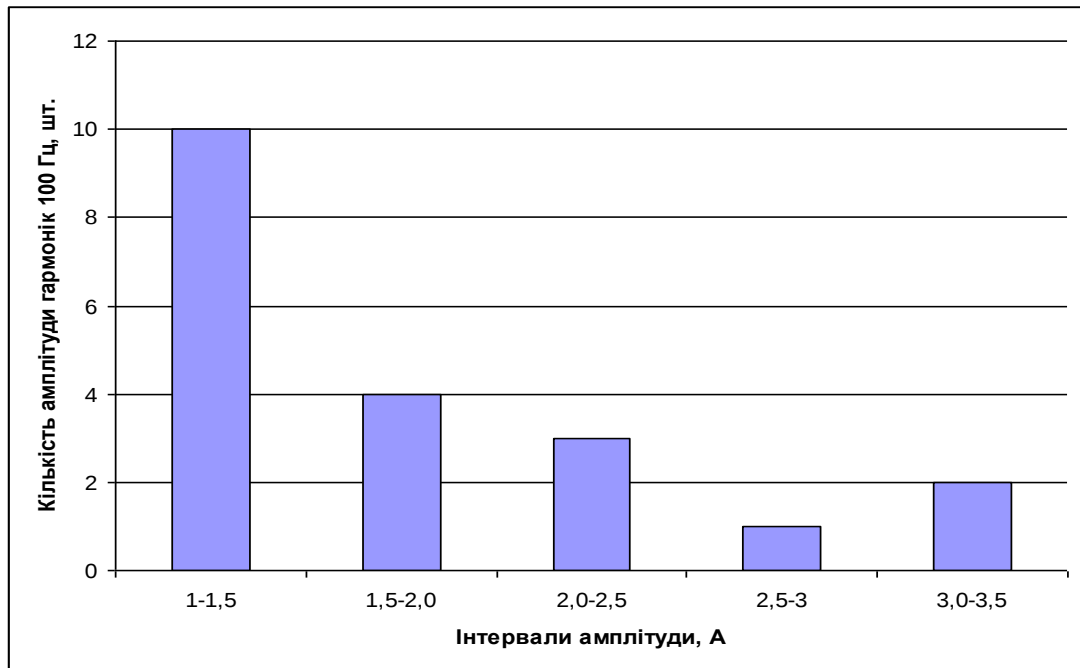


Рис. 4.10. Кількісна оцінка величини гармонік 150 Гц

Розрахуємо Імовірнісні характеристики амплітуд струму частотою 150 Гц. Побудуємо діаграму імовірності попадання амплітуди в певні інтервали, рис. 4.11.

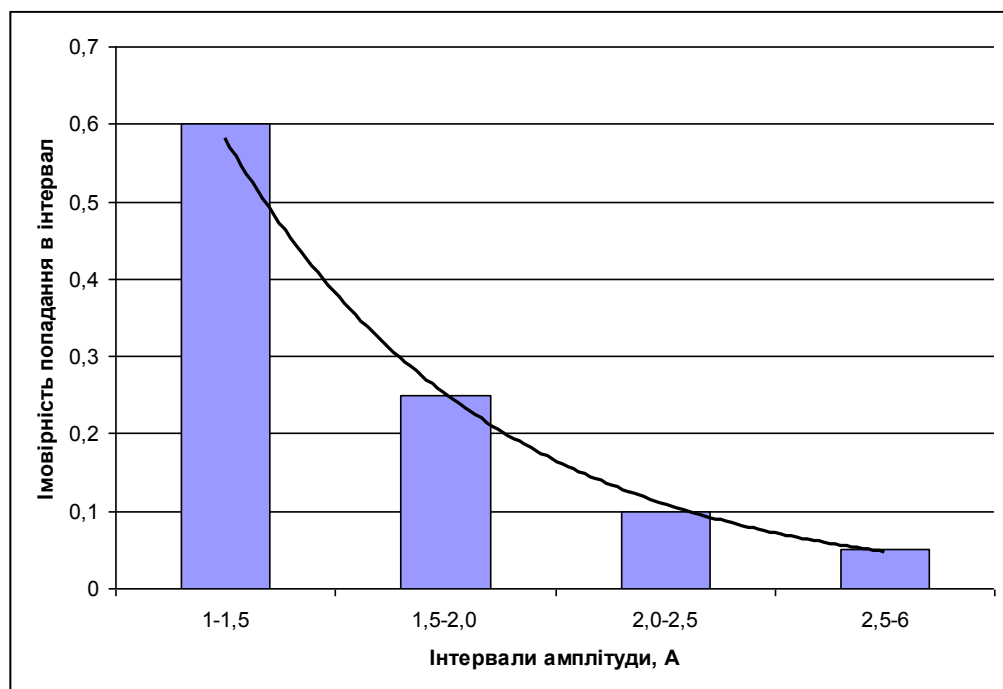


Рис. 4.11. Імовірнісні характеристики амплітуд струму частотою 150 Гц

Якщо, окрім характерних для розподілу значень величин відомий функціональний вид розподілу випадкової величини, то можна отримати повну

інформацію про ймовірність реалізації випадкової величини в будь-якому заданому інтервалі значень. Найзручніше користуватися нормальним, або Гаусовим, розподілом, що відображає ситуацію, що найчастіше зустрічається в природі. Як наслідок, йому властива особлива роль, зумовлена тим, що при обробці даних вимірювань в науці і техніці зазвичай припускають нормальний закон розподілу випадкових погрешностей вимірювань.

На користь застосування нормального розподілу є вагомі підстави. А саме, воно завжди виявляється тоді, коли сумарна погрешність є результатом неврахованої сумісної дії цілого ряду причин, кожна з яких дає малий внесок в погрешність. При чому абсолютно неважливо, по якому закону розподілений кожен з внесків окремо.

В результаті розрахунків отримано, що щільність ймовірності кодових сигналів, записаних з котушок локомотивної сигналізації тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму, розподіляється по нормальному (графік має вид усічено нормальної кривої) закону. На рис.4.5, 4.8,

Вірогідність, отримана за наслідками експериментальних даних, позначена стовпцями. Апроксимована крива проведена лінією. Максимум гармоніки 50 Гц склав 5,4 А, мінімум - 1,0 А, математичне очікування - 1,64 А, середньоквадратичне відхилення - 0,507 А. Максимум гармоніки 100 Гц склав 4,3 А, мінімум - 1,0 А, математичне очікування - 1,79 А, середньоквадратичне відхилення - 0,789 А. Максимум гармоніки 150 Гц склав 3,2 А, мінімум - 1,0 А, математичне очікування - 1,78 А, середньоквадратичне відхилення - 0,53 А.

Гіпотеза перевірена за критерієм Пірсона, величина $\chi^2_{набл} = \sum (n_i - n'_i)^2 / n'_i$ дорівнює 4,1 для 50 Гц, 5,3 для 100 Гц, 6,7 для 150 Гц, що менше за табличне значення, яке дорівнює 44,3, 49,6, 44,3 відповідно (при числі ступенів свободи $k=n-1=25-1=24$ та рівні значимості $\alpha=0,01$), виконується нерівність $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, тобто немає підстав відкидати цю гіпотезу [16].

Оскільки гармоніка 50 Гц спостерігалася в межах не одного РК, то можна зробити висновок, що дана завада міститься в тяговому струмі. Середнє

значення її амплітуди в розділовій паузі коду «З» склало близько 50 % від мінімального значення корисного сигналу при якому колійне реле може встати під струм. Таке значення завади є вельми критичним, оскільки амплітуда кодового сигналу повинна бути не менше 2 А для рейкових кіл перегонів з електротягою постійного струму.

4.3. Висновки за розділом

Якщо, окрім характерних для розподілу значень величин відомий функціональний вид розподілу випадкової величини, то можна отримати повну інформацію про ймовірність реалізації випадкової величини в будь-якому заданому інтервалі значень.

В результаті розрахунків отримано, що щільність імовірності кодових сигналів, записаних з катушок локомотивної сигналізації тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму, розподіляється по нормальному закону (графік має вид усічено нормальної кривої).

Гіпотеза перевірена за критерієм Пірсона, величина $\chi^2_{набл} = \sum (n_i - n'_i)^2 / n'_i$ дорівнює 4,1 для 50 Гц, 5,3 для 100 Гц, 6,7 для 150 Гц, що менше за табличне значення, яке дорівнює 44,3, 49,6, 44,3 відповідно (при числі ступенів свободи $k=n-1=25-1=24$ та рівні значимості $\alpha=0,01$), виконується нерівність $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, тобто немає підстав відкидати цю гіпотезу [16].

5. Електромагнітна сумісність і аналіз параметрів якості електричної енергії споживачів тягових підстанцій

5.1. Проблеми якості електроенергії в залізничних електромережах

Якість електроенергії – відповідність рівня напруги і частоти деяким значенням, встановлених Держстандартами ДСТУ EN 50160-2011 відповідними нормативами [16–20]. В даному розділі узагальнимо та порівняємо основні терміни та вимоги до якості електричної енергії на підставі згаданих вище нормативних документів.

До основних параметрів якості електричної енергії відносять:

1) зміна напруги електропостачання (відхилення напруги або російські «отклонение напряжения»):

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

де U – діюче значення напруги прямої послідовності або просто діюче значення напруги, $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга. Відхилення напруги спостерігаються при її зміні напруги зі швидкістю менше ніж 1 % за секунду.

$$U = \frac{1}{3} (U_{\text{AB}(1)} + U_{\text{BC}(1)} + U_{\text{AC}(1)}), \quad (5.2)$$

де $U_{\text{AB}(1)}, U_{\text{BC}(1)}, U_{\text{AC}(1)}$ – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Через зміни навантажень в часі, зміни рівня напруги та інших факторів змінюється величина падіння напруги в елементах мережі і, отже, рівень діючого значення напруги U в даний момент часу t . В результаті виявляється, що в різних точках мережі в один і той же момент часу, а в одній точці – в різні моменти, відхилення напруги різні.

Нормальна робота електроприймачів в мережах напругою до 1 кВ забезпечується за умови, що відхилення напруги на їх вході не перевищують $\pm$

5% (нормальне значення) і $\pm 10\%$ (максимальне значення). У мережах напругою 6...36 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги $\pm 10\%$.

Через те, що кількість користувачів, які отримують електроенергію безпосередньо від мереж високої напруги, є обмеженою та, зазвичай, вони мають індивідуальні контракти, то в стандарті ДСТУ EN 50160:2014 не наведено норми на змінення напруги електропостачання [19].

2) коливання напруги характеризують флікером або швидкою зміною напруги (або по-російськи «размах изменения напряжения»):

$$pU = \frac{U_{min} - U_{max}}{U_{max}} \cdot 100\% , \quad (5.3)$$

Коливання напруги спостерігаються при її зміні зі швидкістю більше ніж 1 % за секунду.

Значення коливання напруги мають ті ж самі норми, що і відхилення напруги з єдиною відмінністю: тривалість процесу менше однієї хвилини. Нормально допустимим коливанням напруги вважається діапазон в 5%, тобто: $\pm 5\%$ (наприклад, для мереж до 1000 В від 209 В до 231 В). Гранично допустимим коливанням напруги вважається діапазон $\pm 10\%$ (від 198 В до 242 В).

До розмахів зміни напруги відносять поодинокі зміни напруги будь-якої форми з частотою повторення від двох разів на хвилину (1/30 Гц) до одного разу на годину, що мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1 % в секунду (для ламп розжарювання) і 0,2 % в секунду для інших приймачів.

Швидкі зміни напруги викликаються ударним режимом роботи двигунів металургійних прокатних станів, тягових установок залізниць, лугових сталеплавильних печей, зварювальної апаратури, а також частими пусками потужних короткозамкнених асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність становить кілька відсотків від потужності короткого замикання.

Флікер або мерехтіння (flicker) Відчуття нестійкості зорового сприйняття, спричинене світловим подразником, яскравість або спектральний розподіл якого коливається в часі [IEV 161-08-13]. Коливання напруги зумовлюють зміни світлового потоку ламп, які можуть створювати зорове явище. Флікер, величина

якого перевищує певний поріг, стає подразнювальним. Роздратування збільшується дуже швидко із зростанням амплітуди коливань. Але навіть дуже малі амплітуди за певних частот повторення можуть бути дратівливими [19].

Показник флікера

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \leq 1, \quad (5.4)$$

де P_{sti} – показник короткочасного флікера, який вимірюється протягом 10 хв. P_{st} має бути не більше 1,38 (або 1 – для приміщень з лампами розжарювання і там, де необхідні значні зорові зусилля) протягом 100 % часу вимірювання, P_{lt} – показник довгочасного флікера, який обчислюють за даними 12 вимірів, які були зроблені протягом двох годин.

Основні вимоги, що пред'являються до коливань напруги, обумовлюються намірами захистити зір людини. Встановлено, що найбільша чутливість ока до мерехтіння світла спостерігається при 8,7 Гц. Тому для ламп розжарювання, які забезпечують робоче освітлення при значних зорових напруженнях, розмах напруги допускається не більше 0,3 %, для побутових ламп накаливання – 0,4 %, для люмінесцентних ламп та інших електроприймачів – 0,6 %.

Для зниження розмаху зміни напруги в освітлювальній мережі застосовують роздільне живлення приймачів освітлювальної мережі і силового навантаження, поздовжню ємнісну компенсацію мережі живлення, синхронні електродвигуни (компенсатори) та штучні джерела реактивної потужності (реактори або конденсаторні батареї, струм яких формується за допомогою керованих вентилів для отримання необхідної реактивної потужності).

3) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС ($\overline{NEAN}$) або коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_v = \frac{1}{U_{ном}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \% = \frac{U_{v\Sigma}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (5.5)$$

де $U_{v\Sigma}$ - діюче значення напруги від усіх гармонік, існуючих в цій напрузі;
 U_1 – напруга першої гармоніки (50 Гц); N – порядок останньої з врахованих

гармонійних складових, U_n – діюче значення n -й ($n = 2 \dots N$) гармонійної складової напруги.

Під час роботи потужних випрямних і перетворювальних установок встановлених на тягових підстанціях чи підприємствах, а також дугових печей і установок для зварювання, тобто нелінійних елементів, відбувається скривлення кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги містять гармонійні коливання, які мають різні частоти. Промислова частота $f = 50$ Гц є основною і зветься першою. Це нижча гармоніка, всі інші по відношенню до неї – вищі гармоніки і мають частоти $f_n = 50 \cdot n$, Гц.

Вищі гармоніки в системі електропостачання викликають додаткові втрати енергії, скорочують термін служби конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів, призводять до труднощів при налагодженні релейного захисту та сигналізації, а також експлуатації електроприводів з тиристорним керуванням і т. п.

Для зниження вищих гармонік застосовуються силові індуктивно-ємнісні фільтри, які налаштовані в резонанс на певну гармоніку. З метою виключення гармонік нижчих частот застосовують перетворювальні установки з великим числом фаз.

Нормальні і максимальні значення $K_v = K_{nc}U$ не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ – 5 і 10 %, в електричній мережі 6...20 кВ – 4 і 8 %, в електричній мережі 35 кВ – 3 і 6 %, в електричній мережі 110 кВ і вище 2 і 4 %.

Раніше вважалось, що напруга є якісної, якщо $K_v \leq 5\%$. Зараз СКГС напруги електропостачання (ураховуючи всі гармоніки до 40-ої включно) мають бути меншими чи рівними 8 %. Обмеження порядку гармонік до 40 є загальноприйнятим [19].

5) Напруга гармоніки (harmonic voltage) – синусоїдальна напруга з частотою, яка пропорційна з цілим множником основній частоті (50 Гц) напруги електропостачання.

Напруги гармонік можуть бути оцінені через відносну амплітуду напруги окремої гармоніки U_h , віднесеною до напруги основного складника U_1 , де h — це порядок гармоніки, або через сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС ($\overline{NEAN}$), який обчислюють за формулою:

$$\overline{NEAN} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}. \quad (5.6)$$

б) Коефіцієнту n -ї гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку $K_{U(n)}$ або як вказано в ДСТУ EN 50160:2014 відносна амплітуда напруги окремої гармоніки U_h . Коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ представляє собою відношення діючого значення n -ї гармонічної складової напруги до діючого значення напруги основної частоти 50 Гц і має дорівнювати $K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \leq 8\%$ протягом 95 % часу за тиждень.

За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в таблицях [19]. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік.

Результати порівняння норм на коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ за держстандартами ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014 були такими, як наведено в табл. 5.1.

Проаналізував стандарт ДСТУ EN 50160:2014 було з'ясовані норми на відносні величини амплітуд низької, середньої та високої напруг для різних гармонік до 25-го порядку (табл. 5.2).

Таблиця 5.1

Норми на коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ для
різного рівня напруг за стандартами

$K_{U(n)}$ за ГОСТ 13109-97	СКГС ($\overline{NEAN}$)
--------------------------------	----------------------------

				за ДСТУ EN 50160: 2014
протягом 95 % часу вимірювання		протягом 100 % часу вимірювання		8% протягом 95 % часу за тиждень
0,38 кВ	8 %	0,38 кВ	12 %	
6...20 кВ	5 %	6...20 кВ	8 %	
35 кВ	4 %	35 кВ	6 %	
110... 330 кВ	2%	110... 330 кВ	3 %	

7) Напруга інтергармоніки (interharmonic voltage) – синусоїдальна напруга з частотою, коефіцієнт пропорційності якої до основного складника напруги електропостачання не є цілим числом.

Рівень інтергармонік в енергосистемах низької і середній напрузі (1...35 кВ) збільшується внаслідок науково-технічного прогресу і впровадження нових перетворювачів частоти й систем регулювального обладнання. Інтергармоніки низького рівня ведуть до зростання флікера і суттєво впливають на системи, в яких використовують змодульовані тональні посилення.

Через низькі частоти (200...500 Гц), які обумовлені наявністю індуктивності і ємності в схемах заміщення при яких виникає резонанс в мережах високої напруги допуски для напруг інтергармонік не встановлено, а їх вплив незначний. Це питання потребує більш детального наукового дослідження.

8) Відхилення частоти:

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}} \text{ або } q f = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100\%.$$

Раніше нормувалось відхилення частоти нормувалось більш жорстко. Перш за все зміна частоти живлячої напруги впливає на режими роботи електрообладнання, швидкість обертання роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів, технологічний процес різних виробництв (наприклад, прокатних станів) і, як наслідок, на техніко-економічні показники роботи промислових підприємств.

Величини гармонік в точках приєднання у відношенні до первинної напруги U_1 50 Гц для низької, середньої та високої напруг

Непарні напруги				Парні напруги	
не кратні 3		кратні 3			
Порядок гармоніки h	Відносна амплітуда U_h , %	Порядок гармонік и h	Відносна амплітуда U_h , %	Порядок гармоніки h	Відносна амплітуда U_h
5	6,0/5,0	3	5,0/3,0	2	2,0 / 1,9
7	5,0/4,0	9	1,5/1,3	4	1,0
11	3,5/3	15	0,5/0,5	6...24	0,5 / 0,5
13	3,0/2,5	21	0,5 / 0,5		
17	2,0 / на розгляді				
19	1,5 / на розгляді				
23	1,5 / на розгляді				
25	1,5 / на розгляді				

Примітка: Величини значень відносної амплітуди гармонік U_h наведено у чисельнику для низької та середньої напруг, а в знаменнику – для високої напруги

Електромагнітна складова збитку обумовлена збільшенням втрат активної потужності в електричних мережах і зростанням споживання активної та реактивної потужностей. Відомо, що зниження частоти на 1% збільшує втрати в електричних мережах на 2 %.

Технологічна складова збитків спричинені в основному недовипуску промисловими підприємствами своєї продукції і вартістю додаткового часу роботи підприємства для виконання завдання. Згідно з експертними оцінками значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного.

Ступінь впливу частоти на продуктивність ряду механізмів може бути виражена через споживану ними активну потужність.

Відхилення частоти негативно впливає на роботу електронної техніки: відхилення частоти більш +0,1 Гц призводить до яскравості і геометричним фоном спотворень телевізійного зображення, зміни частоти від 49,9 до 49,5 Гц

викликає майже чотириразове збільшення допустимого розмаху телевізійного сигналу до фонові завади.

Також жорсткі вимоги до частоти мережі висувають електродвигуни, трансформатори, реактори зі сталевим магнітопроводом, де зниженням частоти викликає додатковий нагрів сталевих сердечників.

Для запобігання загальносистемних аварій, викликаних зниженням частоти передбачаються спеціальні пристрої автоматичного частотного розвантаження (АЧР), що відключають частину менш відповідальних споживачів. Після ліквідації дефіциту потужності, наприклад після включення резервних джерел живлення, спеціальні пристрої частотного автоматичного повторного включення (ЧАПВ) включають раніш відключені споживачі і нормальна робота енергосистеми відновлюється.

Отже, підтримка нормальної частоти, що відповідає вимогам стандарту є не тільки технічною, а і науковою задачею, основний шлях вирішення якої – введення генеруючих потужностей з метою створення резервів потужності в мережах енергопостачальних організацій і розробка математичних моделей і алгоритмів з підтримки частоти на заданому ДСТУ рівні.

За Держстандартом ГОСТ 13109-97 1997 року відхилення частоти Δf протягом 95 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,2$ Гц (нормально допустиме значення) та протягом 100 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,4$ Гц (гранично допустиме значення).

За ДСТУ EN 50160:2014:

- для систем, які синхронно підключено до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 1\%$ протягом 99,5 % часу за рік; 50 Гц $+4\% \dots -6\%$ протягом 100 % часу вимірювання;

- для систем, які без синхронного підключення до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 2\%$ протягом 95 % часу за тиждень; 50 Гц $\pm 15\%$ протягом 100 % часу вимірювання.

За рівнями напруги (низька напруга – до 1 кВ, середня напруга – від 1 до 35 кВ, висока напруга – від 36 до 150 кВ) існують такі стандарти щодо відхилення

частоти [19]: номінальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку вимірюють протягом 10 с і яка має бути для систем, що синхронно підключені до об'єднаної енергосистеми; $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ (тобто 49,5...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік; $50 \text{ Гц} + 4 \dots - 6\%$ (тобто 47...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання; для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто систем типу «енергетичний острів»): $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ (тобто 49...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень; $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$ (тобто 42,5...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання.

9) Провали напруги і перенапруги.

Причиною провалів напруги є аварійні ситуації. Перенапруги виникають через перемикання або відключення навантаження, природні явища, які є випадковими і які важко передбачити.

В мережах низької і середньої напруги традиційно поріг початку провалу напруги дорівнює 90 % від номінальної напруги, поріг початку перенапруги – 110 % від номінальної напруги. Величина гістерезису звичайно дорівнює 2 %, рекомендовані правила встановлення величини гістерезису наведено в EN 61000-4-30:2009, 5.4.2.1 [19]. При цьому слід розглядати лінійну напругу у чотирипровідних (між проводом і нейтраллю) і трипровідних (між лінійними проводами) системах, в однофазних мережах також лінійну напругу в залежності від типу підключення між проводом і нейтраллю або між лінійними проводами.

Оцінювання провалів напруги треба провадити відповідно до EN 61000-4-30 залежить від цілі оцінювання. Частіше за все використовується поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає подію з однаковою тривалістю і остаточною напругою. Також можна використовувати правила, які описані в IEC/TR 61000-2-8, 4.3.2.4 Класифікація провалів напруги.

В системах високої напруги оцінювання перенапруг треба провадити відповідно до EN 61000-4-30. В основі методу аналізу перенапруг для трифазних систем лежить поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає визначення еквівалентної події й характеризується однаковою залишковою напругою. Також

узагальнюють події в часі і використовують правила рекомендовані в IEC/TR 61000-2-8.

10) Небаланс напруг або напруга зворотної послідовності.

Раніше за ГОСТ 13109-97 нормувалося коефіцієнт несиметрії напруг за зворотної послідовності K_{2U} , який повинен протягом 95 % часу вимірювання 2% та протягом 100 % часу вимірювання 4% від напруги прямої послідовності (основного складника). За ДСТУ EN 50160-2014 висуваються більш жорсткі вимоги і допускається лише 3 % від напруги прямої послідовності (основного складника) [17, 19].

Взагалі для систем з низькою, середньою та високою наругою за нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах 0...2 % від складника напруги прямої послідовності. В стандарті [19] наведено значення тільки для складника зворотної послідовності, тому що ця складова стосується можливих взаємних впливів підключеного до системи устаткування.

З усіх перелічених параметрів якості електричної енергії на тягових підстанціях контролюється відхилення і колювання напруги на шинах підстанції, флікер, перериви в електропостачанні їх тривалість, перенапруга. Критичні значення струму і напруги в системі тягового енергопостачання контролюються в режимі реального часу за допомогою засобів релейного захисту, наприклад «Регіна». Інші параметри в процесі експлуатації не визначаються зовсім. Вимірювання напруги гармонік і інтергамонік, визначення коефіцієнта несинусоїдальності і т. ін. можливе лише при виявленні порушень нормального функціонування тягових і нетягових споживачів або при впровадженні нових систем і обладнання.

5.2. Аналіз роботи типової тягової підстанції змінного струму

Аналіз роботи типової тягової підстанції змінного струму за 2018 року шляхом обліку спожитої електроенергії і визначення коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ без урахування перетікання реактивної потужності дано в табл. 5.3.

Було розраховано баланс електроенергії по вводам 10кВ тягової підстанції змінного струму, який показує різницю між споживаною від енергосистеми електроенергії і відданою нетяговим споживачам. Різниця показань пояснюється різними типами лічильників встановлених на тяговій підстанції і в системі зовнішнього електропостачання. Результати дано в табл. 5.4.

Таблиця 5.3

Коефіцієнт потужності на шинах типової тягової підстанції змінного струму

Дата	Шини 110 кВ		Шини 27,5 кВ	
	S, МВА	$\cos\varphi$	S, МВА	$\cos\varphi$
01.2018	3938.98	0,86	4643.50	0,826
02.2018	3687.55	0,87	4374.18	0,846
03.2018	3441.13	0,869	4131.38	0,852
04.2018	3158.88	0,881	3819.47	0,867
05.2018	2427.46	0,893	3003.43	0,874
06.2018	3092.50	0,888	3668.75	0,859
07.2018	3394.72	0,876	3875.87	0,846
08.2018	2673.35	0,867	3072.71	0,833
09.2018	2785.76	0,867	3173.19	0,831
10.2018	3086.12	0,862	3537.85	0,825
11.2018	3014.55	0,867	3486.32	0,833
12.2018	2934.92	0,859	3361.51	0,824

Таблиця 5.4

Небаланс електроенергії по вводам 10 кВ тягової підстанції змінного струму

Дата	Фактичний небаланс, кВт	Фактичний небаланс, %	Допустимий небаланс, %
01.2018	-1946	-0,96%	1,43%
02.2018	-784	0,26%	1,41%
03.2018	-1856	-0,61%	1,35%
04.2018	-1190	-0,61%	1,16%

05.2018	-3806	-1,84%	1,35%
06.2018	-3336	-1,73%	1,34%
07.2018	-1986	-1,04%	1,32%
08.2018	-2956	-1,28%	1,37%
09.2018	-3514	-1,91%	1,39%
10.2018	-1738	-0,71%	1,02%
11.2018	-1974	-0,70%	1,40%
12.2018	-700	-0,22%	1,36%
01.2019	-2302	-0,73%	1,39%

Добовий облік коефіцієнту несиметрії на шинах тягової підстанції змінного струму дано в табл.5.5.

Було встановлено, що нетягове навантаження складає лише 5 % від всієї спожитої електроенергії. Таким чином вплив нетягового навантаження на систему тягового електропостачання незначний. Головною причиною несинусоїдальності напруги на шинах 10 кВ тягової підстанції є система тягового електропостачання.

Щодо питання електромагнітної сумісності (ЕМС) тягових і нетягових споживачів підстанції. Було зафіксовано, що в тяговому струмі присутні низькочастотні гармоніки. Серед усіх них амплітуда третьої гармонійної складової є найвищою (крім основної 50 Гц). Третя гармоніка амплітудою 500...800 В біла зафіксована і на шинах 110 кВ тягової підстанції. При цьому коефіцієнт n-ної гармоніки $K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{nom}} \cdot 100\% = 0,45...0,72\%$, що не перевищує норму.

Таблиця 5.5

Добовий облік коефіцієнту несиметрії на шинах тягової підстанції
змінного струму

Час, год.	Коефіцієнт несиметрії на шинах 110 кВ, %			Коефіцієнт несиметрії на шинах 27,5 кВ, %			Коефіцієнт несиметрії на шинах 10 кВ, %		
	UAB	UBC	UCA	UAB	UBC	UCA	UAB	UBC	UCA
0	6,36	7,27	6,36	-0,36	0,00	-0,73	10	12	9
1	6,36	6,36	5,45	0,00	-0,73	-0,36	10	11	10
2	7,27	6,36	6,36	-0,36	0,00	-1,09	10	12	9
3	5,45	7,27	6,36	-0,73	-0,36	-0,73	11	12	10
4	6,36	6,36	5,45	-0,36	0,00	-1,09	11	13	9

5	6,36	5,45	7,27	0,00	-0,36	-0,36	10	12	11
6	5,45	6,36	7,27	-0,36	0,00	0,00	10	11	9
7	5,45	6,36	6,36	0,00	-0,36	0,00	10	13	8
8	4,55	4,55	4,55	-1,82	-1,82	-1,82	10	10	5
9	4,55	4,55	4,55	-5,45	-3,64	-6,18	10	10	10
10	4,55	4,55	4,55	-5,45	-2,91	-3,64	10	10	10
11	4,55	4,55	4,55	-5,09	-3,64	-5,45	10	10	10
12	4,55	4,55	4,55	-5,09	-3,64	-3,64	15	10	10
13	4,55	4,55	4,55	-3,64	0,00	-3,27	15	15	10
14	4,55	4,55	4,55	-3,64	-2,55	-1,82	15	15	15
15	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-1,09	10	10	10
16	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-3,64	10	10	10
17	4,55	4,55	4,55	-1,82	-6,55	-2,91	10	10	10
18	4,55	4,55	4,55	0,00	-1,82	-2,91	10	10	10
19	4,55	4,55	4,55	-3,64	-3,64	-2,91	10	10	10
20	4,55	4,55	4,55	-1,82	-5,45	-5,45	10	10	10
21	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-3,64	10	10	10
22	4,55	4,55	4,55	-1,82	-1,82	-3,64	15	10	15
23	5,45	4,55	4,55	0,00	-1,82	-1,82	10	15	10
24	5,45	5,45	5,45	-1,82	-1,82	-1,82	10	10	15

5.3. Висновки за розділом

Оцінено параметри якості електричної енергії, яка надходить на шини типової тягової підстанції змінного струму і передається споживачам. Коефіцієнт несиметрії на шинах 110 кВ не перевищував 7,27 %, на шинах 10 кВ досягав 15 %, а на шинах 27,5 кВ – 6,18 % за добу, але в цілому є нижчим ніж на шинах 110 і 10 кВ.

Оцінена електромагнітна сумісність споживачів ТП. Електромагнітна ситуація в даному випадку є задовільною.

На тягових підстанціях контролюється обмежена кількість параметрів якості електричної енергії: відхилення і коливання напруги на шинах підстанції, флікер, перериви в електропостачанні їх тривалість, перенапруга. Критичні значення струму і напруги в системі тягового енергопостачання контролюються в режимі реального часу за допомогою засобів релейного захисту, наприклад «Регіна». Інші параметри в процесі експлуатації не визначаються зовсім. Вимірювання напруги гармонік і інтергамонік, визначення коефіцієнта

несинусоїдальності і т. ін. можливе лише при виявленні порушень нормального функціонування тягових і нетягових споживачів або при впровадженні нових систем і обладнання.

Висновки

Для забезпечення електромагнітної сумісності необхідно знати можливі джерела заважаючих впливів, види цих впливів (чинників, що заважають) і шляху їх передачі до сприймаючого об'єкту. Якщо така інформація є, можна прийняти відповідні захисні заходи. Вони можуть бути реалізовані як на джерелі перешкоди, так і на сприймаючому об'єкті (приймачі). Можливо також блокування шляху передачі.

При вимірюванні в колі зворотнього тягового струму є можливість оцінити завади в рейковій мережі. Основними джерелами завад можуть бути струм електровоза і його гармонійні складові, що виникають в процесі роботи локомотива, сторонні блукаючі струми, створювані заземленими джерелами електричної енергії, генераторами освітлення потягу, активними заземлюючими пристроями, посиленими дренажами, колійними джерелами струму, сигнальними струмами інших рейкових кіл.

В вагоні-лабораторії були досліджені перегони залізничі з тягою як постійного так і змінного струму, де використовуються кодові рейкові кола частотою 25 Гц. На основі зібраних даних була розроблена математична модель системи тягового електропостачання ділянок з великою пропускнуою спроможністю.

Більшість математичних моделей не враховують або зневажають, спрощують деякі параметри рельсових 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, що і було зроблено в даній роботі.

Також в результаті розрахунків було отримано, що щільність імовірності кодових сигналів, записаних з котушок локомотивної сигналізації тепловоза на ділянці з електротягою постійного струму, розподіляється по нормальному (графік має вид усічено нормальної кривої) закону, або за Гаусовим, розподілом,

що відображає ситуацію, що найчастіше зустрічається в природі. Правильність висунутої гіпотези була перевірена за критерієм Пірсона.

Оцінено параметри якості електричної енергії, яка надходить на шини типової тягової підстанції змінного струму і передається споживачам. Коефіцієнт несиметрії на шинах 110 кВ не перевищував 7,27 %, на шинах 10 кВ досягав 15 %, а на шинах 27,5 кВ – 6,18 % за добу, але в цілому є нижчим ніж на шинах 110 і 10 кВ.

Оцінена електромагнітна сумісність споживачів ТП. Електромагнітна ситуація в даному випадку є задовільною.

На тягових підстанціях контролюється обмежена кількість параметрів якості електричної енергії: відхилення і коливання напруги на шинах підстанції, флікер, перериви в електропостачанні їх тривалість, перенапруга.

Список літератури

1. Аполлонский С.М., Вилесов Д.В., Воршевский А.А. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 1 - 6.
2. Фезер К. Электромагнитная совместимость // Железные дороги мира. – 1992. – №6. – С. 29-31.
3. Бетче В., Крафт Р. Количественная оценка электромагнитных влияний в зоне электрифицированных линий // Железные дороги мира. – 1992. – № 4. – С. 24 -
4. Семенчук В.П., Бадер М.П., Просецкий А.П. Экспериментальные исследования электромагнитного влияния тягового электроснабжения постоянного тока на проводные линии связи // Пути совершенствования тягового электропривода транспортных средств. Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: МИИТ. – 1987. – №798. – С.100-106.
5. Рябцун А.А., Сайфутдинов Р.Х., Ющенко Л.В. Устройство для контроля электромагнитных помех, создаваемых при коммутации в машинах постоянного тока / ХабИИЖТ. – Хабаровск, 1985. – 9 с. - Деп. в ЦНИИ ТЭИ МПС 25.02.1985, №3000 – жд 85.
6. Сопельняк А.Г., Калугин А.Н. Измерение параметров гармоник // Автоматика, телемеханика и связь. – 1981. - №6. - С.31-32.
7. Косарев А.Б., Наумов А.А. Гальваническое влияние тяговых сетей с неоднородными электрическими параметрами рельсовых цепей // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. - №4. – С.38-39.
8. Ермоленко Д.В.. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с тиристорным электроподвижным составом: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.22.09 / ВНИИЖТ. –М., 1991. –22с.
9. Ермоленко Д.В. Показатели электромагнитной совместимости и методы ее обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.22.09 / ВНИИЖТ. – М., 1999. –44с.
10. Пыров А.Е., Левин М.Г. Влияние тягового тока на приемник АЛСН при проезде локомотивом изолированных стыков рельсовой цепи // Исследование элементов устройств автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте. Межвузовский сборник научных трудов. – Москва: МИИТ. – 1980. – №664. – С.103-

11. Юклеев В.П., Нарымский Б.В. Измеритель коэффициента асимметрии тягового тока // Автоматика, связь, информатика. – 2001.- №8. – С.35-37.
12. Трейвас М.Д. Высшие гармонические выпрямленного напряжения и их снижение на тяговых подстанциях постоянного тока. – М.:Транспорт, 1964. – 100с.
13. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Барковский Б.С., Магай Г.С., Маценко В.П., Шалимов М.Г., Панфилъ Л.С. – М.:Транспорт, 1990. – 127 с.
14. Справочник по электроснабжению железных дорог / под ред. Марвардта К.Г. – М.: Транспорт, 1980. – Т.1. – 256с.
15. Маценко В.П., Смирнов В.И. Гармоники двенадцатипульсового выпрямителя при несимметричных питающих напряжениях // Энергоснабжение электрических железных дорог. Сборник научных трудов. – Омск: ОмИИТ. – 1976. - №169. – С.9-
16. Сердюк Т.Н. Распределение гармоник тягового тока по длине фидерной зоны и их влияние на работу рельсовых цепей // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы LXVI Международной научно-практической конференции. – Д.:ДИИТ. - 2006. – С.330.
17. Сердюк, Т. М. Метод моделювання системи тягового електропостачання / Т. М. Сердюк, В. В. Мелешко, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – Ном. 10. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2015. – С. 35–43.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.
22. Кузін М.М. Забезпечення електромагнітної сумісності системи контактного зварювання // Всеукраїнська конференція студентів та молодих вчених 2020 р.

«ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ» [електронний ресурс]: збірник тез доповідей 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, .

23. Сердюк К. М., Кузін М. М., Гайченко Д. Л. Дослідження електромагнітної ємності електрорухомого складу зі схемами на *igbt* транзисторах з пристроями залізничної автоматики // Всеукраїнська конференція студентів та молодих вчених 2020 р. «ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ» [електронний ресурс]: збірник тез доповідей 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,

2

6

2

0

—

—

C

.

5

8

-

5

9

.

—