

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

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник  
доктор технічних наук, професор  
Муха Андрій Миколайович

Дніпропетровськ – 2014

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕМС СУМІЖНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ.....	14
1.1 Аналіз процесів взаємопов'язаної роботи систем електрифікованих залізниць .....	14
1.1.1. Системи сигналізації, централізації та блокування...	14
1.1.2. Системи тягового електропостачання.....	17
1.2. Критерії електромагнітної сумісності та постановка задач дослідження.....	20
1.3. Висновки до першого розділу.....	27
РОЗДІЛ 2. ПЕРЕДУМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ПОДІБНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ СИСТЕМ.....	29
2.1. Передумови проведення експериментальних досліджень ...	29
2.2. Особливості визначення масштабних відношень контрольованих параметрів .....	40
2.3. Вибір та обґрунтування методів досліджень .....	43
2.4. Оцінка ступеню подібності систем .....	45
2.5. Визначення числових значень масштабних відношень контрольованих параметрів .....	59
2.6. Висновки до другого розділу.....	71
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ. РЕ- ЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.....	72
3.1. Опис експериментальної установки .....	72
3.2. Фактори та загальні умови експериментального дослідження .....	80
3.3. Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції	

тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ .....	87
3.4.Висновки до третього розділу.....	98
РОЗДІЛ 4. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	100
4.1.Моделювання мережі тягового електропостачання.....	102
4.2.Моделювання силової частини асинхронного тягового електроприводу.....	108
4.3.Моделювання системи керування з широтно-імпульсною модуляцією.....	109
4.4.Дослідження режиму перевантаження тягового електроприводу.....	115
4.5.Дослідження випадку відмови складових блоків тягового електроприводу.....	123
4.6.Дослідження впливу явища комутаційної асиметрії.....	134
4.7.Висновки до четвертого розділу.....	146
РОЗДІЛ 5. ПРОГНОЗОВАНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	148
5.1 Висновки до п'ятого розділу.....	150
ВИСНОВКИ.....	152
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
ДОДАТОК А. ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10.....	169
ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТУЮЧІ КРИВІ РУХУ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10 ПО ЗАДАНОМУ ПРОФІЛЮ КОЛІЇ.....	181
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМС З СИСТЕМАМИ СЦБ У НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ АТЕП ЕРС ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	184
ДОДАТОК Г. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ	

ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТДП-12500/10ЖУ1.....	201
ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТА- ЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	205

## ВСТУП

Електрифіковані залізниці займають особливе місце у системі залізничних перевезень. Застосування системи електричної тяги дозволяє значно знизити собівартість перевезень, підвищити швидкість та ефективність їх здійснення.

В рамках постійного зростання вартості паливно-енергетичних матеріалів розширення мережі електрифікованих залізниць є перспективним напрямком їх подальшого розвитку. Це передбачає використання більшої кількості електричного обладнання при забезпеченні достатнього рівня функціонування мережі в цілому.

Надійність функціонування електрифікованих залізниць у значній мірі визначається показниками взаємного впливу всіх систем, що входять до її складу: тягової мережі; мережі зовнішнього електропостачання; систем автоматики, телемеханіки та зв'язку.

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 М. та ін, основні результати роботи яких викладені у [1-16]. Зокрема у роботі [11] запропоновано методи поліпшення ЕМС залізниць постійного струму шляхом удосконалення систем живлення тягових підстанцій та модернізації способів активної фільтрації перешкод. Не зважаючи на це і на сьогоднішній день питання ЕМС підсистем залізничного транспорту залишається відкритим та актуальним.

Одним з головних джерел електромагнітного впливу є тягова мережа, яка є асиметричною за параметрами, та передає енергію з несинусоїдальними змінними або пульсуючими постійними струмами і напругами [17]. Її вплив на суміжні системи електрифікованих залізниць є досить значним, що головним чином пов'язано з наявністю у її структурі статичних перетворювачів електричної енергії.

Перетворення на тягових підстанціях, або на електрорухомому складі (ЕРС) електричної енергії змінного струму в енергію випрямленого струму та навпаки – за допомогою статичних напівпровідникових перетворювачів, пов'язано зі значним споживанням реактивної енергії цими агрегатами. Крім того, напівпровідникові перетворювачі відносяться до класу навантажень, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, та споживають з мережі несинусоїдальний струм, що спотворює криву напруги живлячих енергосистем. Несинусоїдальність та несиметрія живлячої напруги, в свою чергу, негативно впливають на якість випрямленої напруги – призводять до появи в останній додаткових гармонійних складових та до підвищеного електромагнітного впливу тягової мережі на суміжні слабкоструміві системи, особливо системи сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Це пов'язано з тим, що пристрої залізничної автоматики використовують у якості сигнальних кіл рейкові кола, що одночасно являються зворотнім проводом для протікання несинусоїдального тягового струму [1, 3].

Особливо гостро питання ЕМС постало з початком впровадження в експлуатацію на залізницях України ЕРС з асинхронним тяговим електроприводом (ЕРС з АТЕП) [14]. Однією з особливостей електроприводу таких тягових одиниць є застосування у його структурі статичного напівпровідникового перетворювача частоти. З точки зору ЕМС такий перетворювач при роботі генерує широкий спектр гармонік з частотами, що створюють перешкоди на вході апаратури рейкових кіл (РК) на частотах сигнального струму [2, 3, 9]. При цьому інтенсивність такого впливу

здебільшого визначається частотою модуляції вихідної напруги, що живить асинхронний двигун [19].

**Актуальність теми.** На теренах залізниць України застосовуються мережі тягового електропостачання змінного струму, напругою 25 кВ, та постійного – напругою 3 кВ. При цьому, з точки зору техніко-економічних показників, системи змінного струму є більш прийнятними [20, 21].

В той же час станом на 01.01.2011р. серед загальної експлуатаційної довжини електрифікованих залізниць України (9877 км) близько половини (4764 км) залишається електрифіковано постійним струмом [20, 22] і заміна цих ділянок ділянками змінного струму потребує значних капіталовкладень [23].

З урахуванням цього, на сьогоднішній день, одним з перспективних напрямків розвитку залізниць постійного струму є впровадження в експлуатацію ЕРС з АТЕП, основним елементом тягового електроприводу якого є вище згаданий статичний перетворювач частоти [24].

Застосування в основі функціонування АТЕП 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) [25], що з точки зору електромагнітної взаємодії подібних тягових одиниць з системами СЦБ є неприпустимим. Випробування більш сучасного електровозу ДС-3 в цілому не виявили критичних перевищень амплітуд струмів перешкод [26]. Виключення складають лише короточасні перевищення при значних динамічних змінах потужності – до 35% відносно нормованих значень в діапазоні частот сигнального струму РК 25-175 Гц. Наведені результати

аналізу роботи ЕРС з АТЕП змінного струму, а також недостатній досвід експлуатації ЕРС з АТЕП постійного струму на залізницях України дозволяє вказати, 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[9, 18, 19, 20].

Питанням взаємодії ЕРС постійного струму з АТЕП з суміжними системами залізниць вже приділялась увага. Так автором проаналізовано роботи [3, 8, 11, 12, 16], 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, та стосувались, у своїй більшості, номінального режиму роботи обладнання ЕРС. Питання режимів роботи системи керування статичного перетворювача у цих роботах, а також його електромагнітний вплив на суміжні системи за неномінальних режимів роботи АТЕП розглянуті майже не були. З урахуванням цього 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, темами.**

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

– 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);



– Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012 – 2016 роки (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.2011 р. № 840);

– «Дослідження впливу перетворювачів підвищеної частоти тягового приводу багатосистемних електровозів на лінії СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць» (№ ДР 0110U003608), у якій автор був 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 дослідження** – процеси електромагнітної взаємодії суміжних систем електрифікованих залізниць постійного струму.

**Предмет дослідження** – асинхронні приводи електровозів постійного струму.

**Методи дослідження.** Під час виконання дисертаційної роботи для вирішення поставленого переліку задач було застосовано наступні методи:

- для встановлення ключових показників ЕМС, що відповідають умовам дослідження і відповідних умов та особливостей їх визначення здійснено аналітичний огляд системи діючих вітчизняних та європейських стандартів галузей електропостачання та електротранспорту, та попередніх наукових робіт в даному напрямку;

- створення експериментальної установки, що відтворює основні параметри роботи ЕРС з АТЕП та подальше експериментальне дослідження виконувалось 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 здійснювався з використанням методів гармонійного аналізу, шляхом застосування перетворення Фур’є, а також елементів теорії імовірності та математичної статистики. Обробку експериментальних даних здійснено з використанням ЕОМ.

- виконання досліджень взаємодії ЕРС з АТЕП з розглянутими системами у неномінальних режимах його роботи та обробка результатів здійснювались відповідно до принципів імітаційного моделювання з використанням програмного середовища MATLAB Simulink.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

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

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.

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.

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.

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.**

Удосконалено методику визначення масштабних відношень подібних систем, що розширює можливості експериментальних досліджень ЕМС систем тягового енергоперетворення без порушення їх нормального функціонування.

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.

Розроблено імітаційну модель для дослідження ЕМС у номінальних та неномінальних режимах роботи ЕРС з АТЕП при живленні від мереж тягового електропостачання постійного струму з урахуванням динаміки зміни параметрів руху.

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.**

Мета та задачі дослідження сформульовано автором спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні

дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно.

Всі публікації написано автором самостійно.

### **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-ій «Транселектро 2012», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; 73-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2013 р.; V-ій «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енергоресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», м. Алушта, 2013 р.; 74-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2014 р.; V-ій «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 [80, 81, 92], 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.