

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

БОНДАРЕНКО ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.313.024.33:537.876.41

**ПОЛІПШЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ АСИНХРОННИХ
ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З СУМІЖНИМИ
СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Муха Андрій Миколайович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри «Електротехніка та електромеханіка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
Запорізький національний технічний університет, Міністерство освіти і науки України, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів

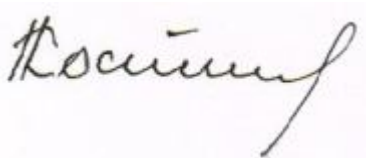
кандидат технічних наук
Кузнецов Віталій Вадимович,
Національна металургійна академія України, Міністерство освіти і науки України, доцент кафедри електротехніки та електроприводу

Захист відбудеться «__» _____ 2015 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий «__» _____ 2015 р.

В. о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.01,
д.т.н., професор



М.О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електромагнітна сумісність (ЕМС) на залізничному транспорті, а в особливості на ділянках електрифікованих залізниць, є досить важливою складовою їх нормального функціонування. Свого часу цьому питанню приділяли значну увагу такі вчені як Бадер М.П., Бочарников Ю.В., Бялонь А., Вісін М.Г., Гаврилюк В.І., Єрмоленко Д.В., Киржнер Д.Л., Лещов О.І., Макашева С.І., Наумов О.А., Сиченко В.Г., Сорин Л.Н., Финонченко Т.Е., Ходкевич А.Г., Щербак Я.В., Lewandowski M. та ін., проте і на сьогоднішній день це питання залишається відкритим та актуальним.

Станом на 01.01.2011р. серед загальної експлуатаційної довжини електрифікованих залізниць України (9877 км) близько половини (4764 км) залишається електрифіковано постійним струмом і заміна цих ділянок ділянками змінного струму потребує значних капіталовкладень. З урахуванням цього, на сьогоднішній день, одним з перспективних напрямків розвитку залізниць постійного струму є впровадження в експлуатацію електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом, основним елементом якого є тяговий статичний перетворювач частоти.

Застосування в основі функціонування асинхронного тягового електроприводу принципу широтно-імпульсної модуляції, з відповідними частотами формування вихідної напруги перетворювача, може бути причиною підвищеного електромагнітного впливу на суміжні системи. Так, експлуатаційні випробування електровозу ВЛ80а-751 дозволили встановити, що за різних параметрів руху амплітуди вищих гармонійних складових тягового струму, наприкладі діапазону 100-300 Гц, можуть становити від 2 % до 28 % діючого значення вхідного струму (відповідно від 17 А до 159 А), що з точки зору електромагнітної взаємодії таких тягових одиниць з системами сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) є неприпустимим.

Наведений приклад розподілу амплітуд струмів перешкод, а також недостатній досвід експлуатації електрорухомого складу (ЕРС) розглянутого типу на залізницях України дозволяє зазначити, що поява у структурі мережі тягового електропостачання постійного струму принципово нової, для неї, тягової одиниці може призвести до збільшення кількості відмов апаратури кіл СЦБ та, як наслідок, стати причиною порушення нормального функціонування залізниць.

Питанням взаємодії ЕРС постійного струму з асинхронним тяговим приводом (АТЕП) з суміжними системами залізниць вже приділялась увага. Так автором проаналізовано роботи, в яких розглянуті питання впровадження активних фільтрів, гібридних фільтрів тощо. Останні, в своїй більшості, були присвячені поліпшенню показників ЕМС засобами систем тягового енергопостачання, зокрема режимами роботи обладнання тягових підстанцій. Питання режимів роботи системи керування статичного перетворювача у цих роботах розглянуті майже не були. Тому задача поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами, за рахунок вибору раціональних діапазонів частот модуляції тягового перетворювача, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційну роботу виконано у відповідності з наступними державними програмами та науково-дослідними роботами:

1. Державна цільова економічна програма енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243);
2. Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012 – 2016 роки (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.2011 р. № 840);
3. «Дослідження впливу перетворювачів підвищеної частоти тягового приводу багатосистемних електровозів на лінії СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць» (№ ДР 0110U003608), у якій автор був одним з виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами електрифікованих залізниць.

Для досягнення поставленої мети необхідним є виконання наступного переліку завдань:

- проаналізувати сучасний стан проблеми забезпечення ЕМС суміжних систем електрифікованих залізниць;
- встановити критерії визначення ЕМС з урахуванням специфіки подальших досліджень;
- розробити експериментальну установку, що відтворює основні параметри роботи електровозів постійного струму та дозволяє досліджувати, з урахуванням масштабності, обрані контрольовані процеси, що супроводжують функціонування АТЕП;
- виконати експериментальні дослідження та надати рекомендації щодо поліпшення ЕМС АТЕП ЕРС постійного струму з системами СЦБ електрифікованих залізниць за умов його роботи у номінальному режимі;
- розробити імітаційну модель, що відтворює функціонування АТЕП у структурі мережі тягового електропостачання постійного струму та дозволяє провести дослідження неномінальних режимів його роботи.
- провести дослідження неномінальних режимів роботи АТЕП та надати рекомендації щодо поліпшення його ЕМС з системами СЦБ електрифікованих залізниць постійного струму та мережею зовнішнього електропостачання;
- оцінити ефективність розроблених рекомендацій.

Об'єкт досліджень – процеси електромагнітної взаємодії суміжних систем електрифікованих залізниць постійного струму.

Предмет досліджень – асинхронні приводи електровозів постійного струму.

Методи досліджень. Для встановлення ключових показників ЕМС, що відповідають умовам дослідження здійснено аналітичний огляд системи діючих вітчизняних та європейських стандартів галузей електропостачання та електро-транспорту, та попередніх наукових робіт в даному напрямку.

Створення фізичної моделі ЕРС з АТЕП та подальше експериментальне дослідження виконували з використанням принципів неповного фізичного моделювання, основ теорії подібності, теорії електричної тяги, елементів теорії механіки електроприводу, а також основних принципів виконання інженерного експерименту.

Аналіз отриманих результатів дослідження ЕМС з суміжними системами електрифікованих залізниць здійснювали з використанням методів гармонійного аналізу шляхом застосування перетворення Фур'є, а також елементів теорії ймовірностей та математичної статистики. Обробку експериментальних даних здійснено з використанням ЕОМ.

Виконання досліджень взаємодії ЕРС з АТЕП з суміжними системами у неномінальних режимах його роботи та обробка результатів здійснювали відповідно до принципів імітаційного моделювання з використанням програмного середовища MATLAB Simulink.

Достовірність основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що містяться у дисертаційній роботі підтверджується:

- вибором фізичного експерименту, як більш точного способу виконання досліджень;
- коректною постановкою та кваліфікованим виконанням експериментальних досліджень;
- застосуванням обладнання з високою швидкістю та точністю обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, які виносяться на захист відносяться.

1. Вперше встановлено закономірності впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на показники його ЕМС з системами СЦБ при номінальному режимі роботи, що дозволило оцінити ступінь електромагнітного впливу асинхронного приводу та розробити відповідні рекомендації щодо його зниження.
2. Вперше, за допомогою удосконаленої імітаційної моделі АТЕП, встановлено вплив частоти модуляції на показники ЕМС з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання при неномінальних режимах роботи тягового приводу. Це дає змогу розробити відповідні рекомендації щодо зниження негативного електромагнітного впливу АТЕП на зазначені системи за умови виникнення розглянутих у роботі неномінальних режимів. При цьому удосконалена модель, на відміну від існуючих, враховує особливості системи тягового електропостачання залізниць постійного струму, а також динамічні показники його функціонування в умовах руху ЕРС по перегону.
3. Вперше встановлено вплив на показники ЕМС явищ комутаційної асиметрії силових ключів тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, що дозволяє врахувати їх вплив при розробці рекомендацій щодо зниження негативного електромагнітного впливу.

4. Отримав подальший розвиток метод визначення масштабних коефіцієнтів приведення окремих параметрів об'єктів електротягових систем, який, на відміну від існуючого, враховує значні розбіжності їх нелінійних характеристик, в тому числі струмових характеристик тягових електродвигунів ЕРС з АТЕП, що дозволяє досліджувати динамічні показники роботи систем електричної тяги на масштабних моделях.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Удосконалено методику визначення масштабних відношень подібних систем, що розширює можливості експериментальних досліджень ЕМС систем тягового енергоперетворення без порушення їх нормального функціонування.
2. Запропоновано і застосовано методику теоретичного визначення струмових характеристик тягових електродвигунів ЕРС з АТЕП, яка дозволяє здійснювати їх побудову у першому наближенні, що спрощує первинну оцінку ефективності функціонування ЕРС, з точки зору ЕМС з суміжними системами.
3. Розроблено імітаційну модель для дослідження ЕМС у номінальних та не-номінальних режимах роботи ЕРС з АТЕП при живленні від мереж тягового електропостачання постійного струму з урахуванням динаміки зміни параметрів руху.
4. Надані рекомендації щодо вибору раціональних діапазонів частот модуляції перетворювача з точки зору покращення показників електромагнітної сумісності останнього із суміжними системами електрифікованих залізниць постійного струму, що дозволяє розширити можливості подальшого впровадження ЕРС з АТЕП.

Результати досліджень впроваджено у ДП «НВК «Електровозобудування» (м. Дніпропетровськ) та у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна при вивченні дисциплін: «Моделювання електромеханічних систем», «Електронна та перетворювальна техніка», «Електричні машини», «Мікропроцесорні пристрої», «Системи керування електроприводом» студентами 3-го та 4-го курсів спеціальності 7.05070204 – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод.

Особистий внесок здобувача. Формулювання мети, задач досліджень, а також обговорення поточних результатів останніх здійснювалось автором спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно.

Всі публікації написано автором без співавторства.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на конференціях: V-ій «Транселектро 2011», м. Дніпропетровськ, 2011 р.; V-ій «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; 72-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; III-ій «Енергозбереження на залізничному транспорті», смт. Воловець, Закарпатської

обл. 2012 р.; VI-й «Транселектро 2012», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; 73-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2013 р.; V-й «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енергоресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», м. Алушта, 2013 р.; 74-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2014 р.; V-й «Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості», смт. Воловець, Закарпатської обл. 2014 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 14 наукових працях, у тому числі: 5 – статті у фахових наукових виданнях, в тому числі роботи [2, 3, 5], опубліковані у виданнях, що входять до переліку міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus; 1 – патент на корисну модель; 8 – у тезах доповідей та матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури та п'яти додатків. Основний текст роботи викладено на 127 сторінках. Дисертація містить 75 рисунків, 16 таблиць, 118 найменувань літературних джерел, розміщених на 13 сторінках та 5 додатків на 39 сторінках.

Повний обсяг дисертації складає 207 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, приведені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

Перший розділ присвячено огляду існуючих методів та засобів поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП з суміжними системами електрифікованих залізниць постійного струму – системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання. Крім зазначеного у розділі обрано та обґрунтовано критерії, що у подальшому дозволять оцінити ступінь електромагнітного впливу охарактеризованих тягових одиниць на вказані системи.

Серед загального переліку електричних систем електрифікованих залізниць, сукупна робота яких забезпечує їх функціонування, головну увагу завжди привертала кола СЦБ, які безпосередньо можуть відчувати на собі вплив кондуктивних перешкод від ЕРС.

З початком впровадження в експлуатацію на залізницях країн СНД, зокрема у Російській Федерації, електровозів постійного струму з АТЕП свого вдосконалення почали зазнавати і технічні рішення, направлені на поліпшення їх ЕМС з суміжними системами, зокрема системами СЦБ. Так, з точки зору ЕРС, таким рішенням є застосування на вході АТЕП замість традиційного резонансного LC-фільтру гібридних фільтрів, створених на основі поєднання пасивних та активних фільтруючих компонентів. Основною перевагою фільтрів такого типу, у порівнянні з традиційними пасивними, є зменшені масо-габаритні показники, а також безумовно кращі показники фільтрації вищих гармонік. Проте,

не зважаючи на це, впровадження таких систем залишається актуальним питанням адже реального працездатного гібридного фільтру для ЕРС з АТЕП постійного струму поки що не створено. З точки зору систем СЦБ основним напрямком вирішення проблеми забезпечення їх ЕМС з суміжними системами, на сьогоднішній день, є застосування тональних рейкових кіл (РК) з робочими діапазонами частот сигнального струму від сотень Гц до одиниць кГц. Використання сигнального струму тонального діапазону дозволяє значно підвищити ступінь захищеності РК від перешкод тягового струму, практично на порядок знизити споживану такими системами потужність, виконати централізоване розміщення апаратури та виключити взаємний вплив між суміжними РК. Тобто такі системи є перспективними з точки зору їх подальшого впровадження.

Іншою системою, яка може зазнавати негативного електромагнітного впливу з боку тягової мережі є система зовнішнього електропостачання. Перетворення електричної енергії на підстанціях та локомотивах призводить до появи у складі її вхідного струму та напруги вищих гармонійних складових, що можуть здійснювати негативний кондуктивний та електромагнітний вплив на роботу суміжного обладнання. На сьогоднішній день, як і у випадку з системами СЦБ, головним напрямком поліпшення ЕМС тягової мережі з мережею зовнішнього електропостачання є встановлення активних або гібридних фільтрів. Принцип дії такого фільтру полягає у генерації компенсуючого струму, що знаходиться у протифазі з гармоніками основного струму, шляхом керування силовою частиною схеми за допомогою системи керування, що реагує на миттєві значення струму навантаження. Не зважаючи на значні переваги розглянутого типу фільтрів, у порівнянні з типовими пасивними, існує ряд положень, які обмежують їх застосування, основним, серед яких є їх висока собівартість, що визначається значною миттєвою потужністю, яка необхідна для забезпечення фільтрації вищих гармонік.

З проведеного аналізу стає очевидним той факт, що проблемі ЕМС ЕРС з АТЕП з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання вже приділялось достатньо уваги. При цьому, основними результатами досліджень були відповідні схемні рішення, що стосуються поліпшення механізму енергоперетворення на тягових підстанціях, ЕРС та передачі сигналів РК. Самі ж дослідження, як правило, виконувались лише для номінальних режимів роботи тягового навантаження. Поточні ж дослідження передбачають отримання у якості вихідних результатів рекомендацій щодо поліпшення ЕМС без застосування додаткових схемних рішень, а лише шляхом коригування параметрів тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму. При цьому сама специфіка досліджень полягає, головним чином, у оцінці електромагнітного впливу останнього на системи СЦБ, як основні системи, вплив перешкод тягового струму на які може бути причиною порушення нормального функціонування залізничного тягового живлення. Миттєвим наявністю постійного взаємозв'язку вище згаданих систем виявляє необхідність проведення аналогічних досліджень і з точки зору взаємодії перетворювача з мережею зовнішнього електропостачання, з точки зору впливу на показники якості напруги живлячих енергосистем. Проте, з урахуванням вказаного вище, такі дослідження пропонується проводити лише при неномінальних

режимах роботи АТЕП, а також в першому наближенні – шляхом виконання імітаційного моделювання.

Для виконання зазначеного вище переліку експериментальних досліджень та досліджень з використанням імітаційного моделювання першочергово необхідним є визначення критеріїв, які б дозволили оцінити ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП з розглянутими суміжними системами. З точки зору систем СЦБ такими критеріями є допустимі амплітуди струмів перешкод на кожній з частот пропускання для РК всіх типів, що визначені у відповідності до НБ ЖТ ЦТ 04-98 «Электровозы. Нормы безопасности».

З точки зору мережі зовнішнього електропостачання критерії визначено у відповідності до ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» і з урахуванням специфіки подальших досліджень в якості останніх обрано:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Загалом, за результатами проведеного у розділі аналізу, зроблено висновок, що на сьогоднішній день одним з перспективних напрямків поліпшення ЕМС тягової мережі з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання є встановлення на ЕРС та підстанціях активних або гібридних фільтрів. В той же час існує гіпотеза щодо можливості поліпшення даних показників без конструктивних модифікацій зазначених систем – в нашому випадку шляхом зміни частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, що вимагає проведення відповідних теоретичних та експериментальних досліджень.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено вибору та обґрунтуванню методів досліджень, а також розробці передумов для їх виконання. В якості основного методу досліджень запропоновано використовувати експеримент із застосуванням експериментальної установки, що імітує функціонування досліджуваного об'єкту – ЕРС з асинхронним тяговим приводом, визначення реальних робочих параметрів якого здійснено шляхом виконання тягового розрахунку.

Оскільки параметри установки та реальної системи є різними, в роботі було здійснено їх приведення з використанням основних положень теорії подібності, а саме третьої теорії подібності та додаткового положення щодо подібності нелінійних систем. В загальному вигляді процеси в досліджуваному об'єкті описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь, що характеризують взаємодію між факторами та параметрами останнього. Таким чином, необхідною умовою подібності двох об'єктів є однаковий вигляд системи диференціальних рівнянь, а отже однаковий характер взаємодії складових частин досліджуваних систем.

Аналіз структурних схем реальної системи тягового електропостачання постійного струму та експериментальної установки (рис.1, 2) свідчить, що механізм енергоперетворення в них, а отже характер взаємодії складових частин, є однаковим, що дозволяє у першому наближенні стверджувати про подібність

систем.

Встановлення подібності систем здійснюється з урахуванням наступних обмежень:

- на тягових підстанціях замість більш ефективної 12-ти пульсової схеми випрямлення застосовано 6-ти пульсову схему;
- пасивні резонансні фільтри, що встановлені на виході тягового випрямляча підстанції та у входному колі силової частини ЕРС з АТЕП постійного струму відсутні (окрім входного LC фільтра-накопичувача);
- входні напруга та струм, що поступають на блок перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму – синусоїдальні;
- індуктивність контактної мережі не враховується.

Приведені припущення можливо враховувати виходячи з обраного методу досліджень – виконання неповного фізичного моделювання.

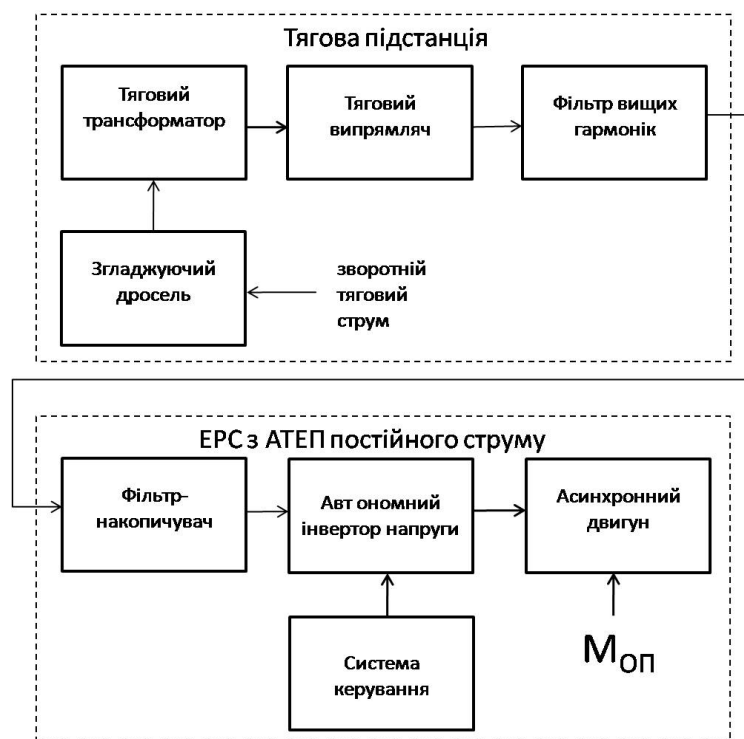


Рис. 1 – Узагальнена структурна схема енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму

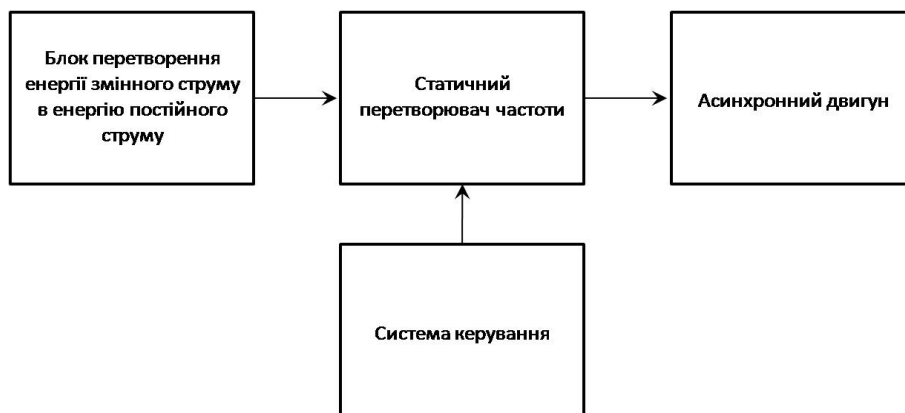


Рис. 2 – Структурна схема експериментальної установки

В роботі, у відповідності до принципів неповного фізичного моделювання, встановлення подібності систем здійснюється шляхом приведення основних характеристик асинхронних двигунів (рис. 3, 4), з визначенням масштабних відношень за струмом, як кінцевих складових ланок енергоперетворення, що визначають зміну параметрів всіх попередніх ланок.

В даному випадку встановлення масштабних відношень за струмом здійснюється з урахуванням використання у складі розглянутих систем двигунів потужністю 750 Вт, на прикладі АИР71А2, що встановлені в частотних приводах лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» та 1200 кВт, на прикладі СТА1200У1, що використовується у складі тягового електроприводу ЕРС з АТЕП.

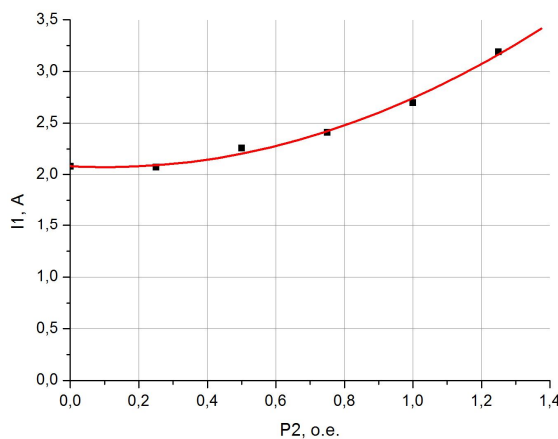


Рис. 3 – Інтерпольована залежність $I_1 = f(P_2)$ для двигуна АИР71А2

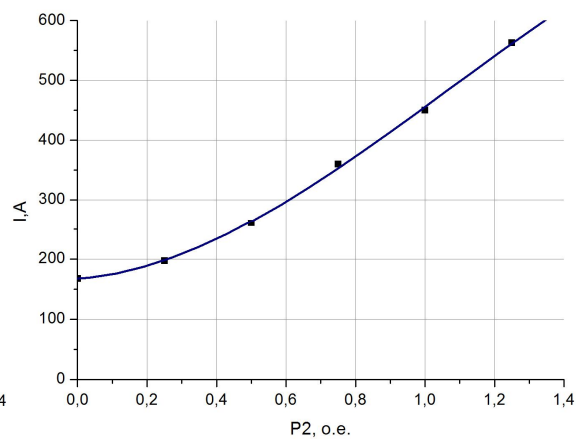


Рис. 4 – Інтерпольована залежність $I_1 = f(P_2)$ для двигуна СТА1200У1

Приведення характеристик здійснюється шляхом їх інтерполяції відповідно до рівнянь:
для АИР71А2:

$$I_{1M} = 2,08073 - 0,17117P_{2M} + 0,83006P_{2M}^2; \quad (1)$$

для СТА1200У1:

$$I_{1B} = 167,33333 + 39,20635P_{2B} + 363,04762P_{2B}^2 - 113,77778P_{2B}^3. \quad (2)$$

Визначення масштабних відношень за струмом здійснюється за допомогою розгорнутого рівняння приведення потужностей обох систем з визначенням значень напруг живлення асинхронних двигунів через вираз для критичного моменту та параметри схем заміщення. Шукані значення напруг наведено у вигляді вольт-частотних характеристик (ВЧХ) (рис. 5, 6). Значення коефіцієнта потужності двигунів обох систем визначаються аналогічно до струму I_1 – шляхом приведення відповідних характеристик. З урахуванням всього вище вказаного результуючий вираз для визначення вхідного струму має вигляд:

$$I_{1OP} = \frac{U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})} \cdot \frac{U_{1MOD} \cdot I_{1MOD}}{U_{1OP}}, \quad (3)$$

де U_{1M} , U_{1B} – напруга живлення двигунів реальної системи енергоперетворення та експериментальної установки відповідно (вихідна напруга АІН); $I_{1B}(P_{2B})$, $I_{1M}(P_{2M})$, $\cos \varphi_{1B}(P_{2B})$, $\cos \varphi_{1M}(P_{2M})$ – аналітичні вирази апроксимації відповідних характеристик двигунів в загальному вигляді; U_{1MOD} , U_{1OP} – діючі значення напруг живлення постійного струму експериментальної установки та реальної системи, I_{1MOD} – діюче значення вхідного струму експериментальної установки.

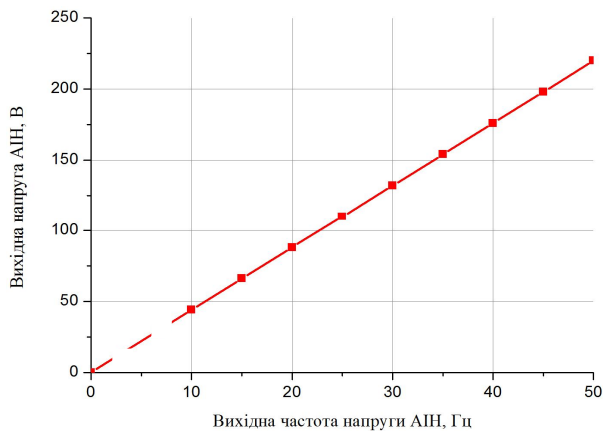


Рис. 5 – ВЧХ двигуна АІР71А2

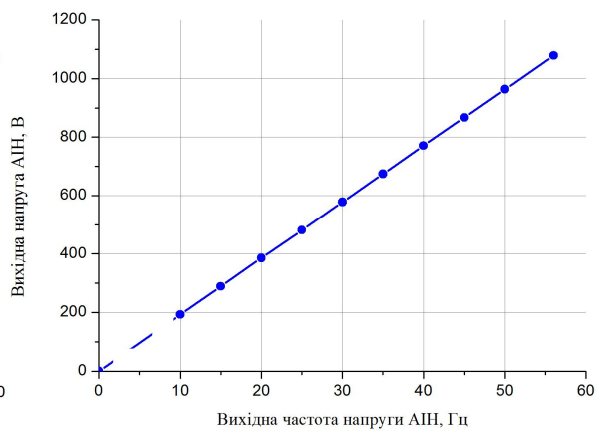


Рис. 6 – ВЧХ двигуна СТА1200У1

Як показали попередні розрахунки, що проведені у дисертаційній роботі, вираз (3) є справедливим лише за умови руху локомотива по номінальній, а відповідно і струмовій, характеристиках, відтворити які при цьому можливо в усьому діапазоні зміни швидкостей. Цей факт і визначає обмеження поточних досліджень.

Встановлення масштабних відношень, у сукупності з попереднім визначенням критеріїв подібності, дозволяє остаточно стверджувати, що розглянуті системи, з урахуванням прийнятих припущень та в певному обмеженні параметрів, є подібними. Такий висновок підтверджує можливість створення фізичної моделі відповідно до розглянутої схеми, а також отримання з її допомогою адекватних результатів подальших досліджень.

У третьому розділі представлені результати досліджень впливу частоти модуляції тягового перетворювача частоти ЕРС з АТЕП постійного струму при номінальному режимі його роботи на показники, що характеризують ступінь електромагнітного впливу на системи СЦБ електрифікованих залізниць постійного струму.

Передумовою проведення досліджень є створення автором експериментальної установки у відповідності до структурної схеми, наведеної у розділі 2. Основу експериментальної установки складають статичний перетворювач час-

тоти та асинхронний двигун, функціональне призначення яких – відтворення необхідного тягового зусилля, реальне значення якого отримано з результатів виконання тягового розрахунку. Крім того, установка містить блок зміни струмового навантаження двигуна та блок регулювання частоти обертання, реалізовані з використанням мікропроцесорної елементної бази.

За допомогою даної установки проведено необхідні експериментальні дослідження, результатом яких є залежності, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС в залежності від зміни частоти модуляції. При цьому під поліпшенням даних показників в роботі прийнято не перевищення ними своїх нормованих значень або їх середню відсоткову зміну відносно нормованих значень. Приклад такої залежності для діапазону зміни частоти модуляції 0,5-0,8 кГц наведено на рисунку 7.

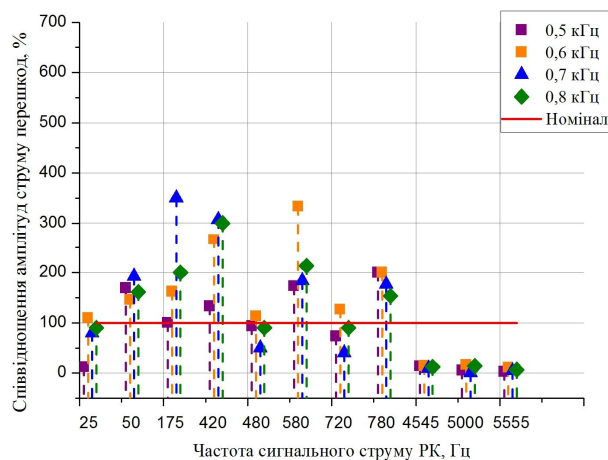


Рис. 7 – Характеристика ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ при номінальному режимі роботи АТЕП

Аналіз даних залежностей дозволив встановити ті значення частот модуляції, за яких досягається максимальне відносне поліпшення даних показників і які можуть бути рекомендованими до подальшого застосування при номінальному режимі роботи АТЕП. Їх значення представлені у загальних висновках.

У четвертому розділі представлено результати досліджень впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП на контрольовані показники ЕМС при неномінальних режимах його роботи: режимі перевантаження тягового електроприводу; режимі часткової відмови системи керування АІН. Окремо досліджено вплив частоти модуляції перетворювача АТЕП на визначені показники ЕМС при наявності явищ комутаційної асиметрії. Дослідження проведено з використанням імітаційної моделі, розробленої автором у програмному середовищі MATLAB Simulink, що відтворює сукупне функціонування окремих складових реальної системи, а саме – мережі тягового електропостачання, силової частини АТЕП та системи керування за допомогою ШІМ. Деякі залежності, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС в залежності від зміни частоти модуляції при розглянутих неномінальних режимах наведено на рисунках 8-11.

Для систем СЦБ аналіз поліпшення показників ЕМСу вигляді аналогічних до наведених вище залежностей здійснено для РК з частотами сигнального струму 50 Гц та 25 Гц, які за результатами попереднього гармонійного аналізу зазнають найбільшого впливу від АТЕП ЕРС постійного струму при виникненні явищ комутаційної асиметрії. Дані залежності наведені на рисунках 12-13.

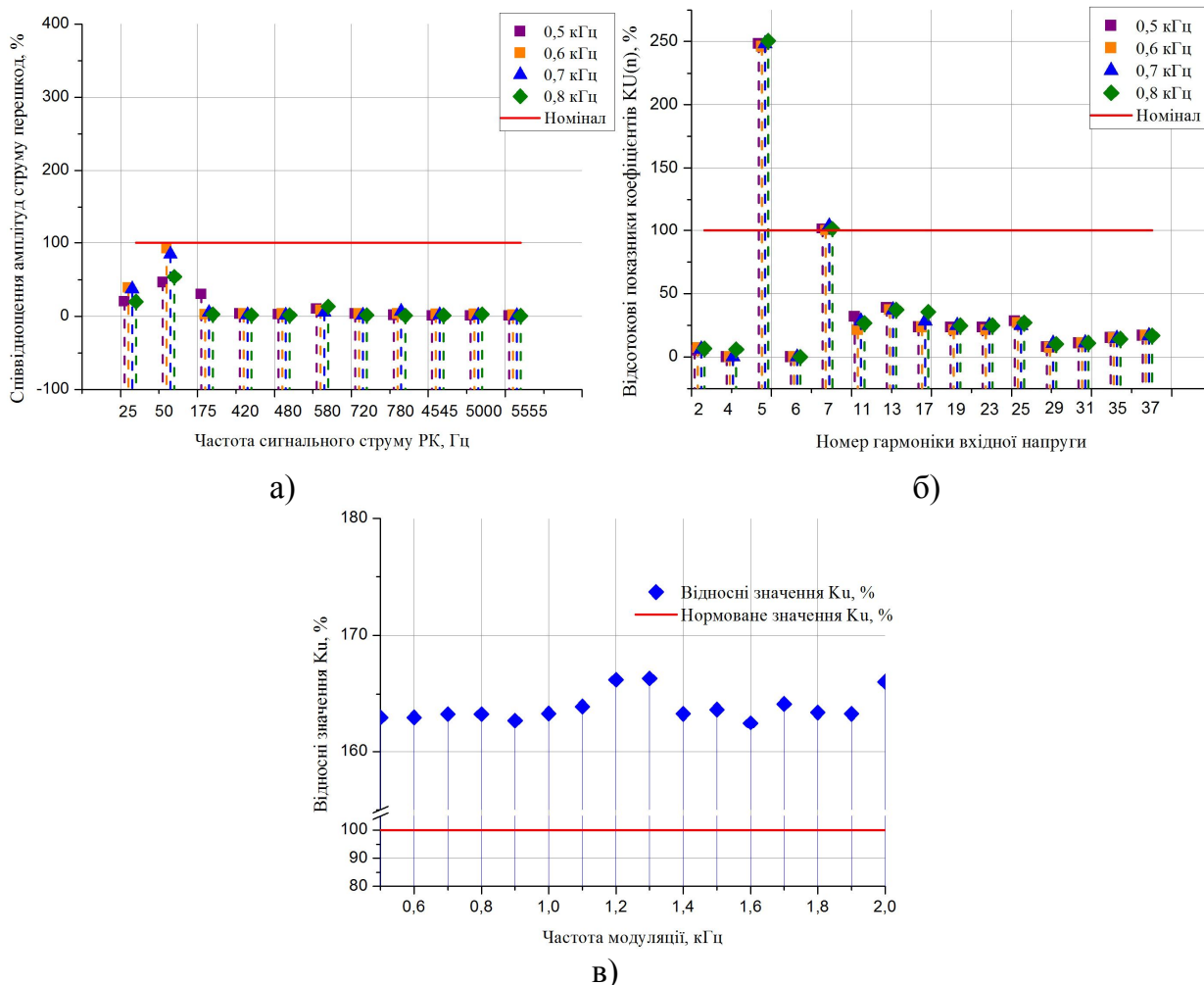
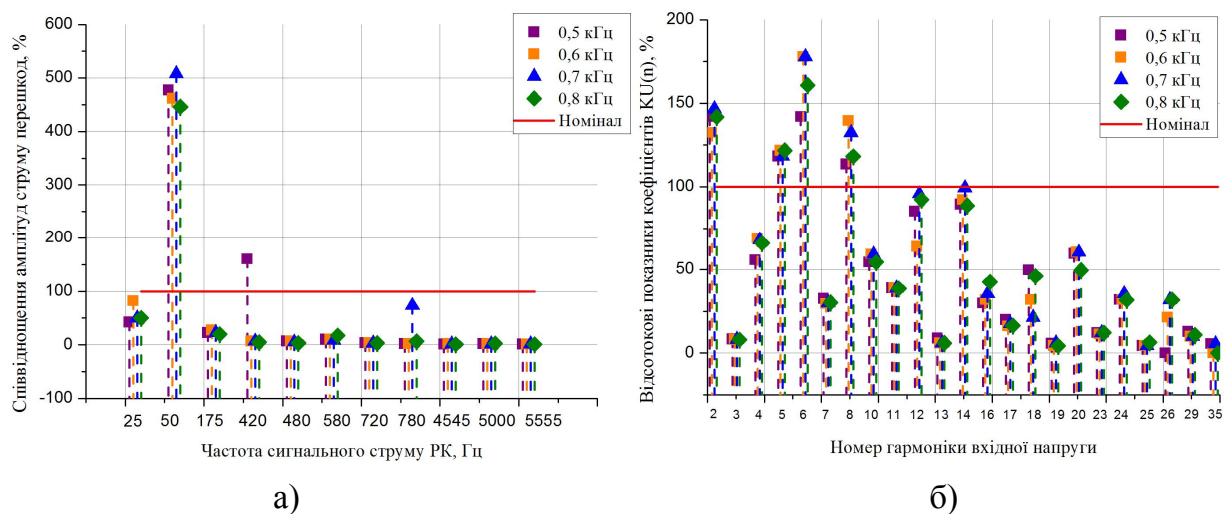
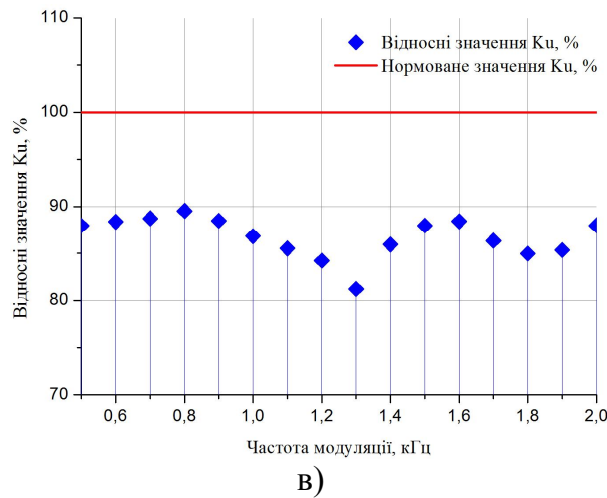


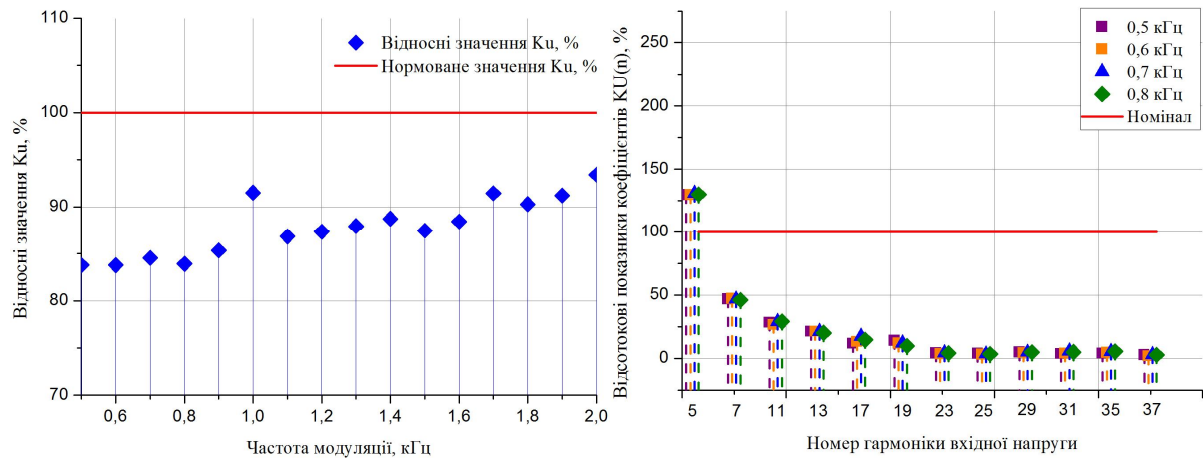
Рис. 8 – Характеристики ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання при режимі перевантаження АТЕП





в)

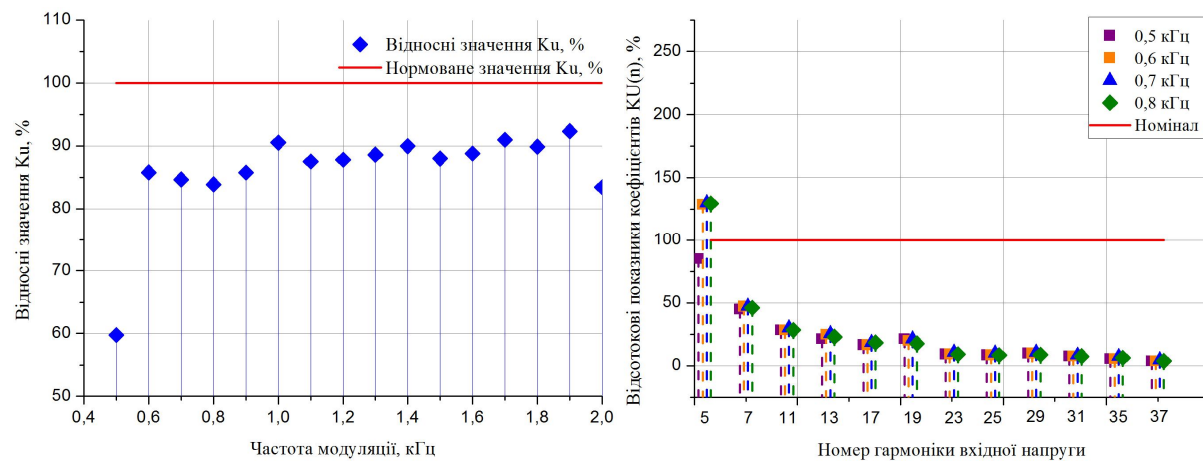
Рис. 9 – Характеристики ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання при режимі часткової відмови системи керування



а)

б)

Рис. 10 – Характеристики ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання при наявності позиційної асиметрії



а)

б)

Рис. 11 – Характеристики ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання при наявності верхньої/нижньої асиметрії

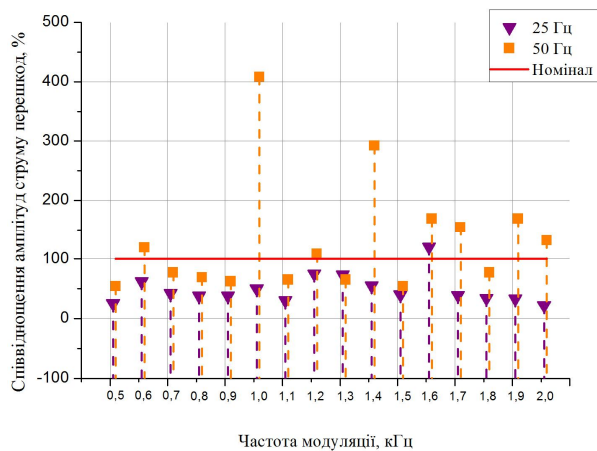


Рис. 12 – Характеристика ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ при наявності позиційної асиметрії

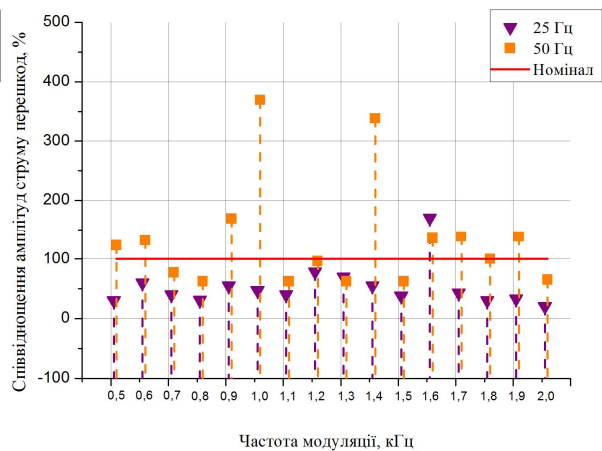


Рис. 13 – Характеристика ступеню поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ при наявності верхньої/нижньої асиметрії

Дані залежності дозволили визначити ті діапазони частот модуляції, за яких спостерігається найбільше відносне поліпшення контрольованих показників ЕМС з суміжними системами при розглянутих неномінальних режимах роботи АТЕП, в тому числі при режимі часткової відмови системи керування АІН, який, згідно досліджень, є найбільш небезпечним з точки зору негативного електромагнітного впливу тягового перетворювача ЕРС.

У п'ятому розділі розглянуто питання оцінки техніко-економічної ефективності впровадження результатів досліджень. Останню здійснено за критерієм зменшення кількості відмов пристроїв СЦБ, яке при врахуванні наданих рекомендацій по застосуванню частот модуляції визначених діапазонів може становити до 8,8 %.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішено актуальну науково-технічну задачу поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму за рахунок вибору раціональних діапазонів частот модуляції тягового перетворювача.

Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Аналіз сучасного стану проблеми забезпечення ЕМС суміжних систем електрифікованих залізниць показав, що остання не є новою і продовжує бути актуальною як на залізницях постійного, так і змінного струмів. Вирішенню даної проблеми загалом присвячено велику кількість робіт, в тому числі роботи, що пов'язані з дослідженням електромагнітної взаємодії ЕРС з АТЕП як постійного, так і змінного струмів. Не зважаючи на це, відсутність значного досвіду експлуатації зазначених тягових одиниць на українських залізницях постійного струму вимагає подальшого проведення досліджень. Оскільки основним джерелом впливу ЕРС з АТЕП на суміжні системи є тяговий статичний перетворю-

вач частоти, що генерує вихідну напругу живлення тягового двигуна за допомогою ШІМ, в якості об'єкту досліджень обрано саме його.

2. Найбільшого впливу зі сторони ЕРС з АТЕП зазнають системи СЦБ та тягового електропостачання, функціонування яких повинно відповідати діючим стандартам. Аналіз суміжної роботи цих систем з ЕРС з АТЕП, дозволив визначити критерії, що дозволяють оцінити ефективність його роботи, за критерієм ЕМС, за умови експлуатації на залізницях постійного струму. До таких критеріїв відносяться: коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ; коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$; допустимі амплітуди струмів перешкод для РК різного діапазону робочих сигнальних струмів.

3. Серед існуючих методів досліджень одним з найбільш відповідних є фізичний експеримент. З використанням основних принципів теорії подібності розроблена експериментальна установка, що імітує функціонування АТЕП ЕРС постійного струму та дозволяє відтворити реальні параметри режиму його руху на типовому профілі з точки зору струмового навантаження та лінійної швидкості, приведеної до вихідної частоти тягового перетворювача. В ході розробки запропоновано методику визначення масштабних відношень між параметрами моделі та реальної системи тягового електропостачання постійного струму, з урахуванням ЕРС з АТЕП, основою якої є застосування залежностей $I_1 = f(P_2)$ двигунів моделі й оригіналу та струмових характеристик ТЕД.

4. За допомогою експериментальної установки здійснено дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на показники ЕМС з системами СЦБ при роботі зазначеного рухомого складу в номінальному режимі. В результаті досліджень встановлено ті значення частоти модуляції, які є найбільш рекомендованими до застосування, за критерієм взаємодії з системами СЦБ, а саме: 0,5 кГц та 0,6 кГц – для РК 25 Гц; 0,5 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц та 1,9 кГц – для ТРЦ-3 з частотами 580 Гц та 780 Гц. Застосування зазначених частот модуляції дозволяє досягти відносного зниження амплітуд струмів перешкод на приведених діапазонах, а отже поліпшення ЕМС розглянутого ЕРС з системами СЦБ, до рівнів: 32-39% від нормованих значень – для РК 25 Гц; 43-67%, 37-48%, та 43-60% від нормованих значень для РК 580-780 Гц відповідно. Для РК з іншими частотами сигнального струму частот модуляції які б повноцінно задовольняли умовам безперешкодної роботи систем СЦБ за критерієм їх ЕМС з ЕРС з АТЕП постійного струму встановлено не було.

5. Розроблено удосконалену імітаційну модель, яка на відміну від існуючих відтворює функціонування АТЕП у структурі системи тягового електропостачання залізниць постійного струму з урахуванням їх особливостей, а також динамічні показники роботи ЕРС в умовах руху по перегону. За допомогою цієї моделі досліджено вплив частоти модуляції на обґрунтовані показники ЕМС в неномінальних режимах роботи АТЕП – в режимі перевантаження та режимі часткової відмови системи керування з ШІМ.

6. Згідно з результатами імітаційних досліджень встановлено, що за умови виникнення режиму перенавантаження найбільш вразливими до дії перешкод є РК з робочими частотами сигнального струму 25 Гц та 50 Гц. В цьому випадку найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції тягового пе-

ретворювача ЕРС з АТЕП постійного струму є 0,8 кГц, 1,3 кГц та 1,5 кГц, за яких спостерігається зниження відповідних амплітуд струмів перешкод до рівня 20-28% (для РК 25 Гц) та 49-54% (для РК 50 Гц) відносно своїх нормованих значень відповідно.

7. При виникненні режиму часткової відмови системи керування, при оцінці ЕМС ЕРС з АТЕП з системами СЦБ, спостерігається суттєве зростання амплітуди гармоніки з частотою 50 Гц – до рівня 500% відносно нормованого значення. При цьому зміна частоти модуляції у межах розглянутого діапазону 0,5-2 кГц не призводить до суттєвих змін її амплітуди, у зв'язку з чим рекомендації щодо поліпшення ЕМС є узагальненими та обмежуються необхідністю здійснення відповідних налаштувань фільтрів або застосування РК з іншими робочими частотами сигнального струму.

При оцінці ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання за вказаних неномінальних режимів зміною частоти модуляції вдається досягти відносного поліпшення лише одного з контрольованих показників ЕМС – коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U за частоти модуляції 1,3 кГц (до рівня 81% відносно свого нормованого значення). При цьому вважати дану частоту рекомендованою до застосування не доцільно через відносне перевищення деяких коефіцієнтів $K_{U(n)}$ своїх нормованих значень на рівні 150%. Як і у випадку з системами СЦБ останній факт дозволяє розробити лише узагальнені рекомендації щодо поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання. В даному випадку вони обмежуються необхідністю покращення процесу енергоперетворення на тягових підстанціях.

8. У випадку виникнення явищ комутаційної асиметрії силових ключів тягового перетворювача ЕРС з АТЕП найбільш рекомендованою до застосування частотою модуляції є 0,8 кГц. За її застосування спостерігається відносне потенційне поліпшення показника K_U до рівня 75% при позиційній асиметрії та 84% при верхній/нижній асиметрії (відносно нормованих значень), а також зниження амплітуд струмів перешкод для кіл СЦБ (з РК 25 Гц та РК 50 Гц) до рівня 42%-50% відносно своїх нормованих значень.

9. Загалом, на підставі комплексного аналізу результатів проведених досліджень в якості рекомендованої частоти модуляції доцільно прийняти 1,5 кГц.

10. При врахуванні наданих рекомендацій по застосуванню частот модуляції визначених діапазонів, з урахуванням режимів роботи АТЕП ЕРС постійного струму, максимальна середня прогнозована ефективність від впровадження результатів роботи, за критерієм зменшення кількості відмов пристроїв СЦБ становить 8,8 %.

Список опублікованих наукових праць за темою дисертаційної роботи.

Основні праці:

1. Бондаренко Ю.С. Вибір критеріїв для оцінки електромагнітної сумісності тягових перетворювачів перспективних електровозів / Ю.С. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2012. - №42. - С.85-89.

2. Бондаренко Ю. С. Експериментальна установка для дослідження електромагнітної сумісності тягових статичних перетворювачів електротранспорту

складу з системами електрифікованих залізниць / Ю.С. Бондаренко // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С.101–108 с.

3. Бондаренко Ю.С. Особливості експериментального дослідження електромагнітної сумісності статичних перетворювачів електрорухомого складу. / Ю.С. Бондаренко// Збірник наукових праць ДонІЗТ – Донецьк: Видавництво ДонІЗТ, 2012. - №32. - С.130 – 136.

4. Бондаренко Ю.С. Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції перетворювача частоти на гармонійний склад струму системи./ Ю.С. Бондаренко // Гірнича електромеханіка та автоматика – Дніпропетровськ: Видавництво НГУ, 2013. - №90. – С.24-28.

5. Бондаренко Ю.С. Передумови експериментального дослідження електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу в структурі системи тягового електропостачання постійного струму / Ю.С. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2014. - №3(51). - С.42-50.

6. Патент UA 80282 МПК (2006.01) G01R 31/34 Стенд для випробування частотно-регульованих асинхронних двигунів / Бондаренко Ю.С.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки u 2012 12237; дата заявки 29.10.2012; дата публікації 27.05.2013. Бюл. №10.

Додаткові праці:

7. Бондаренко Ю.С. Питання електромагнітної сумісності перетворювача багатосистемного електровозу / Ю.С. Бондаренко // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2011»: міжнар. наук. – практ. конф., 19-21 грудня 2011 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011.

8. Бондаренко Ю.С. Критерії визначення електромагнітної сумісності багатосистемного електровоза. / Ю.С. Бондаренко // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 14-17 лютого 2012 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012.

9. Бондаренко Ю.С. Дослідження електромагнітної сумісності перетворювача багатосистемного електровозу з системами електрифікованих залізниць. / Ю. С. Бондаренко // Енергозбереження на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 30 травня – 02 червня 2012 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012. - С.8.

10. Бондаренко Ю.С. Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності перетворювача багатосистемного електровозу з системами електрифікованих залізниць. / Ю.С. Бондаренко // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2012»: міжнар. наук. – практ. конф., 25-28 вересня 2012 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012.

11. Бондаренко Ю.С. Ресурсозберігаючі технології дослідження електромагнітної сумісності тягових перетворювачів. / Ю.С. Бондаренко // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: міжнар. наук. – техн. конф., 9-11 квітня 2013 р.: тези доп. - Кременчук: КрНУ, 2013.

12. Бондаренко Ю.С. Особливості моделювання електромагнітного впливу тягового статичного перетворювача на системи електрифікованих залізниць. /

Ю.С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 23-24 травня 2013 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. - С. 120.

13. Бондаренко Ю.С. Спрощена методика встановлення подібності нелінійних систем / Ю.С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 травня 2014 р.: тези доп. - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2014. - С. 130.

14. Бондаренко Ю.С. Питання розробки математичної моделі асинхронного тягового електроприводу електровозів постійного струму. / Ю.С. Бондаренко // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: міжнар. наук. – практ. конф., 11-13 червня 2014 р.: тези доп. - смт. Воловець, Закарпатської обл., 2014.

АНОТАЦІЯ

Бондаренко Ю.С. Поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами електрифікованих залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2014.

Дисертація присвячена питанню поліпшення електромагнітної сумісності електровозів постійного струму з асинхронним тяговим приводом (ЕРС з АТЕП) з суміжними системами електрифікованих залізниць за рахунок вибору відповідної частоти модуляції вихідної напруги тяговим перетворювачем частоти, що живить тяговий асинхронний двигун.

За допомогою розробленої експериментальної установки, з урахуванням основних та додаткових положень теорії подібності, проведено дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача на системи СЦБ при номінальному режимі роботи АТЕП, з урахуванням реальних параметрів режиму руху ЕРС.

Шляхом виконання імітаційного моделювання на розробленій моделі, що імітує сукупне функціонування реальних систем (ЕРС, мережі тягового електропостачання, системи керування перетворювачем) вперше проведено оцінку впливу частоти модуляції на показники електромагнітної сумісності при неномінальних режимах роботи АТЕП, а також з урахуванням явищ комутаційної асиметрії силових ключів тягового статичного перетворювача, що входить до його складу.

Отримані наукові результати дозволили розробити рекомендації щодо вибору раціональних діапазонів частот модуляції перетворювача для покращення показників електромагнітної сумісності останнього із суміжними системами електрифікованих залізниць постійного струму, що дозволяє розширити можливості подальшого впровадження ЕРС з АТЕП.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, електрорухомий склад, постій-

ний струм, асинхронний привод, тяговий перетворювач, частота модуляції, теорія подібності.

АННОТАЦИЯ

Бондаренко Ю.С. Улучшение электромагнитной совместимости асинхронных приводов электровозов постоянного тока со смежными системами электрифицированных железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2014.

Диссертация посвящена вопросу улучшения электромагнитной совместимости электровозов постоянного тока с асинхронным тяговым приводом (ЭПС с АТЭП) со смежными системами электрифицированных железных дорог за счет выбора соответствующей частоты модуляции выходного напряжения тяговым преобразователем частоты, питающим тяговый асинхронный двигатель.

В основе выполнения исследований, проведенных в работе, лежит разработка экспериментальной установки, имитирующей работу основных составляющих АТЭП электровозов постоянного тока. Даная установка позволяет исследовать реальные режимы движения ЭПС с учётом приведения их основных параметров и исследуемых процессов к реальной системе через соответствующие масштабные коэффициенты. В работе их определение проводилось с использованием основных и дополнительных положений о подобии, а именно – третьей теории подобия и дополнительных положений о подобии сложных систем и о подобии нелинейных систем.

В ходе установления подобия был предложен усовершенствованный метод установления коэффициентов подобия для нелинейных систем, которые имеют в своём составе одинаковые составляющие, но различные предельные параметры и который учитывает особенности тягового электропривода.

С помощью экспериментальной установки проведены исследования влияния частоты модуляции тягового преобразователя ЭПС с АТЭП на показатели электромагнитной совместимости со смежными системами СЦБ при номинальном режиме его работы и определены те частоты, при использовании которых наблюдается наименьшее влияние рассмотренного ЭПС на указанные системы.

В работе предложена усовершенствованная имитационная модель АТЭП, которая, в отличие от существующих, учитывает особенности системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока, а также динамические показатели его функционирования при движении ЭПС по перегону. С помощью модели исследовано влияние частоты модуляции на контролируемые показатели электромагнитной совместимости в неноминальных режимах работы АТЭП. При этом установлено, что наиболее неблагоприятным режимом, с точки зрения негативного электромагнитного влияния, является режим частичного отката системы управления тяговым преобразователем.

Рассмотрены вопросы влияния на контролируемые показатели электромаг-

нитной совместимости частоты модуляции тягового статического преобразователя ЭПС с АТЭП при наличии явлений коммутационной асимметрии силовых ключей. Данные исследования проводились в условиях имитационного моделирования и позволили установить, что данные явления не вносят существенных изменений в уже присутствующий спектр гармоник тока и напряжения, сформированный соответствующим режимом работы АТЭП.

Полученные научные результаты позволили разработать рекомендации по выбору рациональных диапазонов частот модуляции тягового преобразователя ЭПС с АТЭП с точки зрения улучшения показателей электромагнитной совместимости последнего со смежными системами электрифицированных железных дорог постоянного тока, что расширяет возможности его дальнейшего внедрения.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электроподвижной состав постоянного тока, асинхронный привод, тяговый преобразователь, частота модуляции, теория подобия.

ABSTRACT

Bondarenko Yu. S. Improving the electromagnetic compatibility of asynchronous electric drives of DC electric locomotives with adjacent systems of electrified railways. - The Manuscript.

The thesis work for a degree of candidate of technical sciences in specialty 05.22.09 – electrical transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazarjan, Dnepropetrovsk, 2014.

The thesis is devoted to the improvement of the EMC DC electric locomotives with an asynchronous traction drive with adjacent systems of electrified railways by means of selecting the appropriate frequency modulation of the traction frequency converter's output voltage for feeding a traction asynchronous motor.

By using experimental setup, which is developed according to the main and additional provisions similarity theory, was conducted a researches for studies the impact of traction converter's modulation frequency on the signaling systems at a nominal work mode of asynchronous traction electric drive, based on actual traffic mode parameters of the electric locomotives.

By means of simulation, on the developed model that simulates the combined operation of real systems (rolling stock, traction power network, control system of traction converter) for the first time evaluated the impact of frequency modulation on the EMC criteria at not nominal work modes of asynchronous traction electric drive, as well as with account for commutation asymmetry process in power switches of traction converters.

The obtained results allow developing scientific advice on the choice of rational bands of converter's frequency modulation in terms of improvement of electromagnetic compatibility with adjacent systems of DC electrified railways, thus extending the possibilities of further implementation of the DC electric locomotives with an asynchronous traction drive.

Key words: electromagnetic compatibility, DC rolling stocks, asynchronous drive, traction converter, modulation frequency, similarity theory.

Бондаренко Юрій Сергійович

**ПОЛІПШЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ
АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ З СУМІЖНИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ
ЗАЛІЗНИЦЬ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Формат паперу 60×48 1/16. Папір для розмножувальних апаратів. Різограф
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна

Свідоцтво ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса університету і дільниці оперативної поліграфії:
49010, вул. акад. В Лазаряна, 2, Дніпропетровськ
www.diit.dp.ua