

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАД. В. ЛАЗАРЯНА

На правах рукопису

ЩЕКА ВАДИМ ІГОРОВИЧ



**ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ
В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ З
АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ**

УДК 656.259.12:629.423.31

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук

Науковий керівник: Гаврилюк Володимир Ілліч

Дніпропетровськ

2015

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ УМОВ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ ..	10
1.1. Проблема електромагнітної сумісності залізничної автоматики з системами тягового електропостачання та підхід до її дослідження	10
1.2. Особливості електропостачання електрифікованих залізниць	13
1.2.1. Застосування системи з відсмоктувальними трансформаторами	15
1.2.2. Застосування системи з екрануючим та підсилюючим проводами	17
1.3. Сучасний електрорухомий склад з асинхронним тяговим приводом	20
1.3.1 Структура тягового приводу з асинхронним двигуном	20
1.3.2 Елементна база перетворювачів силових кіл	28
1.3.3 Принципова схема силових кіл	29
1.4 Постановка задач дисертаційного дослідження	31
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕРС З АТП.....	32
2.1 Математичне моделювання електромагнітних процесів в силових колах ЕРС з АТП.....	32
2.2 Імітаційне моделювання силових кіл ЕРС з АТП як джерела завад	45
2.2.1 Результати імітаційного моделювання	47
2.3 Висновки за розділом 2	57
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ТЯГОВОГО СТРУМУ ВІД ЕРС З АТП.....	59
3.1. Методика проведення експериментальних досліджень.....	59
3.1.1. Методика досліджень в силових колах ЕРС	61
3.1.2. Виміри в рейкових лініях та пристроях СЦБ.....	63
3.1.3. Методика обробки експериментальних результатів	66
3.2. Результати експериментальних досліджень фазного струму асинхронного тягового двигуна ЕРС д АТП.....	66

3.3. Результати експериментального дослідження спектрального складу зворотного тягового струму ЕРС з АТП.....	70
3.4. Аналіз завад від ЕРС в смугах частот роботи РК	75
3.5. Висновки за розділом 3	76
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ЕРС З АТП НА РЕЙКОВІ КОЛА.....	77
4.1 Дослідження магнітного впливу КМ.....	79
4.1.1 Теоретичне дослідження магнітного впливу КМ на рейкові кола	80
4.1.2 Експериментальне дослідження магнітного впливу КМ на рейкові кола	95
4.1.3 Перевірка адекватності математичних моделей	100
4.2 Дослідження кондуктивного впливу контактної мережі	101
4.2.1 Побудови математичної моделі системи тягового електропостачання ділянки залізниці	101
4.2.2 Результати моделювання	106
4.3 Дослідження електричного впливу КМ.....	109
4.4 Вплив електромагнітних завад на рейкові кола.....	112
4.5 Висновки за розділом 4.....	113
РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИСТУ ЛІНІЙ СЦБ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ З БОКУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ З ЕРС З АТП.....	115
5.1. Використання активного екрануючого проводу	115
5.2. Моделювання системи з активним екрануючим проводом	119
5.3. Оцінка підвищення функціональної безпеки рейкових кіл	125
5.4 Висновки за розділом 5	128
РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ	129
6.1. Розрахунок капітальних вкладень в обладнання ділянки системою захисту рейкових кіл від електромагнітних завад.....	130
6.2. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітних завад.....	131
6.3. Висновки за розділом 6	136

ВИСНОВКИ	137
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	139
ДОДАТОК А. Розрахунок ємностей схеми заміщення IGBT	155
ДОДАТОК Б. Розрахунок часових параметрів керуючих імпульсів	157
ДОДАТОК В. Діаграму розповсюдження гармонік зворотного тягового струму вздовж фідерної зони при електротязі змінного струму	158
ДОДАТОК Г. Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електровозу	159
ДОДАТОК Д. Акти впровадження	160

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток економіки та промисловості України вимагає збільшення вантажообігу та підвищення швидкостей перевезень, що у свою чергу потребує будівництва спеціалізованих колії, застосування сучасних систем автоматики та сигналізації, введення в експлуатацію нових видів електрорухомого складу (ЕРС), зокрема з асинхронним тяговим приводом (АТП). Рух сучасного ЕРС супроводжується генеруванням гармонік, частоти яких потрапляють у смугу сигнальних струмів рейкових кіл (РК), що є найбільш відповідальними елементами залізничної автоматики, бо саме від їх справної роботи залежить безпека руху на залізниці, цілісність вантажів та життя людей. Оскільки електромагнітні завади можуть бути причиною збоїв в роботі рейкових кіл та призводити до перекриття світлофорів та зупинки поїздів необхідне дослідження, розробка та впровадження систем захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі з ЕРС. Таким чином підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом захисту їх від електромагнітних завад є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетним напрямком розвитку залізничної галузі, яка визначена у "Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року" (схвалена розпорядженням КМУ від 16 грудня 2009 р. № 1555-р), а також пов'язана з НДР "Підвищення безпеки мікропроцесорних систем автоматики й забезпечення їх електромагнітної сумісності з новими типами рухомого складу для магістралей із прискореним та швидкісним рухом поїздів" (номер державної реєстрації 0108U003066), «Дослідження і розробка інтегрованої комп'ютерної системи оптимізації перевезень, енергозбереження, безпеки руху та інтелектуалізації процедур управління залізничним транспортом України» (номер державної реєстрації НДР 0114U005164) та «Дослідження роботи тягової мережі на ділянках з рухом

великовантажних і прискорених поїздів, розробка пропозицій щодо зменшення втрат електроенергії в зворотній тяговій мережі та її впливу на роботу АЛСН» (номер державної реєстрації НДР 0112U008162) в яких дисертант приймав участь як виконавець і є співавтором звіту з НДР.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз роботи рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом з урахуванням впливу електромагнітних завад від ЕРС;
- розробити узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахуванням процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів та на її основі комп'ютерну програму для дослідження завад від ЕРС з АТП при різних режимах роботи електрообладнання і визначити найбільш несприятливі режими ведення ЕРС для функціонування рейкових кіл;
- вдосконалити метод вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях з одночасним багатоканальним вимірюванням параметрів завад, швидкості руху, режимів роботи електрообладнання та ін. для визначення причин появи понаднормованих рівнів завад;
- розробити математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола для наукового обґрунтування методу ефективної компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС;
- розробити та науково обґрунтувати метод селективної компенсації завад в рейкових колах і, як наслідок, підвищити безпеку функціонування рейкових кіл;
- провести техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

Об’єкт дослідження – електромагнітні процеси в системі «рейкове коло - контактна мережа – електрорухомий склад» і їх вплив на безпеку функціонування рейкових кіл.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення безпеки функціонування рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом.

Методи дослідження. У роботі при розробці та дослідженні узагальненої математичної моделі силових кіл ЕРС з АТП використано методи математичного моделювання на ЕОМ, імітаційного моделювання за допомогою пакета OrCAD PSpice, перетворення Лапласа, статистичного аналізу; для розробки методу селективної компенсації завад в рейкових колах використані методи математичного аналізу та синтезу, математичного моделювання, чисельні методи; в експериментальних дослідженнях використані методи фізичного моделювання, натурних випробувань, статистичного аналізу, перетворення Фур’є, цифрової обробки сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в науковому обґрунтуванні підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу.

- вперше запропоновано узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахування процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів, а також аналітичне розв’язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити частотні параметри завад від ЕРС з АТП в різних режимах його роботи та визначити найбільш несприятливі для функціонування рейкових кіл режими ведення ЕРС;

- вперше розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола, що дозволило дослідити

характер розповсюдження електромагнітних завад та науково обґрунтувати метод ефективної компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС;

- вперше розроблено наукове обґрунтування запропонованого методу селективної компенсації завад в рейкових колах, суть якого полягає у зменшенні в рейкових колах тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів рейкових кіл, що дозволило значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв та підвищити безпеку функціонування рейкових кіл;

- вдосконалено метод вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях, що відрізняється від існуючих одночасним багатоканальним вимірюванням та реєстрацією зворотних тягових струмів від електрообладнання ЕРС, фазних струмів тягового асинхронного двигуна, напруги на приймальних котушках автоматичної локомотивної сигналізації, сигналів швидкостеміра та керуючих сигналів контролера, що дало можливість всебічно проаналізувати виявлені понаднормовані електромагнітні завади, які генеруються обладнанням ЕРС та причини їх виникнення.

Практичне значення одержаних результатів. Здобуті в дисертації наукові результати дозволили розробити метод зниження електромагнітного впливу контактної мережі на рейкові кола та забезпечити їх електромагнітну сумісність з електрорухомим складом з асинхронним тяговим приводом, що дозволило підтвердити можливість експлуатації сучасних перспективних локомотивів з АТП на залізницях України.

Вдосконалено метод вимірювання електромагнітних завад нових типів ЕРС при їх випробуваннях, який може бути використаний при сертифікаційних випробувань ЕРС з АТП на електромагнітну сумісність з пристроями автоматики.

Основні наукові результати дисертації передані для впровадження у Шосту дистанцію сигналізації та зв'язку Придніпровської залізниці та в П'яту дистанцію сигналізації та зв'язку Одеської залізниці, а також використовуються у навчальному процесі ДНУЗТ на кафедрі «Автоматика, телемеханіка та зв'язок».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в дисертаційній роботі, отримані автором особисто або безпосередньо з його участю.

В роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належить наступне: створення математичної моделі і отримання її характеристик [30]; наукове обґрунтування реалізації пропонованого методу захисту РК [116], [82]; створення математичної моделі розповсюдження зворотного тягового струму та потенціалу в рейках на ділянках з електротягою змінного струму та її комп'ютерна реалізація [119]; проведення вимірів та аналіз отриманих даних [49]; отримання математичних моделей, обробка результатів дослідження [123], проведення випробувань, аналіз результатів, створення математичних моделей [118, 121]. Роботи [117], [120], [122] - [128] написані без співавторів, самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися та були схвалені на: II-й міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2009, м. Місхор); 69-й міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” (2009, м. Дніпропетровськ); III міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2010, м. Дніпропетровськ), IV міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті” (2011, смт. Чинадієво); Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту” (2014, м. Дніпропетровськ). В повному обсязі робота доповідалась і була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі в ДНУЗТ 19 червня 2015 року.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць: 8 наукових статей, з них 6 – у наукових журналах і збірниках наукових праць, рекомендованих ВАК України за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту, 1 патент на винахід, 7 – у матеріалах та тезах міжнародних конференцій.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ УМОВ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ

1.1. Проблема електромагнітної сумісності залізничної автоматики з системами тягового електропостачання та підхід до її дослідження

Відповідно до визначення Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), а також згідно з Міждержавною Радою із стандартизації, метрології і сертифікації та ДСТУ 4151-2003 під електромагнітною сумісністю розуміється здатність технічного засобу функціонувати із заданою якістю в заданій електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних перешкод іншим технічним засобам [40].

Будь-яке електричне коло за наявності в ньому змінної напруги і струму створює в навколишньому середовищі змінне електромагнітне поле і внаслідок цього стає джерелом сторонньої напруги і струмів індукції в колах, що знаходяться в цьому середовищі.

Ступінь впливу залежить від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній. Коло вважається симетричним, якщо його проводи мають однакові первинні (активний опір, індуктивність, ємність між проводами і відносно землі, провідність ізоляції) і вторинні параметри (хвильовий опір і коефіцієнт розповсюдження хвилі). Струми і напруги в усіх проводах такого кола однакові по величині і протилежні по фазі. В цьому випадку векторна сума струмів і напруги всіх проводів кола дорівнює нулю. Таке коло створює мінімальний вплив на суміжні. Але оскільки абсолютно однаковими параметрами проводи кола не володіють, то практично всі електричні кола є повністю або частково несиметричними.

Якщо залишкова напруга (векторна сума напруги всіх проводів) ліній дорівнює робочій напрузі і струм в землі дорівнює робочому струму, то така лінія є несиметричною. До них відносяться: тягова мережа електричних залізниць; лінії передачі однофазного струму з використанням землі як зворотнього проводу; лінії, що працюють за системою «два дроти – рейка».

Найбільший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії, оскільки напруженість електромагнітного поля біля такої

лінії буде максимальною, тоді як напруженість електромагнітного поля біля симетричної лінії буде мінімальною [12, 70, 143].

Значний електромагнітний вплив створюють мережі з високим рівнем передачі електроенергії на лінії з меншим рівнем передачі, наприклад, тягова мережа електричних залізниць або – на лінії зв'язку, рейкові кола, низьковольтні електричні мережі і ін. Зворотний вплив ліній низького рівня передачі електроенергії на мережі з високим рівнем передачі зазвичай невеликий, і його практично можна не враховувати [85, 118, 120].

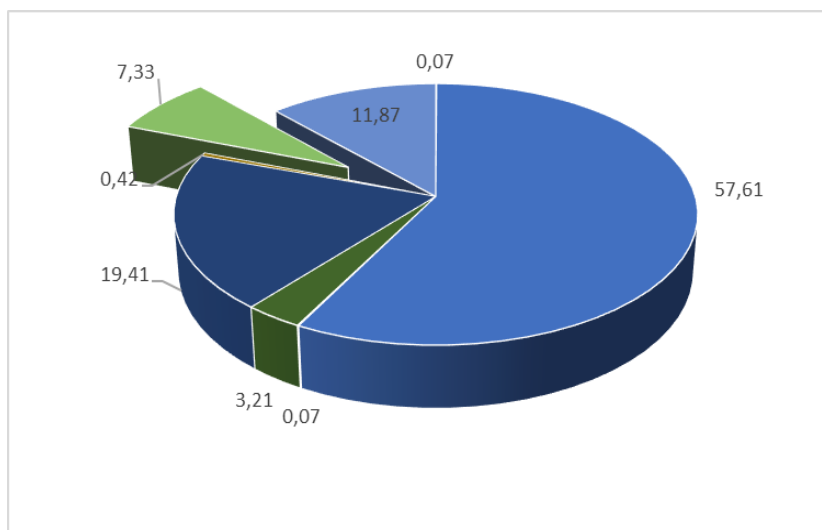
На електрифікованих залізницях рейкові кола окрім своїх безпосередніх призначень виконують функцію каналізації зворотного тягового струму, гармонічні складові якого можуть потрапляти у смугу сигнальних частот, створюючи цим заважаючий або небезпечний вплив. Таким чином тягова мережа створює гальванічний (або кондуктивний) вплив на рейкові кола та лінії, робочі заземлення яких знаходяться у сфері протікання блукаючих струмів, а також на заземлені споруди і комунікації.

Магнітний вплив системи електропостачання полягає у виникненні повздовжньої ЕРС в суміжній лінії, що індукується магнітним полем, яке створюється струмом контактної мережі. Повздовжня ЕРС, при розподілі уздовж лінії, створює в ній напругу відносно землі, що змінюється по довжині лінії, а також викликає в ній струм, який замикається через розподілену ємність лінії відносно землі. До того ж у двопровідних лініях повздовжні ЕРС, індуковані в кожному дроті, створюють в кінці лінії неоднакову напругу кожного дроту відносно землі унаслідок подовжньої і поперечної асиметрії ліній (наприклад: неоднакові опори рейок, викликаний обривом стикових з'єднувачів, неоднаковий опір ізоляції уздовж лінії). В результаті цього з'являється струм асиметрії. При струмі асиметрії більше 12 А перенапруження на живлячих кінцях РЦ досягають 600 В і вище. Подібні перенапруження з'являються також на приймальних кінцях РК, що супроводжується різким зростанням змінного струму, який тривало (іноді декілька годин) протікає по різних елементах РК (ДТ, колійні трансформатори, резистори, вхідні

трансформатори фільтрів ФП та ін.). Ще до спрацьовування автоматичного вимикача АВМ-1 ці елементи можуть перегріватися і виходити з ладу [42, 88].

Наведені струми і напруга в схильних до впливу лініях можуть досягати величин, що представляють небезпеку для нормальної роботи і цілісності апаратури цієї лінії, а також для здоров'я і життя людей, обслуговуючих цю лінію. У такому разі впливи називають небезпечними [113]. Якщо індуковані в колі напруги і струми приводять до спотворення корисних електричних сигналів, що передаються по ній, погіршують нормальну роботу кола, то такі впливи називають заважаючими [40, 42, 74].

Результати аналізу статистики відмов в системах автоблокування та електричної централізації по службі Ш за причинами за останні п'ять років приведені у діаграмі на рис. 1.1. З'ясовано, що проблеми електромагнітної сумісності не виносяться як окремий пункт причин відмов пристроїв автоматики, проте результати аналізу вітчизняних та закордонних наукових публікацій свідчать, що більша частина відмов, віднесених до категорії «Причина не виявлена» насправді є відмовами з причин електромагнітної сумісності. Таким чином, на долю відмов стосовно проблеми електромагнітної сумісності припадає в середньому 7,33 % (на окремих ділянках до 10,5 %) відмов апаратури автоматики, зокрема РК. Також зазначено, що цей показник збільшився в останні роки на ділянках з рухом ЕРС з АТП.



57,61 – порушення технології виконання робіт; 19,41 – фізичне старіння приладів (пристроїв); 11,87 – інші; 7,33 – причина не виявлена; 3,21 – неякісний ремонт та перевірка приладів у РТД; 0,42 – схемний недолік; 0,07 – порушення термінів заміни приладів; 0,07 – стихійні лиха (ожеледиця, повінь та ін.)

Рисунок 1.1 – Діаграма розподілу відмов по службі Ш

Отже проблема електромагнітної сумісності є актуальною для залізниць України в умовах розвитку швидкісного руху, а для впровадження в експлуатацію нових типів ЕРС з АТП необхідно проведення досліджень електромагнітних процесів в комплексній моделі «контактна мережа - тягова підстанція - електрорухомий склад - рейкове коло - земля» та розробка способів захисту апаратури СЦБ від завад з боку КМ з ЕРС для забезпечення їх електромагнітної сумісності.

У підсумку можна зробити висновок що, при обґрунтуванні електромагнітної сумісності слід враховувати наступні взаємовпливаючі чинники: несиметрію і несинусоїдальність трифазної живлячої напруги, несиметрію ліній схильних до впливу, значний рівень реактивної енергії, споживаної тяговими навантаженнями з живлячої електросистеми, якість випрямленої напруги, перенапруження, рівні наведеної напруги і струмів індукції в суміжних системах.

1.2. Особливості електропостачання електрифікованих залізниць

Електрифіковані залізниці є одним з найбільших споживачів електроенергії. Електропостачання електрифікованих залізниць здійснюється через тягові підстанції (ТП). Склад і пристрій ТП залежить від системи (по роду струму і напруги) електричної тяги, вживаної на залізниці. При новому будівництві застосовують більш перспективну систему електропостачання змінного струму. Контактна мережа (КМ) електрифікованої залізниці змінного струму є потужним джерелом електромагнітних перешкод і створює проблеми сумісності з суміжними лініями різного призначення, що призводить до появи значної наведеної напруги [5, 11, 12, 23, 44, 55, 58, 86, 94, 118].

Насамперед розглянемо принцип побудови системи тягового електропостачання. Це є складна комунікаційна система, яка складається з наступних основних елементів: зовнішнє електропостачання; тягові підстанції (ТП); фідера, що живлять і відсмоктують; тягова мережа (ТМ) і зворотна тягова (рейкова) мережа (ЗТМ).

Від ТП (рис. 1.2) через ТМ, що включає контактну мережу (КМ), рейкові

кола (РК), живлячі і відсмоктуючі лінії (фідери) і ряд інших пристроїв і ліній, живиться електрорухомий склад (ЕРС). Довжини ВЛ невеликі і складають в середньому 20-40 км. На тягові підстанції, як правило, встановлюються силові трифазні трансформатори, потужністю 25-40 МВА [5, 16, 102].

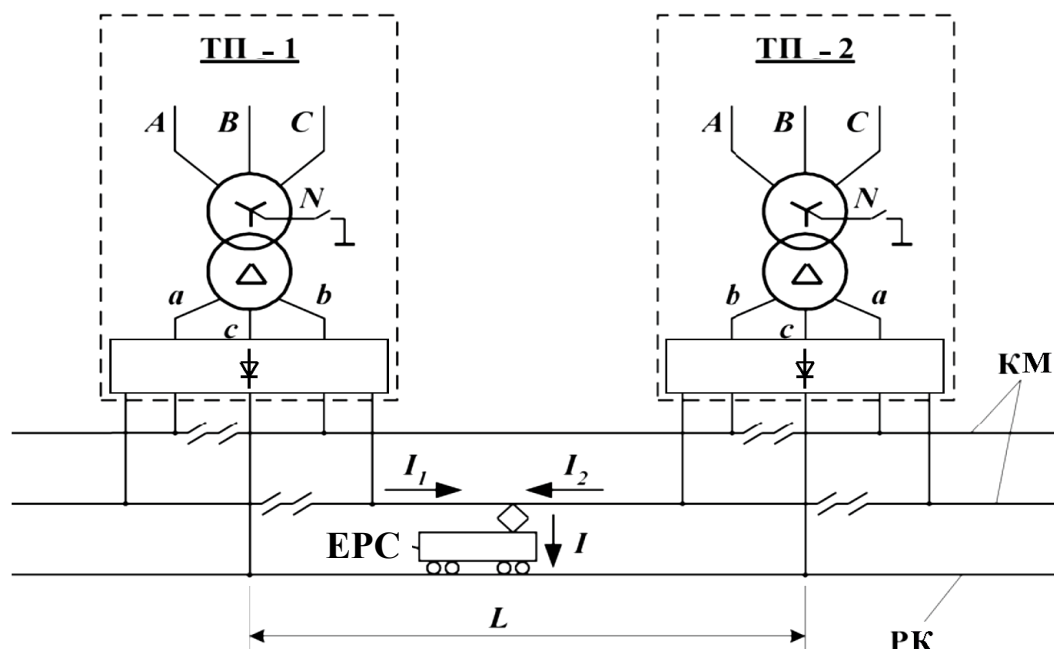


Рисунок 1.2 – Спрощена схема двоколіїної ділянки залізниці при її двосторонньому живленні

Навантаження тягової підстанції є двофазним (рис.1.2): один фазний провід трансформатора на стороні 27,5 кВ (тут – фаза «с») приєднується до рейкової колії, інші дві фази («а» і «б») через вимикачі приєднуються до КП. Таким чином, ЕРС живиться лінійною напругою U_{ac} і U_{bc} , що знімається з трансформатора. Напруга U_{ac} і U_{bc} визначається напругою U_{AN} і U_{CN} на високій стороні трансформатора. Фази «А» і «С» є навантаженими, а фаза «В» виявляється не навантаженою. Отже ТП має несиметричне навантаження [70].

У випадку ТП постійного струму виходи трансформаторів підключають до схеми випрямлення, яка побудована на силових, або групових напівпровідникових елементах за мостовою, 12-ти, або 24-х пульсною схемою. Випрямлена напруга фільтрується із застосуванням смугових фільтрів на базі реактивних елементів. Після фільтрації провід з додатнім потенціалом підключається до контактного проводу, а з від'ємним – на рейкову лінію [70].

Контактна мережа (КМ), у найпростішому випадку, включає в себе несучий трос та контактний провід. Несучий трос допомагає забезпечити рівномірне підвішування контактного проводу без провисань. По всій довжині системи електропостачання контактний провід та несучий трос з'єднуються паралельно за допомогою струн, а несучий трос у свою чергу через ізолятор кріпиться до опори контактної мережі [70, 102].

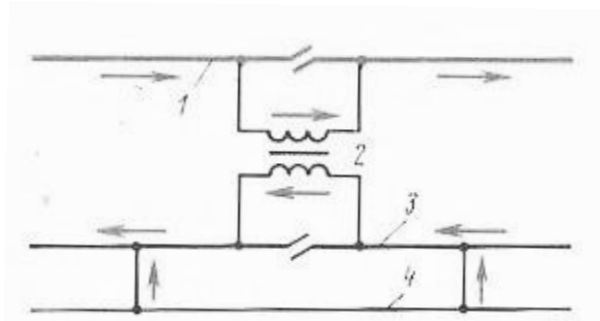
Основним елементом зворотної тягової мережі (ЗТМ) є рейкові лінії. Водночас рейкові лінії використовуються для побудови рейкових кіл. Рейкові кола є основним колійним датчиком, контролюючим положення поїзда (зайнятість/вільність блок-участків), цілісність рейкових ниток, а також виконують функції каналу передачі сигнальної частоти та коду автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) від колійних пристроїв на локомотив. Таким чином, рейкові кола є первинним елементом, що безпосередньо визначає безпеку руху поїздів [7, 25]. Тому електромагнітні перешкоди з боку системи тягового електропостачання безпосередньо впливають на роботу рейкових кіл.

Окрім рейкових ліній до складу зворотної тягової мережі також треба віднести землю, по якій частина зворотного тягового струму повертається на тягові підстанції в обхід рейкових ліній. Оскільки ЗТМ має зв'язок із землею через опір баласту, то виникає ряд проблем, пов'язаних з блукаючими струмами і захистом від електромагнітного впливу.

1.2.1. Застосування системи з відсмоктувальними трансформаторами

Відсмоктуючі трансформатори (ВТ) застосовують на деяких ділянках, електрифікованих за системою змінного струму, щоб зменшити вплив струмів контактної мережі на лінії СЦБ і зв'язку [7, 12, 70]. Таку назву трансформатори отримали тому, що вони як би відсмоктують струм із землі і повертають його в рейки або в спеціальний (зворотний) провід, що підвішується на опорах КМ. Застосування зворотного проводу збільшує провідність рейкової лінії.

ВТ виконують двообмотковими, з коефіцієнтом трансформації близький до одиниці. Первинну обмотку ВТ включають у розрив контактної мережі, а вторинну - у розрив зворотного проводу, з'єднаного з рейками або підключають послідовно до рейок в районі ізолюючих стиків.



1- контактна мережа, 2 - ВТ, 3 - зворотний провід, 4 - рейки

Рисунк 1.3 - Включення ВТ зі зворотним проводом

Струм контактної мережі, протікаючи по первинній обмотці, індукуює у вторинній обмотці протилежно спрямований струм. Завдяки цьому струм, що виникає в зворотному проводі (або в рейках), індукуює в схильних до впливу лініях струм протилежного знаку і тим самим результуючий вплив знижується. При включенні вторинної обмотки в рейки струм рейок значно зростає що призводить до збільшення їх захисної дії [79].

ВТ створюють таку різницю потенціалів між рейками і землею, яка суттєво (на практиці на 85-90%) зменшує струми, що протікають в землі. Таким чином навантаження тягових підстанцій стає більш симетричним, внаслідок чого індуктивне вплив такої системи провідників на лінії СЦБ, зв'язку та інші електричні комунікації значно знижується. [80]

Чим частіше встановлені ВТ, тим сильніше ефект екранування і тим більше знижується магнітний вплив на суміжні лінії. Наявність зворотного проводу, з'єднаного з рейками в багатьох точках, сприяє досягненню необхідного екрануючого ефекту при меншому числі ВТ [79, 80]. Зазвичай, ВТ встановлюють через 4 - 5 км, а зворотний провід для зменшення індуктивного опору виконують з двох проводів.

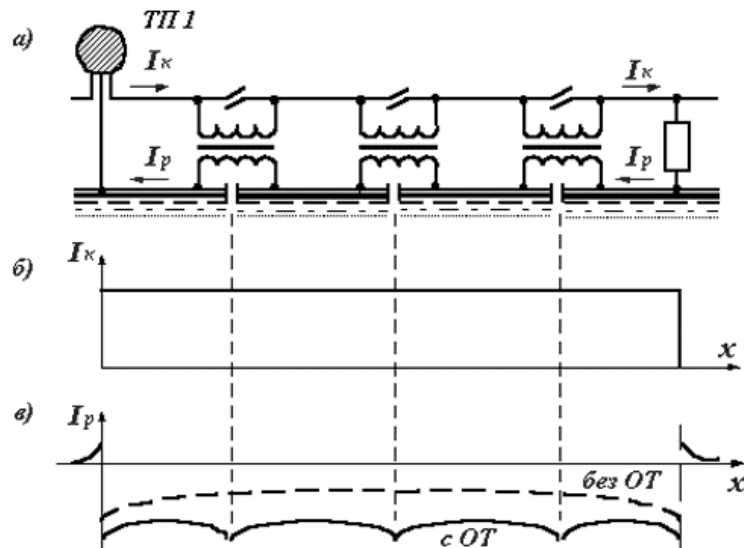


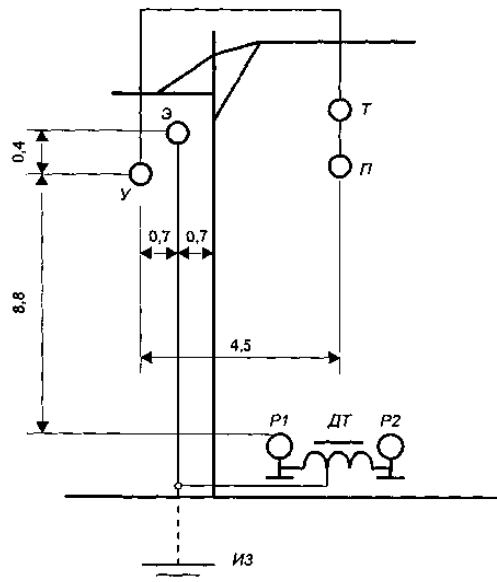
Рисунок 1.4 - Схема включення ВТ без зворотного проводу (а) та діаграми струмів в проводах системи (б)

Однак в місці включення кожного ВТ необхідно влаштовувати електричне розділення КМ, виконувати ізолююче сполучення анкерних ділянок. Це пов'язано з додатковими витратами, а крім того, призводить до зниження надійності контактної мережі і ускладнення її взаємодії з струмоприймачами ЕРС.

1.2.2. Застосування системи з екрануючим та підсилюючим проводами

Електротягова мережа з екрануючим та підсилюючим проводами (ЕПП) була розроблена в РГУПС спільно з ВНІЖТом і МПТом в кінці 70-х років. Застосування системи з ЕПП знижує втрати електроенергії в КМ, зменшує електромагнітний вплив на суміжні споруди, лінії СЦБ і зв'язку. Використання ТМ з ЕПП дозволяє відмовитися від застосування ВТ і усунути тим самим ряд незручностей і проблем, пов'язаних з особливостями їх експлуатації [16, 17].

ТМ містить підсилюючий провід (ПП) і екранувальний провід (ЕП). Ці проводи на обох коліях підвішуються до траверс з польової сторони опор [16, 17]. Ближче до опори на одному ізоляторі монтується зворотний провід, потім на мінімальній допустимій за умовами ізоляції відстані на гірлянді з трьох або чотирьох ізоляторів - підсилюючий провід (рис. 1.5).



П- посилюючий провід; Е - екранувальний (зворотний) провід; Т- несучий трос; К - контактний провід; P1, P2 - рейки; ДТ - колійний дросель-трансформатор; ИЗ - індивідуальний заземлювач

Рисунок 1.5 - Розташування проводів на опорі

При цьому повний еквівалентний опір ТМ знижується приблизно в 1,8-2 рази (табл.1.1), відповідно знижуються втрати напруги і енергії [16, 17, 102].

Таблица 1.1 - Опір тягової мережі

Тип підвіски	r , Ом/км	x , Ом/км	z' , Ом/км
ПБСМ-95 + МФ-100	0,23	0,47	0,466
М-120 + МФ-100	0,16	0,43	0,386
ПБСМ-95 + МФ-100 + А-185 + эА-185	0,12	0,25	0,246
М-95 + МФ-100 + А-185 + эА-185	0,11	0,23	0,224

Крім того, низький опір такої мережі дозволяє при новому будівництві істотно збільшувати відстань між ТП, а як наслідок, зменшувати їх число. Це робить її конкурентоспроможною при електрифікації залізничних магістралей з вантажними та пасажирськими перевезеннями.

Наявність заземленого ЕП, розташованого поблизу контактної підвіски, і ПП призводить до зниження напруженості електричного поля в навколишньому просторі, а отже, до зменшення електромагнітних впливів на суміжні лінії і споруди. Ступінь зниження цих впливів залежить від взаємного

розташування проводів ТМ та суміжної лінії. Зниження магнітних впливів ТМ з ЕУП на суміжні лінії можна оцінити коефіцієнтом екрануючого дії [16, 17]:

$$\lambda \cong 1 - \frac{I_E}{I_T}.$$

Для тягової мережі з ЕПП звичайної конструкції $\lambda = 0,55 - 0,6$.

Для забезпечення найкращих умов роботи ТМ з ЕПП доцільно мати якомога більше точок заземлення екрануючого проводу Е. Це пояснюється тим, що при проході поїзда по ділянці між сусідніми точками заземлення наведені струми в проводах суміжних ліній збільшуються, в результаті чого на цій ділянці техніко економічні показники тягової мережі з ЕПП погіршуються. Існує два різні способи заземлення проводу Е.

Перший спосіб полягає в заземненні ЕП на рейкову лінію, підключаючи його за допомогою заземлюючих спусків до нульових точках існуючих дросель-трансформаторів. Щоб виключити шунтування екрануючим проводом рейкового кола автоблокування при обриві однієї з рейкових ниток, його приєднують до кожного третього дросель-трансформатора.

Альтернативний спосіб підключення ЕП може бути реалізований за допомогою індивідуальних заземлювачів, змонтованих поблизу опори КМ. Заземлювач з ЕП з'єднують за допомогою заземлюючого спуску, при цьому відстань між точками заземлення можна зменшити до 200 м (біля кожної четвертої опори КМ). ЕП при такому способі заземлення не з'єднується з рейками, що спрощує обслуговування рейкових кіл.

Експерименти на діючих ділянках з ЕПП підтверджують ефект зниження впливів на суміжні лінії, причому ступінь цього зниження на двоколійних ділянках на 20 - 25% вище внаслідок наявності ЕП на обох коліях [16, 17]. Крім того застосування ЕПП зменшується небезпека іскроутворення в трубопроводах з горючими та легкозаймистими речовинами, прокладених поблизу електрифікованої ділянки. Всі переваги системи електропостачання з ЕПП були враховані при електрифікації залізничної ділянки Тернопіль – Красне, діючий дільниці Укрзалізниці . Враховуючи вище сказане,

застосування тягової мережі з ЕПП є перспективним на високошвидкісних залізницях і ділянках з інтенсивним або великоваговим рухом.

1.3. Сучасний електрорухомий склад з асинхронним тяговим приводом

Тягові системи електричного рухомого складу великої потужності досягли в даний час високого технічного рівня. Не дивлячись на те, що трифазний тяговий привід почав використовуватися порівняно давно, найбільший розвиток він отримав з появою тиристорів, що замикалися, а потім і транзисторів IGBT [1-3, 91]. Перетворювачі стали легшими і компактнішими, зменшилися їх втрати потужності, підвищилася тактова частота, знизилася ціна. Системи на базі сучасних компонентів силової електроніки зайняли провідне місце в перетворювальній техніці, яка відноситься до діапазону потужностей, вимірюваних в мегаватах. В даний час до систем тягового приводу висувають більш високі вимоги.

На сьогоднішній день до систем тягового приводу висувають більш високі вимоги, тому силові модулі побудовані на IGBT транзисторах повністю витиснули перетворювачі на тиристорах [3, 64, 84, 91, 96]. Отже далі мова піде про ЕРС, що використовує статичні перетворювачі на базі транзисторів IGBT.

1.3.1 Структура тягового приводу з асинхронним двигуном

Класична система асинхронного трифазного приводу базується на використанні ідеального для тяги безколекторного трифазного двигуна, що живиться схемою, що складається з інвертора, проміжної ланки постійної напруги і мережевого чотирьохквadrантного регулятора, що забезпечує можливість рекуперативного гальмування і не запобігає негативному впливу на живлячу мережу [46, 91, 115].

На теперішній час найбільш оптимальним для використання у перетворювачах напівпровідниковим елементом є IGBT транзистор. Він має значні переваги у порівнянні з тиристорами і тому отримав широке застосування у конструкціях асинхронних тягових приводів [63, 73, 84, 130,

141]. Виходячи з цього далі будуть описані схеми з використанням тільки IGBT транзисторів.

Розглянувши існуючі сучасні моделі локомотивів та електропоїздів з АТП можна узагальнити структуру силових кіл ЕРС такого типу (рис. 1.6) [91, 35]. На даний час найбільше поширення отримала двохступенева структура перетворювальної установки для живлення АТП з явно вираженою ланкою постійного струму. З приведених можливих варіантів побудови силових кіл статичних перетворювачів найбільш часто використовують схеми з 4q-S перетворювачами на вході, навіть при живленні від мережі постійного струму. Це дозволяє підтримувати незмінним значення напруги проміжної ланки постійного струму, забезпечувати коефіцієнт потужності близьким одиниці та підвищити загальний ККД.

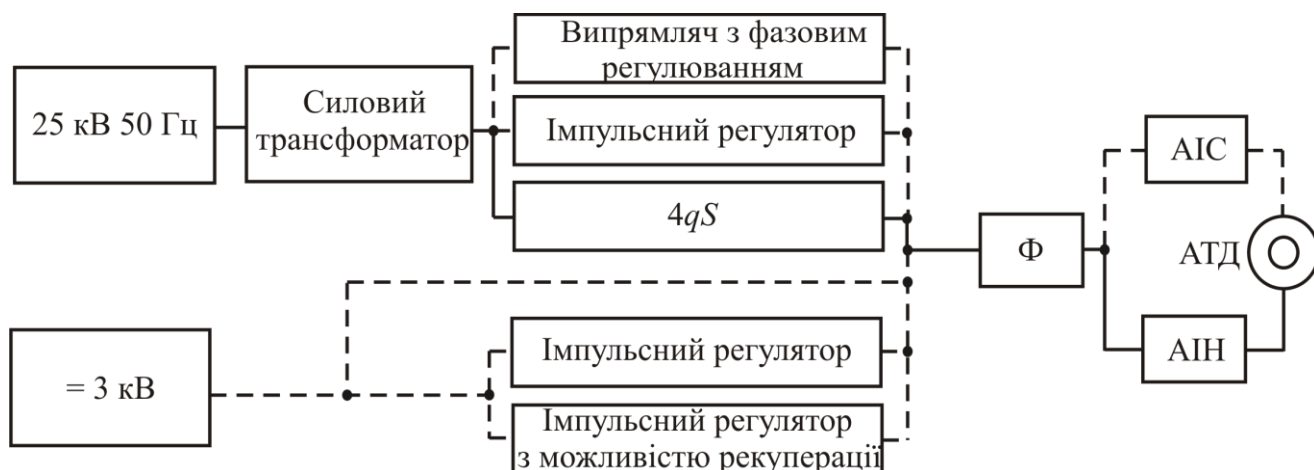


Рисунок 1.6 - Структурні схеми силових кіл ЕРС з АТП

Також значні переваги у використанні отримали автономні інвертори напруги (АІН). На сучасному ЕРС в його функції входить також регулювання величини вхідної напруги. Він перетворює постійну напругу, що подається на його вхід, у трьохфазну змінну напругу частоти та величини, що регулюються. По мірі вдосконалення керованої напівпровідникової техніки інвертори струму втрачають свої первинні переваги, основними з яких були: [1, 91]:

- менша кількість напівпровідникових приладів (відсутні діоди зворотного струму);
- простіша схема керування інвертором;
- можливість використання не швидкодіючих ключів.

Структурна схема силових кіл ЕРС з АТП складається з наступних основних елементів: мережений фільтр, вхідний чотирьохквadrантний регулятор (4qS), проміжна ланка постійної напруги (Z), автономний інвертор (PWR), асинхронний тяговий двигун (ASM) та система керування.

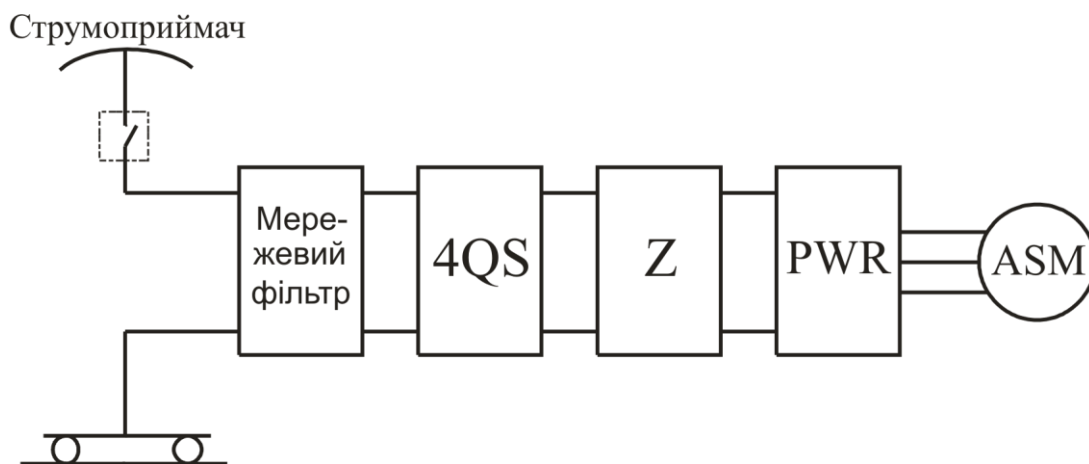


Рисунок 1.7 - Структурна схема силових кіл ЕРС з АТП

Через мережений фільтр, задачею якого є зниження до задовільного рівня струмів вищих гармонік контактної мережі та зворотних впливів перетворювача на мережу, відбувається живлення чотирьохквadrантного регулятора (4q-S) від контактної мережі змінного струму. Чотирьохквadrантний регулятор працює як керований випрямляч, на його виході отримуємо постійну напругу, рівень якої залежить від потужності тягового приводу. Ця постійна напруга з проміжної ланки потрапляє на вхід автономного інвертора (PWR), який перетворює її у трифазну змінну напругу регульованої частоти та величини. Керування роботою інвертора та вхідного регулятора відбувається на базі мікропроцесорів [130, 150]. Схема керування виконує всі необхідні функції по перемикачню транзисторів, діагностиці схеми, її захисту та відновленню нормального режиму роботи при збоях. Завдяки фазовому керуванню роботою загальний рівень гармонік суттєво знижується, чим забезпечується майже синусоїдальна форма кривої струму. Частота сформованої на виході інвертора трифазної напруги визначає швидкість обертання асинхронного двигуна [1-3, 91].

Розвиток технології трифазного тягового приводу дозволив створити універсальні електровози, такі, як серії 120, що поєднують силу тяги

вантажного електровоза і конструкційну швидкість пасажирського електровоза. В даний час компанії-виробники локомотивів можуть поставляти залізницям електровози різних серій, що задовольняють потребам різного роду перевезень. До їх числа відносяться електровози 152 і 182 сімейства EuroSprinter [60].

Електровози цих серій є універсальними локомотивами і при використанні у вантажному русі мають при власній масі 87 т силу тяги при рушанні 300 кН, яка відповідає практично максимальному використанню зчеплення і далі не може бути збільшена навіть при індивідуальному регулюванні тягового приводу. З іншого боку аналіз показав, що з економічної точки зору при невеликих потужностях локомотива оптимально здійснювати управління тяговим приводом з регулюванням двигуна кожної вісі, що й лягло в основу конструктивної концепції двосистемних електровозів серії 185 і 189 (див. рис. 1.8). Схема живлення кожного асинхронного тягового двигуна (АТД)

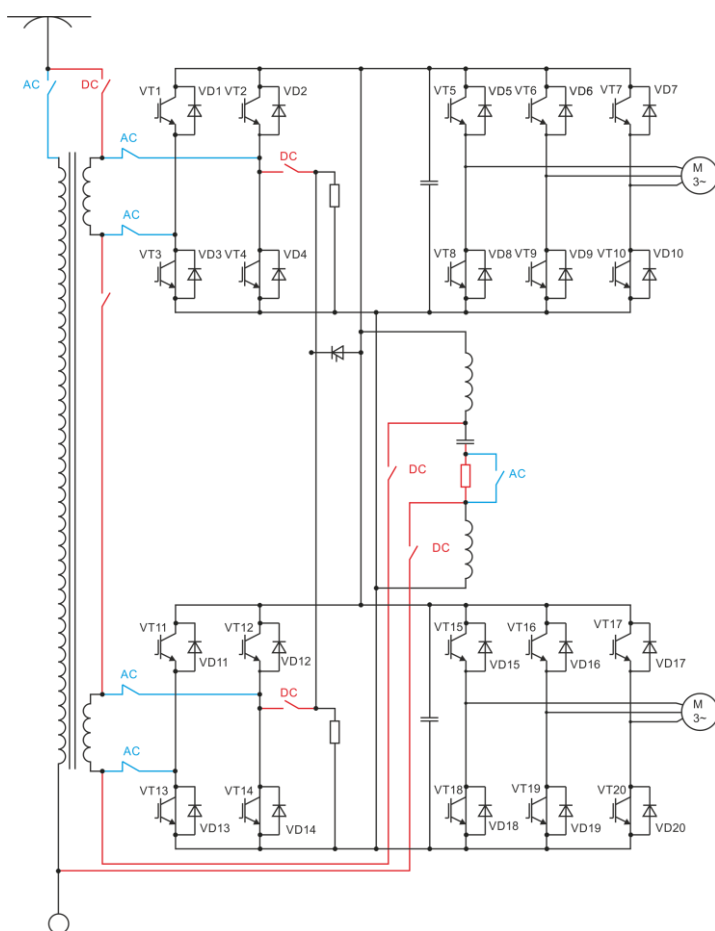


Рисунок 1.8 - Принципова схема силових кіл електровоза серії 189

складається з двох чотирьохквadrантних випрямлячів, які отримують живлення від своєї обмотки трансформатора і перетворюють змінний струм в постійний. Після ланки постійного струму встановлюється інвертор струму, який перетворює постійний струм в трифазний з регулюванням величини і частоти для тягових електродвигунів [133].

DB 185 та 189 являють собою чотиривісні багатосистемні електровози німецьких залізниць, які є складовою частиною нової програми Deutsche Bahn (DB) з

випуску та експлуатації електровозів з асинхронними двигунами. За родом діяльності ці локомотиви позиціонуються як універсальні, тобто можуть використовуватися для водіння як пасажирських, так і вантажних поїздів.

Електровози 185 і 189 серій реалізовані з можливістю живитися з контактних мереж різних систем. Таке виконання необхідно з огляду на те, що вони призначені для далеких міждержавних вантажних перевезень з виходом на лінії залізниць, електрифікованих за іншою системою. Також окрім додаткових струмоприймачів, ці електровози оснащуються апаратурою систем СЦБ, прийнятих у зазначених країнах. [130, 133]

У 2004 р. компанія-оператор вантажних перевезень Федеральних залізниць Швейцарії SBB Cargo по завершенні всіх необхідних процедур допуску отримала 12 багатосистемних електровозів серії Re 484 розроблених компанією Bombardier Transportation. Нові електровози Re 484 разом з Re 482 утворили основний тяговий парк SBB Cargo, який здійснює перевезення на напрямку Німеччина - Швейцарія - Італія.

Електровоз Re 484 відноситься до сімейства локомотивів TRAXX. Його типове позначення - TRAXX F140 MS. Літери MS означають, що електровоз є багатосистемний, тобто призначений для ліній як змінного, так і постійного струму. Тягові перетворювачі електровоза TRAXX MS отримують живлення від двох вторинних обмоток тягового трансформатора (рис. 1.9). Тягові двигуни багатосистемного електровоза працюють в режимі індивідуального регулювання. Дві вторинні обмотки трансформатора локомотива, що працює на лінії постійного струму напругою 3 кВ, використовуються як дроселі вхідних фільтрів. Інтеграція компонентів зробила великий внесок у зниження загальної маси локомотива. [151]

При переході зі змінного струму на постійний схема перебудовується таким чином, що для вхідного імпульсного регулятора не потрібно додаткових силових вентилів. Важливою перевагою такого схемного рішення є те, що всі чотири системи струму працюють при одній напрузі проміжної ланки постійного струму, номінал якої може регулюватися до 2800 В [152].

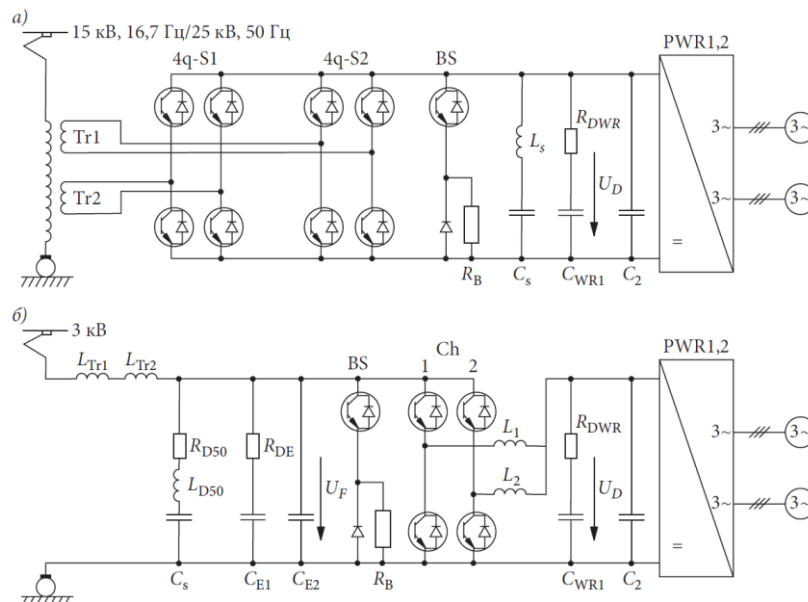


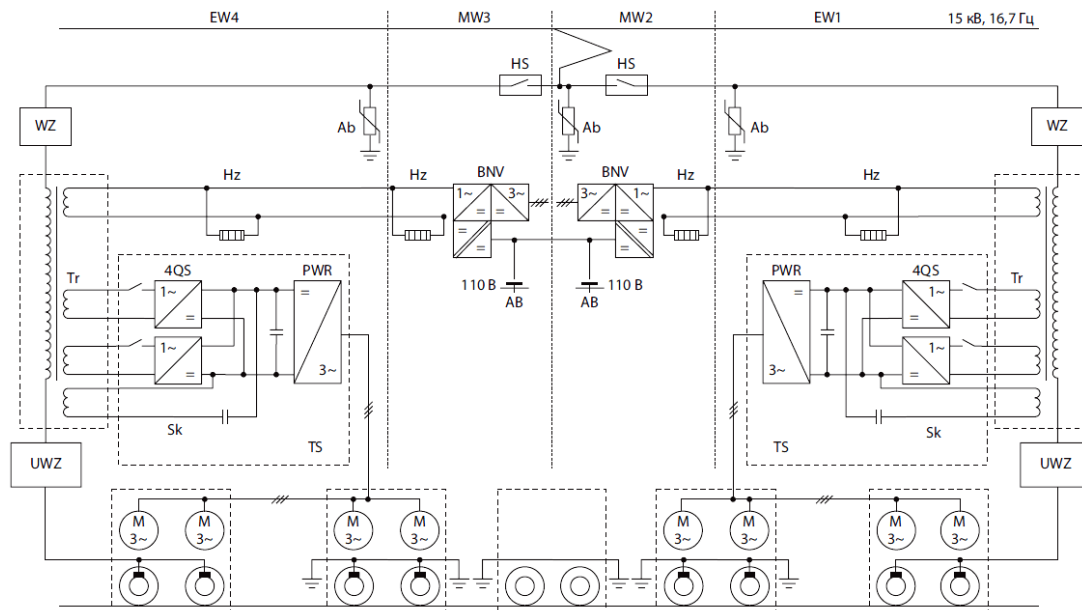
Рисунок 1.9 - Схема тягових кіл електровоза Re 484 для систем змінного (а) і постійного (б) струму

Схема з регульованою ланкою постійного струму є більш ефективною в порівнянні з альтернативною, де вихідний трифазний інвертор отримує живлення безпосередньо від контактної мережі постійного струму. Під контактною мережею з напругою 1,5 кВ постійного струму імпульсний регулятор працює як підвищуючий перетворювач, встановлюючи напругу проміжної ланки рівною 2800 В. ККД такої схеми вище, ніж у варіанті з безпосереднім перетворенням напруги контактної мережі.

Консорціум у складі компаній Alstom і Bombardier в 2007 році поставила залізницях Німеччини нові електропоїзди серії 422, що призначені для обслуговування приміських перевезень в регіоні Північний Рейн – Вестфалія на лініях мережі S-Bahn, електрифікованих на змінному струмі. Чотирьохвагонний поїзд серії 422 являє собою нероздільну в експлуатації самостійну одиницю з ідентичним дизайном кінцевих і проміжних вагонів [136].

На Рисунок 1.10 приведена принципова схема електричної частини. Тягова електрична схема поїзда серії 422 складається з двох ідентичних кіл, кожне з яких відноситься до одного кінцевого та суміжного з ним проміжного вагона. Струмopриймач, розташований на даху проміжного вагону, подає напругу через головні вимикачі на два тягові трансформатори, розташовані в кінцевих вагонах. Кожен трансформатор має дві тягові вторинні обмотки.

Виводи обох вторинних обмоток кожного трансформатора подають напругу 900 В частотою 16,7 Гц на чотирьохквadrантні регулятори, що виробляють напругу постійного струму.



Tr1, Tr2 - головні трансформатори; KS - шиноз'єднувальний контактор; BNV1, BNV2 - системи перетворювачів живлення бортової мережі; Sh - обігрівач лобового скла; GG - перетворювач постійного / постійного струму; AB1, AB2 - акумуляторні батареї; KL - компресор системи кондиціонування повітря; VB – інші споживачі.

Рисунок 1.10 - Принципова схема силових кіл електровоза серії 422

Паралельно з'єднані виходи двох чотирьохквadrантних регуляторів разом з підключеними до них конденсаторами утворюють проміжні ланки постійного струму, від якого отримують живлення інвертори. Кожен з інверторів у свою чергу живить трифазним змінним струмом регульованої напруги і частоти чотири тягових двигуна. Чотирьохполюсних трифазні асинхронні двигуни кожного кола завжди з'єднані паралельно.

В кінці 2002 р. МПС РФ затвердив новий типаж електровозів для залізниць країни. Першими з передбачених типажем будуть розроблені пасажирські електровози постійного струму ЕП2 і змінного струму ЕП3. Їх проектування ведеться на основі досвіду, отриманого при створенні і експлуатації електровоза ЕП10 і його попередників. Передбачається, що в пасажирському русі електровози ЕП2, ЕП3, ЕП100 замінять електровози ЧС2, ЧС2Т, ЧС4, ЧС4Т, ЧС200 виробництва компанії Skoda. На даний час аналог

ЭП2 електровоз постійного струму ЭП2К в модифікації з колекторними двигунами експлуатується з 2005 року на дорогах РЖД.

На рис. 1.11 представлена блок-схема силових кіл пасажирського електровоза змінного струму ЭП3, розробка якого ведеться на основі досвіду, отриманого при створенні та експлуатації електровозів ВЛ86ф та ЭП10 [66]

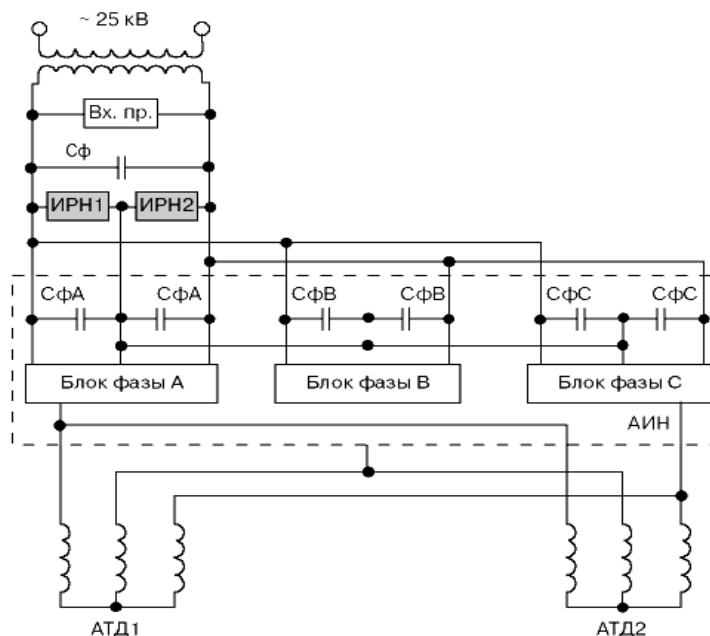


Рисунок 1.11 - Принципова схема силових кіл електровоза ЭП3

Регулювання режиму роботи тягових двигунів передбачено здійснювати за допомогою статичних перетворювачів частоти і числа фаз, що складається з чотирьохквadrантного регулятора-випрямляча, від яких живиться автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Тяговий трансформатор електровоза ЭП3 має три обмотки для живлення тягових перетворювачів, дві для живлення перетворювачів власних потреб і обмотку опалення поїзда. Кожен тяговий перетворювач живить два тягових двигуна. Електровоз має рекуперативне і реостатне гальмування. При переході з тягового режиму в режим електричного гальмування і при зворотних переходах ніяких перемикачів в силових колах не відбувається. Асинхронні тягові двигуни переводяться у генераторний режим за рахунок зниження частоти напруги на обмотці статора відносно синхронної, що відповідає фактичній швидкості руху, а інвертори переводяться в режим випрямлення. Електровоз ЭП3 буде мати уніфіковані АТД НТА-1200 з номінальною потужністю 1200 кВт [99].

Управління електровозом з АТД здійснюється за допомогою багаторівневої мікропроцесорної системи. На верхньому рівні відбувається аналіз інформації, що надходить від системи діагностики, та управління підсистемами електровозу та електровозом в цілому. Тут відпрацьовуються алгоритми режимів тяги, гальмування, підтримання швидкості, керування допоміжним приводом та ін. На другому рівні здійснюється автоматичне регулювання тягового електропривода, тут відпрацьовуються завдання від системи верхнього рівня (у відповідності з протоколом обміну) по силі тяги або гальмування. Система нижнього ієрархічного рівня використовується для безпосереднього керування тяговими перетворювачами.

1.3.2 Елементна база перетворювачів силових кіл

У конструкції перетворювачів на IGBT використовується модульний принцип. Транзистори володіють достатньою ізоляцією, у тому числі і щодо системи охолодження. У зв'язку з цим конструкція блоків перетворювачів істотно спрощується. IGBT модулі класів напруги 1700 В (полегшені поїзди місцевого сполучення з напругою мережі 750 В), 3300 В (важкі приміські поїзди, напруга контактної мережі до 1500 В) і 6500 В (потужний магістральний рухомий склад на напругу до 3,3 кВ) відповідають європейським стандартам [103]. Компанія Bombardier випускає модулі IPM класу 4500 В (напруга проміжної ланки 2,8 кВ) з інтегрованим водяним охолодженням і приладом захисту GDU [63, 130]

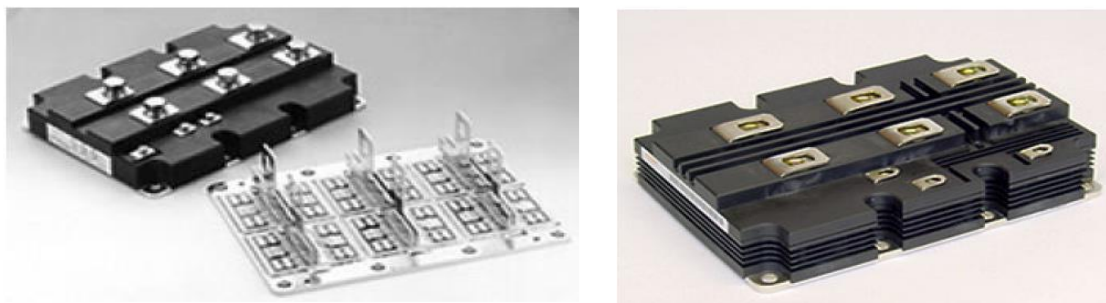


Рисунок 1.12 - Стандартні корпуси модулів на напругу 1,7 кВ (зліва) і 6,5 кВ (справа), виконаних на транзисторах IGBT

Тягові перетворювачі на базі транзисторів IGBT вигідно відрізняються двома особливостями, важливими як для залізниць, так і для виробників. Перш

за все, ці пристрої створюють потенційні можливості для зниження витрат, головним чином завдяки здешевленню збірки і підвищенню ефективності тягових систем. Друга особливість, яка сприяла швидкому впровадженню перетворювальної техніки на базі транзисторів IGBT, полягає в підвищеній надійності і експлуатаційній готовності тягових систем [84, 141].

Застосування перспективних IGBT транзисторів в тяговому перетворювачі дозволило підвищити частоту перемикання, спростити схему управління, мінімізувати завантаження мережі гармоніками і забезпечити гранично низькі втрати в обмотках трансформатора і дроселів [114]. Завдяки цьому схема тягових перетворювачів значно спрощується в порівнянні з системою на тиристорах, що замикаються.

1.3.3 Принципова схема силових кіл

На рис. 1.13 приведено типову принципову схему силових кіл локомотива з АТП при живленні від мережі змінної напруги.

Змінна напруга з контактної мережі через струмоприймач та головний вимикач електровозу потрапляє на тяговий трансформатор. Від вторинних обмоток тягового трансформатора живляться два чотирьохквадрантні регулятора 4q-S, які з'єднані паралельно. Кожний регулятор 4q-S містить 4 повністю керованих ключа на транзисторах і являє собою керований випрямляч. Наявність чотирьохквадрантного регулятора також забезпечує можливість застосування рекуперативного гальмування у будь-якій ситуації, тому що відносно тягової мережі він є автономним інвертором напруги. Як інвертор він забезпечує формування імпульсно-модульованої напруги з частотою, яка дорівнює частоті напруги в контактній мережі [2, 60, 65, 91]. Транзистор VT9 разом із резистором R_n утворюють схему скидання енергії, також цей транзистор з резистором ще називають гальмовими.

Від постійної напруги U_d проміжної ланки живиться інвертор. Він виконаний за схемою автономного інвертора напруги з застосуванням, необхідних при цьому, діодів зворотного струму, містить шість IGBT транзисторів (VT11 – VT16) з зворотним діодом у парі (VD11 – VD16) при

такому з'єднанні транзистор і діод утворюють ключ з двосторонньою провідністю. Для забезпечення нормального режиму роботи інвертора потрібен ємнісний накопичувач енергії на його вході. Цю ємність забезпечує проміжна ланка постійної напруги.

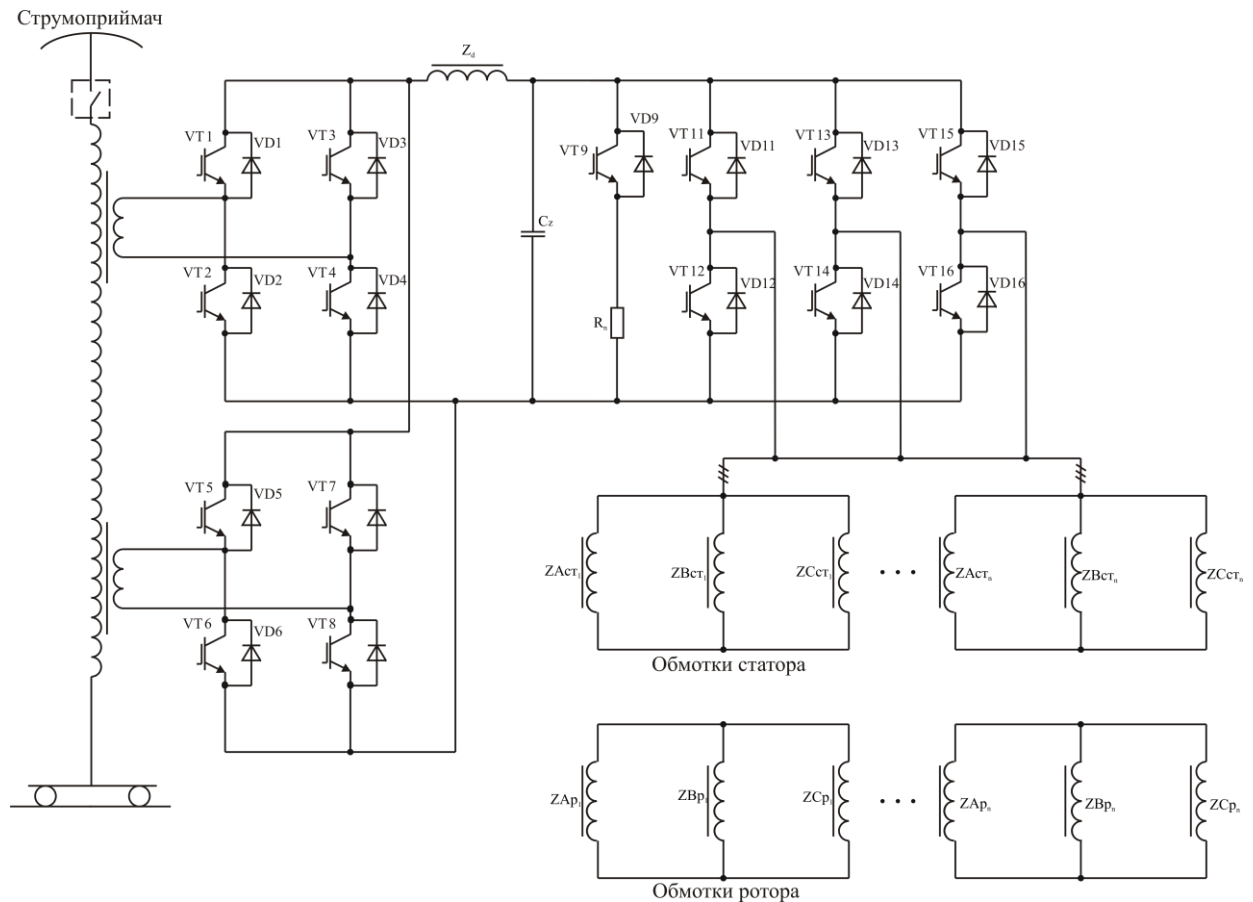


Рисунок 1.13 - Принципова схема асинхронного тягового приводу

Якби навантаження інвертора було б цілком активним, то одразу після закриття транзистору VS16 і відкриття транзистору VS15 відбулась би зміна напрямку струму у фазі С. Але опір обмоток статора містить вагомий індуктивний складову і струм в обмотці буде відставати від напруги. Тому після закриття VS16 струм фази С, на деякому інтервалі від 240° до $(240^\circ + \varphi)$, збереже попередній напрямок. За цих обставин відкритий транзистор VS5 не зможе проводити струм фази С такого напрямку. Тому вступає в роботу діод VD15, через який струм фази С тече впродовж інтервалу φ .

Такий підхід до побудови схеми асинхронного тягового приводу дозволяє створювати багатосистемний електрорухомий склад, який може живитися від будь-якої тягової мережі (постійного та змінного струму) [19, 60, 66, 91].

1.4 Постановка задач дисертаційного дослідження

В результаті проведеного дослідження виявлено, що в умовах розвитку швидкісного руху для впровадження в експлуатацію нових типів ЕРС з АТП необхідно проведення досліджень електромагнітних процесів в моделі «контактна мережа - електрорухомий склад - рейкове коло» та розробка методів захисту апаратури СЦБ від завад з боку КМ з ЕРС для забезпечення їх електромагнітної сумісності. Для цього необхідно:

- провести аналіз роботи рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом з урахуванням впливу електромагнітних завад від ЕРС;
- розробити узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахуванням процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів та на її основі комп'ютерну програму для дослідження завад від ЕРС з АТП при різних режимах роботи електрообладнання і визначити найбільш несприятливі режими ведення ЕРС для функціонування рейкових кіл;
- вдосконалити метод вимірювання електромагнітних завад від нових типів ЕРС при їх випробуваннях з одночасним багатоканальним вимірюванням параметрів завад, швидкості руху, режимів роботи електрообладнання та ін. для визначення причин появи понаднормованих рівнів завад;
- розробити математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на рейкові кола для наукового обґрунтування методу ефективної компенсації електромагнітних завад в рейкових колах від ЕРС;
- розробити та науково обґрунтувати метод селективної компенсації завад в рейкових колах і, як наслідок, підвищити безпеку функціонування рейкових кіл;
- провести техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕРС З АТП

Виходячи з розглянутих структурних та принципових схем силових кіл ЕРС з АТП та принципу дії перетворювачів можна зробити висновок, що сучасний електрорухомий склад може виступати, як потужне джерело електромагнітних завад в полосах сигнальних струмів РК та приводити до відмов апаратури автоматики.

Для підвищення безпеки функціонування пристроїв СЦБ і, як наслідок, забезпечення безпеки руху поїздів, перед введенням в експлуатацію необхідно проводити їх випробування на електромагнітну сумісність (ЕМС) з РК, АЛС, лініями телекомунікації. Результати випробувань нових типів ЕРС не завжди дають впевнені відповіді про неперевищення рівня ЕМ перешкод на лініях СЦБ та зв'язку оскільки в ході випробувань можуть бути реалізовані далеко не всі режими роботи силового обладнання та ведення локомотива.

Тому, відповідно до поставлених в дисертаційній роботі задач необхідно розробити математичну модель тягових силових кіл сучасного ЕРС з АТП для дослідження електромагнітних процесів, що виникають під час їх роботи.

2.1 Математичне моделювання електромагнітних процесів в силових колах ЕРС з АТП

На сьогоднішній день існує багато наукових робіт спрямованих на дослідження електромагнітних процесів в АТП [4, 11, 13, 32, 35, 68, 69, 72, 91, 104, 106, 107, 112, 131, 135, 140], більшість з яких спрямована на аналіз та синтез оптимальних схем керування для досягнення найкращих тягових характеристик. Моделювання більшість авторі проводить в пакеті Matlab Simulink. В роботі [11] автор пропонує описувати електромагнітні явища в силових колах за допомогою метода контурних струмів, шляхом складання та розв'язання системи інтегро-диференціальних рівнянь, такий підхід зустрічається рідко з причини своєї трудомісткості і в роботі [11] застосований тільки для схеми АІН з АТП. В схемі, а також використовується застаріла елементна база, яка потребує комутаційних та демпферних кіл.

Для отримання математичної моделі силових кіл ЕРС з АТП в дисертації пропонується використання метода контурних струмів [9, 15]. Зокрема пропонується для моделювання сучасна схема силових кіл ЕРС з АТП, аналог якої використовується на рухомих одиницях, що експлуатуються на залізницях України. Схема містить обмотку тягового трансформатора, 4q-S перетворювач, проміжну ланку постійної напруги, АІН, обмотки статора АТП. Характер зміни опору силових ключів моделюється на базі вольт-амперної характеристики реальних силових транзисторів IGBT, що апроксимована сплайнами.

Висока швидкість перемикання і високі швидкості зміни напруги і струму при комутаціях до 5 кВ / мкс призводять до серйозних проблем ЕМС. Для оцінки електромагнітного впливу силового обладнання ЕРС з IGBT транзисторами, необхідно розглянути еквівалентну схему силового транзистора. (Додаток А)

Після включення транзистора на діод подається закриваюча напруга. Однак струм через діод продовжує протікати деякий час відновлення зворотного зміщення (T_{rr}), що викликає появу спотворення струму колекторного транзистору та завади, величина якої залежить від часу T_{rr} . Врахуємо усі особливості IGBT при складанні його схеми заміщення.

Для схеми силових кіл необхідно провести наступні заміщення:

- сигнали керування ключами визначаються за діаграмою провідності;
- вважаємо, що локомотив рухається з номінальною тягою, тому VT7, VD7 та R_n не враховуємо в роботі схеми;
- ключі АІН (паралельно з'єднані транзистор IGBT та зворотний діод) заміщуються сумою активного та індуктивного опорів з урахуванням ємності колектор-емітер, що має найбільший вплив на форму струму [106];

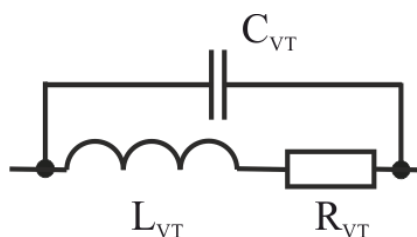


Рисунок 2.1 - Схема заміщення силового ключа

- обмотки статора замінюються сумою активного та індуктивного опорів; опори всіх фаз вважаються рівними [9, 15];



Рисунок 2.2 - Схема заміщення обмотки статора

- обмотка тягового трансформатора замінюється сумою активного та індуктивного опорів з діючою ЕРС (E_s) рівною напрузі КМ, поділеної на коефіцієнт трансформації тягового трансформатора [9, 15].



Рисунок 2.3 - Схема заміщення обмотки тягового трансформатора

Аналіз параметрів АТП. Так як моделювання асинхронного тягового двигуна виконано шляхом заміщення його обмоток активним та реактивним опорами - їх необхідно визначити розрахунком. Ці параметри залежать від геометричних розмірів двигуна, способу намотки, типу провідника, кількості секцій тощо.

Визначимо індуктивний опір обмоток. Для цього потрібно визначити індуктивний опір однієї з секцій. Якщо розміри a і r поперечного перерізу котушки малі порівняно зі сторонами b і c її середнього витка (рис.2.4), то індуктивність котушки (секції) можна визначити за формулою [50] (2.1).

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \omega^2 (b+c) \cdot \left[\ln \frac{2bc}{a+r} - \frac{c}{b+c} \ln \left(c + \sqrt{b^2 + c^2} \right) - \frac{b}{b+c} \ln \left(b + \sqrt{b^2 + c^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2\sqrt{b^2 + c^2}}{b+c} - \frac{1}{2} + 0,447 \times \frac{a+r}{b+c} \right], (2.1)$$

де w – число витків котушки, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна стала.

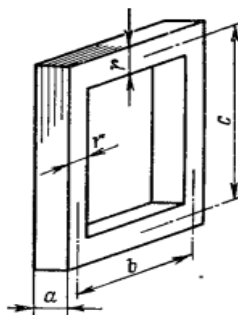


Рисунок 2.4 - Прямокутна котушка індуктивності

Для модельованого двигуна встановлені такі параметри:

$w = 9$; $r = 0,0106$; $a = 0,02016$; $b = 0,13652$; $c = 0,281$; Підставивши задані параметри у формулу (3.5),

$$L = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{3,14} 9^2 (0,13652 + 0,281) \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 0,13652 \cdot 0,281}{0,02016 + 0,0106} - \frac{0,281}{0,13652 + 0,281} \times \right. \\ \left. \times \ln \left(0,281 + \sqrt{0,13652^2 + 0,281^2} \right) - \frac{0,13652}{0,13652 + 0,281} \ln \left(0,13652 + \sqrt{0,13652^2 + 0,281^2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{2\sqrt{0,13652^2 + 0,281^2}}{0,13652 + 0,281} - \frac{1}{2} + 0,447 \times \frac{0,02016 + 0,0106}{0,13652 + 0,281} \right]$$

отримаємо значення $L = 6,123 \cdot 10^{-5}$ Гн. У проектованому двигуні одна фаза складається з 12 секцій [35, 91]. Визначимо індуктивність однієї фази обмотки, вона буде рівною

$$L_f = 12L, \quad (2.2)$$

тобто $12 \cdot 6,123 \cdot 10^{-5} = 7,348 \cdot 10^{-4}$ Гн. Так як маємо три фази, загальний індуктивний опір обмоток дорівнюватиме:

$$L_{st} = 3L_f, \quad (2.3)$$

підставивши числові значення маємо $3 \cdot 7,348 \cdot 10^{-4} = 2,204 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Активний опір секції визначимо за формулою (2.4)

$$R_s = q \frac{l_s}{S_s}, \text{ де} \quad (2.4)$$

$$l_s = 2b + 2c, \quad S_s = a \cdot r, \quad q = 0,0175 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (2.5)$$

Підставивши числові значення, отримаємо вираз:

$$R_s = 0,0175 \cdot 10^{-6} \frac{2 \cdot 0,13652 + 2 \cdot 0,281}{0,02016 \cdot 0,0106} = 1,016 \text{ Ом}.$$

Активний опір однієї фази обмотки буде рівний:

$$R_f = 12R_s, \quad R_f = 12 \cdot 1,016 \cdot 10^{-4} = 1,219 \text{ Ом}, \quad (2.6)$$

а загальний активний опір обмотки буде рівним:

$$R_{st} = 3R_f, \quad R_{st} = 3 \cdot 1,219 = 3,657 \text{ Ом}. \quad (2.7)$$

Отримані параметри схеми заміщення фаз двигуна використаємо при моделюванні електромагнітних процесів в силових колах ЕРС з АТП.

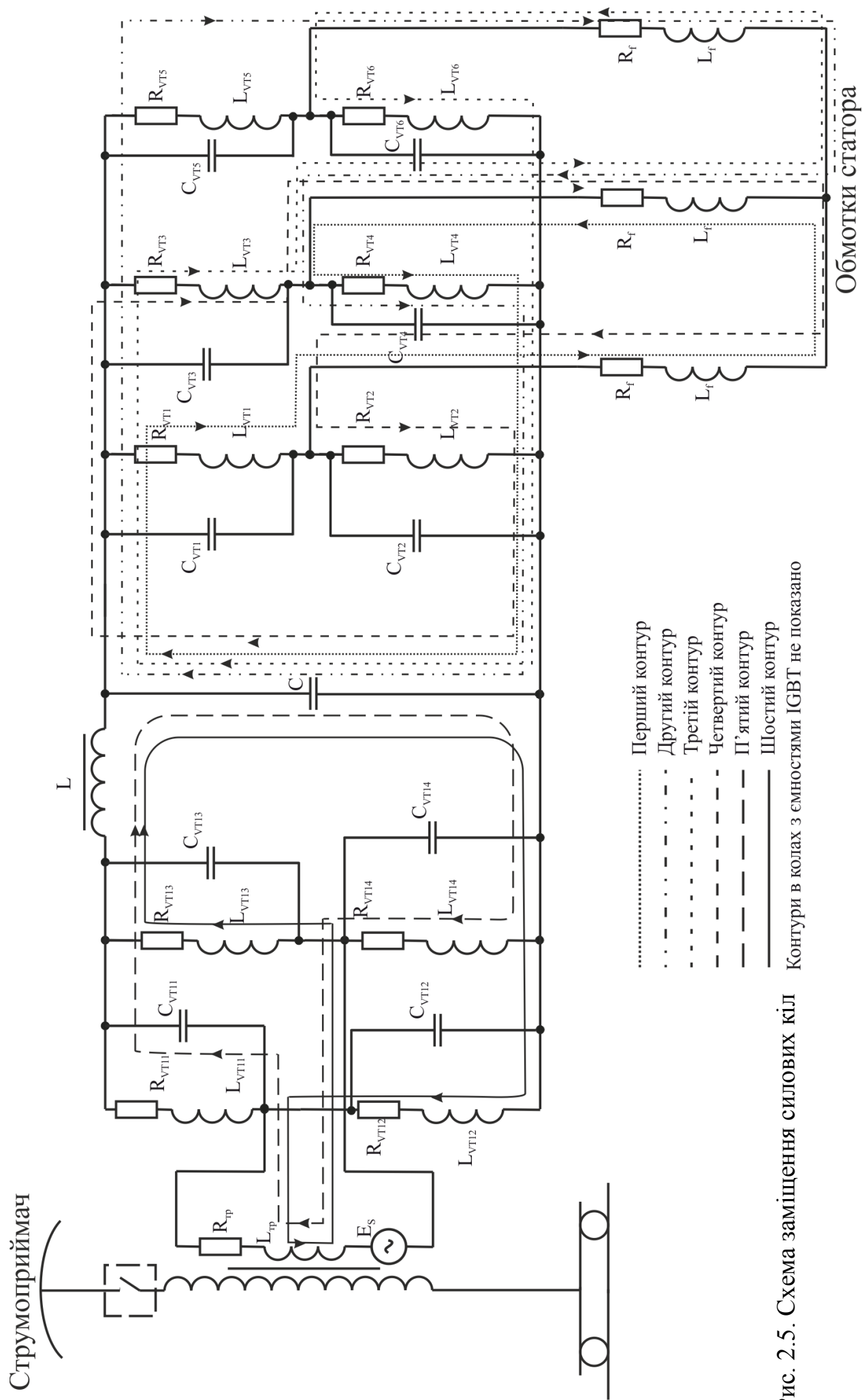


Рис. 2.5. Схема заміщення силових кіл

Враховуючи введені заміщення отримуємо схему заміщення силових кіл ЕРС з АТП (рис. 2.5) для якої визначимо струми в обмотці трансформатора та фазах двигуна за методом контурних струмів [9, 15].

Для першого контуру:

$$\begin{aligned} R_{VT1} \cdot i_1(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_f \cdot i_1(t) + L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_f \cdot i_1(t) + L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_{VT4} \cdot i_1(t) + \\ + L_{VT4} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_1(t) dt + R_{VT4} \cdot i_2(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_2(t) dt + R_f \cdot i_2(t) + \\ + L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - R_f \cdot i_3(t) - L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_3(t) dt - R_f \cdot i_4(t) - L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} - \\ - R_f \cdot i_4(t) - L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_4(t) dt - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_5(t) dt - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_6(t) dt = 0 \end{aligned}$$

Аналогічним чином отримуємо рівняння для інших контурів 3-6. Також складаємо рівняння для контурів, що утворені ємностями транзисторів, для VT1:

$$R_{VT1}(t) \cdot i_{VT1}(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_{VT1}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT1}} \cdot \int_0^t (i_{VT1}(t)) dt + R_{VT1}(t) \cdot i_1(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = 0$$

Приведемо подібні, згруповуючи коефіцієнти перед струмами, їх похідними та інтегралами від них та сформуємо загальну систему рівнянь, в якій використані наступні позначення:

$i_1 \dots i_6$ - невідомі контурні струми; R_{VTi} - активний опір силового ключа; L_{VTi} - індуктивний опір силового ключа; i_{VTi} - струм силового ключа; C - ємність проміжної ланки постійної напруги; C_{VTi} - ємність силового ключа; L - індуктивний фільтр; L_{TR} - індуктивний опір обмотки тягового трансформатора; R_{TR} - активний опір обмотки тягового трансформатора; E_S - ЕРС обмотки тягового трансформатора.

$$\left\{ \begin{aligned}
& \left(R_{VT1}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_1(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \left(R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_2(t) + L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} - \\
& - R_f \cdot i_3(t) - L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_4(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT1}(t) \cdot i_{VT1}(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_{VT1}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left(R_{VT5}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_2(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + \left(R_f + R_{VT4}(t) \right) \cdot i_1(t) + L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - \\
& - 2 \cdot R_f \cdot i_3(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - R_f \cdot i_4(t) - L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT5}(t) \cdot i_{VT5}(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_{VT5}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_2(t) + i_1(t) + i_3(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left(R_{VT4}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT6}(t) \right) \cdot i_3(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} - R_f \cdot i_1(t) - L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_2(t) - \\
& - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_f \cdot i_4(t) + L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} + R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT6}(t) \cdot i_{VT6}(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_{VT6}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_3(t) + i_1(t) + i_2(t) + i_4(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left(R_{VT5}(t) + 2 \cdot R_f + R_{VT2}(t) \right) \cdot i_4(t) + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_4(t)}{dt} - 2 \cdot R_f \cdot i_1(t) - 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_1(t)}{dt} - \\
& - R_f \cdot i_2(t) - L_f \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_f \cdot i_3(t) + L_f \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \\
& + R_{VT2}(t) \cdot i_{VT2}(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_{VT2}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_4(t) + i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) - i_5(t) - i_6(t) \right) dt = 0 \\
& \left(R_{VT11}(t) + R_{VT14}(t) + R_{TR} \right) \cdot i_5(t) + (L + L_{TR}) \cdot \frac{di_5(t)}{dt} - R_{TR} \cdot i_6(t) + (L - L_{TR}) \cdot \frac{di_6(t)}{dt} + \\
& + R_{VT11}(t) \cdot i_{VT11}(t) + L_{VT11} \cdot \frac{di_{VT11}(t)}{dt} + R_{VT14}(t) \cdot i_{VT14}(t) + L_{VT14} \cdot \frac{di_{VT14}(t)}{dt} + \\
& + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_5(t) - i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) - i_4(t) + i_6(t) \right) dt = -E_S \\
& \left(R_{VT13}(t) + R_{VT12}(t) + R_{TR} \right) \cdot i_6(t) + (L + L_{TR}) \cdot \frac{di_6(t)}{dt} - R_{TR} \cdot i_5(t) + (L - L_{TR}) \cdot \frac{di_5(t)}{dt} + \\
& + R_{VT13}(t) \cdot i_{VT13}(t) + L_{VT13} \cdot \frac{di_{VT13}(t)}{dt} + R_{VT12}(t) \cdot i_{VT12}(t) + L_{VT12} \cdot \frac{di_{VT12}(t)}{dt} + \\
& + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \left(i_6(t) - i_1(t) - i_2(t) - i_3(t) - i_4(t) + i_5(t) \right) dt = E_S
\end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{VT1}(t) \cdot i_{VT1}(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_{VT1}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT1}} \cdot \int_0^t (i_{VT1}(t)) dt + R_{VT1}(t) \cdot i_1(t) + L_{VT1} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT2}(t) \cdot i_{VT2}(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_{VT2}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT2}} \cdot \int_0^t (i_{VT2}(t)) dt + R_{VT2}(t) \cdot i_4(t) + L_{VT2} \cdot \frac{di_4(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT3}(t) \cdot i_{VT3}(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_{VT3}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT3}} \cdot \int_0^t (i_{VT3}(t)) dt + R_{VT3}(t) \cdot i_3(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + \\ + R_{VT3}(t) \cdot i_4(t) + L_{VT3} \cdot \frac{di_4(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT4}(t) \cdot i_{VT4}(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_{VT4}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT4}} \cdot \int_0^t (i_{VT4}(t)) dt + R_{VT4}(t) \cdot i_1(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + \\ + R_{VT4}(t) \cdot i_2(t) + L_{VT4} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT5}(t) \cdot i_{VT5}(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_{VT5}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT5}} \cdot \int_0^t (i_{VT5}(t)) dt + R_{VT5}(t) \cdot i_2(t) + L_{VT5} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \\ R_{VT6}(t) \cdot i_{VT6}(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_{VT6}(t)}{dt} + \frac{1}{C_{VT6}} \cdot \int_0^t (i_{VT6}(t)) dt + R_{VT6}(t) \cdot i_3(t) + L_{VT6} \cdot \frac{di_3(t)}{dt} = 0 \end{array} \right.$$

Для знаходження струмів в силових колах ЕРС з АТП розв'яжемо отриману систему інтегро-диференціальних рівнянь операційним методом [24, 26], який дозволяє привести її до виду системи лінійних рівнянь першого порядку. При використанні операційного методу необхідно застосувати наступні перетворення:

$$\frac{di(t)}{dt} = p \cdot I(p) - i(0)$$

$$\int_0^t i(t) dt = \frac{1}{p} \cdot I(p) + u(0)$$

Задаючись нульовими початковими значеннями отримуємо $i(0)=0$ та $u(0)=0$ отримуємо:

$$\frac{di(t)}{dt} = p \cdot I(p)$$

$$\int_0^t i(t) dt = \frac{1}{p} \cdot I(p)$$

Як прикладок розв'язку розглянемо 180-градусний режим керування інвертором. Перед пошуком розв'язків системи рівнянь для зменшення об'єму математичних виразів застосуємо певні спрощення:

- будемо розглядати роботу силових кіл на відрізку $(0; 60^\circ)$;
- знехтуємо провідністю ємності ланки постійного струму;
- знехтуємо індуктивним опором ключів;
- схему 4q-S перетворювача та ланки постійного струму замінено еквівалентним джерелом напруги.

При такому підході опори транзисторів можна замінити еквівалентними опорами R_{VT} низького рівня (біля 10 Ом) для відкритих ключів та високого рівня (біля 10^6 Ом) для закритих ключів. Для діапазону часу, що розглядається, струм втікає в обмотки двигуна через фази А та С, а витікає через фазу В. Тому відкритими будуть транзистори VT1, VT4 та VT5, інші ключі будуть закритими та струм через них не протікатиме (дорівнюватиме нулю).

Загальна система рівнянь спроститься за рахунок відсутності контурних струмів, що протікають через закриті в даний момент часу ключі. Таким чином струми i_3 , i_4 , i_5 дорівнюватимуть нулю, а замість струмів i_6 , i_7 буде протікати струм i_3 , який охоплює контур з еквівалентною ЕРС та ємністю ланки постійного струму. В результаті, після застосування запропонованих спрощень схема заміщення силових кіл матиме наступний вид:

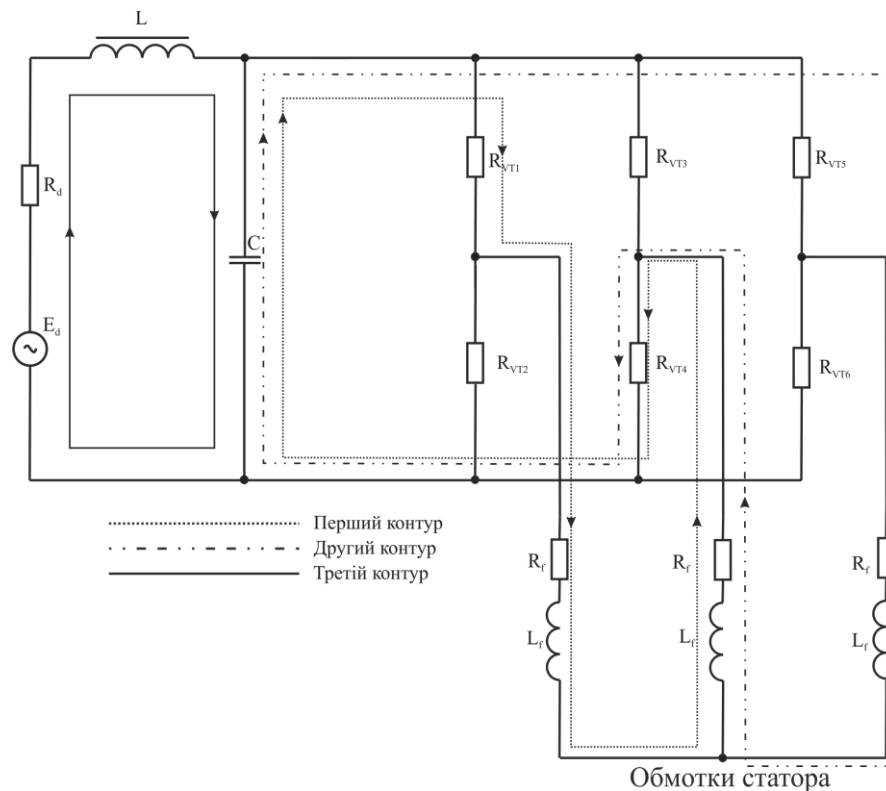


Рисунок 2.6 - Спрощена схема заміщення силових кіл

Так як розглядається інтервал $(0; 60)$ та опір всіх ключів є сталим, а початкові умови нульовими, то розв'язком спрощеної системи рівнянь будуть струми, що зростають від нуля до сталого значення, ілюструючи перехідний процес в колах АІН та АТП при подачі живлення [35, 72, 91]. Іншим словами отримуємо реакцію динамічної система АІН-АТП на одиничний ступеневий імпульс амплітудою E . Сталі значення струмів повинні задовольняти першому закону Кірхгофа за яким: $i_3 = i_1 + i_2$, а за логікою роботи схеми повинно виконуватися рівняння: $i_1 = i_2$. Враховуючи початкові нульові умови, що відповідають моменту подачі напруги в силові кола, граничними умовами для системи будуть:

$$\begin{cases} i_3 = i_1 + i_2 \\ i_1 = i_2 \\ i_i(0) = 0 \\ u_i(0) = 0 \end{cases}$$

Після спрощень загальна система рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} 2 \cdot (R_{VT} + R_f) \cdot i_1 + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_f + R_{VT}) \cdot i_2 + L_f \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t (i_1 + i_2 - i_3) dt = 0 \\ 2 \cdot (R_{VT} + R_f) \cdot i_2 + 2 \cdot L_f \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_f + R_{VT}) \cdot i_1 + L_f \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t (i_1 + i_2 - i_3) dt = 0 \\ R_d \cdot i_3 + L \cdot \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t (-i_1 - i_2 + i_3) dt = E_d \end{cases}$$

Застосуємо перетворення $\frac{di(t)}{dt} = p \cdot I(p)$ та $\int_0^t i(t) dt = \frac{1}{p} \cdot I(p)$. Після підстановки зображень струмів в систему отримуємо:

$$\begin{cases} 2 \cdot (R_{VT} + R_f) \cdot I_1(p) + 2 \cdot L_f \cdot p \cdot I_1(p) + (R_f + R_{VT}) \cdot I_2(p) + L_f \cdot p \cdot I_2(p) + \\ \quad + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_1(p) + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_2(p) - \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_3(p) = 0 \\ 2 \cdot (R_{VT} + R_f) \cdot I_2(p) + 2 \cdot L_f \cdot p \cdot I_2(p) + (R_f + R_{VT}) \cdot I_1(p) + L_f \cdot p \cdot I_1(p) + \\ \quad + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_2(p) + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_1(p) - \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_3(p) = 0 \\ -\frac{1}{p \cdot C} \cdot I_1(p) - \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_2(p) + R_d \cdot I_3(p) + L \cdot p \cdot I_3(p) + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I_3(p) = \frac{E_d}{p} \end{cases}$$

Отримуємо систему лінійних рівнянь для розв'язання якої застосуємо матричний метод [14, 28]. Приведемо подібні, згруповуючи коефіцієнти перед струмами та сформуємо матрицю коефіцієнтів перед змінними:

$$A = \begin{bmatrix} 2 \cdot (R_{VT} + R_f) + 2 \cdot L_f \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} & R_f + R_{VT} + L_f \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} & -\frac{1}{p \cdot C} \\ R_f + R_{VT} + L_f \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} & 2 \cdot (R_{VT} + R_f) + 2 \cdot L_f \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} & -\frac{1}{p \cdot C} \\ -\frac{1}{p \cdot C} & -\frac{1}{p \cdot C} & R_d + L \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} \end{bmatrix}$$

Матриця вільних членів:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_d / p \end{bmatrix}$$

Розв'язок системи рівнянь знаходимо у вигляді:

$$I = A^{-1} \cdot B$$

Для знаходження розв'язків матричного рівняння застосуємо математичний пакет Maple. Щоб спростити символні вирази та прискорити процес обчислень попередньо підставимо у систему рівнянь чисельні значення відомих параметрів схеми (розрахунок приведений вище). Після застосування математичного пакету отримуємо:

$$I = \begin{bmatrix} \frac{3000 \cdot (9719 + 0,7348 \cdot p)}{(3,028 \cdot 10^5 + 2271,49 \cdot p + 28,53 \cdot p^2 + 0,00428 \cdot p^3 + 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot p^4) \cdot p} \\ \frac{3000 \cdot (9719 + 0,7348 \cdot p)}{(3,028 \cdot 10^5 + 2271,49 \cdot p + 28,53 \cdot p^2 + 0,00428 \cdot p^3 + 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot p^4) \cdot p} \\ \frac{3000 \cdot (19438 + 284,84 \cdot p + 0,0428 \cdot p^2 + 1,62 \cdot 10^{-6} \cdot p^3)}{(3,028 \cdot 10^5 + 2271,49 \cdot p + 28,53 \cdot p^2 + 0,00428 \cdot p^3 + 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot p^4) \cdot p} \end{bmatrix}$$

Отриманий вектор зображень контурних струмів необхідно шляхом зворотного перетворення Лапласа привести до вектору оригіналів цих струмів. Для цієї задачі також застосуємо пакет Maple:

$$i = \begin{bmatrix} 9,48 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-13226,72 \cdot t} - 0,006 \cdot e^{-13157,77 \cdot t} + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47-95,83 \cdot j)t} + \\ + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47+95,83 \cdot j)t} + 96,28 \\ 9,48 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-13226,72 \cdot t} - 0,006 \cdot e^{-13157,77 \cdot t} + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47-95,83 \cdot j)t} + \\ + (-48,14 - 20,24 \cdot j) \cdot e^{-(39,47+95,83 \cdot j)t} + 96,28 \\ 1,85 \cdot 10^{-8} \cdot e^{-13226,72 \cdot t} - 7,12 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-13157,77 \cdot t} + (-96,28 - 116,86 \cdot j) \cdot e^{-(39,47-95,83 \cdot j)t} + \\ + (-96,28 - 116,86 \cdot j) \cdot e^{-(39,47+95,83 \cdot j)t} + 192,57 \end{bmatrix}$$

Графічне зображення знайдених контурних струмів показано на рис. 2.9.

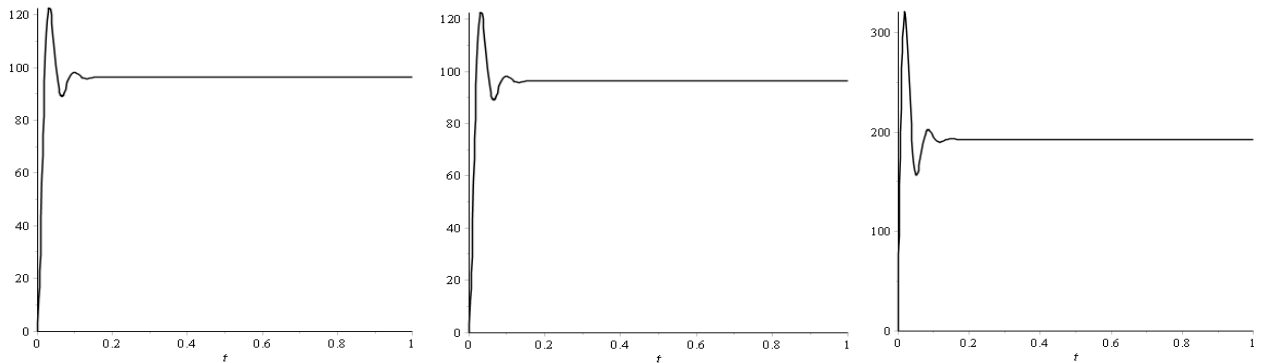


Рисунок 2.7 - Контурні струми (i_1, i_2, i_3 відповідно порядку)

З приведених рисунків видно, що отримані струми i_1 та i_2 рівні між собою, а струм i_3 дорівнює їх сумі. Наявність перехідного процесу свідчить про присутність в схемі реактивних елементів проміжної ланки постійного струму (C та L), а також індуктивності обмоток АТП. Сталі значення фазних струмів:

$$i_{fA} = 97 \text{ A}; i_{fC} = 97 \text{ A}; i_{fB} = -(i_{fA} + i_{fC}) = -194 \text{ A}.$$

Струм фази В має від'ємне значення, що показує напрямок його протікання в обмотці статора: струми фаз А та С спрямовані у статор, а струм фази В – із нього. Отримані сталі значення фазних струмів відповідають закону керування інвертором в інтервалі $(0; 60^\circ)$, що задається фазними комутаційними функціями [91].

Аналогічно до приведеного прикладу розв'яжемо повну систему інтегро-диференціальних рівнянь. Застосовуємо 180° закон керування ключами (див. рис. 2.8), апроксимувавши часову залежність опору ключа сплайнами, частота перемикання ключів 70 Гц. В зв'язку зі складністю та великим об'ємом отриманих формул результат моделювання приведемо лише графічно. Отримуємо часову залежність струмів фаз АТП та струму в обмотці тягового трансформатора.

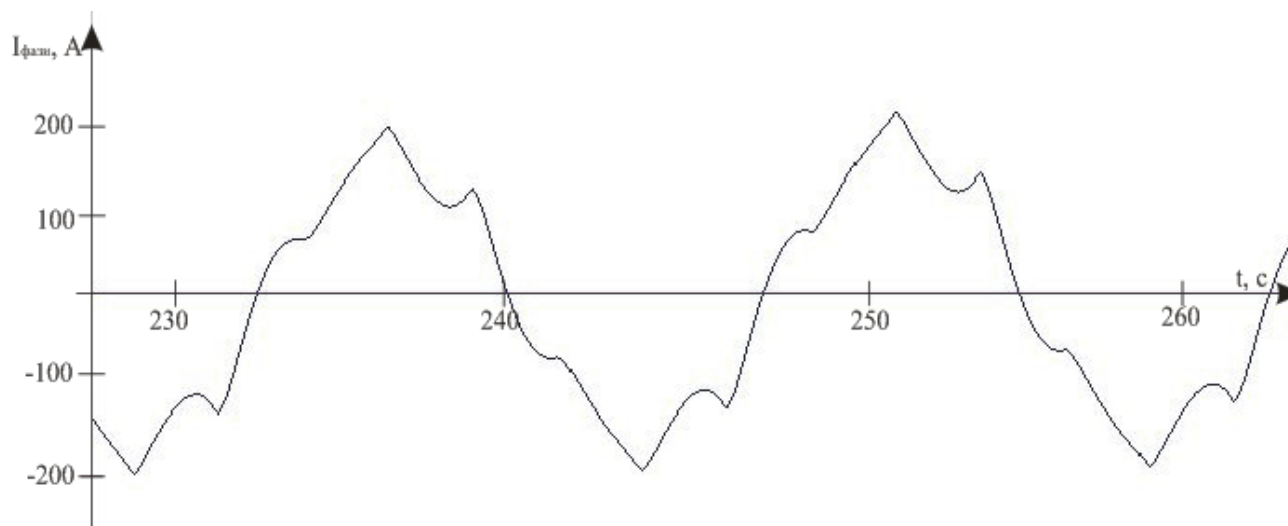


Рисунок 2.8 - Струм фази В АТД

Отриманий фазний струм, з урахуванням індуктивностей в колах досить точно відображає закон керування ключами [2, 35, 91], що задається фазними комутаційними функціями. Струми інших фаз мають аналогічний вигляд, але зміщені на $\pm 120^\circ$ відносно приведеної. Струм первинної обмотки тягового трансформатора отримано з урахуванням коефіцієнта трансформації:

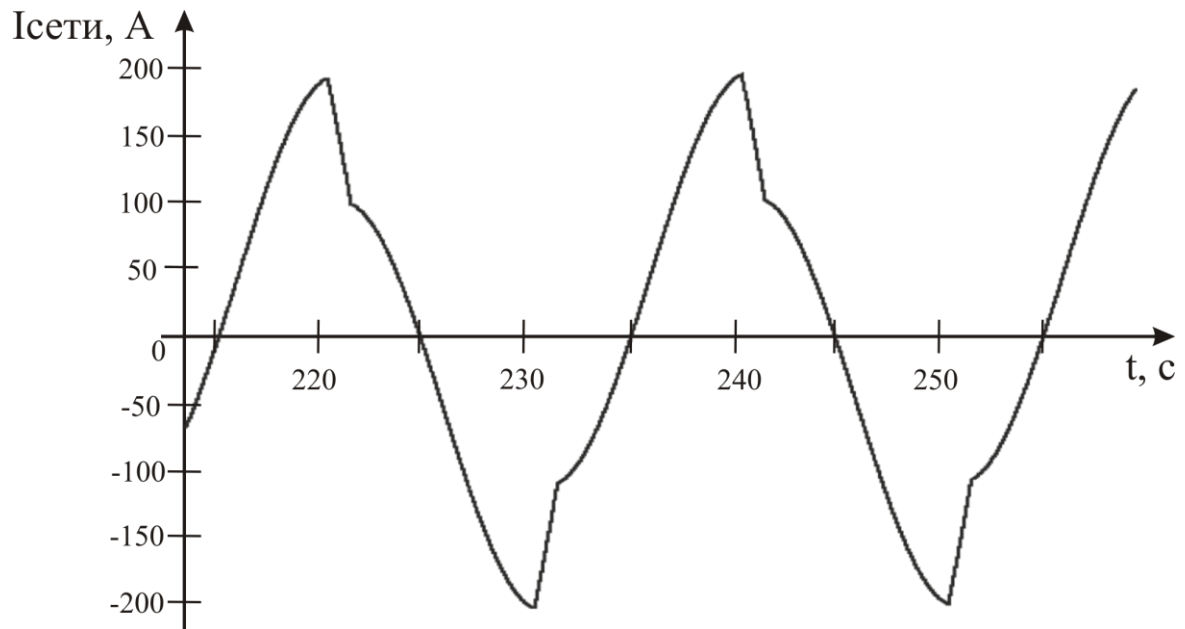


Рисунок 2.9 - Струм первинної обмотки тягового трансформатора

Отриманий струм первинної обмотки тягового трансформатора є струмом, спожитим з КМ та відповідно струмом, що генерується ЕРС з АТП в рейкову лінію. Спектральний склад цього струму дозволить судити про можливий вплив ЕРС з АТП на роботу РК.

Таким чином можна зробити висновок, що отримані значення фазних струмів відповідають логіці роботи схеми та підтверджує вірність отриманих розв'язків та можливість застосовувати отриману математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в силових колах ЕРС з АТП.

2.2 Імітаційне моделювання силових кіл ЕРС з АТП як джерела завад

Складність математичного описання функцій керування транзисторами пропонується подолати за допомогою створення імітаційної моделі силових кіл ЕРС з АТП в пакеті OrCAD Pspice, що дозволить провести дослідження їх роботи в усіх можливих режимах для виявлення впливу ЕРС з АТП на роботу рейкових кіл та підтвердити отримані теоретичні результати.

При використанні АІН на ЕРС застосовують два основних способи регулювання вихідної напруги (напруги на статорі АТП), які були ревізовані при імітаційному моделюванні:

1) амплітудний спосіб [35, 91], при якому вихідна напруга регулюється шляхом зміни вхідної напруги інвертора U_d . Розглядаємо АІН без

внутрішнього регулювання напруги. Такий інвертор регулює тільки частоту, а регулювання напруги відбувається на вході інвертора внаслідок зміни напруги U_d . Для цієї мети використовують керований випрямляч (при живленні від мережі змінного струму) або імпульсний переривник (при живленні від мережі постійного струму).

2) широтно-імпульсний спосіб, при якому вихідна напруга регулюється внутрішніми засобами інвертора (при незмінній вхідній напрузі шляхом багатократного включення і виключення ключів інвертора за один період вихідної напруги [35, 68, 69, 91, 112]. Інвертор, в якому застосовують такий спосіб регулювання, називають інвертором з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Дослідження роботи автономного інвертора напруги проводилось за допомогою імітаційного моделювання з використанням пакету аналізу електричних кіл OrCAD Pspice. Було створено модель АІН на транзисторах IGBT, який працює при напрузі проміжної ланки до 3000 В.

Стандартні моделі IGBT транзисторів не задовольняють умовам роботи тягового перетворювача, тому за допомогою редактора моделей Model Editor та програми параметричної оптимізації PSpice Optimizer було створено власну модель. Базові параметри моделі IGBT визначалися з необхідних для експлуатації на залізниці характеристик транзистора, що були побудовані у Model Editor [30]. Далі за допомогою PSpice Optimizer була проведена оптимізація параметрів моделі IGBT транзистора в два етапи. Спочатку варіюючи отримані параметри в допустимих межах, були проведені статистичні випробування за методом Монте-Карло. За результатами статистичних досліджень визначено локальний екстремум, в околиці якого виконана повторна оптимізація параметрів за допомогою програми PSpice Optimizer. Завдяки проведеній оптимізації отримана модель IGBT транзистора, яка досить точно відображає процеси в реальних силових приборах.

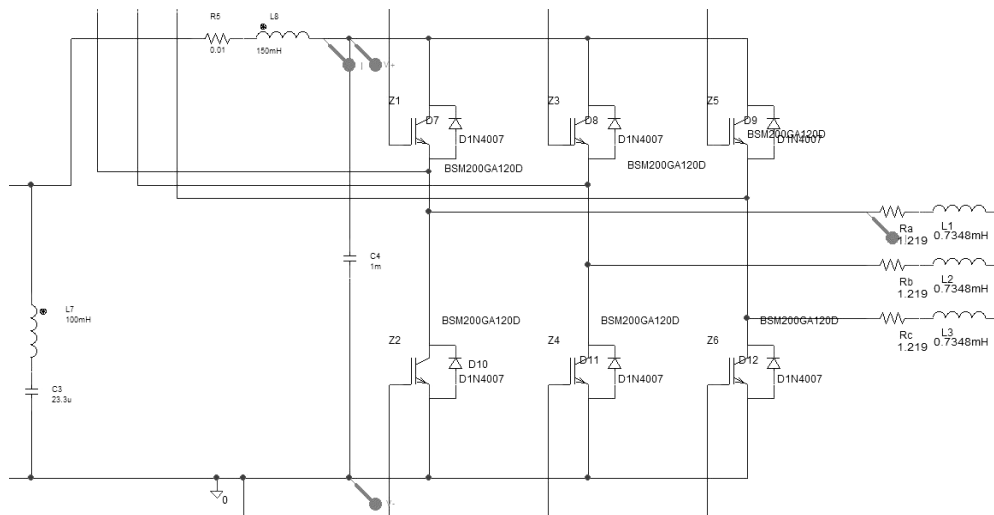


Рисунок 2.10 - Фрагмент імітаційної моделі АІН

АІН за допомогою ємності C_ϕ підключений до джерела напруги U_d , а до його виходів приєднані фази навантаження - обмотки статора АТД, що моделюються індуктивним та активним опором [9, 15]. Якщо транзистори Z1-Z6 вмикати і вимикати відповідно до діаграми керування (рис. 2.11, 2.13, 2.15), то напруга у навантаженні при з'єднанні фаз двигуна "зіркою" матиме форму ступінчатих прямокутних імпульсів поперемінно позитивної і негативної полярності [35, 91]. Для спрощення напруга живлячої мережі та проміжної ланки вважається вільною від сторонніх завад [45].

Отримана модель, за допомогою пристрою керування (на малюнку не зображені), дозволяє змінювати вихідну частоту АІН та задавати різні алгоритми відкриття та закриття транзисторів, що дозволяє реалізувати різні режими роботи інвертора при будь-якій швидкості руху локомотива.

Проведений розрахунок параметрів керуючих імпульсів (Додаток Б) та асинхронного тягового двигуна (приведений в п.п. 2.1). Ці параметри в подальшому використовуються при моделюванні роботи силових кіл ЕРС з АТП в пакеті OrCAD Pspice.

2.2.1 Результати імітаційного моделювання

120 - градусний режим керування АТП

При 120-градусному режимі роботи кожен транзистор знаходиться в стані провідності від 120° за період. (див. рис. 2.11) У будь-який час два транзистори в цій схемі знаходяться в стані провідності і два з трьох резисторів навантажень є

споживачами потужності. Коли транзистор з непарної групи знаходиться в стані провідності фазова напруга, що відповідає йому, - позитивна. Якщо ж в стані провідності знаходиться тиристор з парної групи, фазова напруга негативна, що відповідає йому. Вихідна лінійна напруга має форми шестиступінчастих послідовностей імпульсів, з відставанням на 120° по відношенню один до одного [35]. Форми фазового струму і його спектральний склад приведені на рис.2.12.

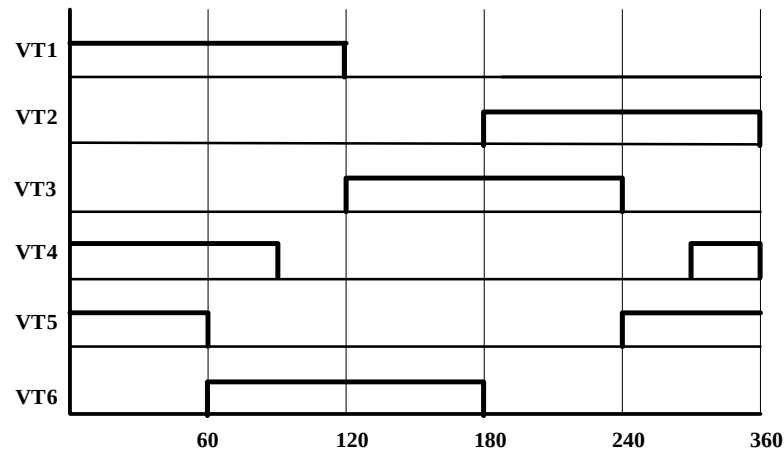


Рисунок 2.11 - Діаграма провідностей при 120-градусному режимі керування інвертором

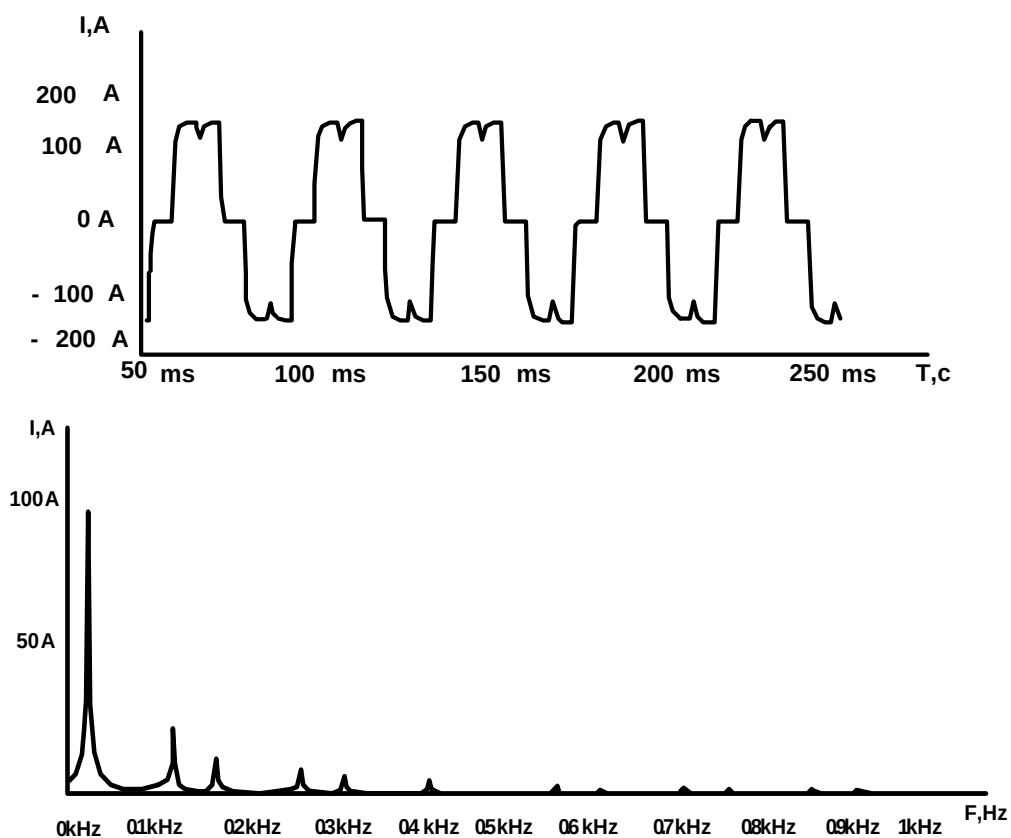


Рисунок 2.12 - Форма фазного струму та його спектр при 120 градусному режимі керування

При реалізації 120 градусного режиму керування АТП моделювалась швидкість руху локомотива 25 км\год. З приведеного спектру видно присутність гармонік 475 Гц й 725 Гц, які потрапляють у смугу відповідних сигнальних частот тональних рейкових кіл та можуть створювати заважаючий на їх роботу.

150- градусний режим керування АТД

150-градусний режим керування роботою асинхронного двигуна на залізниці використовується в умовах запуску двигуна електрорухомого складу та при малих швидкостях руху. У цьому режимі вмикання транзисторів відбувається з затримкою 30 градусів після вимикання відповідного транзистору даної фази. Кожен з транзисторів знаходиться в увімкненому стані впродовж 150 градусів за період (див рис. 2.13). Форма фазного струму та отриманий спектр зображено на рис. 2.14. [30]

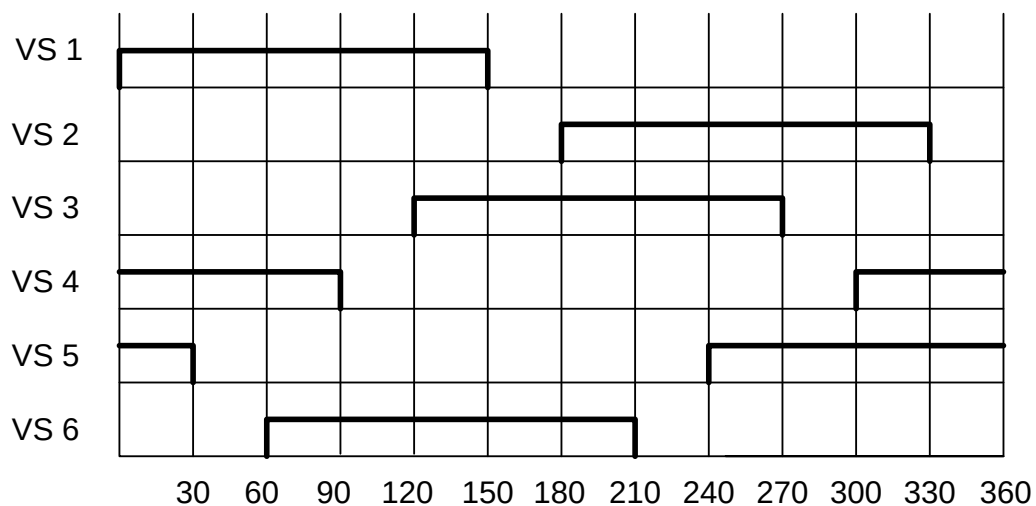


Рисунок 2.13 - Діаграми провідності ключів при 150 градусному режимі керування

При 150 градусному режимі роботи асинхронного трифазного двигуна при швидкості 25 км\год також отримуємо гармоніки 475 Гц й 725 Гц.

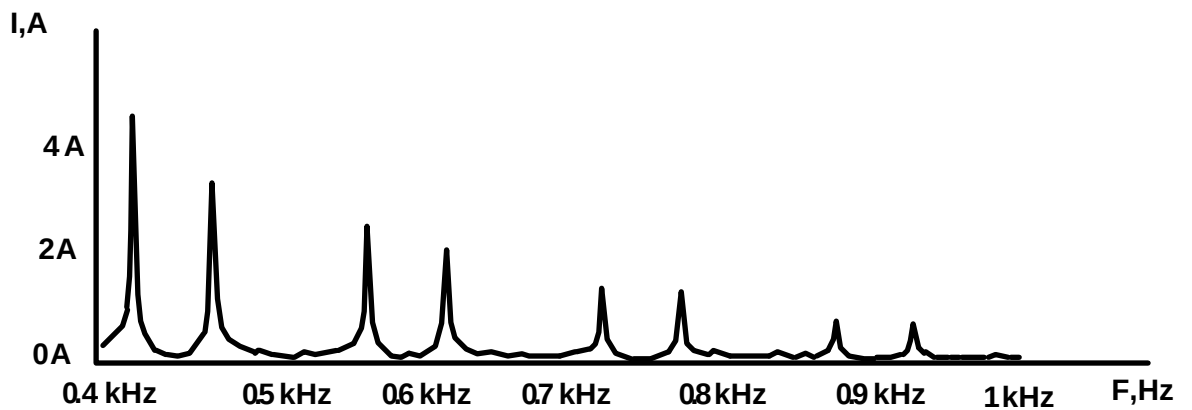
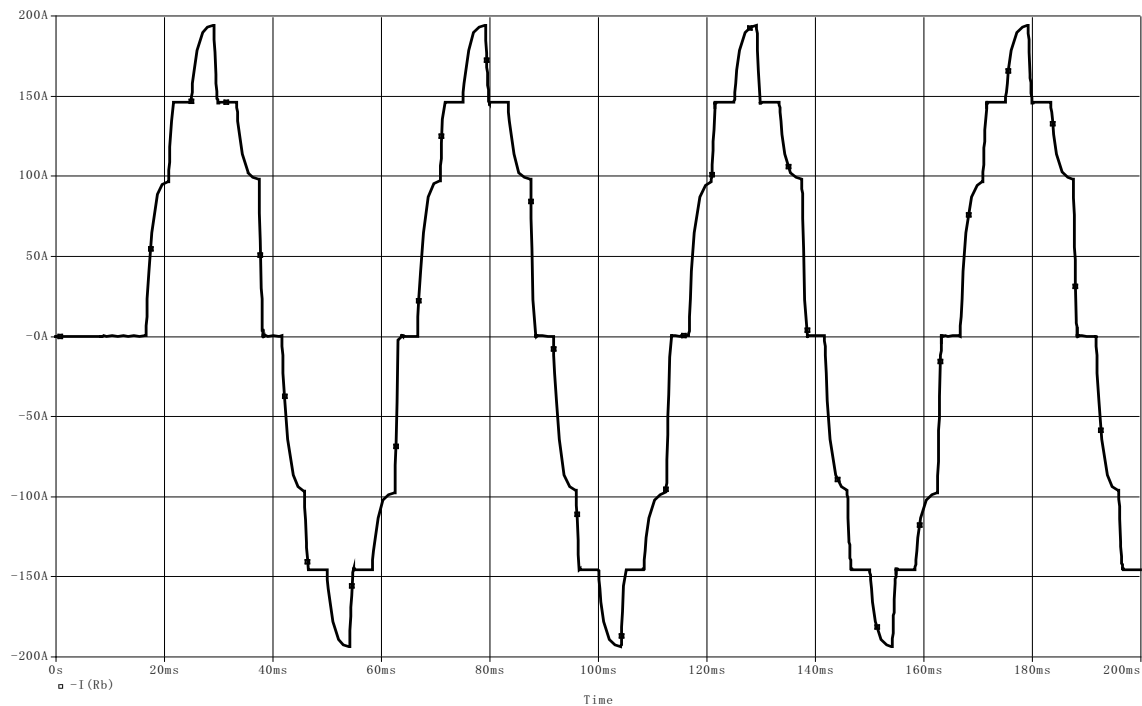


Рисунок 2.14 - Форма фазного струму та його спектр при 150 градусному режимі керування.

Так, одним з важливих показників доцільності застосування певного методу керування асинхронним приводом є коефіцієнт гармоніки [59, 74], який визначається відношенням діючого значення i -ої гармоніки до діючого значення першої гармоніки. Для даної моделі з 150 градусним режимом керування, при частоті 580 Гц коефіцієнт гармоніки дорівнює $I_{580}^{150} = \frac{1}{160} = 0,00625$.

180-градусний режим керування АТП

Цей режим використовується для керування роботою тягового асинхронного двигуна при русі локомотива вздовж ділянки з встановленою швидкістю. При 180-градусному режимі кожен транзистор знаходиться в стані провідності половину періоду (див. рис. 2.15). У цьому режимі роботи інвертора можливі два комутаційні стани транзисторів - два транзистора з непарної групи і один транзистор з парної групи або два з парної групи і один з непарної групи перебувають відкритому стані [91]. Форма фазного струму та спектр приведено на рис. 2.16.

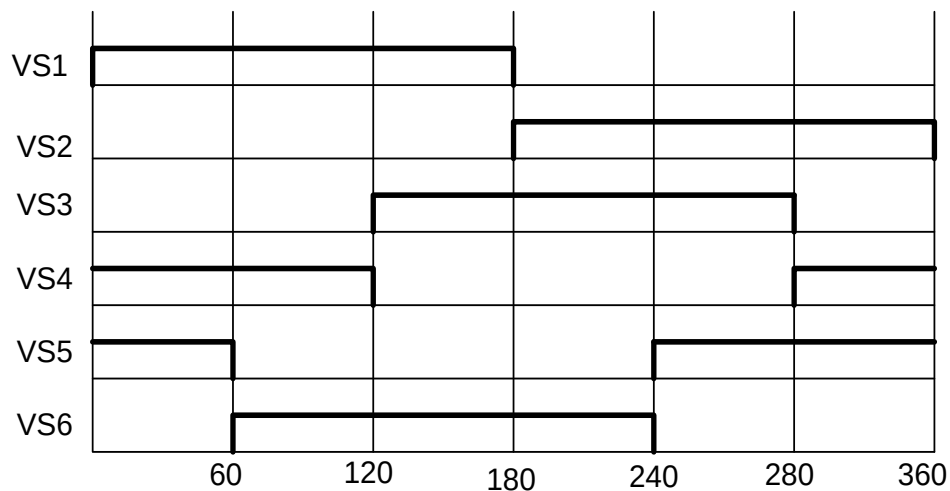


Рисунок 2.15 - Діаграма провідності при 180 градусному режимі

При моделюванні 180 градусного режиму керування АТП також задана швидкість руху локомотива 25 км\год, а приведений спектр показує наявність характерних гармонік 475 Гц й 725 Гц, які потрапляють у смугу сигнальних частот тональних РК.

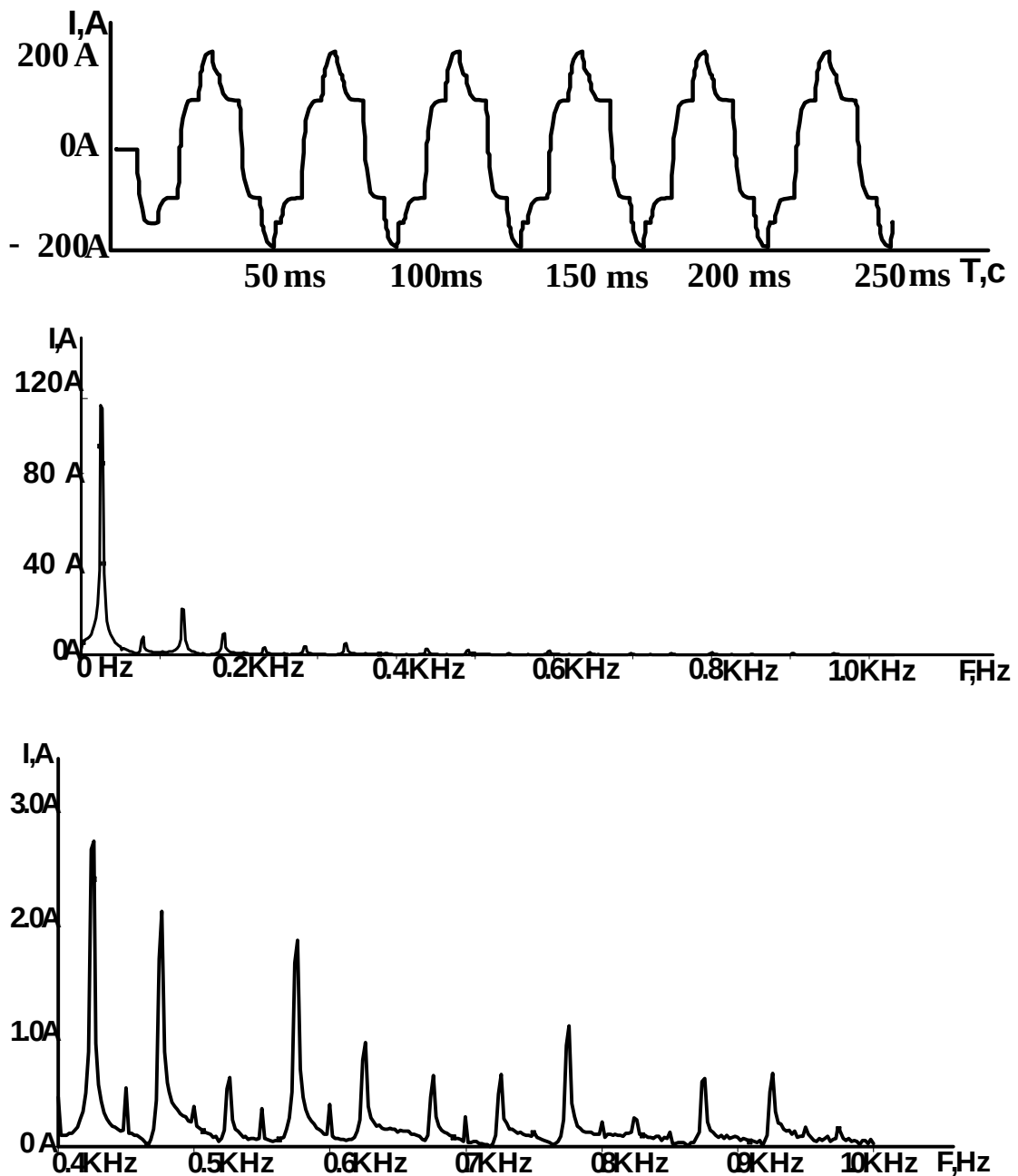


Рисунок 2.16 - Форма фазного струму та його спектр при 180 градусному режимі керування

Аналізуючи приведені режими роботи АТП можна зробити висновок, що рівень основної гармоніки, яка створює магніторушійну силу, буде максимальним при використанні 180 градусного режиму керування інвертором. Частота основної гармоніки значним чином визначається швидкістю руху локомотива [35, 91], а вищі гармоніки мають кратність $(6k \pm 1)$. Отже спектральний склад фазного струму локомотива з АТП безпосередньо залежить від швидкості руху локомотива. Найбільший рівень гармонік в смузі

сигнальних частот спостерігається при реалізації 120 градусного режиму, тому цей режим не використовується для керування роботою інвертора. Як видно з рис. 2.14, використання 150 градусного режиму керування дозволяє отримати менш пульсуючу криву струму статора, що дозволяє реалізувати плавний пуск АТП та трогання локомотива з місця. Найменший рівень гармонійних складових в полосі сигнальних частот РК характерний для 180 градусного режиму керування, який часто використовується для керування роботою АТП.

Керування інвертором за допомогою сигналу з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ)

У інверторі з ШІМ для регулювання вихідної напруги змінюють співвідношення між інтервалами підключення фази двигуна до «плюса» і «мінуса» джерела живлення впродовж одного періоду вихідної напруги і тим самим змінюють глибину регулювання вихідної напруги, яку характеризує коефіцієнт регулювання [35, 91, 112, 146]. Приклад керуючої напруги для транзистора наведено на рис. 2.17.

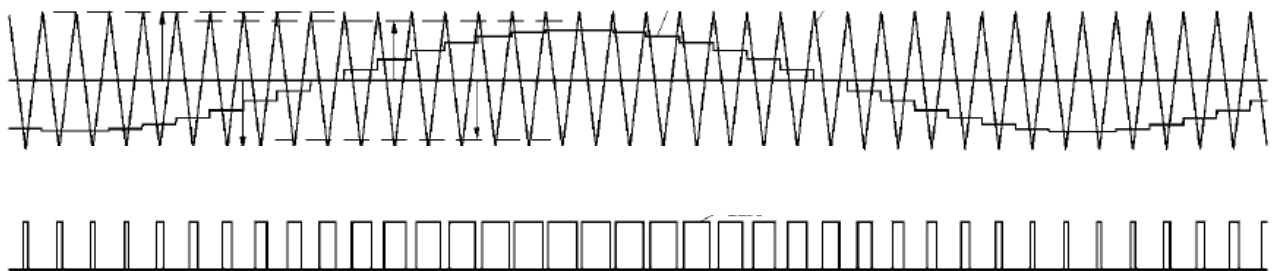


Рисунок 2.17 - Формування керуючої напруги при ШІМ

При управлінні способом ШІМ напруга на виході АІН має форму серії імпульсів позитивної і негативної полярності з нульовими паузами, причому тривалість імпульсів і пауз в межах одного періоду вихідної напруги можна змінювати за різними законами. При роботі в режимі ШІМ складові вихідних напруг інвертора в першому наближенні подібні напруженням управління фаз (за умови постійності напруги конденсатора в колі постійного струму). На рис. 2.18 зображено спектральний склад фазного струму при керуванні інвертором за допомогою ШІМ.

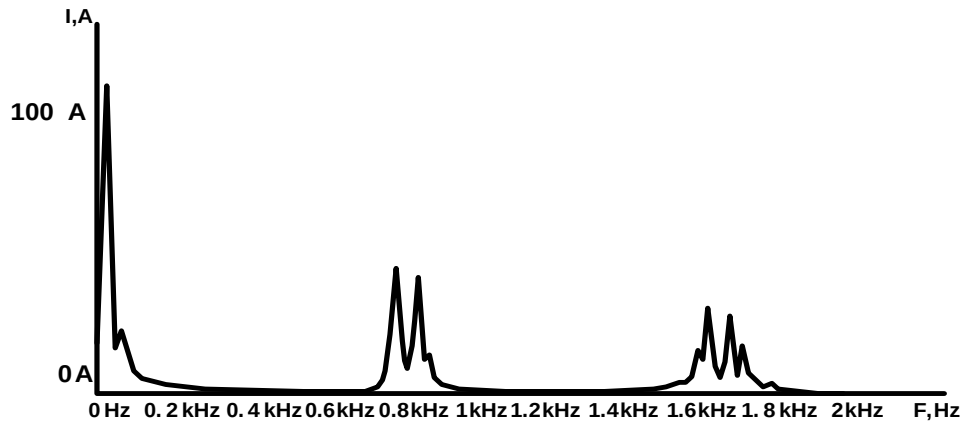


Рисунок 2.18 - Спектральний склад фазного струму АІН при ШІМ

З приведенного графіку видно, що використання ШІМ для керування роботою інвертора призводить до появи у спектрі фазного струму гармонік з комбінаційними частотами: $(n_1 f_H + n_2 f_M)$, де f_H – несуча та f_M – модулююча частоти, $n_1 = 1, 2, 3, \dots$, $n_2 = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$. Для приведенного режиму роботи АТД створює заваду у полосі сигнальної частоти 780 Гц, оскільки несуча частота дорівнює 800 Гц та комбінаційна гармоніка потрапляє в смугу РК.

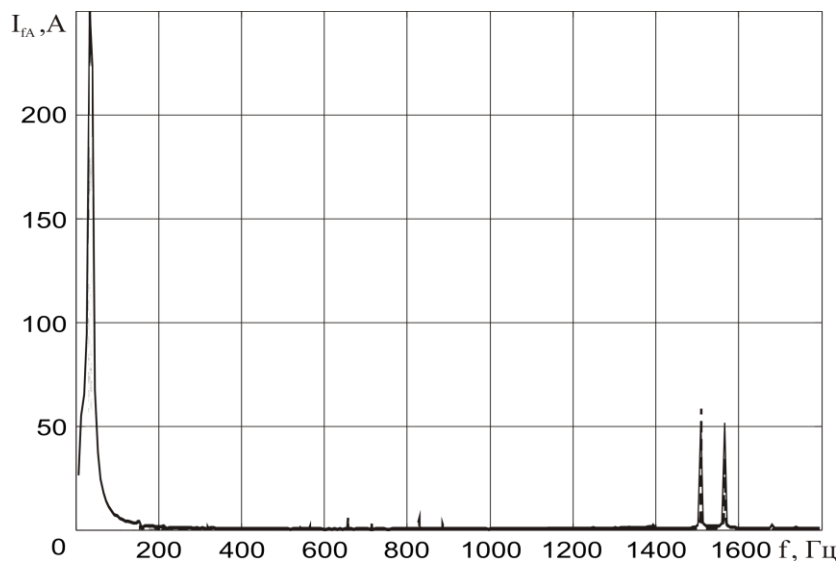


Рисунок 2.19 - Спектральний склад фазного струму АІН при ШІМ

На рис 2.19 частота несучого сигналу обрана 1550 Гц і як наслідок гармоніки з комбінаційними частотами не потрапляють в смугу робочих частот РК. Таким чином для організації керування ключами силових перетворювачів сучасного ЕРС з АТП доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою, що дозволить уникати потрапляння гармонік зворотного тягового струму в смугу сигнальних частот РК.

Теоретично, чим вище буде несуча частота, тим менший вплив буде створювати руханий склад на роботу рейкових кіл. Проте, обираючи несучу частоту, необхідно враховувати технічні особливості використовуваних у інверторі транзисторів, а саме – швидкість (частоту) комутацій.

Для порівняння режимів роботи проаналізуємо рівень гармоніки у полосі сигнальної частоти 480 Гц змодельовавши роботу силових кіл АТД при інших рівних умовах. Отримані значення порівняємо за допомогою коефіцієнта гармонік:

$$I_{480}^{120} = \frac{2,5}{100} = 0,025; I_{480}^{150} = \frac{0,6}{115} = 0,0052; I_{480}^{180} = \frac{0,3}{120} = 0,0025$$

Найбільший рівень гармонік в смузі сигнальних частот спостерігається при реалізації 120 градусного режиму, тому цей режим не використовується для керування роботою інвертора. Використання 150 градусного режиму керування дозволяє отримати менш пульсуючу криву струму статора, що дозволяє реалізувати плавний пуск АТД та торгання локомотива з місця. Найменший рівень гармонійних складових в полосі сигнальних частот РК характерний для 180 градусного режиму керування, який часто використовується для керування роботою АТД. При виборі високих частот несучої режим ШІМ майже не створює завад в полосах робочих частот РК, і тому є найбільш оптимальним для їх роботи.

При певних швидкостях руху електровоза деякі гармоніки його зворотного струму потраплятимуть у смугу сигнальних частот рейкових кіл, створюючи заважаючий і навіть небезпечний вплив [40, 74]. Рівень цих гармонік у рейкових лініях буде залежати від: потужності АТП електровозу, рівня постійної напруги проміжної ланки, первинних та вторинних параметрів рейкової лінії, кількості локомотивів на тяговій ділянці та швидкості їх руху, погодних умов та ін. [47] Тому для обґрунтування адекватності розроблених моделей АІН необхідно провести експериментальне дослідження тягового струму від сучасного локомотива з АТП.

Визначимо потенційно небезпечні вихідні частоти інвертора напруги, при яких гармоніки фазного та зворотного тягового струму від ЕРС з АТП потраплятимуть у смугу сигнальних частот рейкових кіл. У табл. 2.1 в крайньому лівому рядку приведені номери гармонік вихідної напруги інвертора, виходячи з кратності $(6k \pm 1)$. У верхньому рядку приведені сигнальні частоти рейкових кіл в герцах. Числа в таблиці визначають вихідну частоту інвертора при якій та чи інша гармоніка потрапляє у смугу частот РК. З приведеної таблиці видно, що, наприклад, при вихідній частоті інвертора 60 Гц 7 гармоніка його струму потрапляє у смугу сигнальної частоти 420 Гц, 13 – у смугу частоти 780 Гц, 77 – у смугу частоти 4545 Гц та 83 – у смугу частоти 5000 Гц.

Таблиця 2.1 - Потенційно небезпечні вихідні частоти інвертора

Сигн. част № гарм	25	50	420	480	580	720	780	4545	5000	5555
5	5	10	84	96	116	144	156			
7	3,57	7,14	60,00	68,57	82,86	102,86	111,43			
11	2,27	4,55	38,18	43,64	52,73	65,45	70,91			
13	1,92	3,85	32,31	36,92	44,62	55,38	60,00			
17	1,47	2,94	24,71	28,24	34,12	42,35	45,88	267,35	294,12	
19		2,63	22,11	25,26	30,53	37,89	41,05	239,21	263,16	292,37
23		2,17	18,26	20,87	25,22	31,30	33,91	197,61	217,39	241,52
25		2,00	16,80	19,20	23,20	28,80	31,20	181,80	200,00	222,20
29			14,48	16,55	20,00	24,83	26,90	156,72	172,41	191,55
31			13,55	15,48	18,71	23,23	25,16	146,61	161,29	179,19
35			12,00	13,71	16,57	20,57	22,29	129,86	142,86	158,71
37			11,35	12,97	15,68	19,46	21,08	122,84	135,14	150,14
41			10,24	11,71	14,15	17,56	19,02	110,85	121,95	135,49
43			9,77	11,16	13,49	16,74	18,14	105,70	116,28	129,19
47			8,94	10,21	12,34	15,32	16,60	96,70	106,38	118,19
49			8,57	9,80	11,84	14,69	15,92	92,76	102,04	113,37
53			7,92	9,06	10,94	13,58	14,72	85,75	94,34	104,81
55			7,64	8,73	10,55	13,09	14,18	82,64	90,91	101,00
59			7,12	8,14	9,83	12,20	13,22	77,03	84,75	94,15
61			6,89	7,87	9,51	11,80	12,79	74,51	81,97	91,07
65			6,46	7,38	8,92	11,08	12,00	69,92	76,92	85,46
67			6,27	7,16	8,66	10,75	11,64	67,84	74,63	82,91
71			5,92	6,76	8,17	10,14	10,99	64,01	70,42	78,24
73			5,75	6,58	7,95	9,86	10,68	62,26	68,49	76,10
77			5,45	6,23	7,53	9,35	10,13	59,03	64,94	72,14
79			5,32	6,08	7,34	9,11	9,87	57,53	63,29	70,32
83			5,06	5,78	6,99	8,67	9,40	54,76	60,24	66,93
85			4,94	5,65	6,82	8,47	9,18	53,47	58,82	65,35

Серед потенційно небезпечних вихідних частот слід виділити всі низькі частоти до 12 Гц включно, а також частоту 25 Гц, гармоніки якої потрапляють одразу в шість смуг наступних сигнальних частот: 25 Гц, 420 Гц, 480 Гц, 580 Гц, 720 Гц та 780 Гц. Якщо приблизно враховувати, що 1 Гц вихідної частоти інвертора приблизно дорівнює 1 км/год швидкості руху ЕРС (твердження перевірено експериментальним двоканальним заміром зворотного струму локомотива та його швидкості), то найбільш небезпечними режимами роботи локомотива є пуск, розгін та рух з низькою швидкістю [30].

Увагу слід приділити струмам інвертора з частотами 44 та 84 Гц, гармоніки яких потрапляють у смугу сигнальних частот 480, 580 Гц та 420, 580 Гц відповідно. Критичними також є частоти 95 Гц, 97 Гц, 102 Гц, 110 Гц, 116 Гц, 118 Гц, 143 Гц, 146 Гц та 156 Гц, але вони відповідають великим швидкостям руху і на практиці досягаються не часто.

Рівні цих гармонік у рейкових лініях будуть залежати від: рівня постійної напруги проміжної ланки, потужності асинхронних двигунів електровозу, первинних та вторинних параметрів рейкової лінії, кількості локомотивів на тяговій ділянці та швидкості їх руху, погодних умов [118, 123-126]. І в ідеальному випадку нормальної роботи всіх систем знаходиться у допустимих межах, але при певному збігу декількох негативних факторів [10] рівень гармонік у рейкових лініях може виходити за встановлені межі допустимого рівню та створювати небажаний і навіть небезпечний вплив. Для детального з'ясування цих обставин потрібне дослідження розповсюдження гармонік зворотного тягового струму у рейкових лініях за допомогою математичної моделі системи тягового електропостачання, а також проведення експериментальних досліджень спектрального складу зворотного струму електровозів з асинхронними тяговими двигунами.

2.3 Висновки за розділом 2

В розділі роботи розроблено математичну модель для дослідження електромагнітних завад від тягових перетворювачів, проведено імітаційне

модельовання роботи силових кіл локомотива з АТП та порівняно отримані результати з експериментальними дослідженнями тягових струмів від нових типів ЕРС. Виявлено найбільш небезпечні режими роботи ЕРС з АТП. Основні результати наступні:

1) Наявність вищих гармонік у кривій фазного струму або напруги обумовлена алгоритмом керування інвертором та швидкістю руху локомотива. Також спектральний склад залежить від умов експлуатації ЕРС та систем автоматики, а також від стану прилеглих багатопровідних систем.

2) Теоретичне дослідження спектрального складу комутаційної функції, фазного та зворотного струмів показує, що при певному збігу деяких негативних факторів гармоніки від ЕРС можуть потрапляти у смуги сигнальних частот рейкових кіл. За результатами проведеного дослідження виділені частоти та рівні характерних завад, що генеруються при роботі сучасних типів ЕРС, що можуть створювати заважаючий або небезпечний вплив на роботу пристроїв автоматики.

3) Адекватність отриманих моделей перевірена за критерієм Вілкоксона на 5% рівні значності для різних режимів роботи тягового приводу, при двох родах тягового струму та різних способів керування роботою асинхронного двигуна. Це дає можливість стверджувати, що отримані в цьому розділі математична та імітаційна моделі коректно описують електромагнітні процеси в силових колах ЕРС з асинхронними двигунами, та можуть бути використані для дослідження та проектування електромагнітної сумісності сучасних типів ЕРС з пристроями автоматики.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ТЯГОВОГО СТРУМУ ВІД ЕРС З АТП

Доведення електромагнітної сумісності сучасного електрорухомого складу з РК є фундаментом забезпечення безпеки руху на залізниці. Тому дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу КМ та ЕРС з АТП є актуальною проблемою галузі. Позитивний висновок щодо електромагнітної сумісності нового засобу транспорту надається на основі проведення низки сертифікаційних експериментальних вимірів для встановлення значень максимально можливих струмів завад [40, 74, 95]. Результати вимірів оформлюються окремим протоколом та дають змогу сформулювати ґрунтовний висновок щодо можливості використання нового засобу на залізницях України.

Враховуючи вище сказане у цьому розділі розглянуто результати дослідження електромагнітної сумісності сучасних типів ЕРС з АТП з пристроями СЦБ та зв'язку.

Слід зауважити, що в даному розділі не включені такі обов'язкові для випробувань на ЕМС процедури, як вимірювання радіозавад та ряд інших, і розгляд обмежений тільки дослідженням впливу ЕРС на рейкові кола. Для проведення досліджень було розроблено спеціальні методики.

3.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Електромагнітні завади, що генеруються ЕРС, розповсюджуються за участю тягової мережі, яка містить контактну мережу, рейкові лінії, тягові підстанції і, відповідно до цього, дослідження проводили як безпосередньо в силових колах ЕРС, так і рейкових лініях та на зворотному фідері тягової підстанції [40, 49, 74-76].

Типи обладнання та його параметри наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Випробувальне обладнання та засоби виміральної техніки

Назва виду випробувань	Характеристики та параметри, що визначаються	Назва засобів вимірювань	Основні параметри засобів вимірювань
Випробування на кондуктивні завади, що створюються електропоїздом	Найбільші значення струму завади на частотах, що задані нормативним документом	APPA 39R №02600957.	$f=0..10\text{кГц}$, $I=0,1..1000\text{ А}$ $\pm 1,9\%$
		AC current probe A 100	$f=0..20\text{кГц}$, $I=0,1..2000\text{ А}$ $\pm 1,0\%$
		Mastech M890F	$0,1\text{мВ}-1000\text{В}$ $\pm 0,5\%$
		АЦП В-421 № 332	$f=0..200\text{ МГц}$, $U=0..10\text{ В} \pm 1,5\%$
		АЦП m-DAQ14	$f=0..100\text{ кГц}$, $U=-10...+10\text{ В}$ $\pm 1,2\%$
		АЦП ADA-1406	$f=0..350\text{ кГц}$, $U=-10...+10\text{ В}$ $\pm 1,0\%$

У табл. 3.1 для кожного технічного засобу приведено відносну похибку вимірювання, по яким можна визначити результуючу похибку отриманих в результаті вимірів тягових струмів. В якості основного датчику струму використовувався AC current probe A 100, дані з нього через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) записувались на мобільний персональний комп'ютер (МПК). Згідно [31] максимальна відносна похибка вимірювання не перевищую суми відносних похибок використаних вимірвальних засобів. Максимальну відносну похибку вимірювання має АЦП В-421 – 1,5%, тоді виміряні дані будуть мати відносну похибку не більше:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{д}} + \varepsilon_{\text{АЦП}} = 1 + 1,5 = 2,5\%$$

де, $\varepsilon_{\text{д}}$ - відносна похибка AC current probe A 100;

$\varepsilon_{\text{АЦП}}$ - найбільша відносна похибка серед використаних АЦП (В-421)

3.1.1. Методика досліджень в силових колах ЕРС

Вимірювання фазного струму АТП

Схема вимірювання фазного струму АТП наведена на рис. 3.1. Фазний струм вимірювали за допомогою безконтактного датчика на одному з фазних проводів АТП. Датчик перетворює фазний струм АТП на відповідну йому напругу низького рівня, яка оцифровується АЦП та фіксується на МПК [49, 119, 134, 142]. Водночас на інші канали АЦП подаються сигнали швидкості руху ЕРС та керуючі сигнали, що визначають режим його ведення.

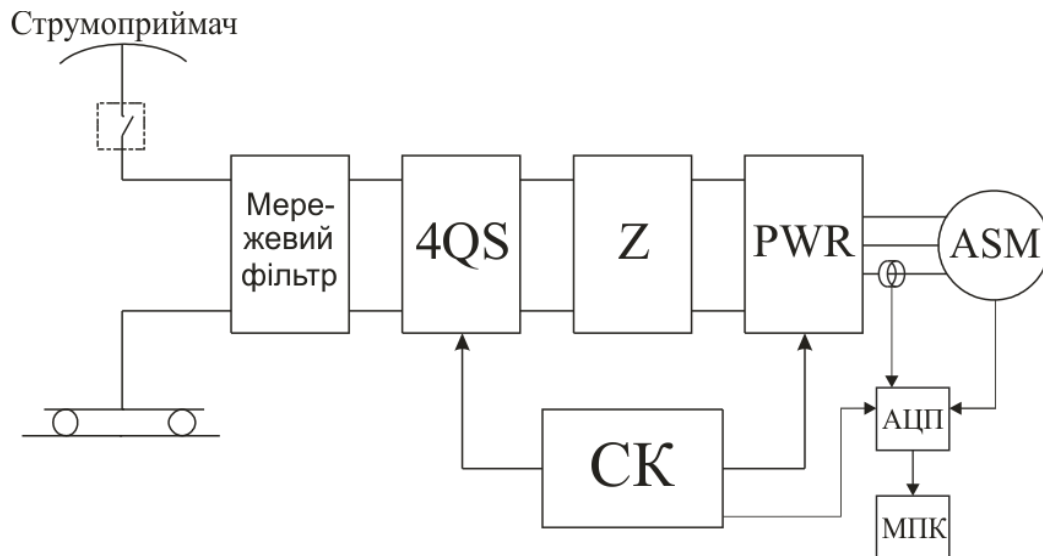


Рисунок 3.1 - Схема включення апаратури при вимірюванні фазного струму АТП

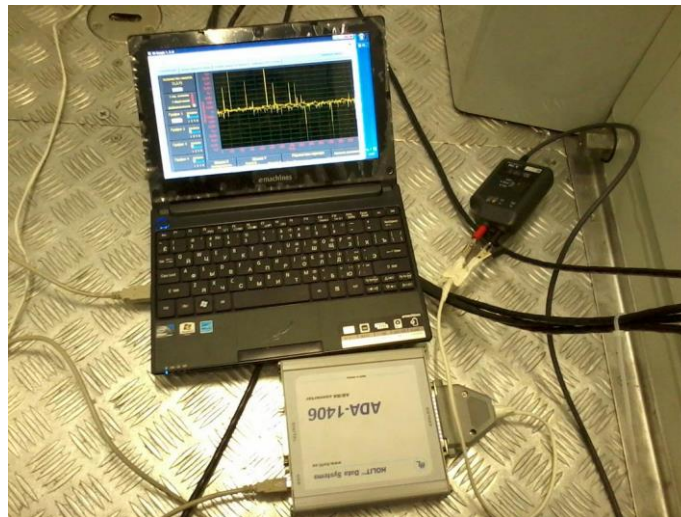


Рисунок 3.2 - Фото заміру струму в електровозі (датчики в силовій шафі)

Вимірювання зворотного тягового струму

Схема вимірювання фазного струму АТП наведена на рис. 3.3. Безконтактний датчик підключається до загального заземлювача електровоза,

таким чином він формує напругу, пропорційну загальному зворотному тяговому струму електровоза, що через заземлювач потрапляє в рейки. Якщо заземлювачів декілька, то для урахування повного зворотного струсу необхідно фіксувати струми всіх заземлювачів (практика показує, що розподілення загального струму по заземлювачам непропорційне) [49]. Одночасно з фіксацією струму електровозу на інших каналах АЦП фіксують керуючі сигнали та швидкість руху локомотива. Вид реєструючої апаратури в процесі досліджень на електропоїзді наведено на рис. 3.4

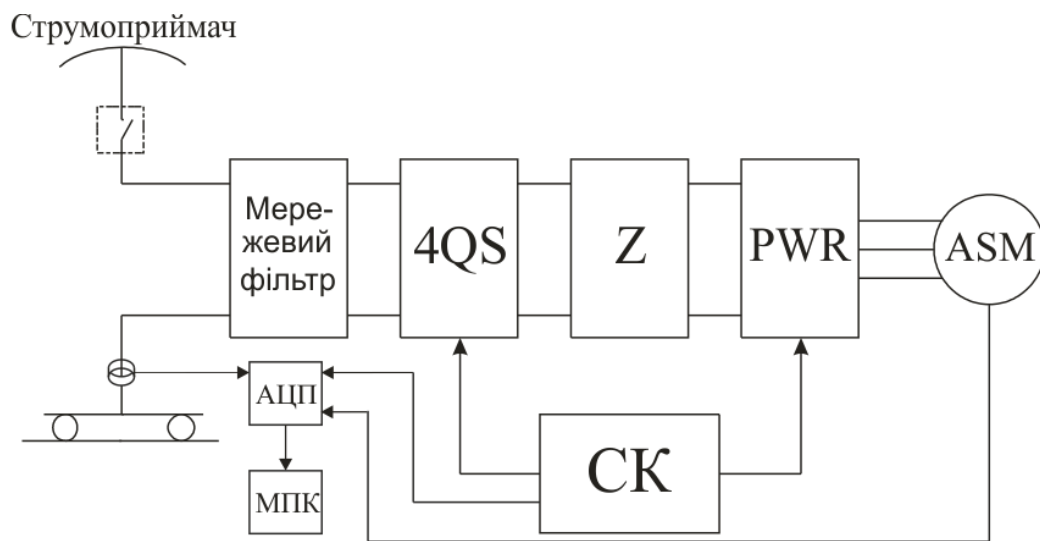


Рисунок 3.3 - Схема включення апаратури при вимірюванні зворотного струму електровозу

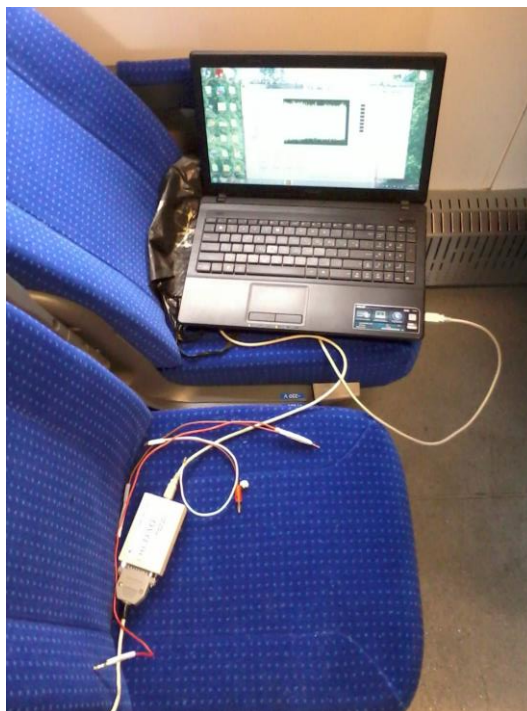


Рисунок 3.4 - Фото проведення заміру зворотного тягового струму

3.1.2. Виміри в рейкових лініях та пристроях СЦБ

Вимірювання зворотного тягового струму в рейках.

Схема вимірювання зворотного тягового струму в рейках наведено на рис. 3.5. Датчики підключаються до АЦП, дані якого фіксуються в реальному часі за допомогою МПК.

Найбільш зручним місцем для фіксації струму в рейках є дросель-трансформатор. За допомогою ДТ є можливість фіксувати загальний зворотній тяговий струм та струм в кожній рейці окремо, а з цих даних, при необхідності, непрямым методом можна отримати струм АЛС, кодовий струм РК, значення асиметрії тягових струмів в рейках [37, 38, 49]. Оптимальний замір тягових струмів здійснюється за допомогою двох Приклад підключення наведено на фото з експерименту рис. 3.6, 3.7. Датчики підключаються до АЦП, дані якого фіксуються в реальному часі за допомогою МПК.

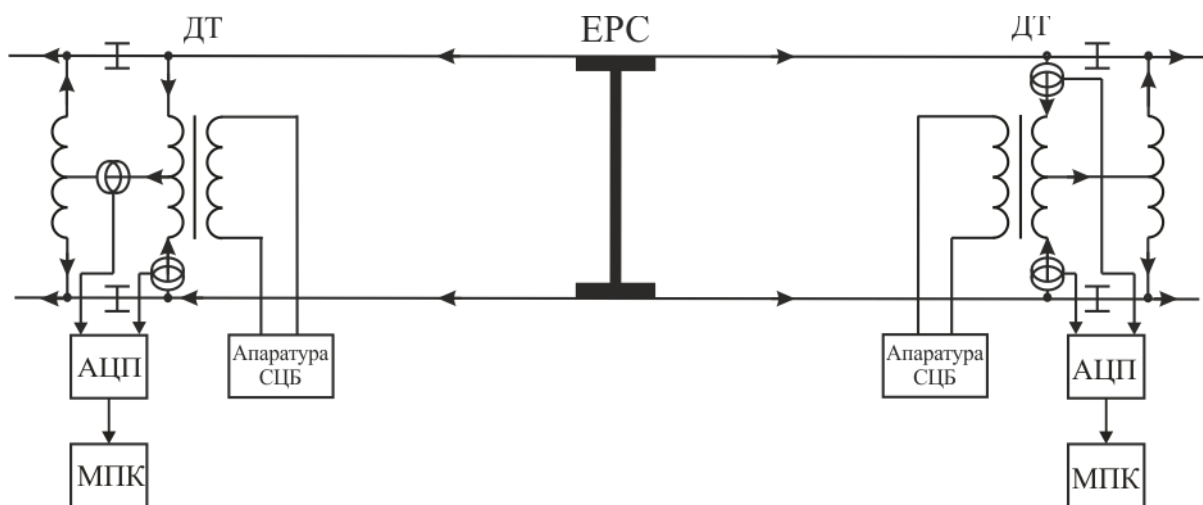


Рисунок 3.5 - Схеми включення апаратури при вимірюванні зворотного струму на дросель-трансформаторі



Рисунок 3.6 - Фото заміру тягового струму на дросель-трансформаторі
(проводиться замір струмів в рейках)



Рисунок 3.7 - Фото заміру тягового струму на дросель-трансформаторі
(проводиться замір струмів з рейки та зі зворотного фідеру ТП)

При проведенні замірів тягового струму на ДТ необхідно враховувати розповсюдження зворотного тягового струму в рейках в обидві сторони від ЕРС та перехід струму в землю. Тому для більш точного врахування зворотного струму від ЕРС необхідно проводити заміри на двох ДТ, що обмежують одне РК. Розподілення тягового струму від електровоза в різні

сторони залежить від багатьох факторів: відстані до ТП з одного та іншого боку, різної напруженості фідерних зон, опору рейкової лінії, поїзної ситуації та ін. [12, 70, 119]. Проте крім перелічених недоліків є велика перевага такого способу заміру: отримані рівні струмів завади є струмами в точці безпосереднього підключення апаратури СЦБ.

Багатоканальні АЦП надають значну перевагу при проведенні комплексних вимірів, бо дозволяють одночасно знімати показання з декількох інформаційних джерел. Використання багатоканального АЦП дозволяє скоротити об'єм робіт та час на проведення вимірів. Крім того аналіз даних отриманих в такий спосіб дозволяє виявити певні закономірності та взаємозв'язки в вимірюваних сигналах. При використанні багатоканального АЦП є можливість об'єднати схеми вимірювання на рис. 3.1, 3.3 та 3.5 . В роботі переважна кількість замірів виконана при використанні багатоканальних АЦП.

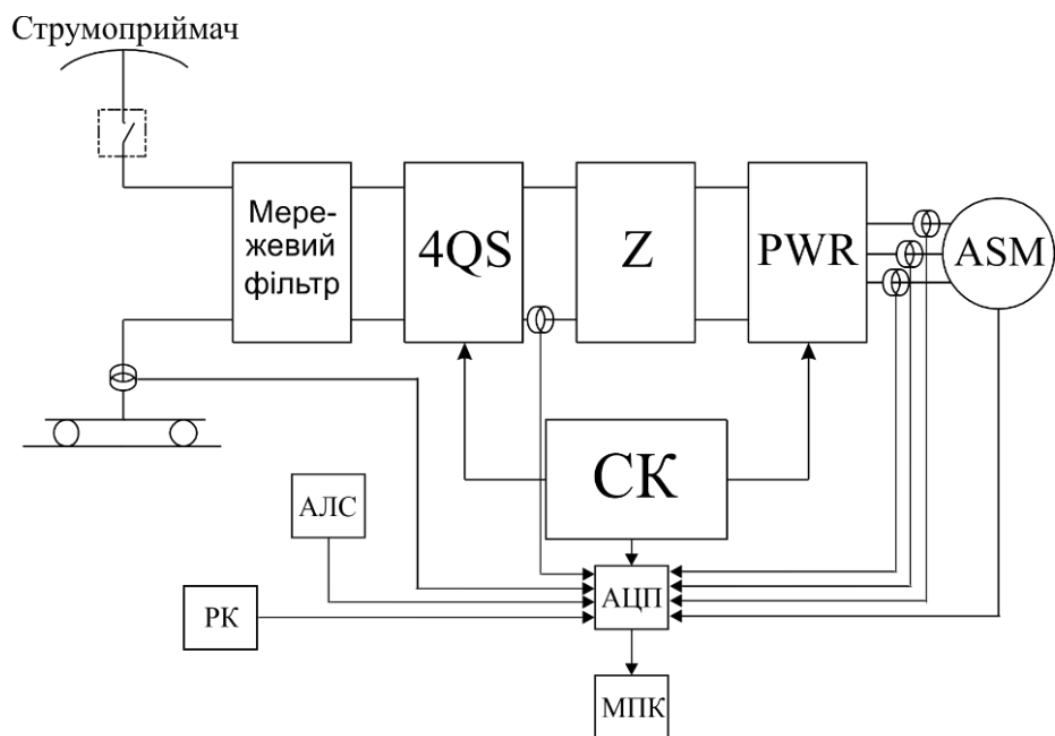


Рисунок 3.8 - Схема включення апаратури при проведенні багатоканальних вимірів

3.1.3 Методика обробки експериментальних результатів

Для визначення спектрального складу виміряних струмів використовували два основних метода, що можуть доповнювати один одного, підвищуючи точність та достовірність отриманих результатів:

1. Швидке перетворення Фур'є (FFT).
2. Використання цифрових фільтрів для визначення завад в окремих смугах частот та аналізу їх динаміки.

Експрес аналіз проводився безпосередньо під час вимірювань. При проведенні аналізу використано програмне забезпечення, що входить в комплект до АЦП, а також програми, розроблені в пакеті LabVIEW компанії National Instruments. Експрес аналіз дозволив оперативно оцінити отримані результати та зробити попередні висновки.

Глибокий аналіз результатів проводився за допомогою пакету MATLAB компанії MathWorks. В середовищі MATLAB реалізовано алгоритм FFT та проаналізовано найбільш інформативні фрагменти масивів записаних струмів.

В доповнення до методу FFT окремі фрагменти загального тягового струму пропускались через створені в Signal Processing Toolbox цифрові фільтри з полозою пропускання в діапазоні сигнальних частот рейкових кіл [147]. Відфільтровані струми завад є тими, що безпосередньо потрапляють на приймальні пристрої РК через колійні фільтри і є найбільш небезпечними для їх безпечної роботи.

3.2 Результати експериментальних досліджень фазного струму асинхронного тягового двигуна ЕРС д АТП

На рис. 3.9 приведена часова залежність фазного струму асинхронного тягового двигуна ЕРС з АТП, який в момент запису рухався рівноприскорено з набором швидкості до 155 км/год на ділянці з тягою змінного струму. Для параметрів, аналогічних до проведеного експерименту було, за допомогою імітаційної моделі, отримано часову залежність струму фази асинхронного двигуна, яка приведена на рис. 3.9, б пунктиром. З порівняння отриманих

результатів можна зробити висновок, що імітаційна модель, отримана в дисертації, досить точно описує реальний процес, що підтверджується перевіркою адекватності моделі за критерієм Вілкоксона [24, 31] на 5% рівні значності.

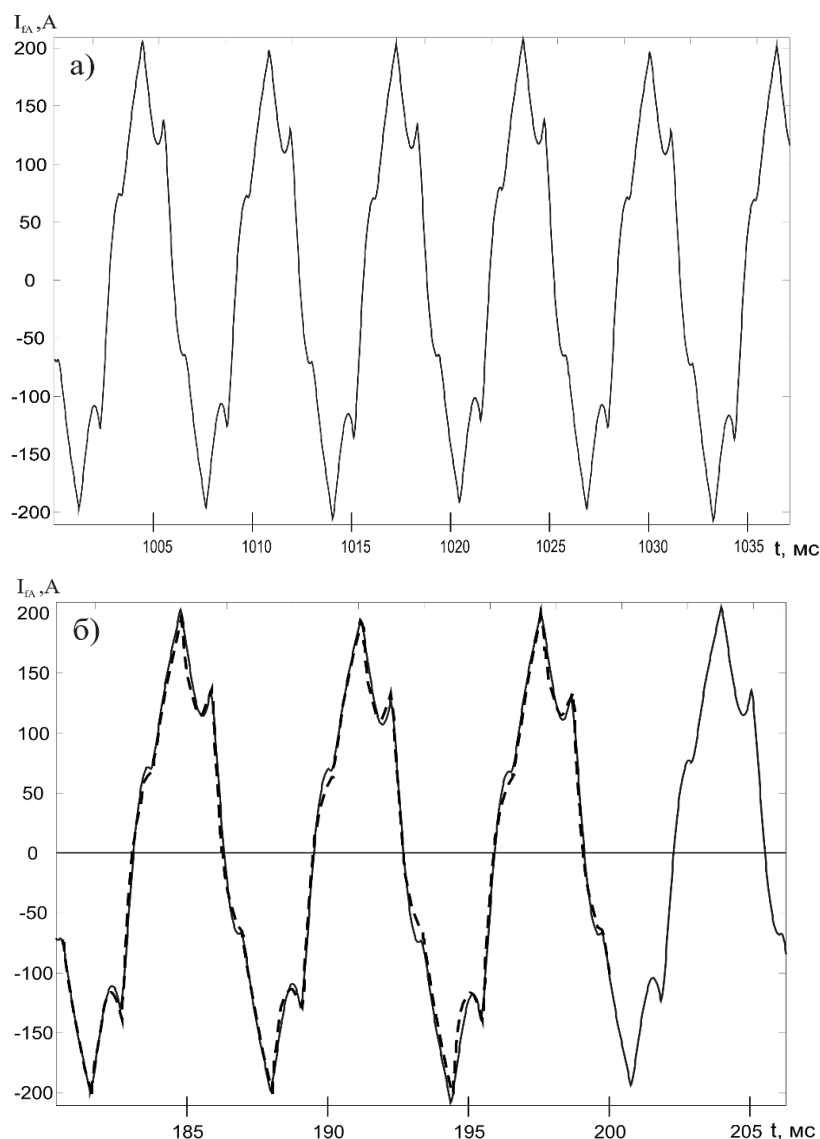


Рисунок 3.9 - Крива фазного струму електровозу (а) та її порівняння з результатом імітаційного моделювання (б)

Спектральний склад отриманої експериментальним шляхом часової залежності струму фази двигуна також майже ідентичний спектру струму, змодельованого за допомогою пакету OrCAD PSpice (рис. 3.10). На спектрі домінує гармоніка з частотою 157 Гц, яка відповідає вихідній частоті інвертору, що живить тягові асинхронні двигуни електровозу. При цьому 5-та гармоніка фазного струму потрапляє у смугу сигнальної частоти 780 Гц і має рівень більше 10 А, що може призвести до збоїв в роботі апаратури тональних РК.

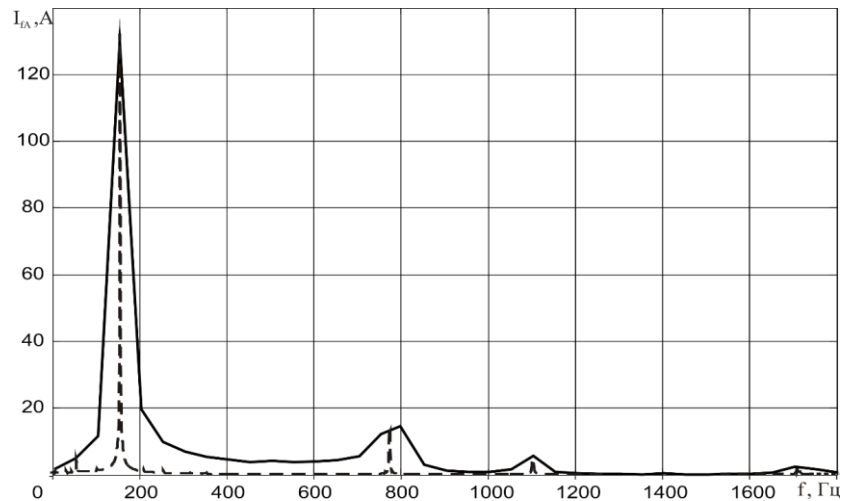


Рисунок 3.10 - Спектральний склад фазного струму отриманий експериментально та за допомогою імітаційного моделювання

На рис. 3.11 приведений фрагмент часової залежності струму фази асинхронного тягового двигуна, отриманий експериментальним шляхом під час початку руху локомотива з прискоренням в режимі тяги після відправлення зі станції, реалізована майже максимальна потужність електрорухомого складу. Також помітно застосування ШІМ для частотного керування асинхронним двигуном. За допомогою розробленої імітаційної моделі було отримано діаграму часової залежності струму фази інвертора для параметрів аналогічних до експерименту.

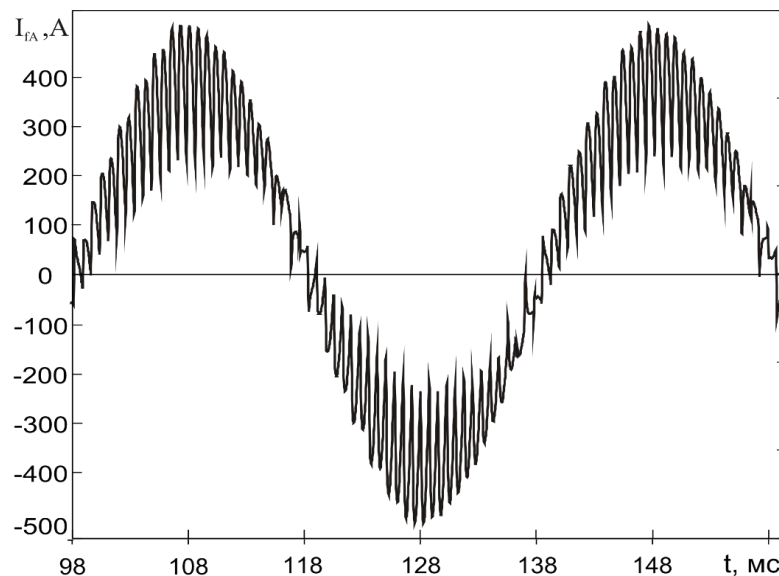


Рисунок 3.11 - Крива фазного струму при відправленні зі станції.

Порівняння результатів моделювання та експерименту приведено на рис. 3.12, де наведено спектральний склад фазного струму отриманий з моделі

(суцільна лінія) та експериментально (пунктирна лінія). Спектральний склад зафіксованої під час експерименту часової залежності струму фази двигуна подібний спектру струму, отриманого в результаті моделювання за допомогою пакету OrCAD (рис. 2.19). Адекватність імітаційної моделі, за допомогою якої отримана часова залежність струму фази при керуванні із застосуванням ШІМ, була перевірена за критерієм Вілкоксона на 5% рівні значності.

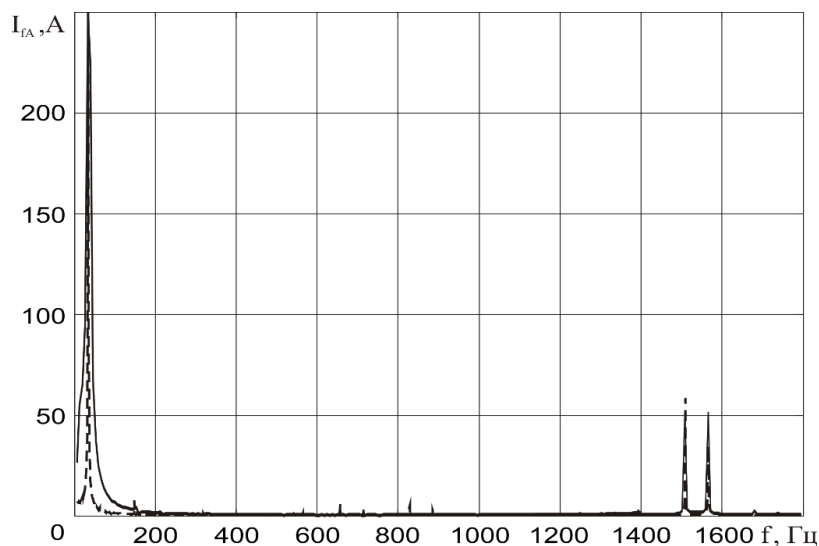


Рисунок 3.12 - Спектральний склад фазного струму

Отримані спектри вимірюваних фазних струмів відображають характер роботи перетворювача та збігається зі спектрами отриманими теоретично за допомогою математичної моделі АІН у розділі 2. Підтверджується гіпотеза доцільності використання методів широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою для керування АІН, що дозволить уникати потрапляння гармонік зворотного тягового струму в смугу сигнальних частот РК.

З приведених результатів імітаційного моделювання та експериментального дослідження часових залежностей фазних струмів асинхронних тягових двигунів, а також з проведеної оцінки адекватності імітаційної моделі можна зробити висновок, що запропонована модель адекватно описує реальні електромагнітні процеси в асинхронному тяговому приводі та може бути використана для подальших досліджень.

3.3. Результати експериментального дослідження спектрального складу зворотного тягового струму ЕРС з АТП

На рис. 3.13 та 3.14 приведено часову залежність та амплітудний спектр зворотного тягового струму електровозу з асинхронними тяговими двигунами в режимі тяги при розгоні до швидкості близько 140 км/год на ділянці з невеликим підйомом $\sim 5\text{ ‰}$.

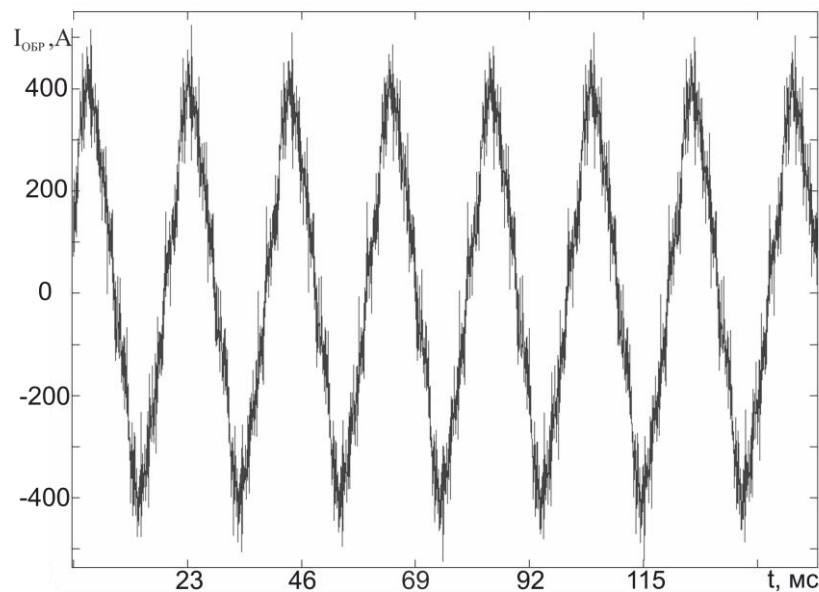


Рисунок 3.13 - Часова залежність зворотного тягового струму електровоза в режимі тяги

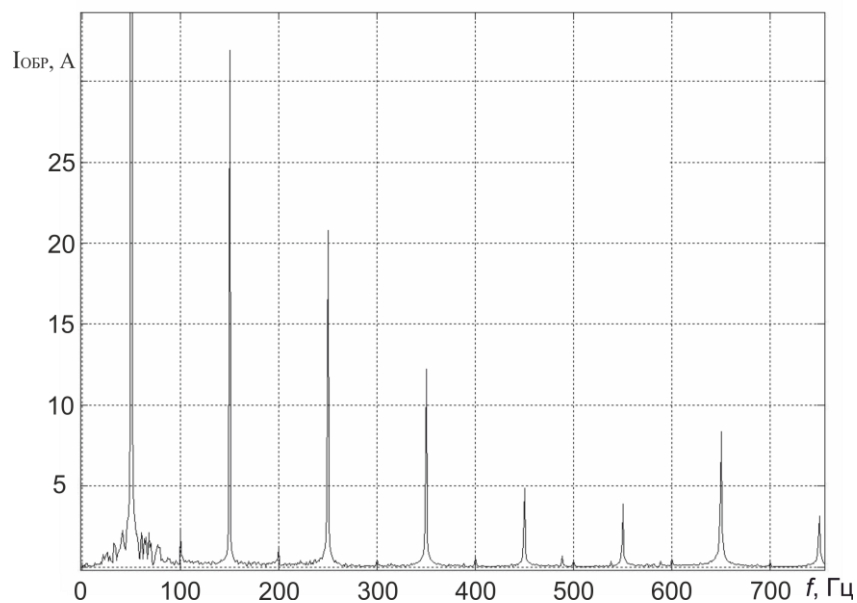


Рисунок 3.14 - Спектральний склад зворотного тягового струму електровоза в режимі тяги

На рис. 3.14 можна побачити, що у спектрі зворотного тягового струму присутні завади, що лежать у смузі сигнальних частот рейкових кіл: 25, 480 та 580 Гц, при цьому в полосі частоти 25 Гц рівень завади близький до небезпечного, а в полосі частоти 480 Гц завада від ЕРС перевищує нормативно допустиме значення [34, 40, 74] приблизно в 2 рази, що може привести до заважаючого, а при несприятливих умовах до небезпечного впливу на роботу рейкових кіл.

Основні гармонійні складові струму, що зумовлюють його несинусоїдальність, обумовлені роботою тягових перетворювачів електровоза, які навантажені на асинхронний двигун, що є активно-індуктивним колом [33, 46, 91]. З приведеного сигналу та його спектру можна зробити висновок про присутність цих гармонічних складових, досить високого рівня, в складі кривої струму, що свідчить про неякісне знімання струму пантографом та неповноцінну роботу мережевого фільтру ЕРС. Ці складові, що мають кратність 50 Гц, спотворюють сигнал, ускладнюючи його подальший аналіз, оскільки вони будуть відсутні у спектрах струмів, отриманих за допомогою розробленої моделі силових кіл ЕРС. Тому подальші результати аналізу приведені для тягового струму після цифрової фільтрації за допомогою фільтра синтезованого в пакеті MathLab.

Частоту зрізу фільтру обрано 1000 Гц для виключення високочастотних гармонійних складових. Такий вибір зумовлений необхідністю детального аналізу спектра сигналу в діапазоні частот РК, та виключення впливу нелінійностей АЧХ фільтру в області частоти зрізу. Отриманий сигнал після фільтру приведений на рис. 3.15.

Для порівняння результатів моделювання (суцільна лінія) із зафіксованим експериментальним шляхом сигналом після фільтрації (пунктир), дві часові залежності наведені на рис. 3.16. З приведеного рисунка можна зробити висновок, що отримана у роботі модель досить точно описує реальні електромагнітні процеси в силових колах ЕРС з асинхронними тяговими

двигунами. Була підтверджена адекватність отриманих моделей за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

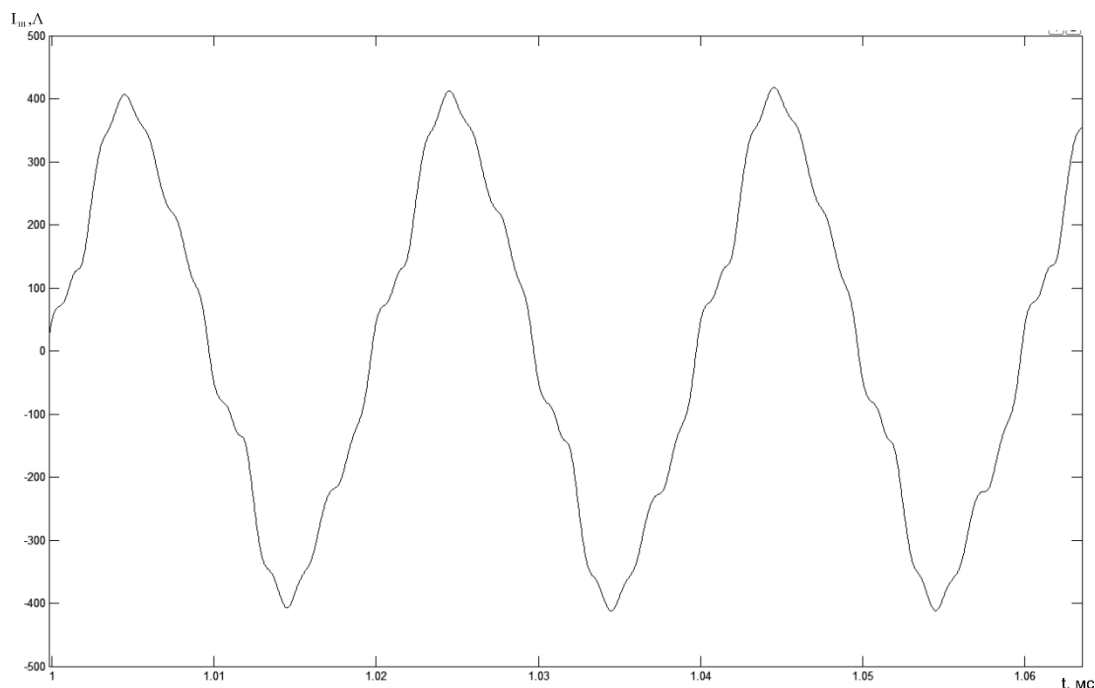


Рисунок 3.15 - Часова залежність зворотного тягового струму електровоза в режимі тяги після фільтрації

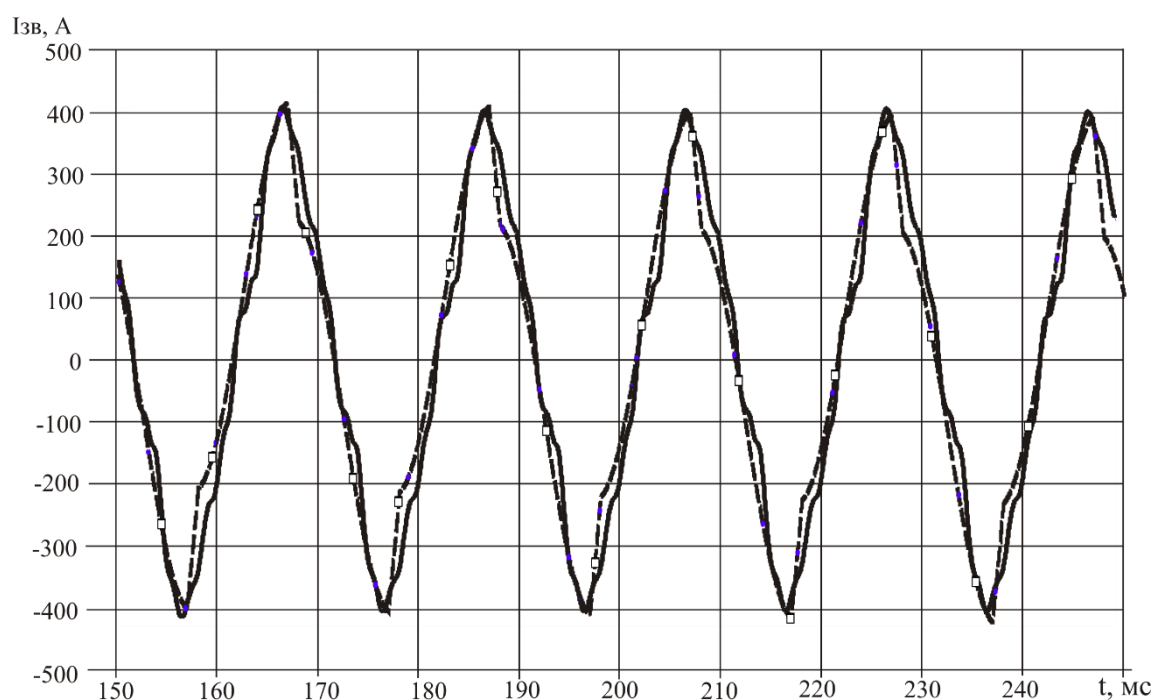


Рисунок 3.16 - Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними

На рис. 3.17 та 3.18 приведено часову залежність та амплітудний спектр зворотного тягового струму електровозу з асинхронними тяговими двигунами в режимі вибігу з невеликим прискоренням при швидкості близько 120 км/год на

ділянці з невеликим підйомом. З аналізу приведених даних можна зробити висновок, що в режимі вибігу споживаний ЕРС струм з контактної мережі суттєво нижчий ніж в режимі тяги. В наслідок чого рівні гармонік зворотного тягового струму в полосі сигнальних частот теж нижчі та знаходяться в межах, зазначених в нормативних документах [40, 74]. При такому режимі ведення локомотиву ймовірність негативного впливу на роботу РК з боку ЕРС значно менша.

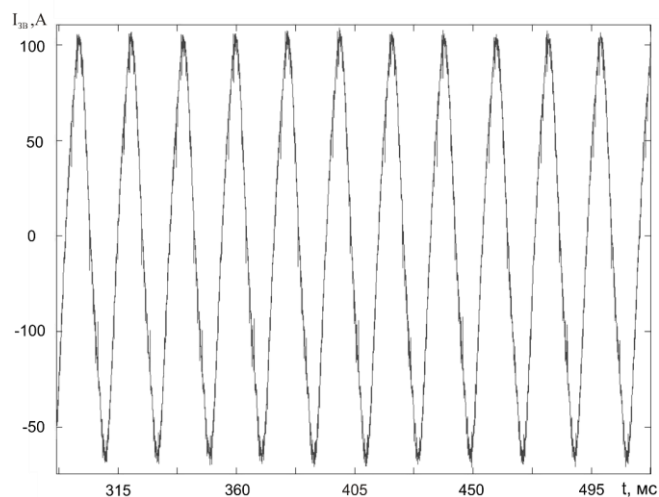


Рисунок 3.17 - Часова залежність зворотного тягового струму електровоза в режимі вибігу з невеликим прискоренням

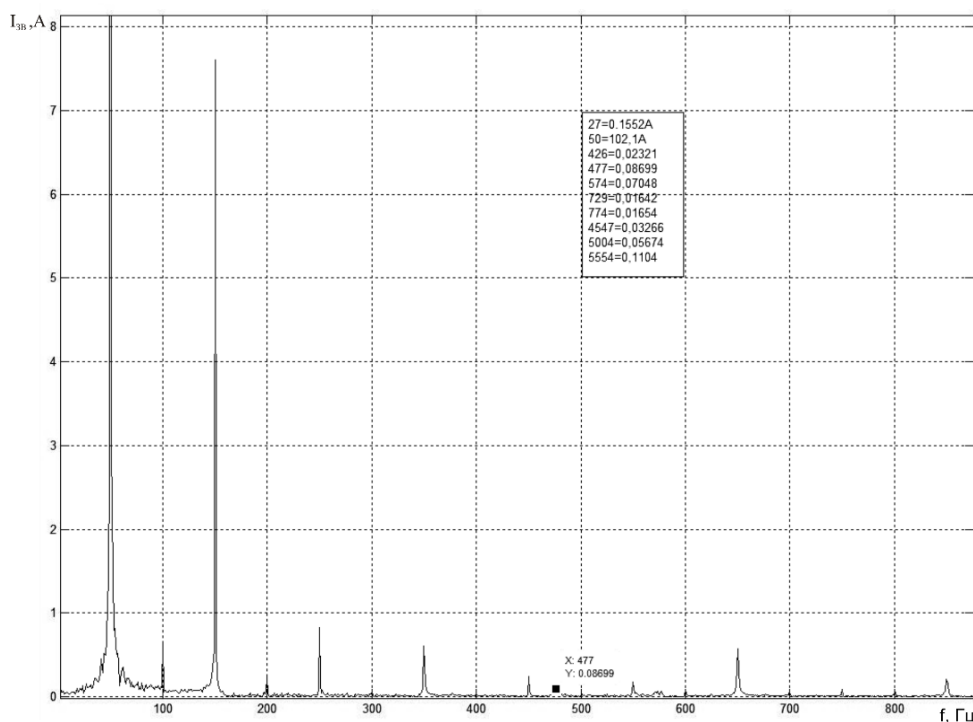


Рисунок 3.18 - Спектральний склад зворотного тягового струму електровоза в режимі вибігу з невеликим прискоренням

На рис. 3.19 та 3.20 приведено часову залежність та амплітудний спектр зворотного тягового струму електровозу з асинхронними тяговими двигунами в режимі екстреного гальмування без використання рекуперації. Гальмування відбувалось зі швидкості близько 140 км/год на рівній ділянці шляху.

Рівень зворотного тягового струму в режимі гальмування не перевищує 20 А, проте спектр струму має досить великий набір гармонічних складових, які відсутні у режимі тяги. Уваги заслуговує завада у полосі сигнальної частоти 480 Гц, оскільки її рівень вищий ніж за нормативно допустимий. Таким чином тяговий струм навіть невеликого рівня може оказувати дію, що заважає роботі рейкових кіл. Слід зазначити, що при гальмуванні з використанням рекуперації рівні завад у тяговому струмі будуть значно більшими.

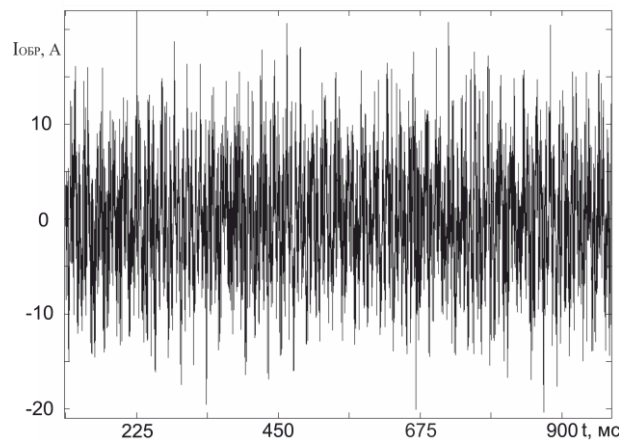


Рисунок 3.19 - Часова залежність зворотного тягового струму електровоза в режимі екстреного гальмування

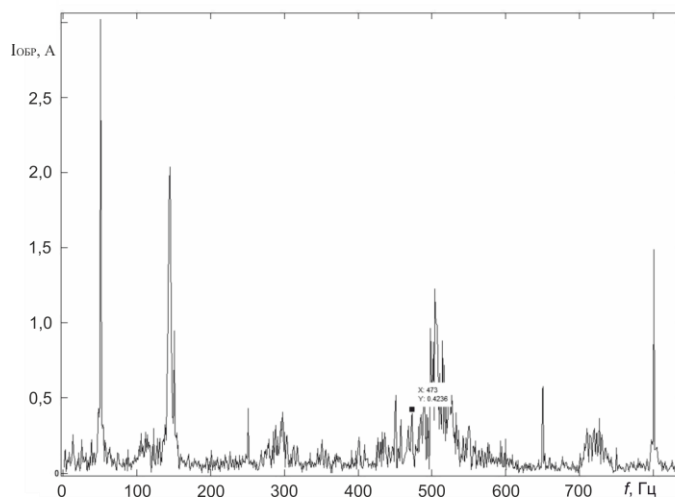


Рисунок 3.20 - Спектральний склад зворотного тягового струму електровоза в режимі екстреного гальмування

3.4. Аналіз завад від ЕРС в смугах частот роботи РК

В ході проведення експериментальних досліджень отримано значення струмів завад, що генеруються локомотивом з АТП в режимах прискорення, вибігу, гальмування, стоянки. Найбільші значення струмів завад спостерігалось при реалізації прискорення з максимальною тягою. Результати проведених вимірювань на кондуктивні завади, що створюються електровозом з АТП, при живленні від мережі змінного струму наведено в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 - Результати проведених вимірювань для електротяги змінного струму

Частота, Гц	Діапазон частот, Гц	Максимально допустимий струм завади, А	Максимально вимірний струм завади, А	Відповідність Так/Ні
25	21-29	1	1,41	Ні
420	408-432	0,35	0,37	Ні
480	468-492	0,35	0,40	Ні
580	568-592	0,35	0,55	Ні
720	708-732	0,35	0,42	Ні
780	768-792	0,35	0,52	Ні
4545	4508-4583	0,2	0,50	Ні
5000	4963-5038	0,2	0,15	Так
5555	5518-5593	0,2	0,21	Ні

Результати проведених вимірювань на кондуктивні завади, що створюються електровозом з АТП, при живленні від мережі постійного струму наведено в таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 - Результати проведених вимірювань для електротяги постійного струму

Частота, Гц	Діапазон частот, Гц	Максимально допустимий струм завади, А	Максимально вимірний струм завади, А	Відповідність Так/Ні
25	21-29	1	0,39	Так
50	46-54	1,3	0,10	Так
420	408-432	0,35	0,42	Ні
480	468-492	0,35	0,48	Ні
580	568-592	0,35	0,36	Ні
720	708-732	0,35	0,26	Так
780	768-792	0,35	0,38	Ні
4545	4508-4583	0,2	0,12	Так
5000	4963-5038	0,2	0,30	Ні
5555	5518-5593	0,2	0,13	Так

У таблицях 3.2 та 3.3 приведено максимальні значення струмів завад, що отримані при проведенні вимірів. З результатів проведених експериментальних

досліджень зворотного тягового струму від локомотива з АТП, які проілюстровано в підсумкових таблицях 3.2 та 3.3 видно, що у процесі випробувань струми завад у РК на частотах 25, 420, 480, 580, 780, 4545, 5000 Гц були вищими за гранично допустимі значення, що зазначені в [40, 74].

3.5. Висновки за розділом 3

У розділі роботи доведено актуальність експериментального дослідження зворотного тягового струму від ЕРС з АТП. Розроблено та описано оптимальні методики проведення таких досліджень із використанням сучасної вимірювальної та аналізуючої апаратури. Проведено врахування похибки результатів вимірювання та сформовано підсумкові таблиці результатів вимірів. Основні результати наступні:

1) Вдосконалено метод багатоканального вимірювання електромагнітних завад від нових типів електрорухомого складу при їх випробуваннях, що дав можливість проаналізувати причини виникнення завад, які генеруються обладнанням ЕРС. Метод може бути використаний при сертифікаційних випробувань ЕРС з АТП на електромагнітну сумісність з пристроями автоматики.

2) Отримані результати свідчать про те, що рух ЕРС з АТП супроводжується генерацією гармонійних завад досить високого рівня в широкому частотному діапазоні, включаючи смуги робочих частот РК.

3) В ході досліджень сформовано технічну рекомендацію щодо усунення причин появи електромагнітних завад в рейкових колах: доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою для керування АІН. Дотримання цієї рекомендації дозволить зменшити кількість завад від ЕРС з АТП, що потрапляють в смуги сигнальних струмів РК.

4) Результати розроблених математичної та імітаційної моделей досить точно описують данні, отримані експериментальним шляхом. Розбіжності між приведеними експериментальними даними та отриманими в дисертації результатами моделювання не перевищують 5 %, що підтверджується перевіркою адекватності моделі за критерієм Вілкоксона на 5% рівні значності

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ЕРС З АТП НА РЕЙКОВІ КОЛА

Проведені дослідження свідчать, що в умовах руху ЕРС в режимі тяги рівень гармонік зворотного тягового струму у рейкових лініях може виходити за встановлені межі допустимого рівню та створювати небажаний і навіть небезпечний вплив на роботу РК. Для детального з'ясування цих обставин потрібно провести дослідження процесу впливу контактної мережі на рейкові кола та аналіз розповсюдження гармонік зворотного тягового струму у рейкових лініях за допомогою математичної моделі системи тягового електропостачання.

Будь яка модель, що описує електромагнітний вплив, повинна містити три обов'язкові складові [18, 109, 120-122]: джерело завад – об'єкт, що генерує небажані електромагнітні коливання під час свого нормального функціонування; механізм зв'язку – фізичний принцип передачі енергії завади від джерела до приймача; приймач – об'єкт, який опинившись під впливом електромагнітних завад може втратити змогу коректно виконувати свої функції.

При розгляді загальної системи «джерело – приймач» слід враховувати відстань між об'єктами, що мають електромагнітний зв'язок, тобто визначити знаходиться приймач в ближній чи дальній зоні відносно джерела [111, 120, 139]. Дальня зона визначається відстанню між джерелом та приймачем, а також швидкістю зміни поля, іншими словами якщо час зростання поля менше ніж час проходження електромагнітною хвилею відстані між джерелом та приймачем, то можна вважати, що приймач розташований у дальній зоні. В такому випадку приймач з джерелом завад зв'язаний електромагнітним випроміненням, а електромагнітне поле завади повинно розглядатися як нестационарне, внаслідок чого опис і дослідження таких електромагнітних процесів стає громіздким.

Якщо приймач розташований в безпосередній близькості до джерела, на відстані, яка не перевищує довжини хвилі завади ($d \ll \lambda / 2\pi$), то можна вважати, що приймач знаходиться у ближній зоні [111, 120]. Знаходження

приймача у ближній зоні дозволяє припустити, що зміни електромагнітного поля, згенерованого джерелом завади, відбуваються одночасно в усіх точках простору. Завдяки такому припущенню поле завади у ближній зоні можна вважати стаціонарним, тоді між джерелом та приймачем може існувати кондуктивний та індуктивний зв'язок. Крім того в такому випадку єдине електромагнітне поле завади може розглядатися як сукупність двох складових: електричної та магнітної, кожна з яких створює свій механізм впливу на приймач.

Ступінь цього впливу залежатиме від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній. Будь-яка лінія вважається симетричною, якщо її проводи мають однакові первинні (активний опір, індуктивність, ємність між проводами і відносно землі, провідність ізоляції) і вторинні параметри (волновий опір і коефіцієнт розповсюдження хвилі). Найбільший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії, оскільки напруженість електромагнітного поля біля такої лінії буде максимальною. Коло КМ створене КП та рейками, що зв'язані з землею, тому первинні та вторинні параметри проводів такого кола будуть значно відрізнятися. А враховуючи, що струм в рейках та землі повністю дорівнює робочому струму в КП, КМ можна віднести до несиметричних ліній [12, 70, 120-122]. Отже є всі підстави вважати КМ потужним джерелом електромагнітних завад.

РК є основним колійним датчиком, що контролює положення потягу на перегоні та станції, цілісність рейкових ниток, а також виконує функції каналу передачі коду автоматичної локомотивної сигналізації від колійних пристроїв на локомотив. Рейкова лінія розташована поблизу КМ та виступає одним з її проводів, а отже малопотужне РК є потенційним приймачем електромагнітних завад з боку КМ [5-7, 142-145].

При дослідженні електромагнітного впливу КМ в діапазоні частот до 1 МГц можна вважати, що РК, як приймач завад, розташовані у ближній зоні. Це

дає можливість розглянути окремо кондуктивний, електричний та магнітний вплив КМ [120].

4.1 Дослідження магнітного впливу КМ

Головним параметром магнітного зв'язку між приймачем та лінією, що створює вплив, виступає опір взаємоіндукції $Z_{ij} = \omega \cdot M_{ij}$, де M_{ij} – коефіцієнт взаємоіндукції між двома лініями, що розглядаються.

Одним з основних джерел завад на залізниці, як зазначалось вище, виступає несиметрична лінія тягової мережі, іншими словами контур «КП – земля». Приймачем завад в свою чергу є рейкові кола, а саме контур «рейка – земля». Отже при дослідженні впливу КМ на РК необхідно розглядати опір взаємоіндукції між контурами «КП – земля» та «рейка – земля», на який суттєвий вплив створює провідність землі [21, 70]. В реальній ситуації земляний шар є неоднорідним, а його провідність залежатиме від геологічної породи та кліматичних умов. Це в значній мірі ускладнює процес теоретичного дослідження магнітного впливу КМ, а отримані результати моделювання в свою чергу потребують перевірки експериментом.

В літературі [6, 12, 48, 70, 87, 118, 143, 132, 153] розглядається багато варіантів підрахунку коефіцієнта взаємоіндукції між двома проводами, але всі вони дають лише в тій чи іншій мірі наближення до дійсності. Найбільш розповсюдженим та оптимальним для низьких частот вважається вираз, запропонований Поллячеком, який має наступний вид [12]:

$$M_{ij} = \left(1 + 2 \cdot \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot (D_{ij} - r) \cdot \sqrt{10\pi\omega\sigma}} - j \left(\frac{\pi}{2} + \frac{16 \cdot 10^{-4} (h_i + h_j) \cdot \sqrt{10\pi\omega\sigma}}{3} \right) \right) \cdot 10^{-4}, \quad (4.1)$$

де D_{ij} – відстань між проводами; r – радіус проводу, що знаходиться під впливом; σ – питома провідність землі; h_i, h_j – висота проводів над землею.

В дисертаційній роботі проведено теоретичне та експериментальне дослідження залежності коефіцієнту взаємоіндукції M від частоти впливаючого струму. При проведенні дослідження відстань між проводами була прийнята 4 м, висота підвісу 6 м, провідність землі $9,49 \cdot 10^{-4}$ См/м, що є близьким до реальної

ситуації на залізниці. Експериментальні дослідження проводилися в масштабі 1:40. На рис. 4.1 приведено результати дослідження, суцільною лінією показано теоретичний розрахунок, крапки відображають результати експерименту.

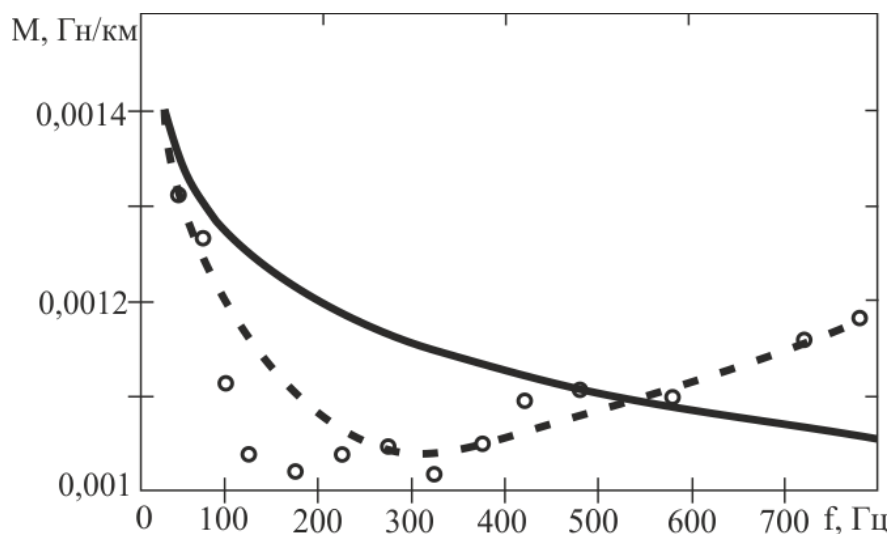


Рисунок 4.1 - Залежність коефіцієнту взаємодукції від частоти

Порівнявши теоретичні розрахунки з отриманими емпіричними даними, отримуємо середню відносну похибку, яка складає 3,8%. В зоні сигнальних частот РК (50, 420-780) середня відносна похибка складає 3,43%, що дає можливість з певною допустимою похибкою використовувати приведений теоретичний вираз для дослідження електромагнітних процесів на низьких частотах у смузі сигнальних струмів РК.

4.1.1 Теоретичне дослідження магнітного впливу КМ на рейкові кола

Якщо розглядати одноколіїну ділянку залізниці, то наведені повздовжні ЕРС у рейках будуть приблизно однаковими, бо контактний провід розташований симетрично відносно рейкової лінії. Таким чином магнітний вплив від контактного проводу своєї колії буде незначним. Але при розгляданні багатоколіїних ділянок (двух-, трьохколіїні перегони, або станції) треба враховувати вплив КП однієї колії на рейкові лінії сусідніх колій. В цьому випадку наведені повздовжні ЕРС матимуть різні значення, бо відстань від впливаючого контактного проводу до рейок суміжної колії буде різною.

При дослідженні магнітного впливу треба враховувати, що рейкова лінія є лінією з розповсюдженими параметрами і процеси в них описуватимуться системою наступних диференціальних рівняннями [11, 12, 56]:

$$\begin{aligned} u_p - (u_p + du_p) &= R_p i_p dx + L_p \frac{di_p}{dt} + i_{кп} R_{кпр} dx + L_{кпр} \frac{di_{кп}}{dt} dx, \\ i_p - (i_p + di_p) &= G_p u_p dx + C_p \frac{du_p}{dt} + G_{кпр} (u_p + u_{кп}) dx + C_{кпр} \frac{d(u_p + u_{кп})}{dt} dx \end{aligned} \quad (4.2)$$

де u_p, i_p - миттєві значення напруги та струму в рейковій лінії;

R_p, L_p, G_p, C_p - первинні параметри рейкової лінії;

$u_{кп}, i_{кп}$ - миттєві значення напруги та струму в контактному проводі;

$M_{кпр} = R_{кпр} + j\omega L_{кпр}$ - параметр магнітного зв'язку контактного

проводу з рейками;

$Y_{кпр} = G_{кпр} + j\omega C_{кпр}$ - параметр електричного зв'язку контактного

проводу з рейками;

При переході від миттєвих значень до діючих комплексних отримуємо наступну систему:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_p}{dx} &= R_p \dot{I}_p + L_p \frac{d\dot{I}_p}{dt} + L_{кп} \frac{d\dot{I}_{кп}}{dt} + R_{кпр} \dot{I}_{кп}, \\ -\frac{d\dot{I}_p}{dx} &= G_p \dot{U}_p + C_p \frac{d\dot{U}_p}{dt} + G_{кпр} (\dot{U}_p - \dot{U}_{кп}) + C_{кпр} \frac{d(\dot{U}_p - \dot{U}_{кп})}{dt} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Так як $\dot{U}_p = |U_p| e^{j(\omega t + \varphi)}$, $\dot{I}_p = |I_p| e^{j(\omega t + \varphi - \alpha)}$, то звідси можна записати

$$\frac{d\dot{U}_p}{dt} = j\omega |U_p| e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad \frac{d\dot{I}_p}{dt} = j\omega |I_p| e^{j(\omega t + \varphi - \alpha)}, \quad \text{тоді справедливі наступні}$$

вирази $\frac{d\dot{U}_p}{dt} = j\omega \dot{U}_p$; $\frac{d\dot{I}_p}{dt} = j\omega \dot{I}_p$; $\frac{d\dot{I}_{кп}}{dt} = j\omega \dot{I}_{кп}$. Підставимо їх у систему (4.3):

$$\begin{aligned}
-\frac{dU_p}{dx} &= (R_p + j\omega L_p)I_p + j\omega L_{кпр}I_{кп} + R_{кпр}I_{кп}, \\
\frac{dI_p}{dx} &= (G_p + j\omega C_p)U_p - (G_{кпр} - j\omega C_{кпр})(U_{кп} - U_p)
\end{aligned}
\tag{4.4}$$

Отримали систему диференціальних рівнянь, яка за методом суперпозицій має відомі загальні рішення:

$$\begin{aligned}
u_1 &= C_1 e^{\gamma_p x} + C_2 e^{-\gamma_p x} \\
i_1 &= -\frac{1}{Z_{Bp}} \left[C_1 e^{\gamma_p x} - C_2 e^{-\gamma_p x} \right]
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

де γ_p - постійна розповсюдження хвилі у рейковій лінії;

Z_{Bp} - хвильовий опір рейкової лінії.

Для пошуку часткових рішень системи (4.4) напишемо її у вигляді:

$$\begin{aligned}
U'_p + Z_p I_p + Z_{кпр} I_{кпн} e^{-\gamma_{кп} x} &= 0 \\
I'_p + Z_p U_p - Y_{кпр} U_{кпн} e^{-\gamma_{кп} x} &= 0
\end{aligned}
\tag{4.6}$$

де $\gamma_{кп}$ - постійна розповсюдження хвилі у контактному провіді.

Самі часткові рішення будемо шукати у наступній формі:

$$\begin{aligned}
u_2 &= A e^{-\gamma_{кп} x}, \\
i_2 &= B e^{-\gamma_{кп} x}
\end{aligned}
\tag{4.7}$$

Тоді

$$\begin{aligned}
u'_2 + Z_p i_2 + Z_{кпр} I_{кпн} e^{-\gamma_1 x} &= 0 \\
i'_2 + Z_p u_2 - Y_{кпр} U_{кпн} e^{-\gamma_1 x} &= 0
\end{aligned}
\tag{4.8}$$

Підставимо значення u_2 та i_2 з (4.7), а також їх похідні в систему (4.8):

$$\begin{aligned}
-\gamma_{кп} A e^{-\gamma_{кп} x} + Z_p B e^{-\gamma_{кп} x} + Z_{кпр} I_{кпн} e^{-\gamma_{кп} x} &= 0, \\
-\gamma_{кп} B e^{-\gamma_{кп} x} + Y_p A e^{-\gamma_{кп} x} + Y_{кпр} U_{кпн} e^{-\gamma_{кп} x} &= 0
\end{aligned}
\tag{4.9}$$

Розділимо на $e^{-\gamma_1 x}$ отримуємо:

$$\begin{aligned}
-\gamma_{кп} A + Z_p B + Z_{кпр} I_{кпн} &= 0, \\
-\gamma_{кп} B + Y_p A + Y_{кпр} U_{кпн} &= 0.
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

Розв'яжемо цю систему відносно коефіцієнтів A та B , отримуємо:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\gamma_{\text{кп}} Z_{\text{кпр}} I_{\text{кпн}} - Z_{\text{р}} Y_{\text{кпр}} U_{\text{кпн}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2}, \\ B &= \frac{Y_{\text{р}} Z_{\text{кпр}} I_{\text{кпн}} - \gamma_{\text{кп}} Y_{\text{кпр}} U_{\text{кпн}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Визначивши загальні та часткові рішення системи диференціальних рівнянь (4.4), напишемо повне рішення цієї системи як суму загального та часткового рішень:

$$U_{\text{р}}(x) = Ae^{-\gamma_{\text{кп}}x} + C_1 e^{\gamma_{\text{р}}x} + C_2 e^{-\gamma_{\text{р}}x} \quad (4.12)$$

$$I_{\text{р}}(x) = -\frac{1}{Z_{\text{Вр}}} \left[C_1 e^{\gamma_{\text{р}}x} - C_2 e^{-\gamma_{\text{р}}x} \right] + Be^{-\gamma_{\text{кп}}x} \quad (4.13)$$

Рейкове коло, що знаходиться під впливом є двопровідною лінією. Сучасні тональні рейкові кола використовуються у системах автоблокування без ізолюючих стиків [6, 36, 110]. Тоді щоб врахувати наявність рейкової лінії по кінцях конкретного рейкового кола, можна вважати, що воно замкнене на хвильові опори. Проте станційні тональні рейкові кола, як і рейкові кола низьких частот (25, 50 Гц) експлуатуються з ізолюючими стиками. Такі лінії можна вважати ізолюваними по кінцях. Отже дослідження магнітного впливу буде проводитися для двопровідних ліній ізолюваних по своїх кінцях [98]. Двопровідну рейкову лінію розглядатимемо як дві однопровідні лінії, що знаходяться поряд на відстані 1520 мм.

Розглянемо однопровідну лінію, що ізолювана по кінцях, тобто випадок, близький до станційних тональних рейкових кіл, або рейкових кіл низької частоти. Для такої лінії маємо [11, 12, 70]:

$$I_{\text{рн}} = I_{\text{рк}} = 0$$

а рівняння (4.12-4.13) при $x = 0$ приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_{\text{рн}} &= A + C_1 + C_2 \\ 0 &= -\frac{1}{Z_{\text{Вр}}} [C_1 - C_2] + B \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\text{Тоді } C_1 = \frac{U_{\text{рн}} - A + BZ_{\text{Вр}}}{2} \quad C_2 = \frac{U_{\text{рн}} - A - BZ_{\text{Вр}}}{2} \quad (4.15)$$

Підставимо ці значення в систему рівнянь та виразимо ступеневі функції через гіперболічні:

$$U_{\text{р}} = Ae^{-\gamma_{\text{р}}x} + (U_{\text{рн}} - A) \text{ch } \gamma_{\text{р}}x + BZ_{\text{Вр}} \text{sh } \gamma_{\text{р}}x,$$

$$I_{\text{р}} = Be^{-\gamma_{\text{р}}x} - B \text{ch } \gamma_{\text{р}}x - \frac{U_{\text{рн}} - A}{Z_{\text{Вр}}} \text{sh } \gamma_{\text{р}}x.$$

При $x = l$ та $I_{\text{рк}} = 0$ друге рівняння системи прийме вигляд:

$$0 = Be^{-\gamma_{\text{кп}}l} - B \text{ch } \gamma_{\text{р}}l - \frac{U_{\text{рн}} - A}{Z_{\text{Вр}}} \text{sh } \gamma_{\text{р}}l.$$

Напруга на початку однопровідної лінії буде:

$$U_{\text{рн}} = BZ_{\text{Вр}} \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}}l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}}l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}}l} + A.$$

Якщо підставити значення коефіцієнтів A і B з рівняння (4.11), отримуємо:

$$U_{\text{рн}} = Z_{\text{Вр}} \frac{Y_{\text{р}}Z_{\text{кпр}}I_{\text{кпн}} - \gamma_{\text{кп}}Y_{\text{кпр}}U_{\text{кпн}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2} \cdot \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}}l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}}l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}}l} + \frac{Z_{\text{кпр}}I_{\text{кпн}}\gamma_{\text{кп}} - Y_{\text{кпр}}U_{\text{кпн}}Z_{\text{р}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2}$$

Після перетворення:

$$U_{\text{рн}} = \frac{U_{\text{кпн}}Z_{\text{Вр}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2} \left[\frac{Z_{\text{кпр}}}{Z_{\text{Вкп}}Z_{\text{Вр}}} \left(\gamma_{\text{кп}} + \gamma_{\text{р}} \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}}l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}}l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}}l} \right) - Y_{\text{кпр}} \left(\gamma_{\text{р}} + \gamma_{\text{кп}} \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}}l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}}l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}}l} \right) \right].$$

В склад формули входять дві частини, друга з яких характеризує магнітний вплив контактного проводу. Враховуючи раніше прийняті позначення напишемо вираз для індукованої напруги, що зумовлена тільки магнітним впливом:

$$U_{\text{рн}}^{\text{м}} = \frac{\omega U_{\text{кпн}} Z_{\text{Вр}}}{(\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2) Z_{\text{Вкп}} Z_{\text{Вр}}} M_{\text{кпр}} \left(\gamma_{\text{кп}} + \gamma_{\text{р}} \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}} l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}} l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}} l} \right) \\ = \frac{\omega I_{\text{кпн}} M_{\text{кпр}}}{\gamma_{\text{кп}}^2 - \gamma_{\text{р}}^2} \left(\gamma_{\text{кп}} + \gamma_{\text{р}} \frac{e^{-\gamma_{\text{кп}} l} - \text{ch } \gamma_{\text{р}} l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}} l} \right).$$

Так як величина $\gamma_{\text{кп}}$ незначна по відношенню до $\gamma_{\text{р}}$ то при розгляданні її можна не враховувати, тоді формула для визначення поздовжньої напруги прийме більш спрощений вигляд:

$$U_{\text{рн}}^{\text{м}} = \frac{\omega M_{\text{кпр}} I_{\text{кпн}}}{\gamma_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - \text{ch } \gamma_{\text{р}} l}{\text{sh } \gamma_{\text{р}} l}$$

Скориставшись початковими умовами визначимо напругу у будь якій точці лінії:

$$U_{\text{р}} = A + (U_{\text{рн}} - A) \text{ch } \gamma_{\text{р}} x + B Z_{\text{Вр}} \text{sh } \gamma_{\text{р}} x, \\ I_{\text{р}} = B - B \text{ch } \gamma_{\text{р}} x - \frac{U_{\text{рн}} - A}{Z_{\text{Вр}}} \text{sh } \gamma_{\text{р}} x. \quad (4.16)$$

Коефіцієнти A та B визначаються з рівнянь (4.11) за умови, що $\gamma_{\text{кп}} = 0$

$$A = \frac{Y_{\text{кпр}} U_{\text{кпн}}}{G_{\text{р}} + j\omega C_{\text{р}}} = k_2 U_{\text{кпн}}, \quad B = -\frac{\omega M_{\text{кпр}} I_{\text{кпн}}}{R_{\text{р}} + j\omega L_{\text{р}}},$$

де

$$k_2 = \frac{Y_{\text{кпр}}}{G_{\text{р}} + j\omega C_{\text{р}}} = \frac{Y_{\text{кпр}}}{Y_{\text{р}}}, \quad k_1 = \frac{\omega M_{\text{кпр}}}{R_{\text{р}} + j\omega L_{\text{р}}} = \frac{Z_{\text{кпр}}}{Z_{\text{р}}}.$$

Підставимо значення A та B в систему рівнянь (4.16):

$$U_{\text{р}} = k_2 U_{\text{кпн}} + U_{\text{рн}} \text{ch } \gamma_{\text{р}} x - k_2 U_{\text{кпн}} \text{ch } \gamma_{\text{р}} x - k_1 I_{\text{кпн}} Z_{\text{Вр}} \text{sh } \gamma_{\text{р}} x, \\ I_{\text{р}} = -k_1 I_{\text{кпн}} + k_1 I_{\text{кпн}} \text{ch } \gamma_{\text{р}} x - \frac{U_{\text{рн}}}{Z_{\text{Вр}}} \text{sh } \gamma_{\text{р}} x + \frac{1}{Z_{\text{Вр}}} k_2 U_{\text{кпн}} \text{sh } \gamma_{\text{р}} x. \quad (4.17)$$

Виходячи з приведеної системи можна визначити напругу та струм, що зумовлена тільки магнітним впливом, у будь якій точці лінії:

$$U_p^M = U_{pH}^M \operatorname{ch} \gamma_p x - k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \operatorname{sh} \gamma_p x$$

$$I_p^M + k_1 I_{кпн} = k_1 I_{кпн} \operatorname{ch} \gamma_p x - \frac{U_{pH}^M}{Z_{Bp}} \operatorname{sh} \gamma_p x$$

При $x = l$

$$U_p^M = U_{pH}^M \operatorname{ch} \gamma_p l - k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \operatorname{sh} \gamma_p l$$

$$0 + k_1 I_{кпн} = k_1 I_{кпн} \operatorname{ch} \gamma_p l - \frac{U_{pH}^M}{Z_{Bp}} \operatorname{sh} \gamma_p l$$

З другого рівняння визначаємо напругу на початку та в кінці лінії:

$$U_{pH}^M = k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \frac{\operatorname{ch} \gamma_p l - 1}{\operatorname{sh} \gamma_p l} = k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}. \quad (4.18)$$

$$U_{pK}^M = -k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}.$$

Різниця потенціалів, наведених в кінці та на початку лінії є поздовжньою ЕРС, наведеною в лінії:

$$U_{pH}^M - U_{pK}^M = 2k_1 I_{кпн} Z_{Bp} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}.$$

Підставимо в це рівняння відомі значення k_1 та Z_{Bp} , отримуємо виріз для визначення поздовжньої ЕРС [11, 12]:

$$E_{и_i} = U_{pH}^M - U_{pK}^M = \frac{2\omega M_{кпр} I_{кпн} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}}{\gamma_p} \quad (4.19)$$

Знайшовши вирази для оцінки наведеної повздовжньої ЕРС в рейках, визначимо окремо рівень ЕРС в кожній з рейок колії.

$$E_{иp1} = \frac{2\omega M_{кпр1} I_{кпн} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}}{\gamma_p} - \text{для ближньої рейки суміжної колії}$$

$$E_{иp2} = \frac{2\omega M_{кпр2} I_{кпн} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}}{\gamma_p} - \text{для дальньої рейки.}$$

Також необхідно дослідити характер зміни різниці наведених ЕРС в рейках колії, що визначається за формулою:

$$\Delta E_{12} = E_{ip1} - E_{ip2} = \frac{2\omega(M_{кпр1} - M_{кпр2})I_{кпн} \operatorname{th} \frac{\gamma_p l}{2}}{\gamma_p}$$

Для дослідження задаємося найгіршими параметрами, при яких вплив контактного проводу був би максимальним, тобто рейки суміжної колії розташовані як найближче до контактного проводу. При цьому необхідно взяти мінімальну висоту підвіски контактного проводу. Відстань між коліями - це параметр, який головним чином визначатиме відстань від контактного проводу до рейок, до того ж на різних ділянках залізниці він може змінюватися, тому у роботі цей параметр оберемо як змінну.

Відома відстань між рейками, вона визначається Правилами технічної експлуатації залізниць України та і становить 1520 мм. Міжколійна відстань на перегоні двохколійної ділянки повинна бути не менш ніж 4100 мм. Висота підвіски контактного проводу також визначається нормативним документом і може знаходитися в межах від 5750 мм до 6800 мм.

Дослідження будемо проводити для частоти тягового струму 50 Гц та однієї з тональних частот, яка може з'явитися у струмі, що споживає електровоз. Так як з ростом частоти амплітуда гармоніки спадає [45, 100], то для дослідження оберемо найнижчу тональну частоту 420 Гц.

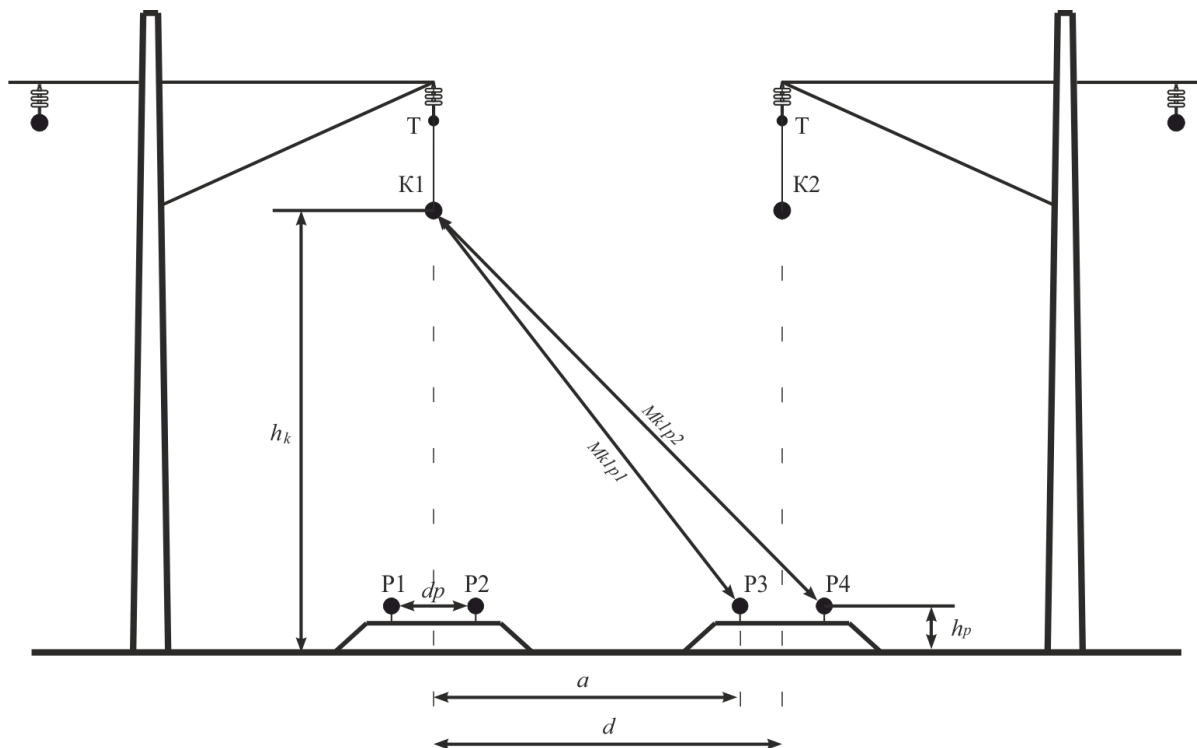


Рисунок 4.2 - Розміщення контактних проводів та рейок на двохколіній дільниці

Отримані ЕРС в рейках колії є повздовжніми, тобто визначаються на одиницю довжини рейки. При проектуванні тональних рейкових кіл їх максимальна довжина досягає 1000 м [62, 90, 110], тому всі розрахунки будемо проводити для довжини рейки 1000 м.

При розрахунках необхідно врахувати первинні та вторинні параметри ліній. Контактний провід для спрощення вважаємо ідеальним (постійна поширення хвилі дорівнює нулю), а параметри рейкової лінії знайдемо окремо. Відомо, що активний опір рейок залежить від частоти та рівня струму, який проходить крізь них.

Будемо вважати, що на момент магнітного впливу суміжна колія вільна від рухомого складу, отже тяговий струм в рейках відсутній. Струми, що наводяться в рейках, також матимуть значення, які дуже малі по відношенню до тягового струму, а напруженість магнітного поля під їх дією можна вважати близькою до нуля. Тоді відносна магнітна проникність рейок буде постійною та дорівнюватиме 90.

Існують також теоретичні дослідження, які присвячені визначенню активного опору феромагнітних провідників. На їх основі була отримана

наступна розрахункова формула, за допомогою якої можна визначити активний опір рейок [12, 70]:

$$R_r = \frac{0,28}{P} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f} \quad (4.20)$$

де P - периметр перерізу рейки;

ρ - питомий опір рейкової сталі, $0,21 \cdot 10^{-6}$ Ом $\cdot$ м [11];

μ - відносна магнітна проникність;

Індуктивний опір рейок визначається як сума зовнішньої та внутрішньої індуктивностей. Перша з них визначається суто геометричними розмірами системи [6, 70]:

$$L_e := 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left(\frac{dp - r1}{r1} \right)$$

де $r1$ - радіус еквівалентного круга з довжиною кола, що дорівнює периметру перетину рейки;

Внутрішня індуктивність залежить від активного опору рейок та частоти струму, що по них протікає. Тоді результуюча формула індуктивного опору однієї рейки матиме вигляд [6, 70]:

$$L_r := \frac{L_e + 2 \cdot \left(0,0955 \frac{R_r}{f} + 1,27 \cdot 10^{-6} \right)}{2}$$

Провідність ізоляції рейкової лінії від землі можна взяти нормативну: 1 Ом $\cdot$ км. Ємність ізоляції приймаємо рівною 1 мкФ $\cdot$ км [6, 12, 88].

Виходячи з первинних параметрів рейкового кола, можна визначити вторинні параметри, які також необхідні при розрахунках:

$$\gamma_r := \sqrt{(R_r + j \cdot \omega \cdot L_r) \cdot (G_r + j \cdot \omega \cdot C_r)} \quad Z_v := \sqrt{\frac{(R_r + j \cdot \omega \cdot L_r)}{(G_r + j \cdot \omega \cdot C_r)}}$$

Запишемо всі вихідні данні для розрахунків:

$d_p = 1,52$ м., відстань між рейками;

$d = var$ м., відстань між коліями;

$h = 6,0$ м., висота підвіски контактного проводу;

$f = 50\text{Гц}; 420\text{Гц}$, частота впливаючого струму;

$l_1 = 1000\text{ м.}$, довжина рейкової лінії;

Далі визначаємо параметр магнітного зв'язку контактного проводу з кожною рейкою окремо [12, 118, 121]:

$$M_{k1p1}(d) = 10^{-4} \cdot \left(2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{12,66}{\sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000} \cdot [(a_{kp1}(d))^2 + (h_k - h_r)^2]}} \right) \right) +$$

$$+ 1 - j \cdot \left[\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000}} \cdot e^{j \frac{3}{4} \pi} \cdot (h_k + h_r) \right]$$

$$M_{k1p2}(d) = 10^{-4} \cdot \left(2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{12,66}{\sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000} \cdot [(a_{kp2}(d))^2 + (h_k - h_r)^2]}} \right) \right) +$$

$$+ 1 - j \cdot \left[\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000}} \cdot e^{j \frac{3}{4} \pi} \cdot (h_k + h_r) \right]$$

де $\sigma = 10^{-3} \text{ См} \cdot \text{км}$ - питома провідність землі

h_k - висота підвісу контактного проводу над землею;

h_r - висота рейки над землею;

a_{kp1}, a_{kp2} - відстань по горизонталі від контактного проводу по першої та другої рейки суміжної колії, що за допомогою геометричних розрахунків визначимо через міжколійну відстань [118, 121]:

$$a_{kp1}(d) = d - \frac{d_p}{2}$$

$$a_{kp2}(d) = d + \frac{d_p}{2}$$

Відстань від контактного проводу до кожної з рейок, а як наслідок й параметр магнітного зв'язку контактного проводу з кожною рейкою визначається як функція від міжколійної відстані. Таким чином отримана поздовжня ЕРС також буде функцією від міжколійної відстані. Значення

тягового струму, що створює магнітний вплив, визначаємо наступним чином: на частоті 50 Гц – 300 А (тяговий струм одного локомотива), на частоті 420 Гц – максимально зафіксований струм при вимірах у розділі 3.

Визначивши всі необхідні параметри для розрахунку підставимо їх в формули (4.1), (4.19) та визначимо наведені поздовжні ЕРС в кожній з рейок суміжної колії, а також різницю цих ЕРС. Побудуємо графіки за отриманими залежностями:

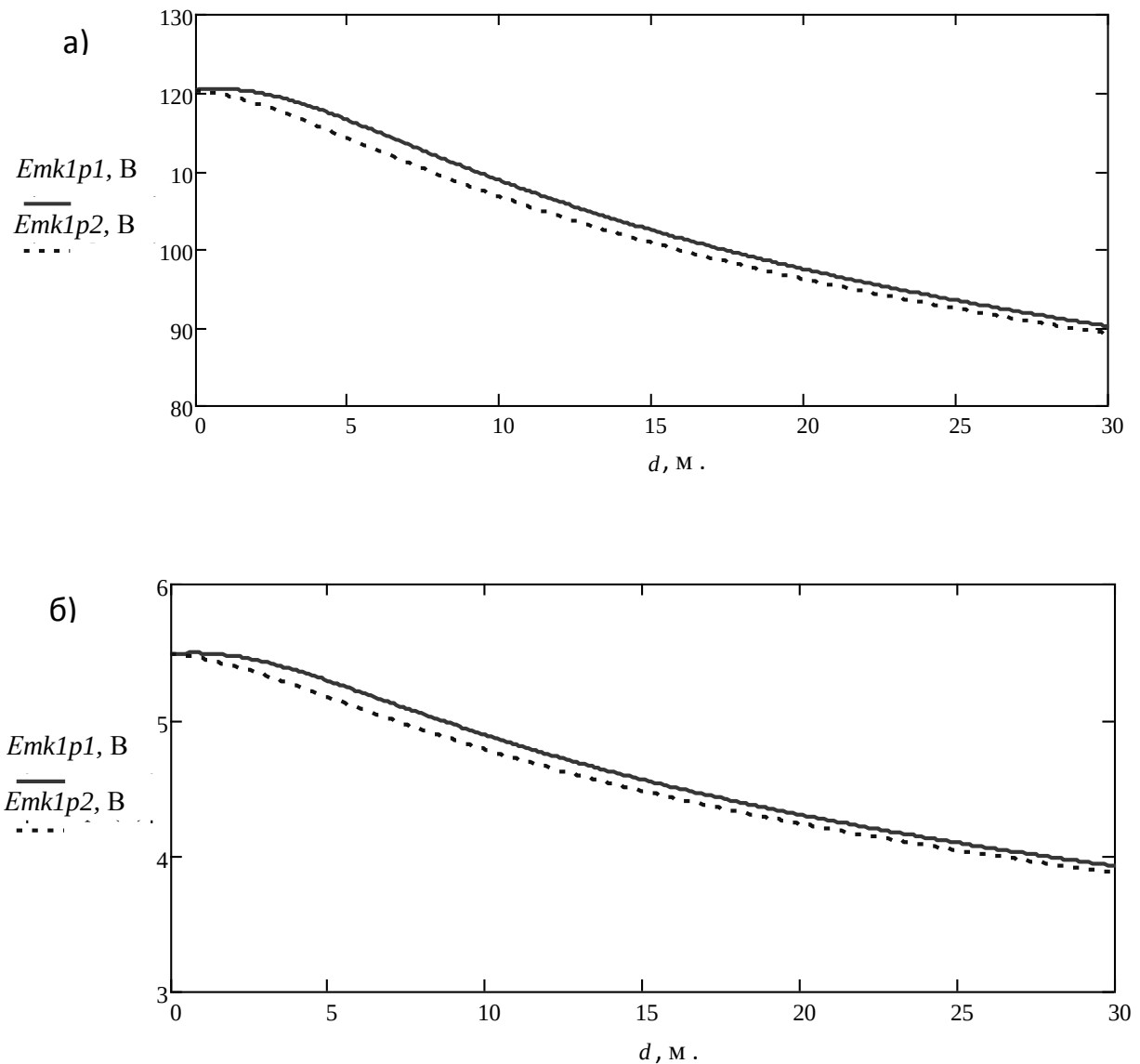


Рисунок 4.3 - Наведені в рейках ЕРС в залежності від відстані між коліями для струму частотою 50 Гц (а), та частотою 420 Гц (б)

З отриманих графіків видно, що при відстані між коліями, наприклад, 4,1 м в рейках суміжної колії індукується поздовжня ЕРС (на 1 км) приблизно 100 В для струму частотою 50 Гц та приблизно 5,3 В для струму 420 Гц.

У лабораторних умовах проведено експериментальне дослідження наведеної ЕРС задля чого було відтворено описану вище математичну модель в масштабі 1:300 [121, 128]. Присутність землі моделювалась за допомогою суцільного металевого листа. На рис. 4.4 приведено отримані теоретично (суцільна лінія) та експериментально (крапки) рівні наведеної ЕРС в залежності від міжколійної відстані.

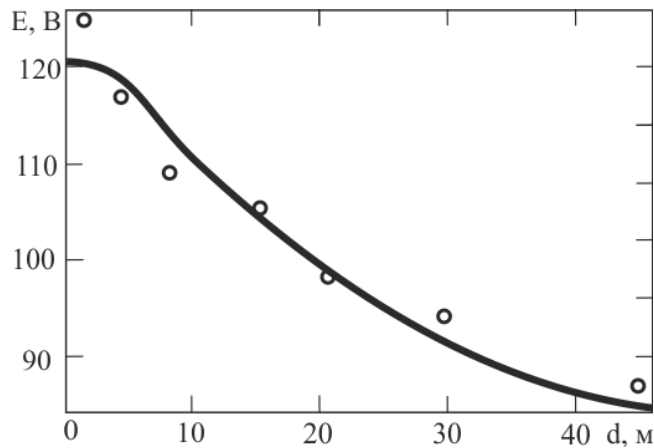


Рисунок 4.4 - Залежність наведеної в рейці ЕРС від міжколійної відстані

З приведенного графіку видно, що при обраних для моделювання вихідних даних в суміжній колії потенціал кожної з рейок може перевищувати 120 В. Приведені теоретичні результати дуже близькі до отриманих емпіричних даних, оскільки середня відносна похибка складає 3,81%, а розбіжність по окремим даним не перевищує 7,9%. Таким чином приведений математичний апарат можна з певною похибкою використовувати для оцінки магнітного впливу КМ.

Проведемо дослідження характеру зміни різниці наведених в рейках ЕРС в залежності від відстані до контактного проводу, бо саме ця різниця впливатиме на роботу рейкових кіл. Знайдемо різницю між наведеними ЕРС:

Побудуємо графік за отриманою залежністю:

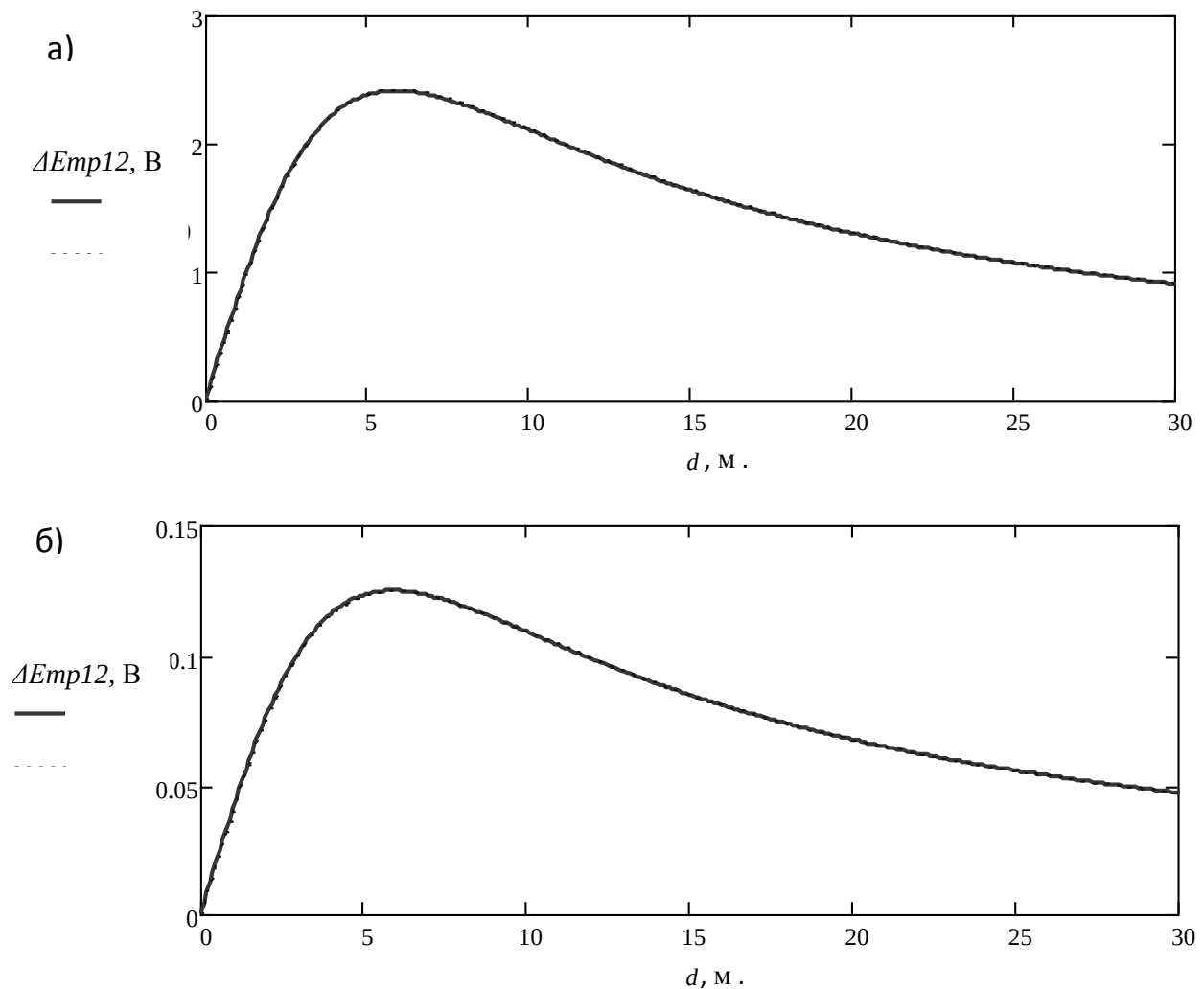


Рисунок 4.5 - Різниця наведених в рейках ЕРС в залежності від відстані між коліями для струму частотою 50 Гц (а), та частотою 420 Гц (б)

З отриманих графіків видно, що максимальна різниця між наведеними ЕРС спостерігається при відстані між коліями 5,9 м і становить для частоти 50 Гц приблизно 2,4 В, а для частоти 420 Гц – 0,125 В на км. При подальшому збільшенні відстані до контактного проводу, різниця наведених ЕРС зменшується, тобто вплив на колії, що знаходяться далі ніж перша суміжна буде зменшуватися.

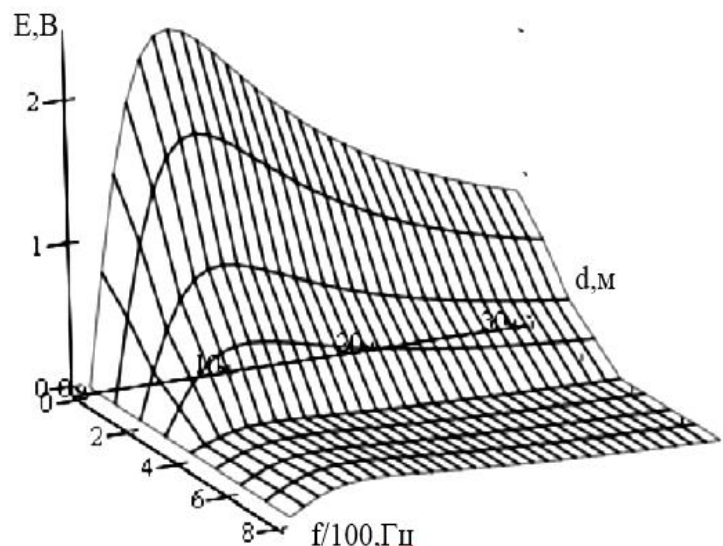


Рисунок 4.6 - Залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від міжколійної відстані та частоти впливаючого струму

На рис. 4.6 приведено діаграму, що ілюструє залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від міжколійної відстані та частоти впливаючого струму (з урахуванням зміни його амплітуди) [121].

На рис. 4.7 приведено діаграму, що ілюструє залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від висоти розташування КП та провідності землі. Із зростанням провідності землі вона починає виступати в ролі шунтуючого провідника, зменшуючи тим самим наведену ЕРС. Зменшення висоти підвісу контактного проводу (наприклад в районі штучних споруд, мостів, шляхопроводів) призводить до різкого збільшення наведеної ЕРС [121].

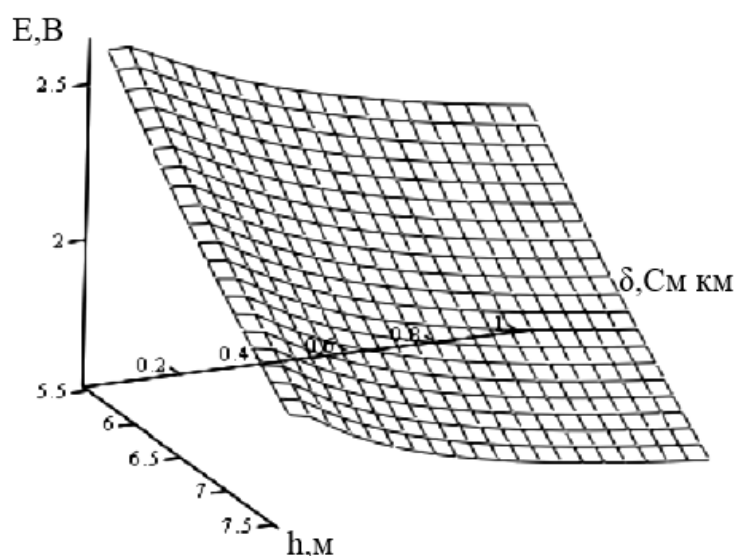


Рисунок 4.7 - Залежність різниці наведених в рейках суміжної колії ЕРС від висоти розташування КП та провідності землі

Багатопровідна контактна мережа станції створює складні електромагнітні умови для роботи станційних рейкових кіл при розміщенні суміжних колій на відстані 5,9 м, що є досить поширеною міжколійною відстанню. Це зумовлено тим, що наводити в рейках суміжних колій ЕРС, а отже й впливати на роботу рейкових кіл буде кожен з контактних проводів електрифікованих колій станції.

В результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш несприятливі умови для роботи рейкових кіл виникають при розташуванні суміжних колій на відстані 5,9 м. При такому розміщенні суміжних колій в рейках індукуються поздовжні ЕРС, різниця яких досягає найбільших значень, що при певних умовах може створювати заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу рейкових кіл.

4.1.2 Експериментальне дослідження магнітного впливу КМ на рейкові кола

Для дослідження наведеної ЕРС в провіді-приймачі було проведено експеримент, схема якого зображена рис. 4.8. На рисунку зображено провід-джерело завад, який утворює впливаючий контур разом рейкою (пунктиром вказані лінії на дальньому плані). Від генератора в провід-джерело подається струм завади фіксованого рівня. Провід-приймач знаходиться на відомій відстані від джерела та разом із зворотним проводом утворює приймальний контур, в який увімкнене вимірювальне обладнання [120]. Позначення на рис.4.8:

a - відстань між проводами по горизонталі;

a_r - відстань між проводом-джерелом та його зворотнім проводом по горизонталі;

$a_{3\phi}$ - відстань між проводом-приймачем та його зворотнім проводом по горизонталі;

h_1, h_2 - висота проводів над землею;

$h_r, h_{3\phi}$ - висота зворотних проводів над землею.

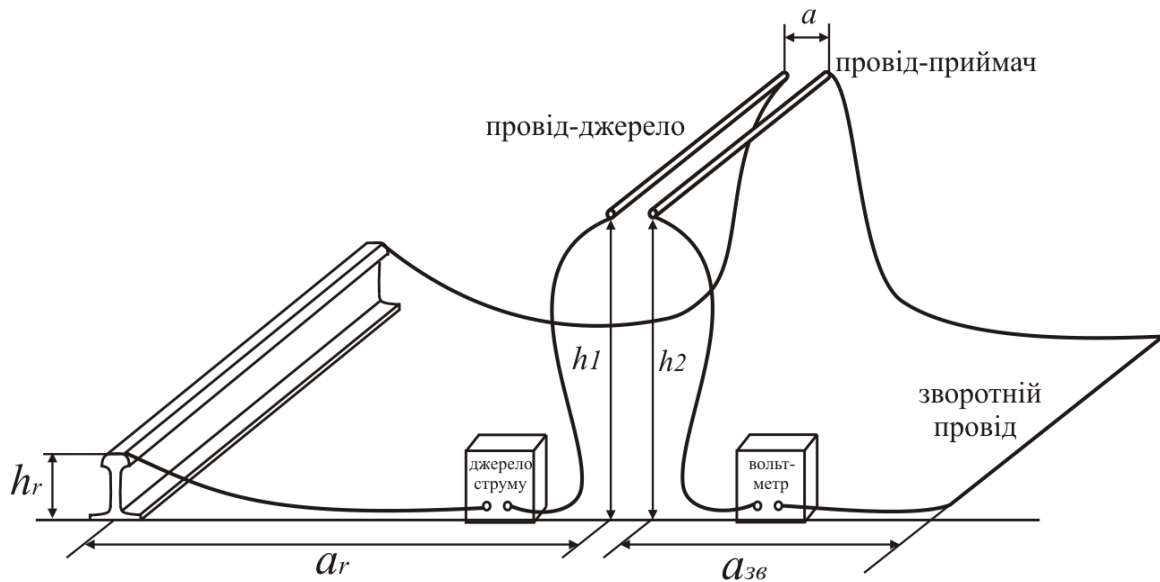


Рисунок 4.8 - Схема проведення експерименту для дослідження магнітного впливу КМ на РК

Задача експерименту полягала в фіксуванні рівнів наведеної в проводі-приймачі ЕРС на різних частотах при відомому струмі в проводі-джерелі [120].

Відстань між проводами бажано обрати невелику, що забезпечить більший рівень наведеної ЕРС (виходячи з визначення коефіцієнту взаємодукції), та високе значення сигнал/шум на вимірювальній апаратурі. З цих самих причин довжину ділянки зближення між проводами доцільно обрати великою (виходячи з визначення наведеної ЕРС). Оскільки в контурі приймачі, в приведеній схемі, можливо виміряти тільки різницю ЕРС, що наведені в проводі-приймачі та його зворотному проводі, розмір контуру доцільно збільшити, тобто обрати велике $a_{зв}$. Діапазон досліджуваних частот виберемо виходячи з частотного діапазону РК.

При проведенні експериментального дослідження були обрані наступні параметри схеми:

$a = 0,1\text{м}$, $a_r = 2,9\text{м}$, $a_{зв} = 10\text{м}$, $h_1 = h_2 = 1,4\text{м}$, $h_r = 0,1\text{м}$, $h_{зв} = 0\text{м}$, довжина ділянки зближення $l = 25\text{м}$. Діапазон частот струму завади до 6000 Гц. При проведенні вимірів для кожної частоти окремо фіксувалось значення струму завади.

Для інтерпретації отриманих експериментальних даних було проведено теоретичний розрахунок рівня наведеної ЕРС в колі приймача за параметрами

експерименту. Оскільки схема є багатопровідною, при розрахунку необхідно врахувати взаємоіндуктивні зв'язки між: проводом джерелом та проводом-приймачем ($M_{\text{дп}}$), проводом джерелом та зворотним проводом приймача ($M_{\text{дзв}}$), зворотним проводом джерела (рейкою) та проводом-приймачем ($M_{\text{гп}}$), рейкою та зворотним проводом приймача ($M_{\text{гзв}}$). Розрахунок коефіцієнтів взаємоіндукції проводився по (4.1), з урахуванням геометрії схеми вимірювання. Зв'язком між власними проводами контурів знехтуємо, оскільки між ними існує кондуктивний зв'язок, що значно більший. В результаті в контурі приймача наводиться ЕРС від кожного описаного вище зв'язку, яку можна знайти по (4.19). Тоді, з урахуванням знаку, на вимірювальний прилад діятиме результуюча ЕРС: $E = E_{\text{дп}} - E_{\text{дзв}} - E_{\text{гп}} + E_{\text{гзв}}$

Окрім цього, проведений натурний експеримент був відтворений в лабораторних умовах за допомогою масштабного моделювання в масштабі 1:7,45. Стенд повністю імітує проведений експеримент та дозволяє отримувати рівні наведеної ЕРС в колі приймача при відомому струмі джерела. Присутність землі в стенду імітується суцільним металевим листом. Результати проведених досліджень зображено на рис.4.9.

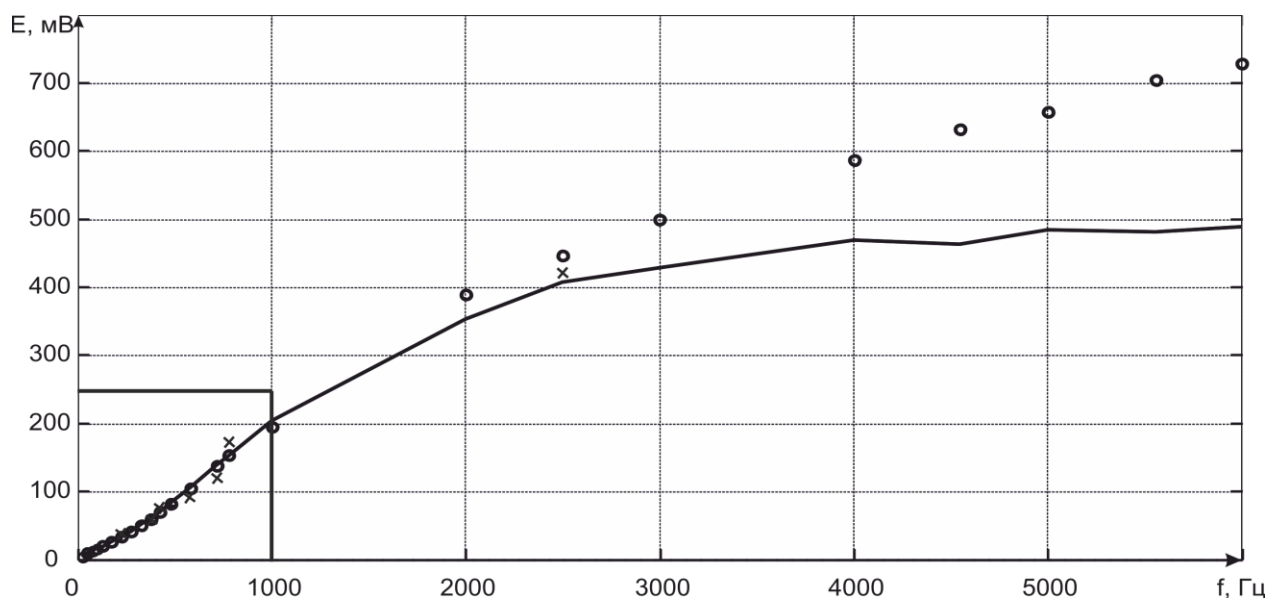


Рисунок 4.9 - Порівняльна діаграма результатів дослідження

На рис. 4.9 приведено залежність наведеної в контурі-приймачі ЕРС від частоти струму завади. Суцільною лінією показано результат теоретичного

розрахунку. Знаком «○» відмічені значення ЕРС, що отримані при проведенні натурного експерименту. Знаком «+» позначено ЕРС, що виміряно на модельному стенді з урахуванням масштабу. З рис. 4.9 Видно, що рівні наведеної ЕРС, отримані різними способами збігаються приблизно до частоти 1000 Гц, при більш високих частотах значення теоретичної моделі значно нижчі від результатів експериментів. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 6000 Гц складає 11,12 %, при чому у діапазоні 2000...6000 Гц вона становить 28,69 %, а на частоті 6000 Гц 49 % (рис. 4.10) [120].

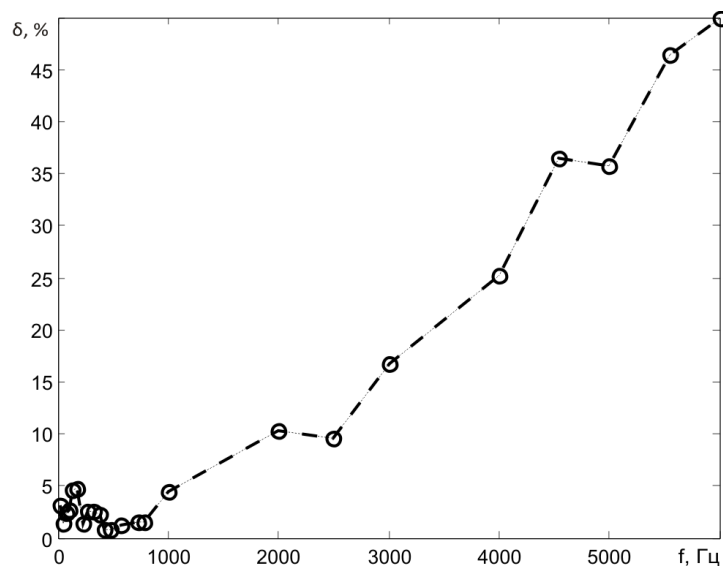


Рисунок 4.10 - Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти

На рис. 4.10 спостерігається різке зростання відносної похибки починаючи з частоти 1000 Гц, тому, з цієї причини, можна зробити впевнений висновок, що застосування приведенного математичного апарату в частотному діапазоні більше 1000 Гц є неможливим.

Розглянемо детальніше частотний діапазон до 1000 Гц, що приведений на рис. 4.11. Позначення на рис. 4.11 ідентичні до рис. 4.9.

З рис. 4.11 видно досить добрий збіг результатів визначення наведеної ЕРС різними способами. На низьких частотах результати експерименту трохи більші за теоретичні, що пояснюється абсолютною похибкою вимірювання при низьких значеннях сигнал/шум, це також призводить до отримання збільшеної відносної похибки на низьких частотах.

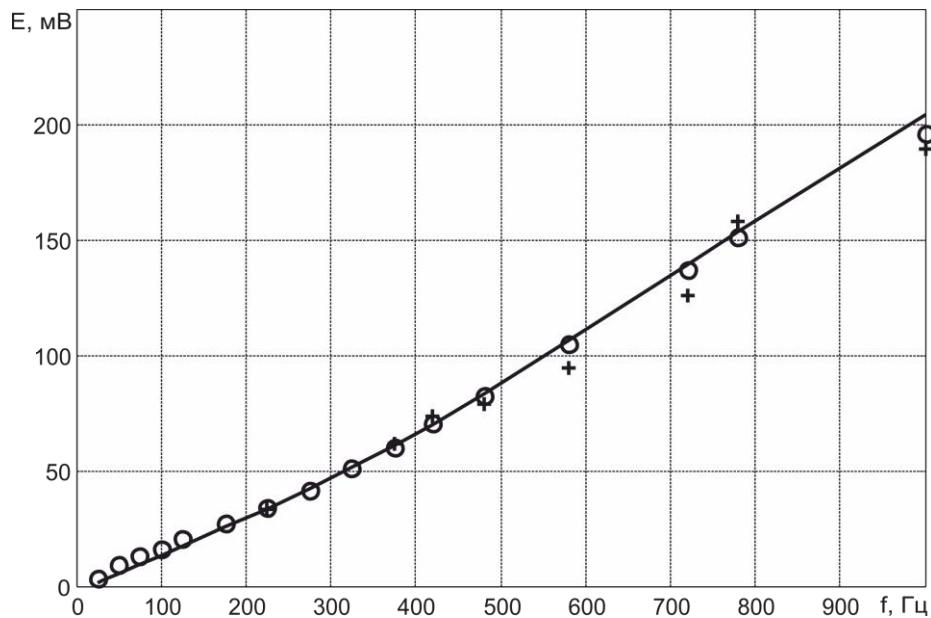


Рисунок 4.11 - Порівняльна діаграма результатів дослідження в частотному діапазоні до 1000 Гц

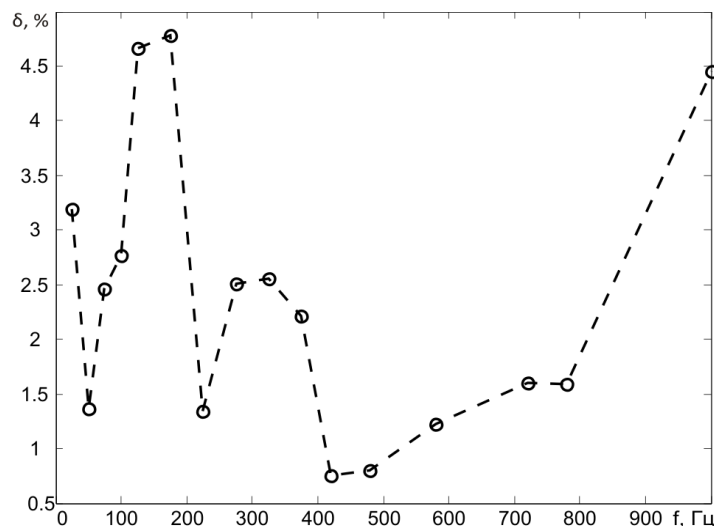


Рисунок 4.12 - Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти в діапазоні до 1000 Гц

Відносна похибка по окремих результатах не перевищує 5 %. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 1000 Гц складає 2,33 %, при чому у діапазоні тональних РК 420...780 Гц вона становить 1,19 %. У роботі підтверджено адекватність математичного апарату отриманим експериментальним даних за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності [31, 120]. Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування приведенного математичного апарату у частотному діапазоні до 1000 Гц з досить невисокою відносної похибкою.

Результати проведеного експериментального та теоретичного дослідження магнітного впливу одного контуру на інший дають збіг у частотному діапазоні до 1000 Гц з середньою відносною похибкою 2,33 %; у діапазоні 2000...6000 Гц вона становить 28,69 % [120].

Підтверджено адекватність приведеного математичного апарату отриманим експериментальним даних за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності, що дозволяє застосовувати його в діапазоні до 1000 Гц для дослідження електромагнітних процесів в багатопровідних лініях та системі КМ-РК-земля зокрема. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні, дослідженні та забезпеченні електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання

4.1.3 Перевірка адекватності математичних моделей

Існує функція у пакеті Matlab, що призначена для проведення двостороннього рангового тесту Вілкоксона для перевірки нульової гіпотези. Незалежні вибірки x і y , що задаються як вектори, взяті з генеральних сукупностей з рівними медіанами. Функція повертає значення рівня значущості p для перевірки нульової гіпотези. Критичний рівень значимості для умови прийняття нульової гіпотези в більшості практичних випадків приймають рівним 0,05; 0,01. $[p, h] = \text{ranksum}(x, y)$ функція повертає значення рівня значущості p при перевірці нульової гіпотези і результат перевірки нульової гіпотези h для критичного значення рівного 0,05. Нульова гіпотеза приймається якщо $h = 0$. Якщо $h = 1$, то нульова гіпотеза може бути відкинута, тобто медіани вибірок статистично значимо відрізняються один від одного [14, 24, 31].

В якості прикладу наведемо порядок перевірки нульової гіпотези щодо рівності медіан вибірки результатів математичного моделювання електромагнітних процесів в системі «рейкове коло - контактна мережа – електрорухомий склад» та вибірки результатів експериментальних досліджень. В якості прикладу приведено дані для дослідження залежності коефіцієнта взаємодукції від частоти, що зведено в таблицю 4.1:

Таблиця 4.1 – Порівняння результатів моделі та експерименту

Частота, Гц	Результати експерименту, $M1$, Гн	Результати математичної моделі, $M2$, Гн
25	0,00155	0,001472
50	0,00131	0,001363
75	0,00126	0,001323
100	0,00127	0,001294
125	0,00124	0,001272
175	0,00118	0,001239
225	0,00116	0,001214
275	0,00114	0,001194
325	0,00114	0,001178
375	0,00112	0,001163
420	0,00110	0,001152
480	0,00112	0,001139
580	0,00109	0,001120
720	0,00115	0,001099
780	0,00114	0,001091

$[p\ h] = \text{ranksum}(M1, M2, 0.05)$

$p = 0,955$

$h = 0$

Отримане значення $h=0$ свідчить, про адекватність математичної моделі отриманим експериментальним даним.

4.2 Дослідження кондуктивного впливу контактної мережі

4.2.1 Побудови математичної моделі системи тягового електропостачання ділянки залізниці

З метою врахування впливу всіх видів перешкод на роботу рейкових кіл, необхідно розробити комплексну математичну модель процесу їх розповсюдження в системі тягового електропостачання. Для вирішення даного завдання важливо уточнити схему заміщення електричних тягових мереж для врахування чинників, що впливають на розподіл гармонік струму і напруги в них, визначити джерела перешкод, що створюють вплив на передачу сигнальних струмів по рейковим колам; теоретично проаналізувати розподіл

гармонік напруги і струмів по довжині фідерної зони (ФЗ), знаючи спектральний склад тягового струму, визначений експериментально.

Гармонійний склад струму в тяговій мережі відомий в результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень у попередніх розділах, і це дає можливість оцінювати заваду окремо для кожної гармоніки тягового струму. Для цього, в першу чергу, необхідно знати, як розподіляються струми кожної гармоніки в рейкових нитках колії.

При електричній тязі рейкові лінії використовуються не тільки як лінії кола в пристроях залізничної автоматики, а і для пропуску зворотного тягового струму [7, 25, 70]. Струм, споживаний електровозом, поступаючи в двохниткову рейкову мережу, розгалужується на струми I_1 та I_2 , які мають однаковий напрям, але можуть відрізнятися по величині (унаслідок присутності подовжньої і поперечної асиметрії). При цьому частина зворотного тягового струму повертається на підстанцію не по рейкових лініях, а через землю. На порядок розподілу струму впливає нерівність опорів ниток шляху, а також нерівність опорів заземленні кожній з ниток [7, 57, 70]. В останньому випадку з рейкової нитки, що має менший опір заземлення, тяговий струм більшою мірою тече через землю на тягову підстанцію, чим з іншої рейки. Величина струмів витoku визначається питомою провідністю контурів рейка – рейка, рейки – земля, контактна мережа – рейки, контактна мережа – земля. Останні дві величини мають дуже малі значення і при моделюванні ними можна нехтувати.

Також при моделюванні треба враховувати, що рейкові лінії схильні до індуктивного впливу тягових струмів, що протікають в контактних проводах як свого, так і суміжного шляху, якщо дана ділянка є багатоколійною. Оскільки КП своєї колії розташований симетрично щодо рейкових ниток, то індуктивний вплив тягового струму, що протікає в ньому, на обидві рейки виявляється однаковим. З іншого боку, індуктивний вплив тягового струму суміжної колії на рейкові нитки даного колії буде різним, оскільки відстань їх до цього КП буде неоднаковою [70, 120-122].

Тягова мережа відрізняється від інших ліній електропередачі великим числом різнорідних несиметрично розташованих проводів. Навіть у найбільш простому випадку – на одноколінійній ділянці тягова мережа складається з контактного проводу, несучого троса, і двох рейок, сполучених із землею. Крім того, до контактної підвіски може бути паралельно приєднаний підсилюючий провід. В цьому випадку на двоколінійній ділянці тягова мережа складатиметься з шести проводів і чотирьох рейок, причому унаслідок відгалуження частини струму з рейок в землю сумарний струм в них по модулю і фазі відрізняється від струму в проводах контактної мережі. Це обставина, так само як і різнорідність проводів, серйозно ускладнює розрахунки параметрів тягової мережі.

Нижче приводиться узагальнений метод розрахунку параметрів мережі, що складається з будь-якого числа різнорідних проводів. Він заснований на розгляді ЕРС, наведеною в якому-небудь контурі струмами всіх проводів мережі [12, 94, 122].

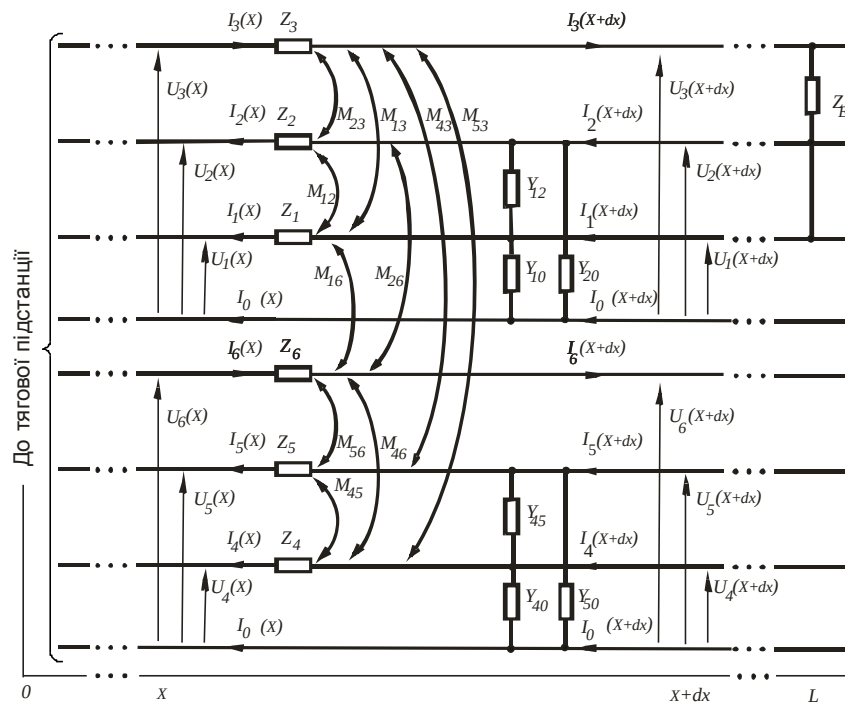


Рисунок 4.13 - Еквівалентна електрична схема системи тягового електропостачання

Для побудови математичного описання системи тягового електропостачання двоколіійної ділянки залізниці довжиною L з двома видами

тягового струму на коліях розглянемо її еквівалентну схему (рис. 4.13). Тягова підстанція з координатою $x=0$ є спільною для ліній постійного і змінного струму. Електровоз розташований на першій колії і має координату $x=L$. Нульові лінії відповідають провідності землі, перша і друга лінії – рейковим ниткам першої колії, четверта і п'ята лінії рейковим ниткам другої колії (з потенціалами, відповідно, U_1, U_2, U_4, U_5), третя і шоста лінії – контактним проводам (з потенціалами U_3, U_6). Комплексні провідності між рейковими нитками та часткові провідності між кожною рейковою ниткою та землею позначені для двох колій, відповідно, через $Y_{12}, Y_{10}, Y_{20}, Y_{45}, Y_{40}, Y_{50}$. Проведені розрахунки показують, що активна і ємнісна провідності між контактним проводом та рейками є незначною і ними можна знехтувати. Для побудови математичного описання системи використаємо математичний апарат для ліній з розповсюдженими параметрами, що за звичай використовується для таких задач [12, 51, 58, 94, 105]. Розіб'ємо ділянку залізниці на частини довжиною dx , де x – відстань, яка відраховується від початку лінії (тобто від тягової підстанції). Тоді всі процеси у системі електропостачання можна описати за допомогою наступної системи матричних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{U}}{dx} = |\underline{Z}| \bar{I} \\ \frac{d\bar{I}}{dx} = |\underline{Y}| \bar{U} \end{cases} \quad (4.21)$$

де $\bar{U} = \{\bar{U}_j\}$ – вектор комплексів напруг всіх проводів системи,

$\bar{I} = \{\bar{I}_j\}$ – вектор комплексів струмів, що протікають в усіх проводах системи,

$|\underline{Z}| = \{\underline{Z}_{ij}\}$ – матриці комплексів питомих (на одиницю довжини) опорів всіх ліній системи,

$|\underline{Y}| = \{\underline{Y}_{ij}\}$ – матриці питомих провідностей між лініями системи,

i, j – цілі числа у діапазоні $1 \dots 6$.

У приведеній вище системі рівнянь елементи матриці $|\underline{Z}|$ при $i = j$ описують комплекси питомих поздовжніх опорів ліній системи електропостачання, а при $i \neq j$ – комплекси комплексів взаємних опорів між лініями. Чисельно ці елементи можна визначити за допомогою наступних формул: [12, 48, 70]:

$$\underline{Z}_{ii} = R_i + jX_i = R_i + j\omega L \quad (4.22)$$

$$\underline{Z}_{ij} = jX_{ij} = j\omega M_{ij} \quad (4.23)$$

де R_i , X_i – відповідно активний та реактивний опір лінії, M_{ij} – коефіцієнт взаємної індукції між лініями i та j .

При визначенні елементів матриці питомих провідностей між лініями $|\underline{Y}|$ необхідно користуватися наступними формулами:

$$\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{10} + \underline{Y}_{12} \quad \underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{20} + \underline{Y}_{21}$$

$$\underline{Y}_{44} = \underline{Y}_{40} + \underline{Y}_{45} \quad \underline{Y}_{55} = \underline{Y}_{50} + \underline{Y}_{54}$$

Введемо коефіцієнти, що характеризують поздовжню і поперечну асиметрію рейкових ліній:

$$K_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_1 - I_2}{2I} \quad (4.24)$$

$$K_u = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = \frac{U_1 - U_2}{2U} \quad (4.25)$$

$$K_z = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1 - Z_2}{2Z} \quad (4.26)$$

$$K_Y = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} = \frac{Y_1 - Y_2}{2Y} \quad (4.27)$$

Проведемо перетворення (4.21)-(4.23) з урахуванням (4.24)-(4.27): Після перетворень отримуємо наступні рівняння:

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -\underline{Z}_0 \dot{I} + \underline{Z}_M \dot{I}_3 \quad (4.28)$$

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = -\underline{Y}_0 \dot{U} \quad (4.29)$$

де $Z_0 = (1 - K_I K_Z)Z$ та $Y_0 = (1 + K_U K_Y)Y$.

Отриманні рівняння (4.28), (4.29) мають відоме рішення:

$$U(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (4.30)$$

$$I(x) = -\frac{1}{Z_c} [C_1 e^{\gamma x} - C_2 e^{-\gamma x}] + m I_3 \quad (4.31)$$

$$\text{де } m = \frac{Z_{31}}{Z_1 + Z_{21}} [12, 48, 70].$$

Константи інтегрування C_1 і C_2 знаходяться з граничних умов при $x = 0$ і $x = L$ для конкретного режиму роботи рейкових кіл.

Для випадку, коли опір ізоляції баласту відповідає нормативній нижній межі 1 Ом/км, вирази для постійних інтегрування спрощуються [12, 48, 70]:

$$C_1 = \frac{1}{2} (1 - m) Z_c I_3 \exp(-\gamma l) \quad (4.32)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (1 - m) Z_c I_3 \quad (4.33)$$

4.2.2 Результати моделювання

За результатами математичного моделювання розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє автоматизувати визначення характеру розповсюдження потенціалів та струмів у рейках вздовж ФЗ при заданій кількості рухомих одиниць на різних родах тягового струму. Комп'ютерна реалізація математичної моделі дозволяє досліджувати різні ситуації шляхом зміни довжини ФЗ, кількості локомотивів у ФЗ, роду тяги, потужності ЕРС, опору рейок та ізоляції. Також запропонована модель враховує індуктивний вплив КМ при тязі змінного струму [118, 119, 122, 125].

На основі розробленої математичної моделі та її комп'ютерної реалізації було проведено дослідження розподілу зворотного тягового струму в рейковій колії з електротягою змінного та постійного струму. Вихідні данні про спектральний склад тягового струму локомотива змінного струму з асинхронним тяговим двигуном отримано експериментально у 3 розділі дисертації.

Результати роботи комп'ютерної реалізації математичної моделі наведено на рис. 4.14 - 4.17. На рис. 4.14 та 4.15 наведено діаграму розповсюдження зворотного тягового струму (а) та потенціалу (б) рейок вздовж ФЗ гірської ділянки для тяги постійного та змінного струму. Довжина ФЗ 10 км, ЕРС знаходиться на координатах 3 та 8 км. Великий рівень тягових струмів ЕРС зумовлений рухом поїздів по ділянці з крутим профілем [88, 119].

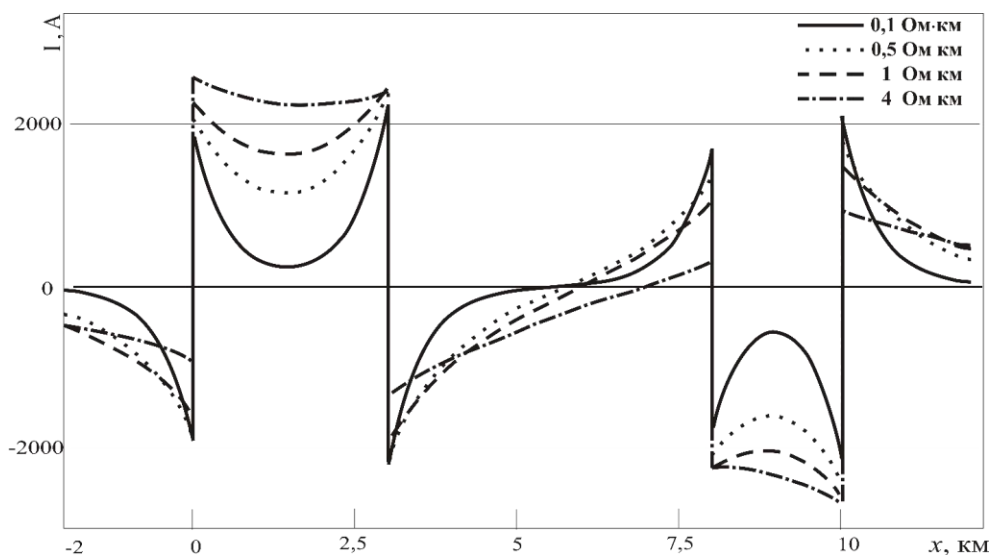


Рисунок 4.14 - Діаграму розповсюдження зворотного тягового струму вздовж ФЗ при електротязі постійного струму

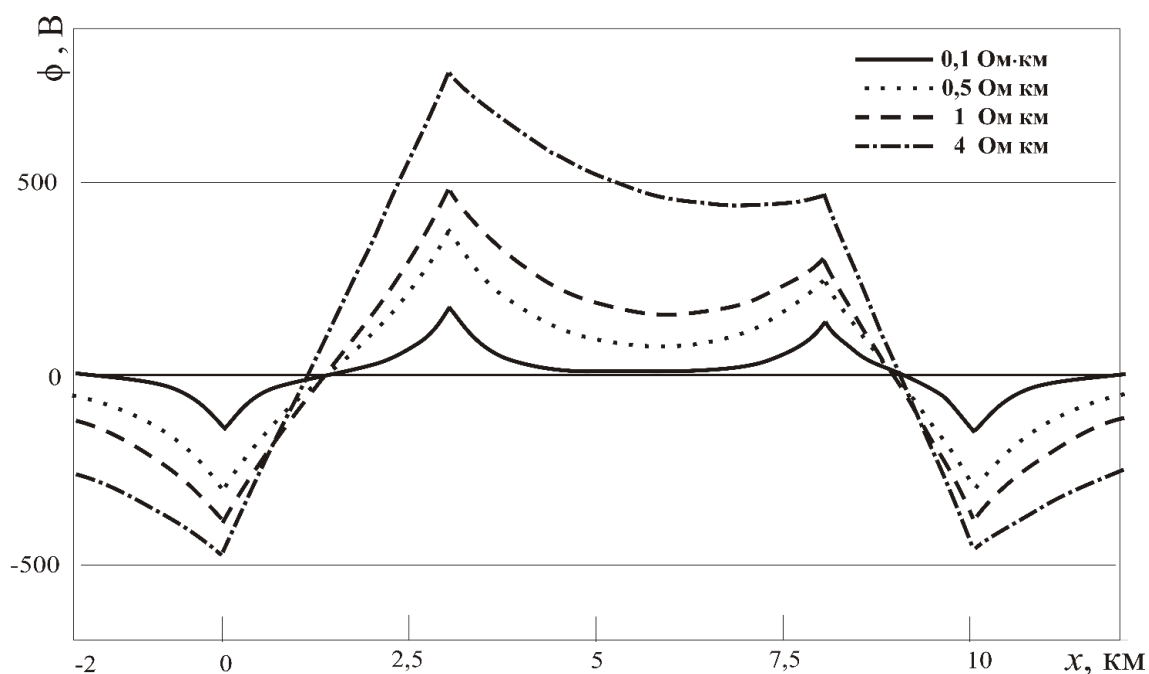


Рисунок 4.15 - Діаграму розповсюдження потенціалу рейок вздовж ФЗ при електротязі змінного струму

На рис. 4.16 та 4.17 наведено діаграму розповсюдження зворотного тягового струму (а) та потенціалу (б) рейок вздовж ФЗ для тяги змінного струму при різних опорах ізоляції (0,1 - суцільна; 1 - пунктирна; 5 Ом км – штрих-пунктирна лінія). Довжина ФЗ дорівнює 60 км [70, 102], в якості навантаження прийнято два електропоїзди з координатами 30 та 50 км.

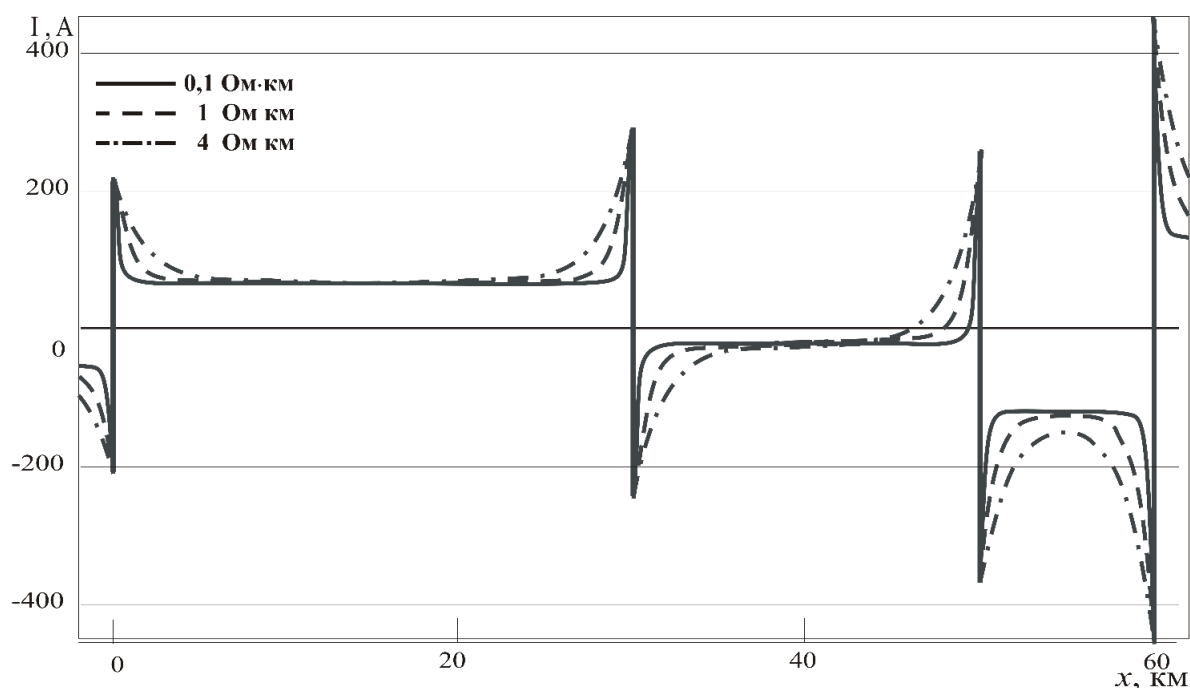


Рисунок 4.16 - Діаграму розповсюдження зворотного тягового струму вздовж ФЗ при електротязі змінного струму

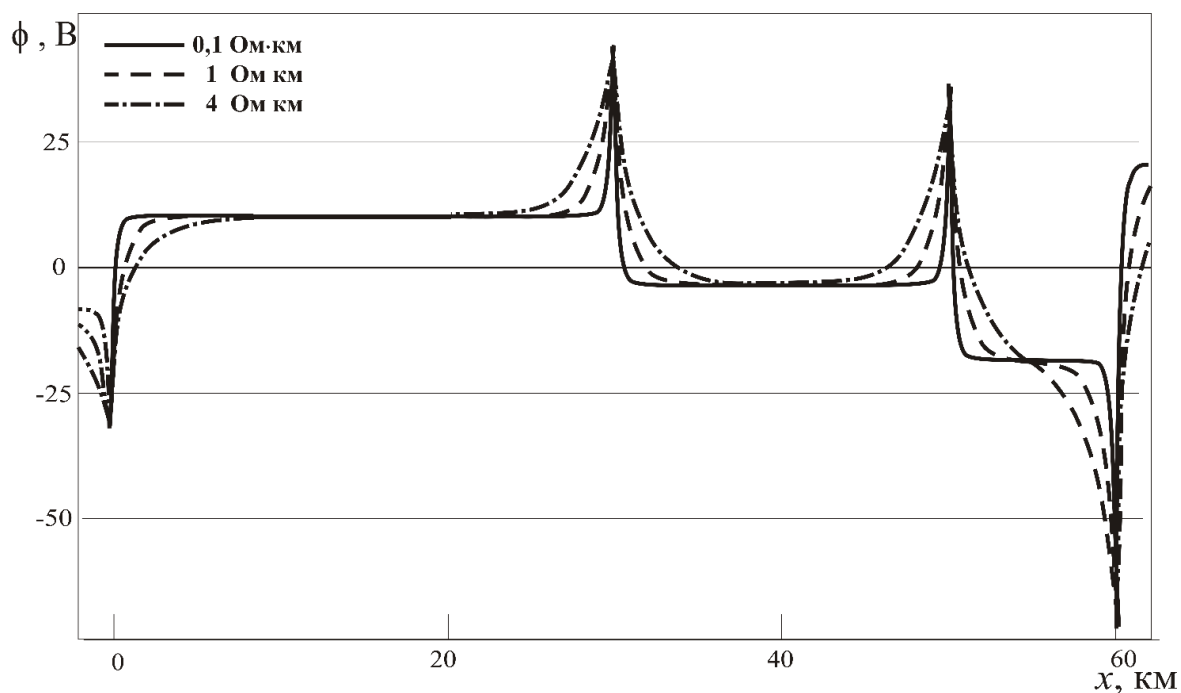


Рисунок 4.17 - Діаграму розповсюдження потенціалу рейок вздовж ФЗ при електротязі змінного струму

З приведених діаграм видно, що рівень тягового струму в рейках найбільший в межах тягових підстанцій та ЕРС та може досягати рівня 2000 А при тязі постійного струму і 400 А при тязі змінного струму. Такі рівні струму ускладнюють процес експлуатації РК та можуть призвести до збоїв у роботі апаратури автоматики [7, 70, 88, 118].

Як видно з діаграми найбільш напруженими ділянками є зони в районі тягових підстанцій та біля локомотивів. Рівень тягового струму в конкретній точці на тяговій ділянці залежатиме від положення рухомих одиниць на ділянці. Також з графіка можна зробити висновок, що при збігу декількох негативних обставин (високий рівень опору ізоляції; велика кількість рухомих одиниць на ділянці; великий рівень споживаємого тягового струму, що може бути наслідком руху на ділянці важких товарних потягів, або наявністю ділянок з крутим профілем; зближення двох тягових ділянок; несприятливі погодні умови; и т.п.) зворотний тяговий струм в рейках може досягати небезпечних значень, негативно впливати на роботу рейкових кіл, або навіть вивести з ладу апаратуру сигналізації та зв'язку [7, 70, 88, 118].

4.3 Дослідження електричного впливу КМ

Електричне вплив обумовлено наявністю в контактній мережі змінної напруги, що створює в навколишньому просторі змінне електричне поле. За рахунок електричного поля контактної мережі (рис. 4.18а) в лініях, схильних до впливу КМ створюватиме ЕРС завади.

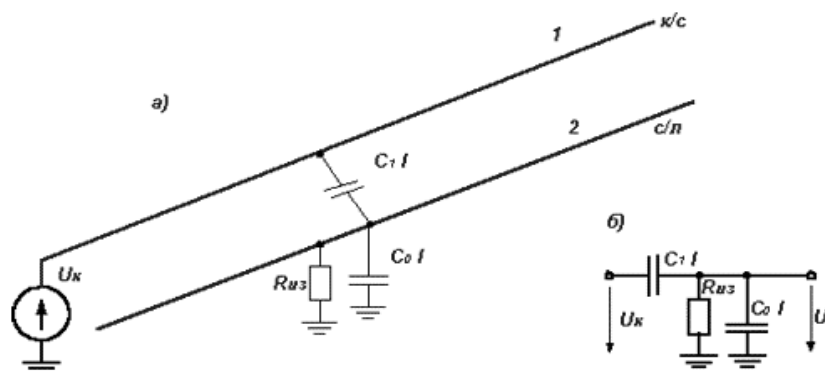


Рисунок 4.18 - Еквівалентна схема заміщення (а) та розрахункова схема(б) електричного впливу

Контактну мережу і суміжний провід можна розглядати як обкладки конденсатора ємністю $C1 \cdot l$, де $C1$ - ємність між суміжною лінією і контактною мережею на 1 км довжини системи, l - довжина системи, км. Разом з другим конденсатором з обкладинками суміжна лінія - земля ємністю $C0 \cdot l$ цей конденсатор утворює ємнісний дільник [5, 55, 58, 111], що визначає напругу електричного впливу на суміжній лінії як

$$U_e = U_{\kappa} \cdot \frac{C1 \cdot l}{C1 \cdot l + C0 \cdot l} = U_{\kappa} \cdot \frac{C1}{C1 + C0}, \quad (4.34)$$

що не залежить від довжини системи, якщо суміжна лінія знаходиться повністю в зоні впливу. Наявність витoku по ізоляції суміжній лінії R_{i3} призводить до того, що при строго постійній напрузі впливаючої лінії електричний вплив відсутній. Система електричної тяги постійного струму в нормальному режимі впливає на суміжні лінії тільки через пульсації випрямленої напруги.

Між впливаючим проводом 1 контактної підвіски (рис.4.19) і проводом приймачем 2 мається ємнісний зв'язок $C1-2$ і кожен з цих проводів має певну ємність по відношенню до землі $C1-0$ і $C2-0$. внаслідок чого виникають ємнісні струми, зокрема, струм $iC1-2-0$. Це викликає появу потенціалу на проводі приймачі. Якщо знехтувати провідністю ізоляції, то величина наведеного в лінії приймачі потенціалу може бути визначена з виразу:

$$U_{\partial} = U_{\kappa C} \cdot \frac{C_{1-2}}{C_{2-0} + C_{1-2}}, \quad (4.35)$$

Зі зменшенням висоти підвісу проводу приймача зростає ємність $C2-0$ і зменшується наведений в проводі потенціал. До електричного впливу у більшому ступені схильні повітряні лінії зв'язку. Для повністю ізольованого проводу, який лежить на землі, наведений у ньому потенціал дорівнює нулю. Підземні кабельні лінії та повітряні кабельні лінії з металевою заземленою оболонкою від електричного впливу захищені [12, 55, 111].

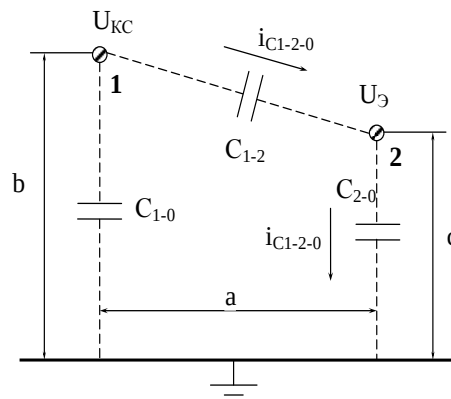


Рисунок 4.19 - Розрахункова схема для визначення електричного впливу контактної мережі

Розрахунок небезпечних напруг, обумовлених електричним впливом, проводять при вимушеному режимі роботи тягової мережі, коли ділянка електричної залізниці, що живиться від однієї фази, має найбільшу довжину.

У розрахункових формулах замість ємностей фігурують відстані між проводами і висота їх підвісу. Величину небезпечної напруги при електричному впливі визначають за формулою [55, 111]:

$$U_9 = 27,5 \cdot 10^3 \cdot K \frac{bc}{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \frac{l_9}{l}, \quad (4.36)$$

де K - коефіцієнт, що враховує кількість впливаючих проводів, розташованих на опорах тягової мережі. При виконанні розрахунків цей коефіцієнт був прийнятий рівним 0,5; l і l_9 - розрахункові довжини; a , b і c - відстані, що характеризують розташування проводів контактної мережі та лінії приймача щодо землі і один одного.

Наприклад для лінії зв'язку, що в більшому ступені схильні до електричного впливу, величини a , b і c при виконанні розрахунків можна прийняти: $a = 20$ м, $b = 7$ м, $c = 6$ м.

$$U_9 = 27,5 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \frac{7 \cdot 6}{20^2 + 7^2 + 6^2} \cdot \frac{35}{45} = 926,117 \text{ В}$$

Залежність наведеної напруги на лінію зв'язку від ширини зближення лінії зв'язку з тягової мережею при короткому замиканні показано на рис.4.20

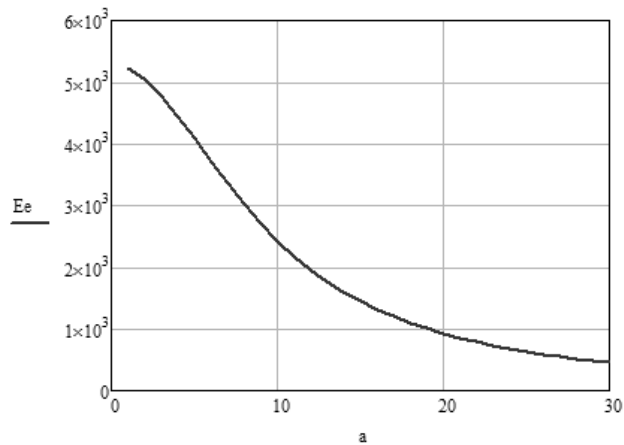


Рисунок 4.20 - Залежність наведеної напруги на лінію зв'язку від ширини зближення лінії зв'язку з тягової мережею

4.4 Вплив електромагнітних завад на рейкові кола

Як вже відзначалося у попередніх розділах забезпечення електромагнітної сумісності є дуже актуальною задачею, вирішення якої обов'язкове на шляху розвитку залізниці. Для того, щоб зробити висновок про електромагнітну сумісність необхідно чітко визначити допустимі норми впливу та чутливості будь-якого електротехнічного устаткування. Норми повинні відповідати умовам експлуатації [47, 93, 113]. Без визначення норм впливу об'єктів залізниці на рейкові кола неможливо забезпечити електромагнітну сумісність, а отже і високий рівень безпеки руху. Нормативи струмів завад в рейках від електровозів та електропоїздів, які діють в Україні приведено у додатку Г [12, 74].

Результуюча діюча ЕРС завади в РК буде визначатися рівнями завад, що створені КМ в РК через всі види зв'язку між ними: магнітним, електричним, кондуктивним. Сумування необхідно проводити з урахуванням різниць фаз напруг, наведених через різні види зв'язку.

Додовання напруги магнітного впливу з напругою електричного впливу, що по фазі збігається з напругою контактної мережі (рис. 4.21) з урахуванням запізнювання струму контактної мережі від напруги на кут близько 37° і розташування векторів напруги магнітного впливу перпендикулярно струму [5, 12, 111].

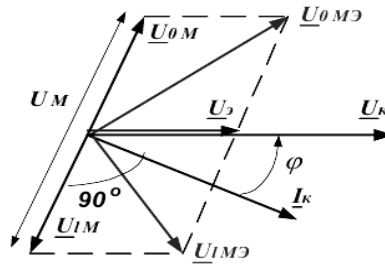


Рисунок 4.21 - Векторна діаграма напруг магнітного та електричного впливів

Відповідно до теореми косинусів сумарна напруга на початку і в кінці лінії визначиться виразом [5, 12, 111]:

$$U_{ME} = \sqrt{\left(\frac{U_M}{2}\right)^2 + U_E^2 \pm U_M U_E \sin \varphi}$$

де U_M - повна напруга магнітного впливу;

U_E - повна напруга електричного впливу.

Допускають спрощений розрахунок з підсумовуванням напруг в квадратурі (що передбачає кут 90° між векторами):

$$U_{ME} = \sqrt{\left(\frac{U_M}{2}\right)^2 + U_E^2}$$

Аналогічним чином потім визначається результуюча напруга з урахуванням гальванічного впливу [5, 12, 111]:

$$U_\Sigma = \sqrt{U_{ME}^2 + U_\Gamma^2}$$

Результати проведених досліджень показують, що найбільше значення з усіх напруг буде мати U_Γ , таким чином саме гальванічний вплив визначає рівень небезпеки для роботи РК. У випадку з лінією зв'язку гальванічний вплив КМ відсутній і $U_\Sigma = U_{ME}$. Перевага того чи іншого впливу в такому випадку залежить від конкретної ситуації.

4.5 Висновки за розділом 4

1) Розроблено математичну модель впливу тягової мережі на РК, що дало можливість дослідити електромагнітний вплив контактної мережі на РК в діапазоні частот струму завади до 6000 Гц. В результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш несприятливі умови для роботи рейкових кіл виникають

при розташуванні суміжних колії на відстані 5,9 м. При такому розміщені суміжних колій в рейках індукуються поздовжні ЕРС, різниця яких досягає найбільших значень, що може створювати заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу РК.

2) Розроблено математичну модель розповсюдження зворотного тягового струму та потенціалу в рейках та її комп'ютерну реалізацію, що дало можливість дослідити розповсюдження кондуктивних завад в рейковій лінії та визначити найбільш неблагопріятні для роботи РК ділянки. Також визначено, що рівень тягового струму в рейках найбільший в межах ТП й ЕРС та збільшується з ростом інтенсивності руху і при підвищенні опору ізоляції рейок.

3) Підтверджено адекватність приведеного математичного апарату отриманим експериментальним даних за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності, що дозволяє застосовувати його в діапазоні до 1000 Гц для дослідження електромагнітних процесів в багатопровідних лініях та системі КМ-РК-земля зокрема. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні, дослідженні та забезпеченні електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання.

РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИСТУ ЛІНІЙ СЦБ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ З БОКУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ З ЕРС З АТП

Як видно з попередніх розділів локомотив з АТП є потужним джерелом електромагнітних завад в полосах робочих частот апаратури СЦБ. Шлях проникнення завад в сигнальні кола автоматики та зв'язку може бути кондуктивний, електричний та магнітний, але незалежно від нього рівень електромагнітного впливу може бути досить високим, до небезпечного. Тому для забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті необхідно проводити захисні заходи, направлені на зниження наведених ЕРС та захист ліній СЦБ від електромагнітного впливу.

5.1. Використання активного екрануючого проводу

Одним з відомих способів зниження електромагнітного впливу КМ на суміжні лінії є використання системи з екрануючим та підсилюючим проводами (ЕПП) [16, 17], огляд якої приведено в першому розділі. Проте така система не враховує реальний рівень та спектр завад в суміжних лініях, внаслідок чого захист не є досить ефективним, оскільки існує велика ймовірність недокомпенсації, або перекомпенсації завади в лініях. Враховуючи переваги та недоліки такого способу захисту в дисертаційній роботі запропоновано використання системи захисту з активним екрануючим проводом (АЕП), який дозволяє збільшити ефективність захисту та як наслідок підвищити безпеку функціонування РК [127, 128].

Система передбачає пропуск зворотного тягового струму через АЕП за допомогою додаткових регулюючих пристроїв. В Європі широко використовується система, в якій весь зворотній тяговий струм пропускається через АЕП [143], таким чином тяговий струм в рейках відсутній. Але в цьому випадку струм в АЕП, як і в контактному, має приблизно постійне значення, отже такий спосіб розрахований в першу чергу на захист ізольованих від землі ліній (кабелів, лінії зв'язку), що мають постійний рівень напруги по всій своїй довжині. Рейкова лінія має сполучення з землею через опір ізоляції, тобто рівень струму в

рейковій лінії змінюється в залежності від місцезнаходження рухомого складу. Таким чином описаний спосіб не дозволяє в достатній мірі зменшити електромагнітний вплив на рейкові кола.

Задача системи захисту РК від електромагнітних завад полягає у забезпеченні рівнів завад в діапазоні всіх робочих частот РК в припустимих межах, визначених [34, 74, 84]. Проте рівні струмів завад нормуються для гармонік струму електровоза. Струм завади на вході пристроїв СЦБ буде максимальним і рівним струму завади від електровоза у разі його безпосереднього розташування в точці підключення апаратури РК. У такому випадку контролювати струм завади, спираючись на нормативні документи, можна в блоці пристрою узгодження та захисту (ПУЗ), який встановлено в точках під'єднання колійних приймачів. (див. рис. 5.1). Крім того для ефективної роботи системи з АЕП достатньо компенсувати завади лише в полосах робочих струмів РК, тобто застосовувати селективний відбір струму в АЕП.

Під'єднання АЕП проводиться за допомогою елементів регулювання (ЕР), що контролюють відгалуження зворотного тягового струму з рейок в активний екрануючий провід за допомогою сигналів з блоку керування (БК). Забезпечення максимального захисту рейкових кіл досягається шляхом визначення зворотного тягового струму в АЕП виходячи з умови мінімуму електромагнітних завад в точці підключення колійних приймачів.

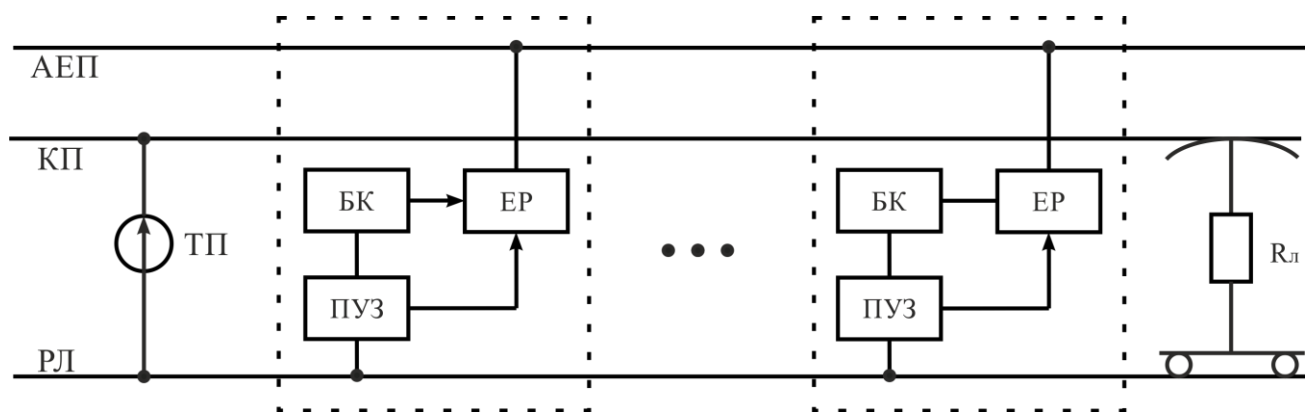


Рисунок 5.1 - Структурна схема системи захисту рейкових кіл

Розглянемо більш детально метод селективної компенсації завад у рейкових колах.

Відмінною рисою системи, що пропонується, є автоматична компенсація електромагнітних завад на ділянках, де це необхідно. Компенсація завад відбувається виходячи з безпосереднього рівня струму завади в рейках в точці підключення колійних приймачів [82, 116, 117, 127]. Для аналізу струму в рейках необхідно встановити первинний датчик, за допомогою якого цей струм повинен поступати до БК. В якості такого датчику доцільно використовувати датчик струму, що побудований на ефекті Холла [37, 38, 100]. Такий датчик є безконтактним, а отже не впливає на роботу рейкових кіл, крім цього він є досить чутливим, надійним та недорогим.

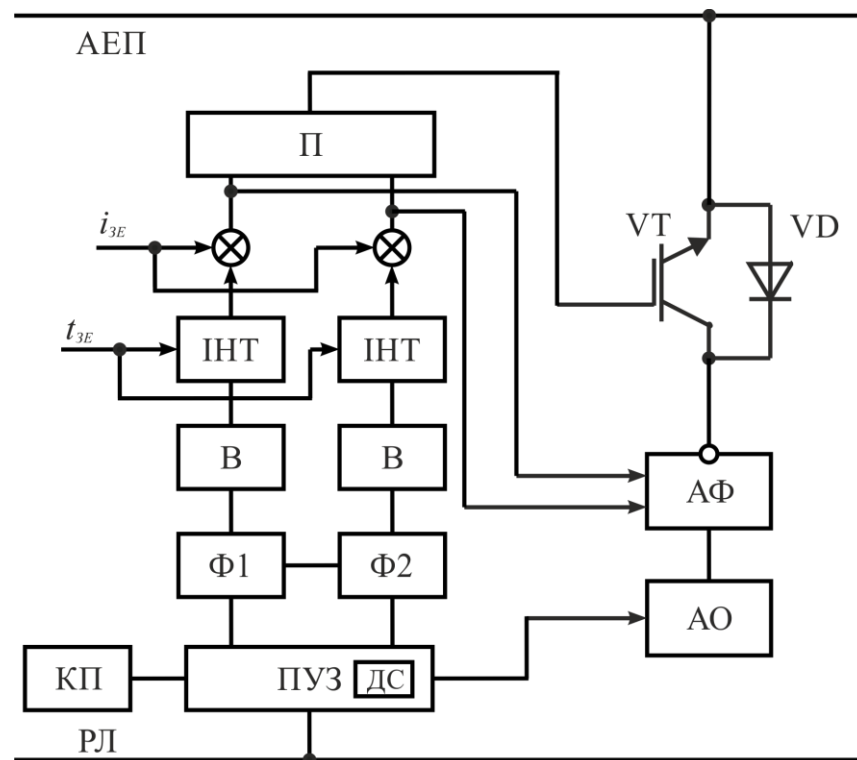


Рисунок 5.2 - Функціональна схема пункту підключення елемента регулювання

Струм з датчику струму (ДС), що встановлений в ПУЗ, поступає до блоку фільтрів (Ф1 та Ф2), що складається з двох фільтрів, налаштованих на частоти f_1 та f_2 , які відповідають сигнальним частотам колійних приймачів, під'єднаних в цій точці. Таким чином із загального струму завади виділяють гармоніки, що потрапляють в смугу частот РК [82, 116, 117, 127].

Далі отримані струми завад окремо для f_1 та f_2 випрямляються та потрапляють на інтегрувальні ланки (ІНТ), задача яких полягає у визначенні тривалості діючої завади (t_3) та порівнянні її з еталонним значенням тривалості

завади (t_{3e}) при якій може спостерігатися вплив на роботу РК. Якщо тривалість діючої завади перевищує встановлене нормативне значення (0,3 с) [74] то відбувається перевірка рівня завади, шляхом порівняння з еталонним значенням (i_{3e}) при якому може спостерігатися вплив на роботу РК. Отриманий сигнал розузгодження несе у собі інформацію на скільки діюче значення завади перевищує нормативно встановлене.

Після цього сформований керуючий сигнал підсилюється (П) та потрапляє на затвор IGBT, який виступає в ролі ЕР (керованого опору), що визначає долю струму відгалуженого в АЕП [82, 116, 117, 127]. Струм з рейок проходить через активний фільтр (АФ), задача якого підсилити, проінвертувати та пропустити в АЕП струм завади тільки в робочій полосі РК. Коефіцієнт підсилення АФ та полоса його пропускання визначаються за сигналом з БК.

Таким чином в АЕП протікатиме струм, який є мінімально необхідним і достатнім для компенсації електромагнітних завад в РК.

Для захисту системи від короткого замикання в тяговій мережі, встановлюється амплітудний обмежувач (АО), що захистить АФ та ЕР від струмів короткого замикання. У випадку короткого замикання у тяговій мережі відгалуження струму з рейок в АЕП не відбувається, а система з АЕП перетворюється на звичайну пасивну систему з екрануючим проводом [82, 116, 117, 127]. Застосування АО знижує вартість системи, оскільки в цьому випадку її елементи не потрібно розраховувати на струм короткого замикання.

У системі присутній зворотній зв'язок, так як чим більший струм завади в РЛ тим більший струм буде відгалужуватися в АЕП, а це в свою чергу призведе до зменшення завад в РЛ. В результаті такої побудови системи компенсація електромагнітних завад відбувається автоматично в реальному часі та по мірі необхідності, наявність зворотного зв'язку підвищує надійність та стабільність системи захисту, а також виключає можливість перекомпенсації [129].

5.2. Моделювання системи з активним екрануючим проводом

У якості наукового обґрунтування використання АЕП проведемо моделювання роботи системи з АЕП для двоколійного перегону, на ділянці «ТП-локомотив» у порівнянні з системою з пасивним екрануючим проводом (ПЕП) та для випадку відсутності будь-якої системи захисту.

Розповсюдження зворотного тягового струму в рейках опишемо за допомогою системи диференціальних рівнянь першого порядку для ділянки колії довжиною dx [12, 70]:

$$\begin{aligned}-\frac{dU_p(x)}{dx} &= (R_p + j\omega L_p) \cdot I_{pm}(x) + j\omega L_{кпп} \cdot I_{кп} + R_{кпп} \cdot I_{кп} \\ \frac{dI_{pm}(x)}{dx} &= (G_p - j\omega C_p) \cdot U_p - (G_{кпп} - j\omega C_{кпп}) \cdot (U_{кп} - U_p)\end{aligned}$$

де u_p, i_p - миттєві значення напруги та струму в рейковій лінії;

R_p, L_p, G_p, C_p - первинні параметри рейкової лінії;

$u_{кп}, i_{кп}$ - миттєві значення напруги та струму в контактному проводі;

Розв'язки приведеної системи дають можливість визначити струм в рейках та їх потенціал відносно землі в будь-якій точці заданої ділянки.

При проведенні моделювання вважаємо рейкову колію двопровідною лінією, що дає можливість досліджувати різницю наведених ЕРС та індукованих струмів, а також враховувати поздовжню та поперечну асиметрію опорів рейкових ліній [7, 97, 119, 143-145]. Для відображення тільки електромагнітного впливу контактної мережі асиметрією знехтуємо, вважаючи опори рейок рівними, однак зазначимо, що наявність асиметрії збільшуватиме різності струмів та ЕРС, погіршуючи умови роботи РК.

Окрім контактного проводу та рейок (P1, P2) в системі також присутні рейки суміжної колії (P3, P4) та активний екрануючий провід.

За допомогою коефіцієнта взаємоіндукції встановимо індуктивний зв'язок між всіма проводами системи по аналогії з математичною моделлю в розділі 4, наприклад, коефіцієнта взаємоіндукції між контактним проводом та рейкою P1 [12, 7, 119]:

$$M_{k1p1}(d) = 10^{-4} \cdot \left(2 \cdot \ln \cdot \left(\frac{12,66}{\sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000} \cdot [(a_{kp1}(d))^2 + (h_k - h_r)^2]}} \right) \right) + \\ + 1 - j \cdot \left[\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{\sigma \cdot \frac{f}{1000}} \cdot e^{j \frac{3}{4} \pi} \cdot (h_k + h_r) \right]$$

де $\sigma = 10^{-3}$ СМ · км - питома провідність землі

h_k - висота підвісу контактного проводу над землею;

h_r - висота рейки над землею;

a_{kp1} - відстань по горизонталі від контактного проводу до першої рейки, що визначена через міжколійну відстань (d):

Тоді струм в АЕП, наведений контактним проводом (якщо АЕП працює як пасивний провід) [117]:

$$I_{ke}(d) = 0,5 m_{ke}(d) I_k$$

де $m_{ke}(d) = \frac{Z_{mke}(d)}{Z_e}$ - параметр зв'язку: $Z_{mke}(d) = j \cdot w \cdot M_{ke}(d)$;

Z_e - опір екрануючого проводу;

I_k – струм в контактному проводі.

Струм в рейках Р1 та Р2 визначаємо з урахуванням впливу екрануючого проводу та системи активної компенсації завад [117]:

$$I_{p1}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5 m_{ep1}(d) I_{ke}(d) \right) \cdot \left(1 - \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right) \\ I_{p2}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5 m_{ep2}(d) I_{ke}(d) \right) \cdot \left(1 - \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right)$$

При визначенні струмів в рейках Р3, Р4 враховуємо індукований струм від контактного та екрануючого проводу, екрануючу дію рейок Р1, Р2 та вплив системи активної компенсації завад [117]:

$$I_{p3P}(x) = 0,5 \cdot (-m_{kp3}(d) I_k - m_{p1p3}(d) I_{p1}(x) - m_{p2p3}(d) I_{p2}(x) - \\ - m_{ep3}(d) I_{ke}(d) - m_{ep3}(d) I_e(x))$$

$$I_{p4}P(x) = 0,5 \cdot (-mkp4(d)I_k - mp1p4(d)I_{p1}(x,d) - mp2p4(d)I_{p2}(x) - \\ - mep4(d)I_{ke}(d) - mep4(d)I_e(x))$$

Отже математична модель роботи системи з АЕП для двоколійного перегону матиме наступний вигляд [117, 127]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{dU_p(x)}{dx} = (R_p + j\omega L_p) \cdot I_{pm}(x) + j\omega L_{кпп} \cdot I_{кп} + R_{кпп} \cdot I_{кп} \\ \frac{dI_{pm}(x)}{dx} = (G_p - j\omega C_p) \cdot U_p - (G_{кпп} - j\omega C_{кпп}) \cdot (U_{кп} - U_p) \\ I_{p1}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5mep1(d)I_{ke}(d) \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right) \\ I_{p2}(x) = \left(\frac{I_{pm}(x)}{2} - 0,5mep2(d)I_{ke}(d) \right) \cdot \left(1 - \left| \frac{I_e(x)}{I_{pm}(x)} \right| \right) \\ I_{p3}P(x) = 0,5 \cdot (-mkp3(d)I_k - mp1p3(d)I_{p1}(x) - mp2p3(d)I_{p2}(x) - \\ - mep3(d)I_{ke}(d) - mep3(d)I_e(x)) \\ I_{p4}P(x) = 0,5 \cdot (-mkp4(d)I_k - mp1p4(d)I_{p1}(x,d) - mp2p4(d)I_{p2}(x) - \\ - mep4(d)I_{ke}(d) - mep4(d)I_e(x)) \\ I_{ke}(d) = 0,5mke(d)I_k \end{array} \right.$$

За алгоритмом роботи струм в АЕП відгалужується лише в разі перевищення струмом завади порогового значення, визначеного за нормативними документами. Для підвищення надійності роботи системи та увімкнення завчасної компенсації нормативне значення струмів завад береться з коефіцієнтом запасу 0,9. При вирішенні диференціальних рівнянь враховуємо, що точці з координатою $x=0$ струм в рейках дорівнює струму тягової підстанції, а в точці $x=l$ – струму локомотиву. Тоді отримуємо граничні умови математичної моделі у формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_e(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\Delta I_{34m}(x)| \leq I_{norm} \\ (k_i \cdot \Delta I_{34m}(x)) & \text{if } |\Delta I_{34m}(x)| > I_{norm} \end{cases} \\ I_{pm}(0) = I_{ТП} \\ I_{pm}(l) = I_{лок} \end{array} \right.$$

Для моделювання приймемо наступні параметри: струм локомотива 450 А 50 Гц, довжина ділянки «ТП-локомотив» 20 км. Площиною позначено максимально допустимий струм завади на частоті 50 Гц - 1,3 А. Приведемо деякі проміжні результати роботи моделі:

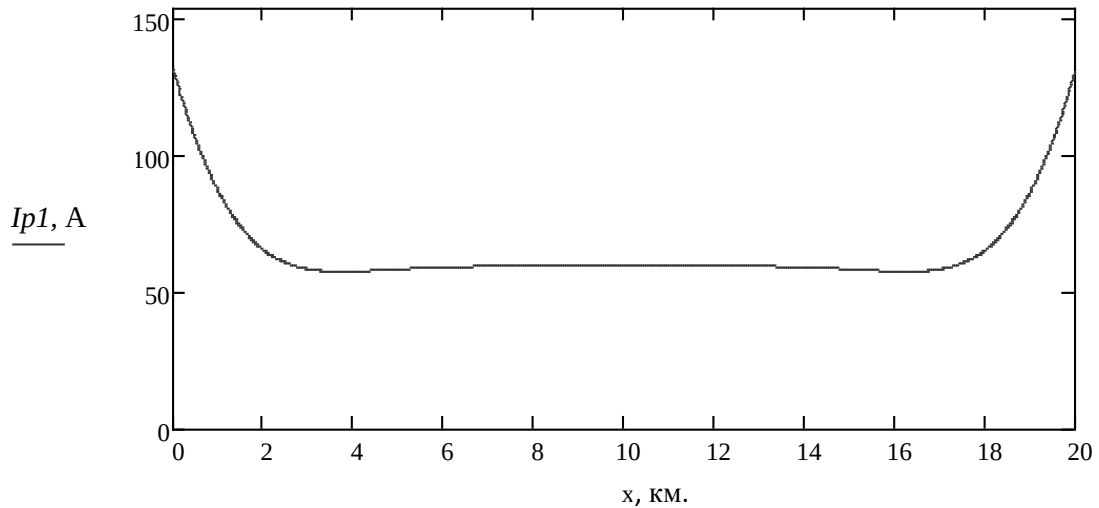


Рисунок 5.3 - Струм у рейці P1

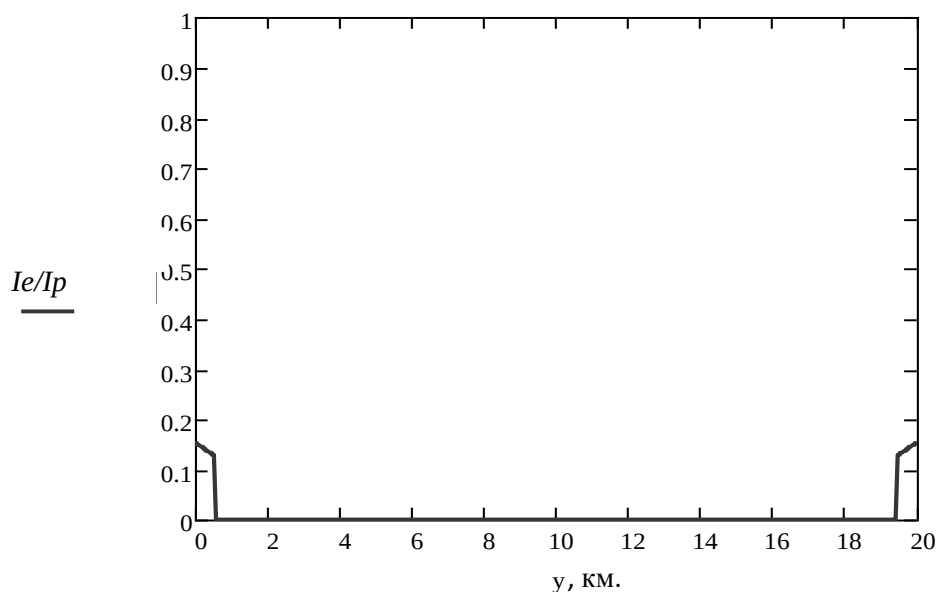
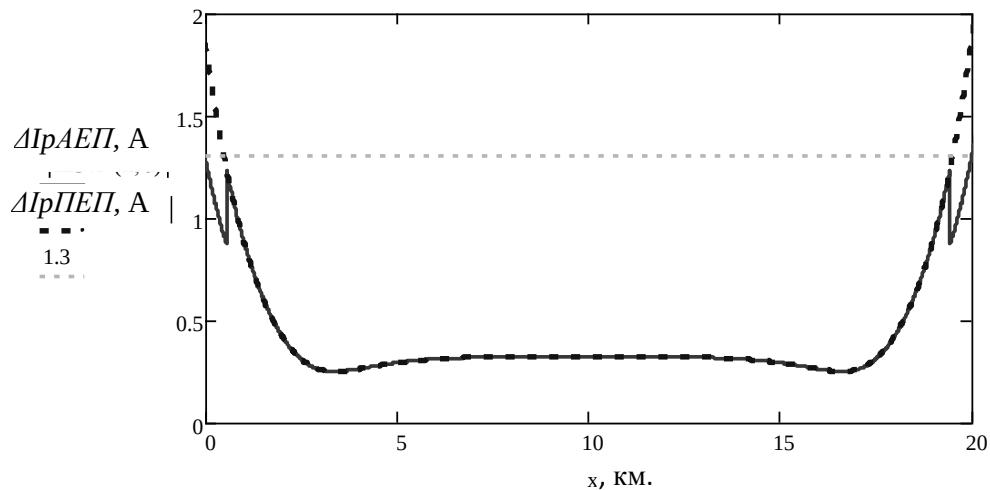


Рисунок 5.4 - Частина струму в рейках, що відгалужується в АЕП

На рис. 5.4 помітно, що струм в АЕП відгалужується тільки в тоді, коли струм завади перевищує допустимі значення, а його долі не перевищує 15% від струму в рейках.



суцільна – при АЕП; пунктирна – при ПЕП

Рисунок 5.5 - Різниця струмів в суміжній колії при $d=4,1$ м

На діаграмах (рис. 5.6) побудована залежність різниці наведених струмів в рейках суміжної колії від міжколійної відстані (d) на ділянці «ТП-локомотив» для випадку відсутності будь-якої системи захисту (а), з системою з пасивним екрануючим проводом (б), для системи з АЕП (в) [117, 127].

При відсутності систем захисту помітно великий рівень наведеної складової між локомотивом та ТП (біля 1 А) й перевищення струмом завади допустимого рівня 1,3 А біля ТП та ЕРС.

На нижній діаграмі проілюстровано дію системи захисту з АЕП, яка включається в роботу на ділянці біля ТП та ЕРС та знижує рівень завади в РК до припустимого значень, забезпечуючи тим самим електромагнітну сумісність РК з КМ та ЕРС з АТП.

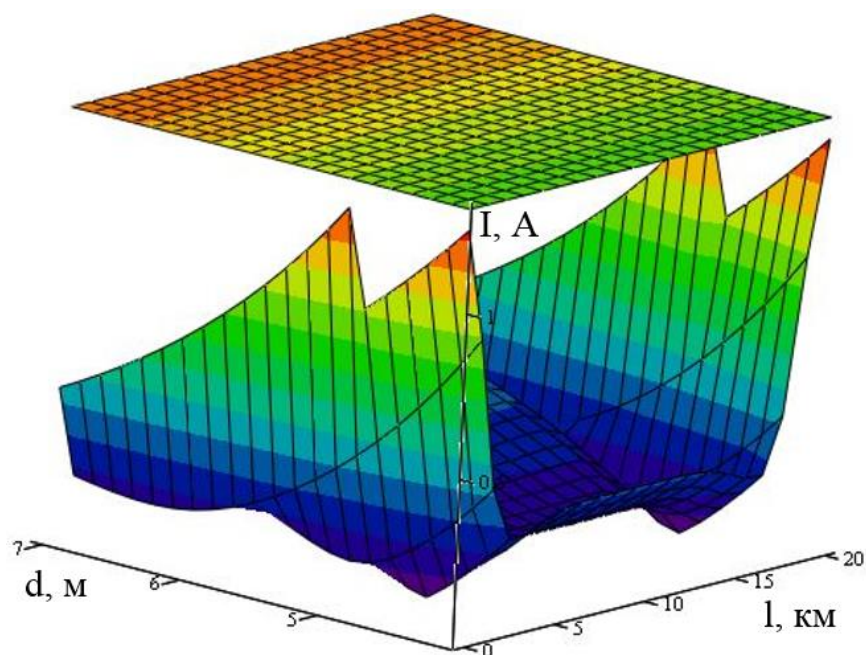
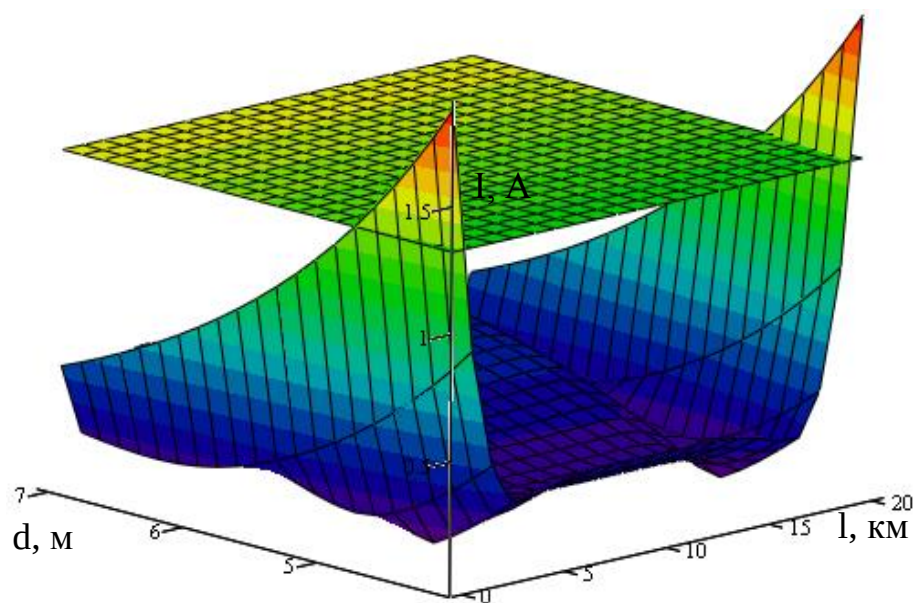
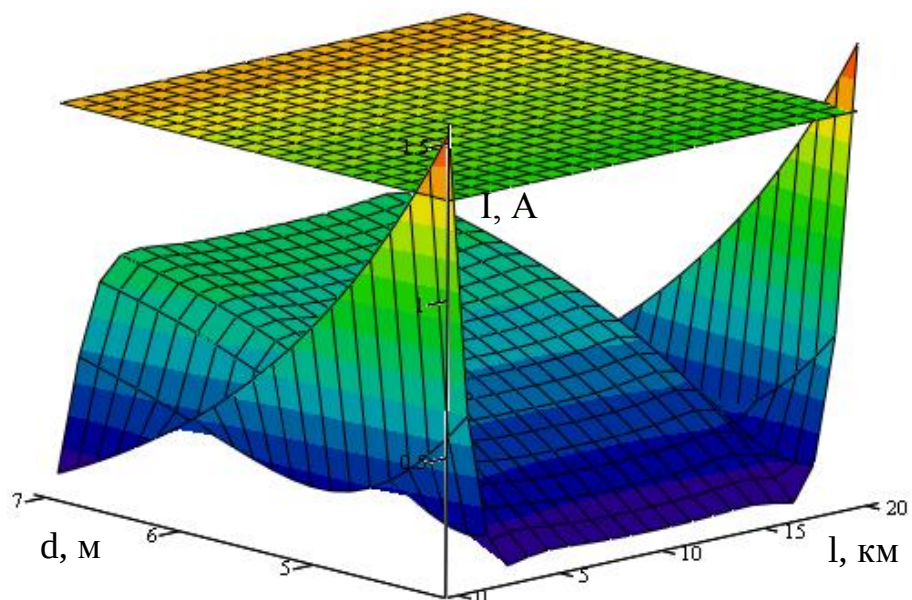


Рисунок 5.6 - Порівняльні результати роботи запропонованої системи захисту з АЕП

5.3. Оцінка підвищення функціональної безпеки рейкових кіл

На небезпечних промислових об'єктах, таких як залізниця, неправильне функціонування системи автоматизації може призвести до людських жертв, екологічних катастроф або великих фінансових втрат, тому поняття безпеки займає ключове місце в системі організації руху на залізничному транспорті.

Безпека в звичайному розумінні цього слова трактується як збереженість людини, об'єкта, вантажу, навколишнього середовища. Безпека перевізного процесу на залізничному транспорті, згідно з [95] розуміється як властивість транспортної системи не створювати небезпеки для збереження вантажу, що перевозиться, технічних засобів, об'єктів навколишнього середовища, для збереження здоров'я і життя пасажирів, технічного персоналу, населення, що знаходиться в зоні впливу перевізного процесу.

Безпека пристроїв залізничної автоматики - властивість системи безупинно зберігати справний, працездатний або захисний стан протягом деякого часу або напруження і базується насамперед на підтриманні в заданих межах параметрів апаратури і систем [95]. Вимоги до параметрів викладені рядом нормативних документів [39-41, 74], які визначають працездатність систем або переведення їх у захисний стан у разі виникнення відмови.

Поняття функціональної безпеки, згідно з [41], це властивість системи виконувати задані функції без недопустимого ризику створення ним аварійних станів, які можуть призвести до загибелі, травмування, погіршення здоров'я людей, негативного впливу на довкілля, завдання визначеного матеріального чи іншого збитку.

Функціональна безпеку відрізняється також від дуже близької поняття надійності тим, що вона враховує не тільки частоту відмов системи, але й імовірність виникнення небезпечної ситуації під час відмови.

Термін "функціональна" стосовно до безпеки систем автоматизації означає безпеку, яка залежить від коректного функціонування системи, тобто від правильного виконання системою своїх функцій. На відміну від цього,

надійність описує частоту відмов незалежно від призначення системи і тяжкості наслідків, викликаних відмовами. Тим не менш, показники надійності використовуються при кількісному описі функціональної безпеки [53, 59, 95].

В процесі експлуатації пристроїв залізничної автоматики, зокрема рейкових кіл, виникають чинники, які мають прямий вплив на рівень безпеки [95, 108]. За статистикою основними порушеннями безпеки, які викликані відхиленням параметрів технічних засобів, є наступні: прийом поїзда на зайняту колію; приймання або відправлення поїзда по неготовому маршруту; відправлення поїзда на зайнятий перегін; переведення стрілки під поїздом; помилкове поява на світлофорі дозволяючого показання сигналу замість заборонного або поява більш дозволяючого; вимикання пристроїв АЛС на шляху прямування; перекриття дозволяючого показання сигналу на заборонне, що викликало проїзд заборонного сигналу та ін.

Впровадження запропонованого методу компенсації завад в рейкових колах від ЕРС з АТП знижує струми завад до припустимого рівня, що призводить до підвищення функціональної безпеки рейкових кіл, в наслідок чого зменшується кількість відмов пристроїв АЛС та проїздів заборонного сигналу.

Проведемо якісну оцінку підвищення функціональної безпеки рейкових кіл від впровадження пропонованого в дисертації методу. За статистикою Укрзалізниці та УЗШК під час експлуатації на залізницях України ЕРС з АТП в середньому протягом року спостерігається близько 166 збоїв графіку руху, що супроводжуються запізненням більш ніж на 20 хвилин, з яких 40 запізнень відбувається з вини апаратури автоматики. Аналіз причин запізнень показав, що в середньому 33 запізнення за рік спричиняють відмови рейкових кіл, з яких близько 25 % спостерігаються збої в роботі системи АЛС або факт проїзду заборонного сигналу. Розрахуємо інтенсивність відмов, що впливають на функціональну безпеку [8, 95, 108]:

$$\lambda_{\phi} = \frac{n(\Delta t)}{N \Delta t}$$

де $n(\Delta t)$ - число рейсів за рік, що супроводжувалися запізненнями; N – загальна кількість рейсів за рік; $\Delta t = 8640$ - кількість годин в році.

$$\lambda_{\phi} = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t} = \frac{33}{7200 \cdot 8760} = 5,23 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{год}}$$

Впровадження методу призводить до покращення умов роботи рейкових кіл, в наслідок чого кількість запізнень за причиною відмови в роботі системи АЛС або проїзду заборонного сигналу зменшується приблизно на 90%. Тоді інтенсивність відмов, що впливають на функціональну безпеку, за умови використання запропонованої системи захисту рейкових кіл:

$$\lambda_{\phi_3} = \frac{n_3(\Delta t)}{N\Delta t}$$

де $n_3(\Delta t) = n(\Delta t) - n(\Delta t) \cdot 0,25 \cdot 0,9 \approx 26$ - число рейсів за рік, що супроводжувалися запізненнями при використанні системи захисту рейкових кіл.

$$\lambda_{\phi_3} = \frac{n_3(\Delta t)}{N\Delta t} = \frac{26}{7200 \cdot 8760} = 4,12 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{год}}$$

Таким чином підвищення функціональної безпеки роботи рейкових кіл від впровадження запропонованого методу складає:

$$S_B = \frac{\lambda_{\phi} - \lambda_{\phi_3}}{\lambda_{\phi_3}} \cdot 100\% = \frac{5,23 \cdot 10^{-7} - 4,12 \cdot 10^{-7}}{4,12 \cdot 10^{-7}} \cdot 100\% \approx 21\%$$

Проведемо оцінку ризиків. Ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови визначаємо виходячи з експоненційного закону розподілення відмов пристроїв залізничної автоматики [95]:

$$p_{\phi} = e^{-\lambda_{\phi} \cdot \Delta t} = 0.9954; q_{\phi} = 1 - p_{\phi} = 0.00455$$

$$p_{\phi_3} = e^{-\lambda_{\phi_3} \cdot \Delta t} = 0.9965; q_{\phi_3} = 1 - p_{\phi_3} = 0.00347$$

Визначимо ризики до впровадження запропонованого методу і після:

$$R_{\phi} = q_{\phi} \cdot D = 0.00455 \cdot 30100 = 136.995$$

$$R_{\phi_3} = q_{\phi_3} \cdot D = 0.00347 \cdot 30100 = 104.447$$

Тоді зниження ризику:

$$\Delta R = R_{\phi} - R_{\phi z} = 136.995 - 104.447 = 32.548$$

5.4 Висновки за розділом 5

1) Розроблено наукове обґрунтування методу селективної компенсації завад в РК, суть якого полягає в зменшенні в РК тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів РК, що дозволяє підвищити безпеку функціонування РК та значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв.

2) Проведено оцінку підвищення функціональної безпеки. Впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в РК знижує інтенсивність їх відмов, що зумовлює підвищення функціональної безпеки РК кіл на 21%. Проведено оцінку зниження ризиків.

3) Застосування системи з ПЕП зменшує абсолютні значення наведених струмів в рейках, але їх різниця біля ТП та ЕРС збільшується до 1,7 А. Таке явище пояснюється врахованою в моделі екрануючою дією рейок, що залежить від струму в них та багатопровідністю досліджуваної системи.

РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ

Основною задачею залізничного транспорту є якісне і повне задоволення потреб народного господарства і населення в перевезеннях. Задачею служби сигналізації та зв'язку, в свою чергу, є підвищення економічної ефективності роботи залізниці та забезпечення безпеки руху [25, 97, 110].

Впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму дозволить знизити кількість відмов рейкових кіл по причині електромагнітних завад та підвищити їх надійність, що в кінцевому результаті дозволить підвищити безпеку руху [82, 117, 127].

Відмови пристроїв СЦБ бувають небезпечні та захищені. Виникнення перших є неприпустимим внаслідок зниження загальної безпеки руху. Тому для розрахунків вважатимемо, що рейкові кола на залізниці дають тільки захищені відмови і не створюють небезпечних для руху ситуацій. В такому разі кожна відмова рейкового кола супроводжується зупинкою потягу та простоєм рухомого складу, що призводить до економічних втрат залізниці по причині несправності пристроїв СЦБ. Додаткові втрати пов'язані з витратами часу та матеріальних ресурсів на ліквідацію відмов експлуатуючим персоналом. Впровадження системи захисту рейкових кіл дозволить суттєво знизити кількість відмов, пов'язаних з електромагнітним впливом тягової мережі змінного струму, і як наслідок отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу [54, 67].

Впровадження нових технічних рішень та систем на залізниці обов'язково базується на основі розрахунку річного економічного ефекту та терміну окупності проекту. Показником загальної економічної ефективності капітальних вкладень є коефіцієнт економічної ефективності E , який для промислових організації і транспорту визначається як відношення приросту річного прибутку до капітальних затрат, що викликають цей приріст [67, 78]:

$$E = \frac{P}{K}$$

Отримане значення коефіцієнту економічної ефективності E порівнюють з галузевим нормативом E_n . Якщо виявляється, що $E > E_n$, то розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними. Норматив ефективності для господарства автоматики та зв'язку $E_{АЗ} = 0,15$. [67, 78, 101]. По отриманому коефіцієнту економічної ефективності може бути визначений термін окупності капітальних вкладень як величина зворотна E :

$$T = \frac{1}{E}$$

6.1. Розрахунок капітальних вкладень в обладнання ділянки системою захисту рейкових кіл від електромагнітних завад.

Планується обладнання фідерної зони довжиною 73,3 км системою захисту рейкових кіл від електромагнітних завад. Обладнання включає в себе монтаж активного екрануючого проводу вздовж ділянки та встановлення проміжних пунктів регулювання струму в цьому проводі. Регулюючі пункти встановлюють через кожні три блок-ділянки, що приблизно складає 6 км. Тоді на обладнання кожних шести кілометрів колії системою захисту рейкових кіл необхідно:

Таблиця 6.1 - Розрахунок капітальних витрат на 6 км колії

N п/п	Пристрій	Кількість, од	Вартість, грн
1	Датчик струму	1	425
3	IGBT транзистор	1	2564,5
4	Провід А-95	6	128500
5	Додаткова апаратура та монтажні матеріали	1	356
6	Монтаж	1	8000
7	Амортизаційні відрахування	5%	6992,28
8	Витрати на матеріали та запасні частини	2%	2875,12
7	Разом		149712,9

Додатково враховуємо амортизаційні відрахування, що визначаються на основі вартості обладнання і складаються з відновлення, заміну деталей та капітальний ремонт. Щорічні амортизаційні відрахування складають 5% від вартості системи, а витрати на матеріали та запасні частини – 2% [54, 67, 78].

Тоді на 73,3 км фідерної зони:

$$K = \frac{220}{6} \cdot 149712,9 = 5,48 \cdot 10^6 \text{ грн}$$

6.2. Розрахунок економічної ефективності впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітних завад

Для визначення економічної ефективності впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітних завад розрахуємо витрати залізниці на простій поїздів та на втрати енергії у проводах контактної мережі для звичайної дільниці та дільниці з активним екрануючим проводом.

Таблиця 6.2 - Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Одиниці виміру	Значення
Кількість відмов за рік на Південно-Західній залізниці в наслідок електромагнітного впливу	<i>Not</i>	шт	65
Середній час затримки одного потягу	<i>Tz</i>	хв	11,6
Середні витрати енергії при простої потягу	<i>Pp</i>	кВт×год	125
Довжина дільниці	<i>Lu</i>	км	220
Ходова швидкість потягу	<i>Vx</i>	км/г	60
Дільнична швидкість потягу	<i>Vu</i>	км/г	32
Середня кількість вагонів у потягу	<i>mv</i>	шт	60
Коефіцієнт, що враховує додаткові локомотиви	<i>Kt</i>	-	1,1
Середній час пошуку несправності в р.к. кодової АБ	<i>Tposhuk</i>	хв	23
Середній час усунення несправності в р.к. кодової АБ	<i>Tus</i>	хв	20
Середня відстань від посту ЕЦ до несправного р.к.	<i>S1</i>	км	7
Середня швидкість пересування ШН	<i>Vper</i>	км/г	5
Час на підготовку ШН до виходу	<i>Tr</i>	хв	15

Параметр	Позначення	Одиниці	Значення
Часова тарифна ставка ШН	C_e	грн/г	10
Вартість розгону та сповільнення одного потягу	C_p	грн	887,29
Вартість простою одного вагоно-часу	C_v	грн	15,0116
Вартість простою одного локомотиво-часу	C_l	грн	182,4222
Вартість простою локомотивної бригади-часу	C_b	грн	698,2
Вартість кВт×год	C_{kv}	грн	1.23

Кількість відмов рейкових кіл за рік та середній час затримки потяга (T_z) базуються на статистиці по залізниці, а кількість відмов по причині електромагнітних завад (Not) – на дослідженні питання електромагнітної сумісності.

Дільнична швидкість потягу (V_u) враховує характерну для проектуємої ділянки інтенсивність руху вантажних та пасажирських потягів.

Коефіцієнт K_t враховує використання додаткових локомотивів для тяги або підштовхування деяких потягів на складних ділянках.

Середня відстань від посту ЕЦ до несправного рейкового кола вибрана виходячи з умови, що максимальна відстань до об'єкта, що обслуговується бригадою ШНС без спец автомобіля може складати 13,75 км [54, 67, 78].

Вважаючи, що кожна відмова рейкового кола супроводжується зупинкою потягу, визначимо експлуатаційні витрати, що пов'язані із розгоном і сповільненням поїздів [54, 67, 78]:

$$Z_p = C_p \cdot Not = 57654.2$$

Визначимо кількість поїздо-годин простою за рік на шляху проходження дільниці по причині відмов рейкових кіл:

$$NH = Not \cdot 2 \cdot Lu \cdot \left(\frac{1}{V_x} + \frac{1}{V_u} \right) = 1374.92 \text{ поїздо-год}$$

Кількість вагоно-годин простою за рік визначається:

$$nh = NH \cdot mv = 82496 \text{ вагоно-год}$$

Кількість локомотиво-годин простою за рік:

$$Mh = NH \cdot Kt = 1512 \text{ лок} \cdot \text{год}$$

Експлуатаційні витрати, пов'язані з простоем поїздів визначаються як добуток поїздо-годин простою на укрупнену витратну ставку:

$$Ze = NH \cdot E_{NT}$$

де E_{NT} - укрупнена витратна ставка.

Таблиця 6.3 -Розрахунок укрупненої витратної ставки на 1 поїздо-годину

N п/п	Вимірник	Формула розрахунку	Значення показника	Витратна ставка, грн	Витрати, грн
1	Вагоно-години	m	60,0000	15,0116	900,696
3	Локомотиво-години	1,1000	1,0000	182,4222	200,66442
4	Бригадо-години локомотивних бригад	1,1000	1,0000	698,2	768,02
5	Кіловат-годин електроенергії	1	125	0,4359	153,75
6	Разом				2023,13042

Отже: $Ze = NH \cdot E_{NT} = 1375 \cdot 2023,13 = 2781803,75 \text{ грн}$

Розрахуємо експлуатаційні витрати, пов'язані з пошуком та усуненням виниклих відмов рейкових кіл. Так як система захисту передбачає встановлення на перегоні, то рахуємо відмови, що трапляються з перегінними рейковими колами. Час, необхідний електромеханіку, щоб дістатися до місця відмови:

$$T_{per} = \frac{S1}{V_{per}} = 1.4 \text{ год}$$

Загальний робочий час, який витрачає електромеханік на усунення однієї відмови складається з часу на [54, 67]:

- підготовку до виходу, T_p (зв'язок з ДСП або ДНЦ, збір інструментів, запасних частин);
- пересування до місця відмови, T_{per} ;
- пошук відмови, T_{poshuk} ;
- усунення відмови, T_{us} ;

- пересування з місця відмови на пост ЕЦ, T_{per} .

$$Totk = T_p + T_{per} + T_{poshuk} + T_{us} + T_{per} = 3.767 \text{ год}$$

Тоді витрати на усунення відмов за рік:

$$Zus = Not \cdot Totk \cdot Ce = 2448.55 \text{ грн.}$$

Згідно з законодавством України проводяться нарахування до основного фонду заробітної плати в розмірі 36% від заробітної плати основного фонду (а саме 32% - пенсійний збір, 2,5% - соціальне страхування, 1,5% - відрахування у фонд безробіття) [78]. Тоді з додатковими нарахуваннями отримуємо експлуатаційні витрати на усунення відмов:

$$Z_v = Zus + Zus \cdot 0.36 = 3330,02 \text{ грн.}$$

Розрахуємо загальні економічні втрати залізниці від простою поїздів по причині відмов рейкових кіл:

$$Z = Z_p + Z_e + Z_v = 2842787,97 \text{ грн}$$

Проведемо розрахунок втрат електроенергії в тяговій мережі на дільниці, що проектується, для двох варіантів: звичайна тягова мережа та мережа з активним екрануючим проводом. Оскільки в системі використовується один екрануючий провід та змінним струмом електрифікована тільки одна з колій, то економія електроенергії спостерігатиметься також на одній колії, тому для неї розрахунок можна виконати за наступною формулою [54]:

$$W_{TC} = 0.067 \cdot \frac{W_T^2}{T \cdot U_{НОМ}} \left[\frac{T}{N \cdot t + N_H \cdot t_H} + 0.46 \left(1 - \frac{J}{t + t_H} \right) \right] \times r \times \frac{L}{2}$$

де T – розрахунковий період, $T=24$ години;

$U_{ном}$ – номінальна напруга контактної мережі, $U_{ном} = 25$ кВ;

t, t_H - час руху потягу по фідерній зоні в парному та непарному напрямках, год;

J – мінімальний міжпоїзний інтервал, $J = 6/60=0,1$ год;

N, N_H – середньодобова кількість потягів в парному та непарному напрямках, $N = 20, N_H = 20$;

W_T – втрати електроенергії в проводах мережі при русі локомотива по фідерній зоні за період T .

Основну енергію на тяговій ділянці споживають вантажні та швидкісні пасажирські потяги, потужність таких локомотивів може складати 8–16 МВт [91, 147]. Тому при розрахунку беремо до уваги рух тільки потужних локомотивів середня потужність яких складає 12 МВт, що відповідає номінальному струму $I_n = 480$ А. Будемо вважати, що втрати електроенергії на рух поїздів у парному та непарному напрямках рівні, оскільки інтенсивність руху на тип підвіски у парному та непарному напрямках однаковий, тоді:

$$W = W_H = I_n^2 \cdot r \cdot l \quad W_a = W_{Ha} = I_n^2 \cdot r_a \cdot l$$

де r, r_a – активний опір тягової мережі без та з активним екрануючим проводом відповідно, $r = 0,172$, $r_a = 0,116$ Ом / км; [70, 102]

l – довжина фідерної зони, $l = 73,3$ км;

Тоді $t = t_H = l/V_u = l/V_u = 73,3/31,839 = 2,303$ год.

$$W_T = W \cdot N + W_H \cdot N_H \quad W_{Ta} = W_a \cdot N + W_{Ha} \cdot N_H$$

Підставимо дані в основне рівняння, отримуємо втрати електроенергії в проводах за рік на фідерній зоні для звичайної контактної мережі та мережі з активним екрануючим проводом:

$$W = 6,76139 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{г} \quad W_a = 2,07408 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{г}$$

Різниця W та W_a дає значення енергії, що економиться за рік при впровадженні системи з активним екрануючим проводом:

$$\Delta W = W - W_a = 4,687 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{г}$$

Враховуючи ціну одного кВт·г визначимо економічний ефект від зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі:

- на фідерну зону: $\Delta C1 = \Delta W \cdot C_{kv} = 5,76 \cdot 10^6$ грн/рік.

- на один кілометр: $\Delta C2 = \Delta C1 / 73,3 = 78649,52$ грн/рік.

Таким чином впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму дозволить отримати прибуток у вигляді економії витрат залізниці на простій рухомого складу у кількості 2,83 млн. грн./рік та економії електроенергії на втратах в проводах контактної мережі кількості у 17,27 млн. грн./рік, тобто $P = Z + \Delta C2$.

Визначимо коефіцієнт економічної ефективності впровадження системи захисту (E):

$$E = \frac{P}{K} = \frac{2,84 \cdot 10^6 + 17,27 \cdot 10^6}{5,48 \cdot 10^6} = 3,67$$

Тоді термін окупності системи:

$$T = \frac{1}{E} \approx 0,272 \text{ років}$$

Отримане в розрахунку значення $E > E_n$ ($E_{A3} = 0,15$), тому розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними.

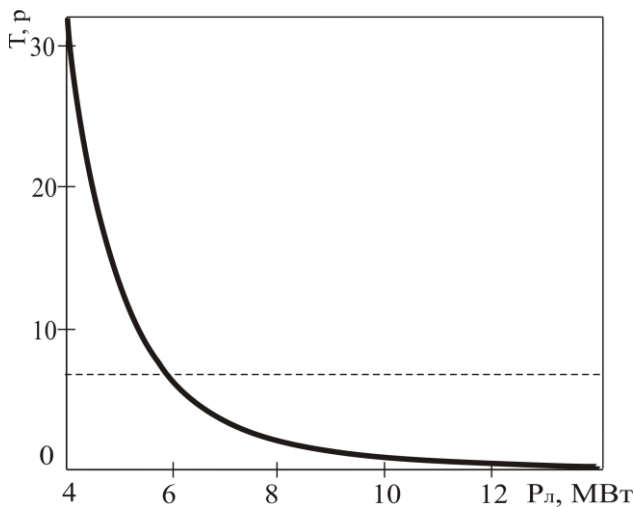


Рисунок 6.1 - Залежність терміну окупності від середньої потужності локомотивів

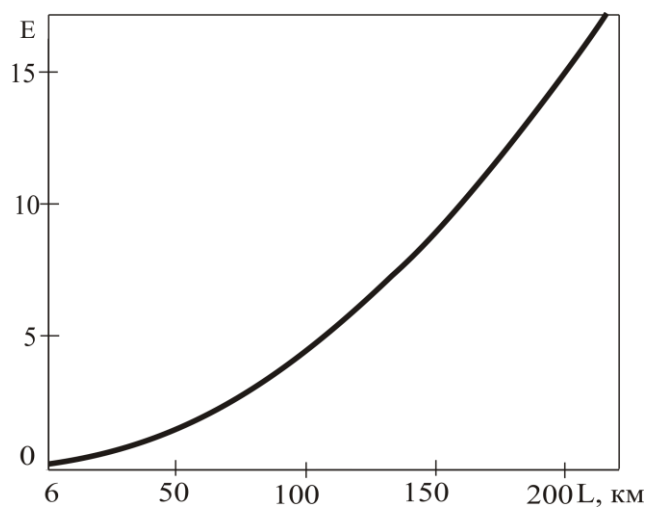


Рисунок 6.2 - Залежність коефіцієнта економічної ефективності від довжини ділянки

6.3. Висновки за розділом 6

Таким чином впровадження селективного методу компенсації завад в рейкових колах дозволить отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу. Визначений коефіцієнт економічної ефективності впровадження системи захисту складає $E = 3,67$, а термін окупності проекту складає $T = 0,272$ років, тобто приблизно 3 місяці.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення функціональної безпеки РК в умовах експлуатації ЕРС з АТП шляхом забезпечення їх електромагнітної сумісності з системою тягового електропостачання та новими видами рухомого складу. Основні результати досліджень полягають у наступному:

1. На основі проведеного аналізу роботи РК виявлено, що на долю відмов з проблеми електромагнітної сумісності припадає в середньому до 10,5 % відмов апаратури автоматики, зокрема РК, що безпосередньо впливає на безпеку руху поїздів. Також зазначено, що цей показник збільшився в останні роки на ділянках з рухом ЕРС з АТП.

2. Розроблено узагальнену математичну модель силових кіл ЕРС з АТП з урахування процесів в силовому трансформаторі, 4q-S перетворювачі, інверторі та обмотках АТП з використанням реальних параметрів силових ключів, а також аналітичне розв'язання рівнянь моделі і її реалізацію в пакеті OrCAD PSpice, що дозволило дослідити частотні параметри завад від ЕРС з АТП в різних режимах його роботи, визначити найбільш несприятливі для функціонування рейкових кіл режими ведення ЕРС.

3. Вдосконалено метод багатоканального вимірювання електромагнітних завад від нових типів електрорухомого складу при їх випробуваннях, що дав можливість проаналізувати причини виникнення завад, які генеруються обладнанням ЕРС. Метод може бути використаний при сертифікаційних випробувань ЕРС з АТП на електромагнітну сумісність з пристроями автоматики. Виявлено, що рівні гармонічних завад в полосі сигнальної частоти 25 Гц досягають 1,41 А, а в полосах роботи тональних РК (420-780 Гц) – 0,55 А, що перевищує нормативні значення на 40-50%. Встановлено зв'язок швидкості руху локомотива з частотним спектром утворюваних ним завад. За результатами досліджень сформовано технічну рекомендацію щодо усунення причин появи електромагнітних завад в рейкових колах: для керування АІН доцільно використовувати метод широтно-імпульсної модуляції з високою несучою частотою. За допомогою отриманих експериментальних даних підтверджено адекватність створених математичної та імітаційної моделей силових кіл ЕРС з АТП реальним системам за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

4. Розроблено математичну модель впливу тягової мережі з активним екрануючим проводом на РК та досліджено електромагнітний вплив контактної мережі на РК в діапазоні частот струму завади до 6000 Гц. Отримана середня відносна похибка між теоретичними та емпіричними даними на діапазоні частот до 6000 Гц складає 11,12 %, в діапазоні до 1000 Гц відносна похибка по окремих результатах не перевищує 5 %, середня відносна похибка складає 2,33 %, причому у діапазоні тональних РК 420...780 Гц вона становить 1,19 %. Виявлено, що при розташуванні суміжних колій на відстані 5,9 м контактна мережа створюватиме найбільший вплив на РК суміжної колії. Різниця наведених ЕРС в цьому складатиме 2,42 В для струму 50 Гц та 0,125 В для струму 420 Гц при тяговому струмі 300А; результати підтверджені масштабним моделюванням, середня відносна похибка складає 3,81%. В роботі підтверджено адекватність застосованого математичного апарату (1-4) отриманим експериментальним даним за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності. Розроблено математичну модель розповсюдження зворотного тягового струму та потенціалу в рейках та її комп'ютерну реалізацію. Визначено, що рівень тягового струму в рейках найбільший в межах ТП й ЕРС та збільшується з ростом інтенсивності руху і при підвищенні опору ізоляції рейок.

5. Розроблено метод селективної компенсації завад в РК, суть якого полягає в зменшенні в РК тільки тих завад, частоти яких знаходяться у смугах роботи колійних приймачів РК, що дозволяє підвищити безпеку функціонування РК та значно зменшити електроспоживання та потужність компенсуючих пристроїв. Впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в РК знижує інтенсивність їх відмов, що зумовлює підвищення функціональної безпеки РК кіл на 21%.

6. Проведено техніко-економічну оцінку результатів впровадження запропонованого методу селективної компенсації завад в рейкових колах на залізницях України. Економічний ефект складає 78649 грн/рік на один обладнаний системою кілометр та досягається за рахунок зменшення втрат потужності в проводах контактної мережі та зниження кількості відмов РК, що зменшує втрати на простій рухомого складу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аватков Е. С. Асинхронный тяговый привод для электроподвижного состава: Науч. ред. З. М. Дубровский. / Е. С. Аватков. – Москва : ВИНТИ., 1974. – С. 173. – (Итоги науки и техники. Т. 2, Электрооборудование транспорта)
2. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи / А. Е. Алексеев. – Ленинград : Энергия, 1977. – 444 с.
3. Андриенко П. Д., Горпинич П. А., Сухарев В. Н. Рекомендации к построению системы регулирования 4q-S преобразователя. Электрический журнал, 1996. - №1. -С.4-8.
4. Андриенко П. Д. Расчет гармонических составляющих во входной цепи преобразователя частоты со звеном постоянного тока с использованием 4q-S преобразователя / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина // Электротехника и электроэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 47-51.
5. Аполлонский С. М. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения / С. М. Аполлонский, Д. В. Вилесов, А. А. Воршевский // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 1-6.
6. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : Транспорт, 1992. – 360 с.
7. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1991. – 296 с.
8. Асмоловський Є. В. Дослідження функційної безпечності мікропроцесорної централізації шляхом розрахунку ймовірнісних показників функціонування / Є. В. Асмоловський // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2013. – Вип. 135. – С. 168-172.
9. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. В 3 ч. / Г. И. Атабеков. – Москва : Энергия, 1978. – Ч. 1: Линейные электрические цепи. – 592 с.
10. Бабаєв М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового

кола / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102-113.

11. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями : автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.22.09 / М. П. Бадер;

МИИТ. – Москва, 1999. – 46 с.

12. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – Москва : УМК МПС, 2002. – 638 с.

13. Басов Г. Г. О паразитных электромагнитных помехах в тяговом подвижном составе / Г. Г. Басов, Н. И. Фалалеев // Залізничний трансп. України. – 2004. – № 2. – С. 25-30.

14. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – Москва : Наука, 1987. – 632 с.

15. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. / Л. А. Бессонов // – 10-е изд. – Москва : Гардарики, 2002. – Ч.1: Линейные. – 638 с.

16. Бочев А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. – 1997. - № 11. – С. 8-12.

17. Бочев А. С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного тока / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестн. ВНИИЖТа. - 1990. - № 8. - С. 17-20.

18. Бочков К. А. Модель электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков // Тезисы докл. научно-техн. конф. «Пути повышения эффективности использования подвижного состава». – Гомель, 1983. – С. 55-56.

19. Безрученко В. Н. Концепция тягового электропривода ДСЗ / В. Н. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вестн. Нац. ун-та «ХПИ». – 2001. – № 10. – С. 28-35.

20. Безрученко В. Н. Тягові електричні машини електрорухомого складу : навчальний посібник / В. Н. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
21. Беляков Ю. С. Расчет взаимоиндукции длинных линий электропередачи / Ю. С. Беляков // Электричество. – 1997. – № 11. – С. 29-32.
22. Беляков И. В. Помехи в рельсовых линиях от переменного тягового тока / И. В. Беляков; МИИТ. – Москва, 1984. – 17 с. – Деп. В ЦНИИ ТЭИ МПС 15.06.84, № 2758 – жд 84.
23. Бетче В. Количественная оценка электромагнитных влияний в зоне электрифицированных линий / В. Бетче, Р. Крафт // Железные дороги мира. – 1992. – № 4. – С. 24-29.
24. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 13-е изд., исправ. – Москва : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
25. Брылеев А. П. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. П. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – Москва : Транспорт, 1978. – 344 с.
26. Бугров Я. С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного : [учебник для вузов] / Я. С. Бугров, С. М. Никольский. – [4-е изд.] – Ростов : Изд-во «Феникс», 1997. – 512 с.
27. Бялонь А. Значения допускаемых параметров помех тягового подвижного состава / А. Бялонь // Вестн. ВНИИЖТ. – 2001. – № 5. – С. 44-47.
28. Воеводин В. В. Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – Москва : Наука, 1984. – 320 с.
29. Вояновски Э. Испытания новых систем управления движением поездов в рамках проекта ERTMS / Э. Вояновски // Железные дороги мира. – 1998. – № 12. – С. 48–53.
30. Гаврилюк В. І. Розробка математичної моделі для дослідження

електромагнітних завад від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – № 31. – С. 221-225.

31. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник / И. Гайдышев. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 752 с

32. Гончаров Ю. П. Характеристики системы «инвертор напряжения - двигатель» при прогнозном управлении по результирующему вектору тока / Ю. П. Гончаров, Н. В. Хворост, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая електроніка і енергоефективність». Ч. 4. – Київ, 2006. – С. 45-50.

33. Гордеев Н. Ф. Электромагнитная совместимость подвижного состава с импульсным регулированием и линии железнодорожной автоматики / Н. Ф. Гордеев // Всесоюз. научно-техн. конф. «Проблемы преобразования техники». – Киев, 1991. – С. 40.

34. ГСТУ 3-14-23-94. Електровози. Методи оцінки рівня якості.

35. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов : монография / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др; под ред. А. А. Зарифьяна. – Москва : Маршрут, 2006. – 374 с.

36. Дмитриев В. С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – Москва : Транспорт, 1992. – 182 с.

37. Дмитренко И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – Москва : Транспорт, 1994. – 263 с.

38. Дмитренко И. Е. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте / И. Е. Дмитренко, А. А. Устинский, В. И. Цыганков. – Москва : Транспорт, 1982. – 312 с.

39. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Надано чинності 01.01.1996. – Київ, 1995. – 38 с.

40. ДСТУ 4151-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та

регулювання руху поїздів. Електромагнітна сумісність. Вимоги та методи випробовування. Національний стандарт України. – Надано чинності 01.01.2004. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 16 с.

41. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування. – Надано чинності 01.07.2003. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 32 с

42. Евсеев И. Г. Защита устройств связи и СЦБ / И. Г. Евсеев. – Москва : Транспорт, 1982. – 176 с.

43. Ермоленко Д. В. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с тиристорным электроподвижным составом : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Д. В. Ермоленко; ВНИИЖТ. – Москва, 1991. – 22 с.

44. 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 / Д. В. Ермоленко; ВНИИЖТ. – Москва, 1999. – 44 с.

45. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.

46. Жук А. К. Влияние на питающую сеть преобразователей частоты со звеном постоянного тока / А. К. Жук // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка і енергоефективність». – Київ, 2006. – С.42-46.

47. Жуковичский И. В. К оценке предельных уровней помех в рельсовых цепях / И. В. Жуковичский, С. А. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному трансп. – 2005. – № 5. – С. 112-113.

48. Завгородний, А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2010. – № 2. – С. 49-53.

49. Исследование электромагнитной совместимости обратной тяговой сети с устройствами сигнализации, централизации и блокировки / А. М. Безнарытний,

В. И. Гаврилюк, И. О. Романцев, В. И. Щека // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2014. – № 3(51). – С. 7–14.

50. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей : Справочная книга / П. Л. Калантаров. - 3-е изд., перераб. и доп. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.

51. Каллер М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – Москва : Транспорт, 1987. – 335 с.

52. Каменев А. И. Безопасность движения поездов и надежность технических средств / А. И. Каменев, Н. Н. Балуюев, В. М. Адаскин // Автоматика, связь, информатика. – 2003. – № 6. – С. 5-8.

53. Каменєв О. Ю. Розрахунок показників безпечності мікропроцесорної централізації стрілок та сигналів з мінімальною деталізацією структури / О. Ю. Каменєв // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ.– 2011. – Т. 122. – С. 165-175.

54. Карпов И. В. Экономика, организация и планирования хозяйства сигнализации и связи : учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / И. В. Карпов, С. Г. Климович, Л. И. Хляпов. – Москва : Маршрут, 2002. – 436 с.

55. Кононова Е. И. Расчет электромагнитного влияния тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации / Е. И. Кононова, А. Б. Косарев // Вестн. ВНИИЖТ. – 1990. – № 2. – С. 17-19.

56. Коровкин Н. В. Анализ волновых процессов в системах с распределенными параметрами методом синтетических схем / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина // Электричество. – 1999. – № 1. – С.49-58.

57. Косарев А. Б. Гальваническое влияние тяговых сетей с неоднородными электрическими параметрами рельсовых цепей / А. Б. Косарев, А. А. Наумов // Вестн. ВНИИЖТ. – 2001. – № 4. – С. 38-39.

58. Котельников А. В. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации / А. В. Котельников, А. Б. Косарев // Электричество. – 1992. – № 9. – С. 26-34.

59. Кустов В. Ф. Основы теории надёжности та функциональной безопасности систем залізничної автоматики : навч. посіб. для вузів / В. Ф. Кустов. – Харків : УкрДАЗТ, 2008. – 218 с.

60. Кучумов В. А. Электромагнитные процессы в тяговой сети с распределенной емкостью при коммутации тока в преобразователе электроподвижного состава / В. А. Кучумов, Н. Н. Широченко // Вестн. ВНИИЖТ. – 1984. – № 1. – С. 19-23.

61. Киселев И. П. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Ч. 1 / И. П. Киселев // Железные дороги мира. – 2005. – № 12. – С. 20-36.

62. Кулик П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – Киев : Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.

63. Линдер Ш. Силовые полупроводниковые приборы. Обзор и сравнительная оценка / Ш. Линдер // Электротехника. – 2007. – № 7. – С. 4-11.

64. Литовченко В. В. 4q-S - четырехквadrантный преобразователь электровозов переменного тока (принцип работы, анализ и экспериментальные исследования) / В. В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64-73.

65. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S преобразователями / В. В. Литовченко // Электротехника. – 1993. – № 5. – С. 23-31.

66. Лещев А. И. Электровоз двойного питания ЭП10: особенности конструкции и электрических схем / А. И. Лещев, С. С. Матейкин, С. А. Усвицкий // Локомотив. – 1999. - № 11. – С. 28-32.

67. Луговой П. А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин, Р. А. Аукционек. – Москва : Транспорт, 1973. – 232 с.

68. Макаренко М. П. Методика аналізу електромагнітних процесів у вхідних контурах напівпровідникових перетворювачів енергії / М. П. Макаренко

// Праці Ін-ту електродинаміки НАН України : зб. наук. пр. – 2004. – № 3(9). – С.112-119.

69. Макаренко М. П. Моделювання електромагнітних процесів у системі «мережа живлення - напівпровідниковий перетворювач енергії» / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2004. – Вип. 3(26). – С147-149.

70. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.

71. Михайлов М. И. Защита сооружений связи от опасных и мешающих влияний / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – Москва : Связь, 1978. – 288 с.

72. Михальченко Г. С. Моделирование переходных режимов в асинхронном тяговом приводе локомотивов / Г. С. Михальченко, Г. А. Федяева, А. И. Власов. // Вестн. ВНИИЖТ. – 2003. – № 4. – С. 42–47.

73. Муха А. Н. Помехоустойчивость релейной аппаратуры электроподвижного состава, построенной с применением современной электронной базы / А. Н. Муха // Транспорт. Сб. научн. тр. Днепропетр. гос. техн. ун-та ж.-д. трансп. – Днепропетровск : Наука и образование, 2001. – № 7. – С. 79-85.

74. НБ ЖТ ЦТ 04-98. Нормы безопасности железнодорожного транспорта. Электропоезда. Требования по сертификации. – Москва : МПС, 1998. – 54 с.

75. НБ ЖТ ЦЛ-ЦТ 139-2003. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте. Преобразователи статические тяговые и нетяговые подвижного состава. – Москва : МПС, 2003. – 15 с.

76. Немыкина О. В. Влияние пульсаций напряжения на фильтре на входные энергетические характеристики 4q-S преобразователя / О. В. Немыкина, К. И. Фалалеев // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 46-53.

77. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

78. Оценка экономической эффективности инвестиций в мероприятиях

научно-технического прогресса : учебно-методическое пособие // [Е.И. Балака, И.Г. Бойко и др.; под ред. В. Л. Диканя]. – Харьков : Основа, 1995. – 254 с.

79. Павлов И. В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока / И. В. Павлов. – Москва, 1965. – 204 с.

80. Павлов И. В. Особенности расчета помех в цепях связи, индуктированных тяговой сетью постоянного тока / И. В. Павлов, А. В. Пительмахов; ВНИИЖТ. – Москва, 1988. – 9 с. – Деп. В ЦНИИ ТЭИ МПС 20.04.1988, № 4359 – жд 88.

81. Памятка Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) Р-809. «Электромагнитная совместимость микроэлектронных устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ)». – 1-е изд. – Добриниште, Болгария, 2001. – 29 с.

82. Пат. 56336 Україна, МПК (2009) B61L 25/06. Спосіб зменшення електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму на рейкові кола суміжної колії / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека, О. В. Завгородній, А. І. Миргородська; заявник і патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2010 07796; заявл. 21.06.10; опубл. 10.01.11, Бюл. № 1.

83. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г. С. Векслер, В. С. Недочетов, В. В. Пилинский и др. – Киев : Техника, 1990. – С. 26-36.

84. Покровский С. Н. Тяговые преобразователи высокой мощности на IGBT-транзисторах: тяговые преобразователи / С. Н. Покровский. // Железные дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 38–46.

85. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний трансп. України. – 2000. – № 2. – С. 10-12.

86. Просецкий А. П. К вопросу об электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения постоянного тока и смежных слаботочных устройств / А. П. Просецкий // Вопросы электроснабжения электрических

железных дорог. Межвузовский сб. научн. тр. – Москва : МИИТ, 1984. – № 756. – С. 21-25.

87. Путевая блокировка и авторегулировка / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев и др.; под ред. Н. Ф. Котляренко. – Москва : Транспорт, 1983. – 408 с.

88. Разгонов А. П. Дослідження роботи рейкових кіл та системи автоблокування на перевальних ділянках з крутим профілем / А. П. Разгонов, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 37. – С.186-190.

89. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Н. Ф. Котляренко, А. И. Баженов, Т. Л. Лебедева / под ред. В. С. Аркатова. – Москва : Транспорт, 1982. – 360 с.

90. Романцев И. О. Анализ методов расчета тональной рельсовой цепи перегона / И. О. Романцев, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 187-192.

91. Ротанов Н. А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов. – Москва : Транспорт, 1991. – 336 с.

92. Семенюта М. Ф. Защита электрических цепей систем автоматики, телемеханики и связи от электромагнитных помех / М. Ф. Семенюта // Автоматика, телемеханика и связь. – 1995. – № 8. – С. 30-33.

93. Сердюк Т. Н. Экспериментальное исследование помех в рельсовых цепях / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С. 15-18.

94. Сердюк Т. Н., Гаврилюк В. И. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с рельсовыми цепями / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Залізничний трансп. України. – 2005. – Спец. вип. 3/2. – С. 176-180.

95. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / [под ред. Сапожникова Вл. В.]. – Москва : Транспорт, 1997. – 288 с.

96. Синолицый А. Ф. Тяговый электропривод переменного тока с

асинхронными двигателями и IGBT-преобразователями для рудничных электровозов / А. Ф. Синолицый, О. В. Пасько // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2005. – Темат. вып. 45. – С. 309-312.

97. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах / А. Б. Бойник [и др.]. – Харьков : УкрГАЗТ, 2005. – 256 с.

98. Соколов Н. И. Некоторые особенности режимов дальних линий электропередачи / Н. И. Соколов, Р. Н. Соколова // Электричество. – 1997. – № 11. – С. 16-20.

99. Сорин Л. Н. Перспективные электровозы для железных дорог России / Л. Н. Сорин // Железные дороги мира. – 2003. – № 8. – С. 18-24.

100. . Сопельняк А. Г. Измерение параметров гармоник / А. Г. Сопельняк, А. Н. Калугин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1981. – № 6. – С. 31-32.

101. Сотников И. Б. Техничко-экономические расчеты в эксплуатации железнодорожного транспорта (в примерах и задачах) / И. Б. Сотников, А. А. Выгнанов, Ф. С. Гоманков. – Москва : Транспорт, 1983. – 254 с.

102. Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с.

103. Справочник по преобразовательной технике / под ред. И. М. Чиженко. – Киев : Техника, 1978. – 447 с.

104. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу // Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост; за ред. Ю. П. Гончарова. – Харків : ХПИ, 2007. – 190 с.

105. Сумин А. Р. Исследование распространения обратного тягового тока в земле и его электромагнитного влияния / А. Р. Сумин // Вестн. ВНИИЖТ. – 1984. – № 7. – С. 26-28.

106. Схема замещения вентильных преобразователей для расчета гармоник тока и напряжения Ч.1 / А. И. Федотов, Е. А. Федотов, Н. В. Чернова // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 38-44.

107. Фалалеев Н. И. Особенности электромагнитных процессов в 4q-S преобразователе при питании от однофазного источника / Н. И. Фалалеев //

Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – № 2. – С. 19-22.

108. Філіппенко І. Г. Критерії оцінки рівня безпеки руху на залізничному транспорті / І. Г. Філіппенко, С. Є. Бантюков // Інформ.– керуючі системи на залізн. трансп. – 1999. – № 3. – С. 6-7.

109. Фезер К. Электромагнитная совместимость / К. Фезер // Железные дороги мира. – 1992. – № 6. – С. 29-31.

110. Федоров Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями : [учебное пособие] / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2004. – 132 с.

111. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер; пер. с нем. И. П. Кужекин; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.

112. Чаплыгин Е. Е. Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / Е. Е. Чаплыгин. // Электричество. – 2009. – №8. – С. 56–59.

113. Чепцов М. Н. Функциональный анализ и синтез критериев опасных отказов рельсовых цепей различных типов / М. Н. Чепцов, С. А. Радковский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 189-193.

114. Шидловский А. К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / А. К. Шидловский, А. В. Козлов, Н. С. Комаров. – Київ : Наук. думка, 1993. – 271 с.

115. Штолл К. Влияние тягового подвижного состава с тиристорным регулированием на устройства СЦБ и связи : пер. с чеш. / К. Штолл, И. Беечка, Б. Надворник. – Москва : Транспорт, 1989. – 199 с.

116. Щека В. І. Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі суміжної колії / В. І. Щека, О. В. Завгородній // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 36. – С. 156-160.

117. Щека В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад

з боку контактної мережі / В. І. Щека // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 84-90.

118. Щека В. І. Дослідження магнітного впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті – 2011. – № 2. – С. 39-44.

119. Щека В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 24-28.

120. Щека В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 57 – С. 27-35.

121. Щека В. І. Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Залізничний трансп. України. – 2015. – № 4. – С.16-19.

122. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягового струму на рейкові кола / В. І. Щека // Тези доп. 69-ї міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2009. – С. 123-124.

123. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу нових типів рухомого складу на пристрої автоматики / В.І. Щека // Тези доп. 69-ї міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2009. – С. 124-125.

124. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягових перетворювачів електрорухомого складу на пристрої СЦБ / В. І. Щека // Матеріали II міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2009. – С. 57–58.

125. Щека В. І. Дослідження електромагнітного впливу тягового струму на роботу рейкових кіл / В. І. Щека // Матеріали II міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». –

Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2009. – С. 55–56.

126. Щека В. І. Дослідження магнітного впливу електрорухомого складу на тональні рейкові кола / В. І. Щека // Тези III міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2010. – С. 52-53.

127. Щека В. И. Исследование электромагнитного влияния контактной сети на рельсовые цепи / В. И. Щека // 3б. тезисів Міжнародної науково-практ. конф. «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2014. – С. 115-116.

128. Щербак Я. В. Замкнутые системы компенсации неканонических гармоник полупроводниковых преобразователей / Я. В. Щербак. – Харьков : Транспорт Украины, 1999. – 255 с.

129. Bakran M. M. Einsatz von IGBT in Nah- und Fernverkehrstriebfahrzeugen / M. M. Bakran, H. G. Eckel // Elektrische Bahnen. – 2001. – № 10. – S. 408-414.

130. Chekhet E. M. The analysis of the space vector modulation control based converter for 4-quadrant operating electrical drives / E. M. Chekhet, V. N. Sobolev // 7th Intern. Power Electronics & Motion Conf, Budapest. – 1996. – № 2. – P. 438-442.

131. Carson J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return / J. R. Carson // Bell Systems Technical J. – 1926. – № 5. – P. 539-554.

132. Ch Thoma. Europalokomotive BR 189 / Ch. Thoma // ZEVrail Glasers Annalen. – 2002. – № 126. – P. 35-43.

133. Holmstrom F. R. Rail transit EMI-EMC Electromagnetic Compatibility / F. R. Holmstrom, D. Turner, E. Fernald // Magazine IEEE. – 2012. - Vol. 1. – Iss. 1. - P. 79-82.

134. Kalaschnikow S. Regelung des netzseitigen Pulsstromrichters eines 4-Quadranten Spannungszwischenkreis / S. Kalaschnikow // Umrichters, ELIN-Zeitschrift. – 1994. – № 46. – P. 102-111.

135. Kraus T. Railvolution / T. Kraus, J. Pernička. – 2008. – №3. – S. 25, 27–30.

136. Maddocks T. Managing EMC problems on railways / T. Maddocks // Intern. Railway J. and Rapig Transit Revolution. – 1998. – № 8. –

P. 27-28.

137. Meyer M. Active Storstrom Filter für die Unterseite von Umrichterlocomotiven / M. Meyer // – 1993. – № 3. – С. 80-85.

138. Midya S. Conducted and Radiated Electromagnetic Interference in Modern Electrified Railways with Emphasis on Pantograph Arcing : Doctoral Thesis: Electrical Syst. / Midya S. – Stockholm, 2009. – 163 p.

139. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling stock / Pranay Soni, Prerna Soni, L. P. Singh, S. S. Deswal // Intern. J. of Electrical, Electronics and Computer Engineering. – 2013. – Vol. 2. – № 1. – P. 22-27.

140. Mohan N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. –3rd Edition. – USA, 2003. – 802 p.

141. Niska S. Measurements and Analysis of Electromagnetic Interferences in the Swedish Railway Systems : Doctoral Thesis / Niska S. – Lulea, 2008. – 128 p.

142. Ogunsola A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 528 p.

143. Serdyuk T., Gavriluk V. Distribution of harmonics of return traction current on feeder zone and evaluation of its influence on the work of rail circuits // 18th Intern. Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC 2006. – Wroclaw (Poland), 2006. – P.467-470.

144. Serdyuk T. N. Influence of railway traction system on nearby small-current devices // 15th Intern. Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility EMC Zurich'03. – Zurich (Switzerland), 2003. – P. 397-400.

145. Shevtsov S. V. Space-vector simplex pulse-width modulation methods of 3-phase voltage source inverter control / S.V. Shevtsov, D. B. Izosimov, S. E. Ryvkin // Proc. of 20th Intern. Confpf IndustElectron.Control and Instrumentation. Bologna, Itali, 1994. – Vol.1. – P. 520-526.

146. Space-frequency analysis and experimental measurement of magnetic field emissions radiated by high-speed railway systems / D. Bellan, G. Spadacini, E. Fedeli, S. A. Pignari // Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on. – 2013. –

147. Study on Distribution Coefficient of Traction Return Current in HighSpeed Railway / Wen Huang, Zhengyou He, Haitao Hu, Qi Wang // Energy and Power Engineerings. – 2013. – № 5. – P. 1253–1258.

148. Tuttas Ch. AC-Bahnen mit aktivem Rückleiter / Ch. Tuttas. // Elektrische Bahnen. – 2001. – №7. – S. 262 – 267.

149. Rhee E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intrasubsystem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. Of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126/

150. Runge W. Eisenbahntechnische Rundschau / W. Runge // ETR. – 2005. – №8. – S. 443–453.

151. Vitins J. Erweiterung der TRAXX-Plattform mit Lokomotiven Re 484 der SBB Cargo / J. Vitins, M. Spillmann // Elektrische Bahnen. – 2005. – № 3. – S. 107-115.

152. Zhao Lin-Hai. Induction coupling between jointless track circuits and track-circuit-reader antenna / Lin-Hai Zhao, WeiShi Shi // Progress in Electromagnetics Research. – 2013. – Vol. 138. – P. 173-196.

153. Zhao M. The Analysis and Amendment of Security System in 3G / M. Zhao, L. Shi. // Intelligent Information Management. – 2009. – №5. – C. 1–5.

ДОДАТКИ

Додаток А

Розрахунок ємностей схеми заміщення IGBT

При складанні еквівалентної схеми IGBT приймається у вигляді потужного MOSFET транзистора, послідовно ввімкненого з біполярним транзистором PNP за схемою Дарлінгтона (див. рис. 1).

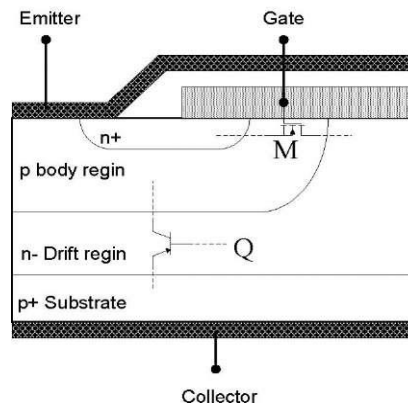


Рисунок 1 - Перетин IGBT с каналом N-типу

Паразитарний конденсатор і паразитна індуктивність, що існують між різними шарами, впливають на продуктивність моделі IGBT. Основними паразитарними ємностями є C_{gc} , C_{ge} , C_{ce} . C_{gc} - ємності затвору по відношенню до колектору, які визначаються виразами:

$$C_{gc} = C_{gd} + C_{cd}$$

$$C_{gd} = C_{ox}, V_{gd} < V_{th}$$

$$C_{gd} = \frac{C_{ox}}{(1 + \frac{C_{ox}}{C_{dep}})}, V_{gd} > V_{th}$$

де C_{gd} - ємність затвор – сток, що складається з ємності оксиду C_{ox} та ємності об'єданого шару C_{dep} . Така ємність представлена моделлю діоду.

Ємність колектор – сток C_{cd} може також бути представлена моделлю діоду.

Ємність колектор – емітер C_{ce} визначається:

$$C_{ce} = C_{jo} (1 - \frac{V_{ce}}{V_j})^{-m},$$

де C_{jo} - ємність PN переходу, V_j – потенціал PN переходу, m – коефіцієнт.

Паразитна індуктивність зв'язана внутрішніми з'єднаннями та має типічне значення від 10 до 100 нГн. У процесі моделювання в даному розділі внутрішня індуктивність прийнята 50 нГн.

Виходячи з проведеного аналізу структури IGBT транзистору, запропонована для аналізу запропонована еквівалентна схема. Усі необхідні параметри для розрахунків взяті з довідкової технічної специфікації IGBT транзисторів.

При відключенні транзистора струм через зворотний діод не протікає і струм у колекторному колі буде описаний формулою:

$$L \frac{di_L(t)}{dt} + i_L(t)R = V_d$$

Рішення цього рівняння для початкового моменту часу $i_L(0) = I_0$ має вигляд: $i_L(t) = \frac{V_d}{R} - e^{-\frac{R}{L}t + \ln(\frac{V_d}{R}I_0)}$.

При вимкненні IGBT протягом деякого часу T_{stom} діод у колекторному колі пропускає струм та напругу колектор – емітер і описується виразом:

$$U_{ce}(t) = V_d + i_L'(t)R + L \frac{di_L'(t)}{dt}$$

Струм у контурі описується рівнянням:

$$i_L'(t)R + L \frac{di_L'(t)}{dt} = 0$$

Відповідно, рішення цього рівняння при нульових початкових умовах $i'(0) = i_L(t_{on})$ записується у виді: $i_L'(t) = i_L(t_{on}) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$.

Додаток Б

Розрахунок часових параметрів керуючих імпульсів.

Період керуючих імпульсів рівний 360^0 незалежно від швидкості руху локомотива (частоти імпульсів на вході інвертора). Тоді для визначення часових параметрів імпульсів керування транзисторами приймемо, що для збільшення швидкості на 1 км/год необхідно збільшити частоту вихідних імпульсів на 1 Гц. Період імпульсів $T=360^0$, отже частота імпульсів визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{360^0} \text{ . Швидкість руху } v \approx f, \text{ тоді } v = \frac{1}{360^0} \text{ . Отримаємо вираз для отримання}$$

$$\text{одного електричного градусу в секундах: } 1^0 = \frac{1}{360^0 \cdot v} \text{ .}$$

Знаючи вираз одного електричного градусу в секундах і маючи схему інвертора з діаграмою керування транзисторами визначимо параметри імпульсів керування для швидкості 25 км/год на прикладі 120^0 режиму керування.

$$\begin{aligned} &V1: t_d=0^0; pw=120^0; T=360^0; V2: t_d=60^0; pw=120^0; T=360^0; V3: t_d=120^0; \\ &pw=120^0; T=360^0; V4: t_d=180^0; pw=120^0; T=360^0; V5: t_d=240^0; pw=120^0; T=360^0; \\ &V6: t_d=300^0; pw=120^0; T=360^0, \end{aligned}$$

де t_d – це час затримки імпульсу, pw – тривалість відкритого стану ключа, T – період імпульсів.

Величини фронту і зрізу приймаємо наближеними до нескінченності ($\approx 0,00000001$ с). Тепер визначимо часові параметри:

$$V1: t_d = 0 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V2: t_d = 60 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0067(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c) T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V3: t_d = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c) T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

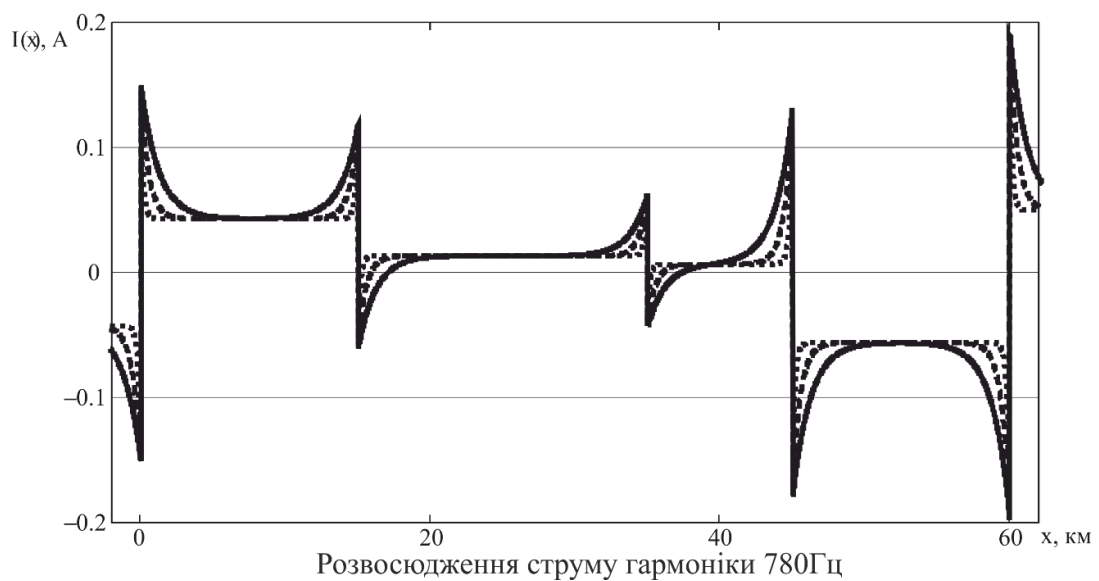
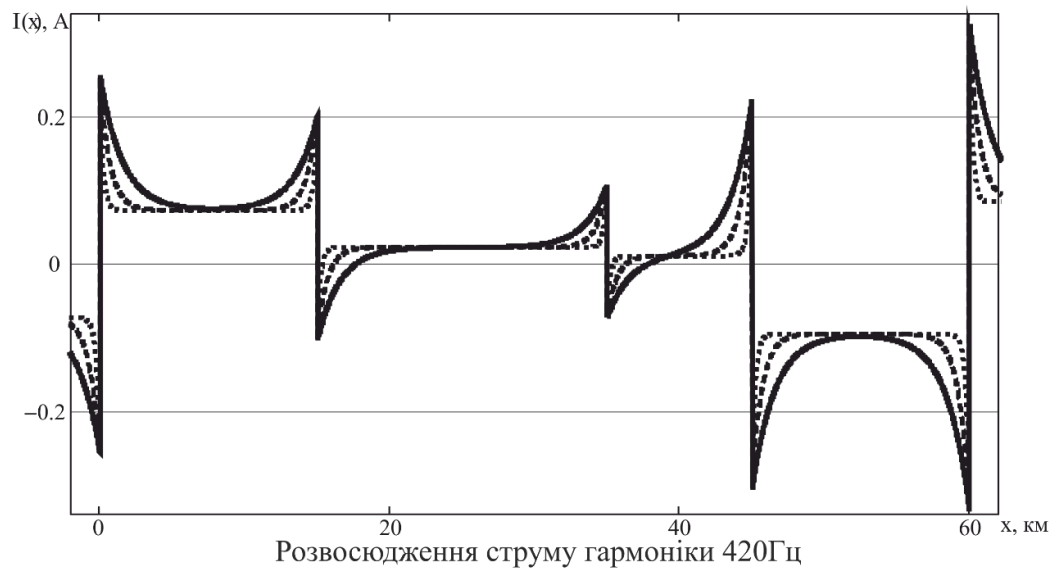
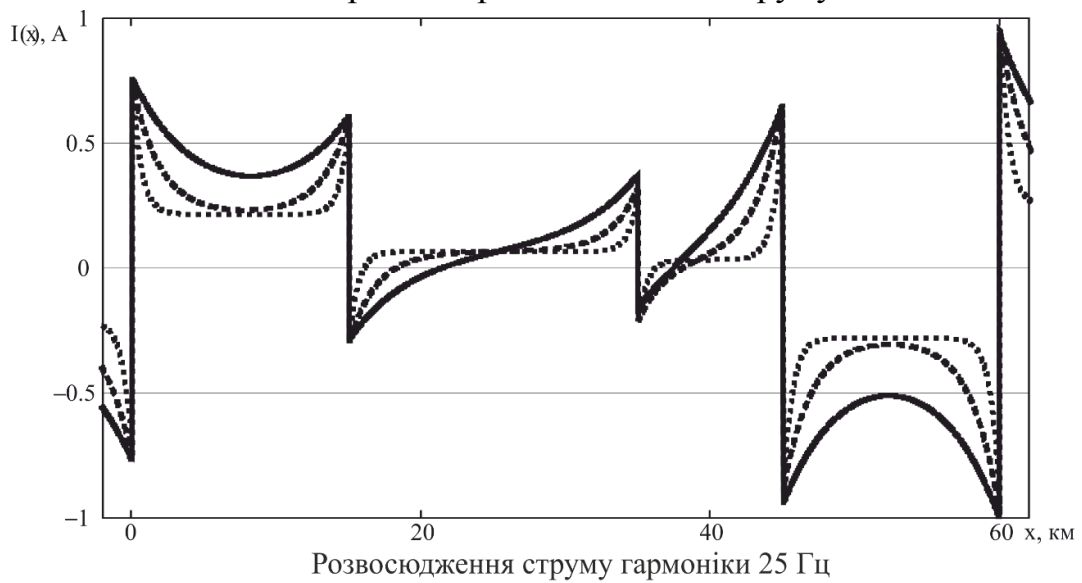
$$V4: t_d = 180 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,02(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c) T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V5: t_d = 240 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0267(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c) T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

$$V5: t_d = 300 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0333(c); pw = 120 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,0133(c) T = 360 \cdot \frac{1}{360^0 \cdot 25} = 0,04(c).$$

Додаток В

Діаграму розповсюдження гармонік зворотного тягового струму вздовж фідерної зони при електротязі змінного струму



Додаток Г

Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електровозу

Частота сигнального струму, Гц	Допустимі параметри струму електровоза					
	Смуга частот, Гц	При безперервній дії (більше 0,3 с.)		При імпульсній дії		
		Допустимий рівень перешко д, $A_{\text{ефф}}$	Характер впливу	Допустимий рівень перешкод , $A_{\text{ефф}}$	Тривалість імпульсу, с	Період проходження, с
25	19-31			11,6	менше 0,3	0,3...0,9
	19-31			26,6	менше 0,3	більше 0,9
	21-29	1,0	небезпечне			
	19-21	11,6	що заважає			
	29-31	11,6	що заважає			
50	40-60			5,0	менше 0,1	1,0...6,0
	40-60			9,6	менше 0,1	більше 6,0
	46-54	1,3	небезпечне			
	40-46	5,0	що заважає			
	54-60	5,0	що заважає			
175	167-184	0,4	що заважає	0,4	менше 0,25	менше 0,25
	145-167	40,0		3,3	менше 0,25	більше 0,25
	184-205	40,0				
420	408-432	0,3	що заважає	0,3 1,2	менше 0,2 менше 0,2	0,25...1,5 більше 1,5
480	468-492					
580	568-592					
720	708-732					
780	768-792					
4545	4508-4583	0,18	що заважає	0,18 0,8	менше 0,2 менше 0,2	0,25...1,5 більше 1,5
5000	4963-5038					
5555	5518-5593					

Додаток Д
Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна, професор

 О. М. Пшінько
« 9 » _____ 2015 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи старшого викладача
кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Щеки Вадима Ігоровича на
тему «Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації
рухомого складу з асинхронним тяговим приводом» у навчальному процесі
Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна

Наукові положення дисертаційної роботи і розроблений метод селективної компенсації завад в тональних рейкових колах використовується у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці спеціалістів та магістрів зі спеціальності 7(8).05020203 «Автоматика та автоматизація на транспорті». Отримані результати використовуються під час проведення занять з дисциплін «Функціональна безпека систем залізничної автоматики», «Електромагнітна сумісність систем залізничної автоматики», «Системи автоматики на перегоні», а також при виконанні дипломних магістерських робіт та дипломних проектів спеціалістів.

Використання результатів досліджень та розробленого методу селективної компенсації завад в тональних рейкових колах дозволяє студентам отримати навички щодо підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом організації активних засобів їх захисту від електромагнітного впливу з боку контактної мережі та електрорухомого складу з асинхронними тяговим приводом.

Декан факультету
«Технічна кібернетика»,
д.т.н., професор



В. В. Скалозуб

Завідувач кафедри
«Автоматика, телемеханіка та зв'язок»
д.ф.-м.н., професор



В. І. Гаврилюк

АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Щеки Вадима Ігоровича на тему «Підвищення функціональної безпеки
рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим
приводом»

Розроблені в дисертаційній роботі Щеки В. І. наукові положення та запропонований метод селективної компенсації завад в рейкових колах прийнятий для розгляду на предмет впровадження в Шевченківській дистанції сигналізації та зв'язку. Використання приведених у дисертації результатів дозволить вирішити актуальну проблему підвищення функціональної безпеки рейкових кіл шляхом організації активних засобів їх захисту від електромагнітного впливу з боку електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом на ділянках дистанції сигналізації та зв'язку зі швидкісним рухом.

Начальник
Шевченківської дистанції
сигналізації та зв'язку



Яхненко С.Ю

«4» 06 2015р.