

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ХАРКІВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ГУЛАК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 629.429.3:621.313

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ
ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА РАХУНОК АДАПТОВАНОЇ ДО СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі тягового рухомого складу залізниць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Віктор Петрович,
Державний університет інфраструктури та технологій,
завідувач кафедри тягового рухомого складу залізниць.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Буряковський Сергій Геннадійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», директор
Науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту «Молнія»;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Божко Володимир Вячеславович,
Акціонерне товариство «Українська залізниця»,
заступник начальника Харківського відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту».

Захист відбудеться «25» листопада 2020 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розіслано «20 жовтня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Дмитро ЯКУНІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кабінетом міністрів України затверджено «Стратегічний план розвитку залізничного транспорту України на період 2015–2020 рр.» від 21 грудня 2015 № 547, основний напрямок якого пов'язаний зі зниженням експлуатаційних витрат, зокрема, зменшення енергоспоживання на тягу поїздів. В області рухомого складу намічене оновлення парку Укрзалізниці локомотивами нового покоління з покращеними техніко-економічними показниками та показниками енергозбереження і якості електроенергії.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є модернізація існуючого парку на основі пристроїв компенсації реактивної потужності енергоспоживання електровозів. Найбільш ефективним вважається включення компенсаторів реактивної потужності (КРП) безпосередньо у структуру споживача, тобто на електрорухомому складі (ЕРС).

Численні дослідження нерегульованих КРП, що проводилися в низці країн, показали, що такий компенсатор є ефективним засобом для підвищення коефіцієнта потужності електровоза. Разом з тим, застосування пасивних КРП на рухомому складі не забезпечує поліпшення коефіцієнта спотворення форми струму і пов'язаного з ним коефіцієнта потужності перетворювача.

Удосконаленням способу компенсації реактивної потужності є застосування компенсаторів з регульованим струмом компенсатора. Такий компенсатор дозволяє регулювати ємнісний струм компенсатора в залежності від фазового кута зсуву між основною гармонікою струму і напругою, виміряними на низькій стороні тягового трансформатора електровозу.

Не зважаючи на велику кількість робіт, присвячених компенсації реактивної потужності, не вирішеними в цьому напрямку залишається низка питань. Наприклад, недостатньо даних щодо впливу якості струмознімання (часті відриви та натискання струмоприймача на контактний провід, прохід нейтральних ставок) на перехідні процеси в тягових та допоміжних приводах. Є також багато нез'ясованих питань щодо виникнення вищих гармонійних складових напруг та струмів при взаємному впливі перехідних процесів в тяговому електроприводі та в приводі допоміжних електричних машин та ін.

Таким чином, синтез гібридного КРП з врахуванням взаємного впливу роботи тягових електричних машин та електричних машин допоміжних агрегатів, якості струмознімання та режимів роботи електровозу на вищі гармонійні складові напруги та струму є актуальним науково-технічним завданням, що складається у поліпшенні показників енергозбереження та якості спожитої електроенергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі тягового рухомого складу залізниць ДУІТ. Наведені в дисертації результати увійшли до наукових проектів, що виконувалися за участю автора: «Методи підвищення енергоефективності, надійності та діагностики сучасного та гібридного транспорту» (ДР № 0114U007085); «Розробка методів зменшення енергоємності та удосконалення систем діагностики устаткування залізничного транспорту» (ДР №

0116U006406); «Методи аналізу та дослідження параметрів тягового електроприводу і його елементів» (ДР № 0116U008477); «Наукові основи проектування, удосконалення конструкцій і модернізації екіпажних частин традиційного і високошвидкісного рухомого складу залізниць із поліпшеними характеристиками взаємодії з рейковою колією» (ДР № 0119U100048); «Підвищення енергоефективності рухомого складу залізниць на основі ресурсозберігаючих технологій і інтелектуальних енергетичних систем» (ДР № 0120U101912).

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності електровозів змінного струму за рахунок розробки та впровадження адаптованої до параметрів системи тягового електропостачання системи компенсації реактивної потужності.*

Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі досліджень:

- визначення впливу факторів, які сприяють зниженню коефіцієнта потужності електровозів змінного струму;
- розробка імітаційної моделі для дослідження електромеханічних процесів в системі тягового приводу електровозу змінного струму та визначення на ній значення коефіцієнту потужності приводу;
- вдосконалення методу визначення власних і взаємних індуктивностей асинхронного двигуна з несиметричними обмотками при переході від узагальненої електричної машини до реальної, розробка імітаційної моделі приводу допоміжних машин і визначення на ній коефіцієнту потужності допоміжного приводу;
- дослідження взаємного впливу тягового та допоміжного приводу на значення їх коефіцієнтів потужності;
- розробка принципової схеми гібридного компенсатора реактивної потужності з керованої активною частиною, робота якої адаптована до параметрів тягового електропостачання;
- розробка рекомендацій щодо підвищення коефіцієнту потужності електровозу змінного струму та порівняння втрат потужності в системах тягового та допоміжного приводів базового та модернізованого електровозу змінного струму.

Предмет дослідження: Тяговий та допоміжний приводи електровозів змінного струму серій ВЛ-80^{Т, К}.

Об'єкт дослідження: динамічні процеси роботи тягового електроприводу з двигунами пульсуючого струму та приводу допоміжних машин з асинхронними двигунами електровозів змінного струму.

Методи дослідження. При виконанні дослідження використовувались наступні загальноприйняті методи: математичної статистики, теорії імовірності та спектрального аналізу – для аналізу гармонійних складових струму і напруги у ланцюгах тягового приводу та приводу допоміжних машин електровозу; теорії електричних машини – для побудови математичних моделей тягового приводу та приводу допоміжних машин; математичного моделювання – для створення

комплексної математичної моделі визначення гармонійних складових струмів та напруги систем тягового приводу та приводу допоміжних машин.

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримав подальшого розвитку метод визначення власної і взаємної індуктивності фаз асинхронного двигуна з несиметричними обмотками, заснований на балансі двох виразів магнітної енергії: виразу, записаного через індукцію, напруженість магнітного поля та геометричні параметри і виразу, записаного через параметри ланцюгів двигуна, за рахунок переходу від узагальненої до реальної електричної машини;

- отримав подальшого розвитку метод моделювання асинхронного двигуна, рівняння роботи якого записані в «загальмованих координатах» за рахунок вираження рівнянь для фазних струмів через відповідні потокозчеплення;

- вдосконалено науковий підхід до визначення гармонійних складових струму ланцюгів тягового приводу та приводу допоміжних машин на основі врахування електромагнітної сумісності цих приводів;

- вдосконалено науковий підхід до визначення складових струму і напруги в системах електричної тяги на основі адаптації методу Левінсона-Дарбіна до аналізу вищих гармонійних складових струму та напруги в системах тягового приводу та приводу допоміжних машин.

Практичне значення отриманих результатів. Для електричного транспорту практичне значення мають наступні напрацювання:

- схема керування гібридним КРП, що побудована на принципі врахування впливу якості струмознімання і режимів роботи електровозу на вищі гармонійні складові напруги та струму. Реалізація даної схеми дозволяє підвищити ефективність експлуатації електровозів змінного струму за рахунок підвищення якості спожитої електричної енергії;

- технічні рішення з вдосконалення керування гібридним КРП, зокрема, для електровозів серій ВЛ-80^{Т,К}, які запропоновані до впровадження в локомотивних депо Південно-Західної залізниці. Технічні рішення можуть бути також застосовані для таких електровозів, як АЕМ-7 виробництва фірми «Electro-Motive Dtesel», ALP-44 виробництва фірми «ASEA-Broun Boveri», що експлуатуються в США та електровозів серії 6G виробництва фірми «Alston», що експлуатуються в Китаї.

Результати дисертаційної роботи для використання у подальшому процесі розвитку енергозберігаючих систем та технологій на залізничному транспорті передано до «Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» та до ДП «Український науково-дослідницький інститут вагонобудування». Матеріали роботи використовуються у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи автором отримані особисто або при його безпосередній участі. Серед них – побудована в програмному пакеті MatLAB модель «Тягова підстанція –

контактна мережа - тяговий привод електровозу»; визначені взаємні та власні індуктивності обмоток статора розчіплювача фаз; спрощена система диференційних рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна шляхом вираження фазних струмів фазними поточкозчепленнями; розроблено модель асинхронного двигуна, що отримує живлення від неякісної системи живлення; розроблено модель системи допоміжного приводу електровозу; розроблено модель для дослідження взаємного впливу роботи систем тягового та допоміжного приводів; адаптовано алгоритм Левінсона-Дарбіна для визначення спектральних складових електровозу змінного струму; розроблено схему керування активною частиною гібридного компенсатора на основі алгоритму Левінсона-Дарбіна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на конференціях: «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті» (Київ, 2014); «Сучасні проблеми залізничного транспорту» (Київ, 2014), «Залізниця: вчора, сьогодні, завтра» (Київ, 2016), «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» (Одеса, 2018), «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». (Дніпро, 2019).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 13 наукових публікаціях, з них 6 – у фахових наукових виданнях України, 2 – у наукових періодичних фахових іноземних виданнях (з них 1 – в наукометричній базі Scopus), 5 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінку, з них основного тексту – 200, включаючи: 66 рисунків по тексту, 5 таблиць по тексту, 110 найменувань використаних джерел інформації на 14 сторінках; 2 додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами, наведено мету та основні задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі наведено аналіз шляхів поліпшення енергетичних показників роботи електровозів змінного струму. Вибрано напрям підвищення ефективності ЕРС змінного струму, заснований на підвищенні коефіцієнту потужності тягового приводу та приводу допоміжних машин.

Проведено аналіз методів щодо підвищення коефіцієнту потужності електровозів. Показано, що підвищення коефіцієнту потужності є можливим, зокрема, за допомогою застосування гібридного КРП.

Виконано аналіз робіт провідних світових вчених, що внесли вагомий вклад у теорію електричних процесів електроприводу змінного струму, зокрема: Б.Тихменєв, В.Кучумов, В.Покровський, В.Омельяненко, А.Лозановський,

В.Янов, С.Крамсков, Б.Любарський, Н.Ротанов, А.Савоськін, В.Литовченко, Н.Ардатський, С.Влас'євський, L.Gyugyi, E.C.Strucula, E.J.Stacey та інші вчені. Проаналізовано досвід практичного використання систем компенсації реактивної енергії в приводах електровозів змінного струму на основі робіт наступних науковців: J.Dixon, N.G.Hingorani, L.Gyugyi, T.J.E.Miller, Y.Song, A.Johns, A.M.Obais, J.Pasupuleti, K.Kahle, T.Larsson, P.Pourbeik, Л.Трахтман, Н.Єсін, А.Солодунов, Ю.Іньков, Н.Широченко, В.Татарниковим, З.Бібінеішвілі.

У роботах S.E.Kale, K.D.Joshi, F. Salah, A.Schuller, C.M.Flath, S.Gottwalt, H.Douglas, A.González-Gil, R.Palacin, P.Batty, X.Yang, B.Milešević, I.Uglašić, B.Filipović-Grčić, В.Сиченко, Ю.Железко, А.Жиленкова розглядався вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електроприводу на якість електричної енергії. За результатами аналізу стану вирішення проблеми у світовій науці і практиці сформульовано мету та задачі досліджень дисертації, вибрано методи вирішення науково-практичного завдання поліпшення енергетичних показників електровозів змінного струму за рахунок адаптованої до системи електропостачання компенсації реактивної потужності.

У другому розділі визначені основні фактори пониження коефіцієнту потужності на електровозах змінного струму, та попередньо наведені деякі теоретичні відомості. Встановлено, що ряд елементів тягового приводу є генераторами вищих гармонійних складових струму. Такими генераторами вищих гармонік виступають елементи силового кола, які мають нелінійні вольт-амперні та вебер-амперні характеристики. До елементів, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, в першу чергу, відносяться силові напівпровідникові діоди, які є основою тягової випрямної установки. До елементів тягового приводу, що мають нелінійні вебер-амперні характеристики, належать згладжуючий реактор та обмотки якоря і збудження тягового двигуна. Згладжуючий реактор має спрямлену спадну характеристику, оскільки його магнітне коло розімкнене.

Коефіцієнт потужності тягового приводу визначається відношенням активної потужності до повної

$$K_P = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_{1(1)} \cdot I_{1(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)}}{U_1 \cdot I_1} = K_{C1} \cdot \cos \varphi_{(1)}, \quad (1)$$

де S_1 - повна потужність, що споживається тяговим приводом з мережі; P_1 - активна потужність, що споживається тяговим приводом з мережі; U_1 - ефективне значення напруги; I_1 - ефективне значення струму; $I_{1(1)}$ - основна гармоніка струму; $U_{1(1)}$ - основна гармоніка напруги; $\varphi_{(1)}$ - фазовий кут зсуву між основними гармоніками напруги та струму; K_{C1} і $\cos \varphi_{(1)}$ - коефіцієнтами спотворення струму і фазового зсуву основних гармонійних складових відповідно.

Встановлені фактори, які зі сторони системи електропостачання здійснюють вплив на форму кривої напруги на струмоприймачі, серед яких: відстань від електровоза до тягової підстанції, знаходження або відсутність в даній фідерній

зоні іншого ЕРС, проходження фідерної зони іншим ЕРС, параметри контактної мережі, як «довгої лінії», тощо. Все це призводить до того, що напругу в контактній мережі слід розглядати як випадкову величину.

Оскільки в результаті аналізу факторів, що впливають на коефіцієнт потужності електровозу, показано, що зміна напруги на струмоприймачі є випадковим неергодичним процесом, було запропоновано для побудови системи керування активною частиною гібридного КРП застосовувати методи лінійного прогнозування, що дозволять адаптувати роботу компенсатора до зміни параметрів напруги системи тягового електропостачання.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню системи ділянки електрифікованої залізниці з електровозами, обладнаними гібридними КРП.

Для швидкості руху електровозу $v = 46,8 \text{ км/год}$, що відповідає роботі електровозів серій ВЛ-80^{Т,К} на 33-ій позиції, при нарузі контактної мережі $U_{KM} = 27,5 \text{ кВ}$ та віддаленні електровозу від тягової підстанції на $L = 50 \text{ км}$ в програмному середовищі MatLAB було виконане моделювання системи «Тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привод електровозу ВЛ-80Т,К».

В результаті моделювання отримані часові діаграми напруги та струму на струмоприймачі секції електровозу (рис. 1). Порівняння отриманих на моделі результатів з результатами, знятими експериментально спеціалістами ВНДІЗТ свідчить про адекватність розробленої моделі.

Для значень напруги та струму на струмоприймачі секції електровозу, що зняті на моделі, був розрахований коефіцієнт потужності тягового приводу, значення якого склало $K_p = 0,837$, що майже співпадає з паспортними даними електровозу ($K_p = 0,84$).

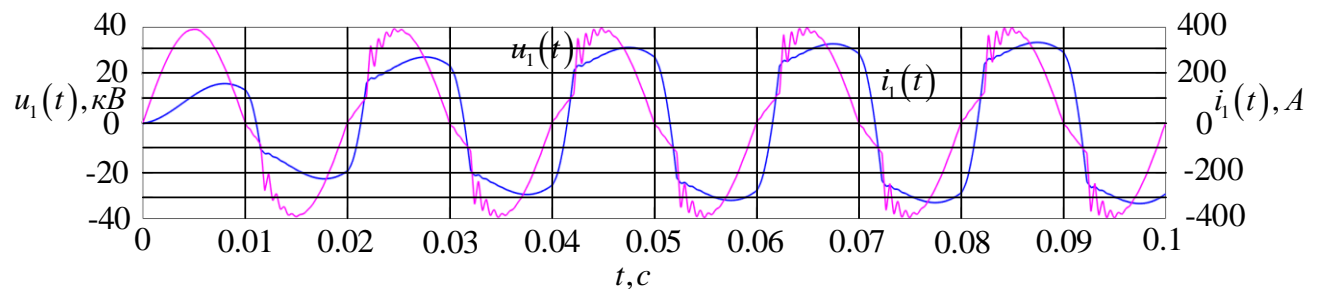


Рисунок 1 - Часові діаграми струму ($i_1(t)$) та напруги на струмоприймачі електровозу ($u_1(t)$), отримані в результаті моделювання

Виконане моделювання мотор-вентилятора, що є асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. Оскільки мотор-вентилятори, мотор-компресори і мотор-насоси системи допоміжного приводу електровозу отримують живлення від неякісної системи живлення (несиметрія напруг живлення, викликана несиметрією обмоток статора фазорозчіплювача та несинусоїдальна форма напруги на обмотці власних потреб тягового трансформатора) вибрано математичну модель асинхронного двигуна в «загальмованих координатах». Для підвищення стійкості алгоритму реалізації математичної моделі виконане зменшення кількості рівнянь моделі шляхом вираження фазних струмів двигуна

через фазні потокозчеплення. Модель мотор-вентилятора реалізована в програмному середовищі MatLAB. В результаті моделювання отримані часові діаграми швидкості обертання валу двигуна та момент на валу двигуна (рис. 2). Визначення номінальної швидкості обертання ($n = 1428,2 \text{ об / хв}$) та номінального моменту на валу двигуна ($M = 267,133 \text{ Н} \cdot \text{м}$) і порівняння їх значень з паспортними даними ($n = 1425 \text{ об / хв}; M = 268,07 \text{ Н} \cdot \text{м}$) свідчать про адекватність моделі.

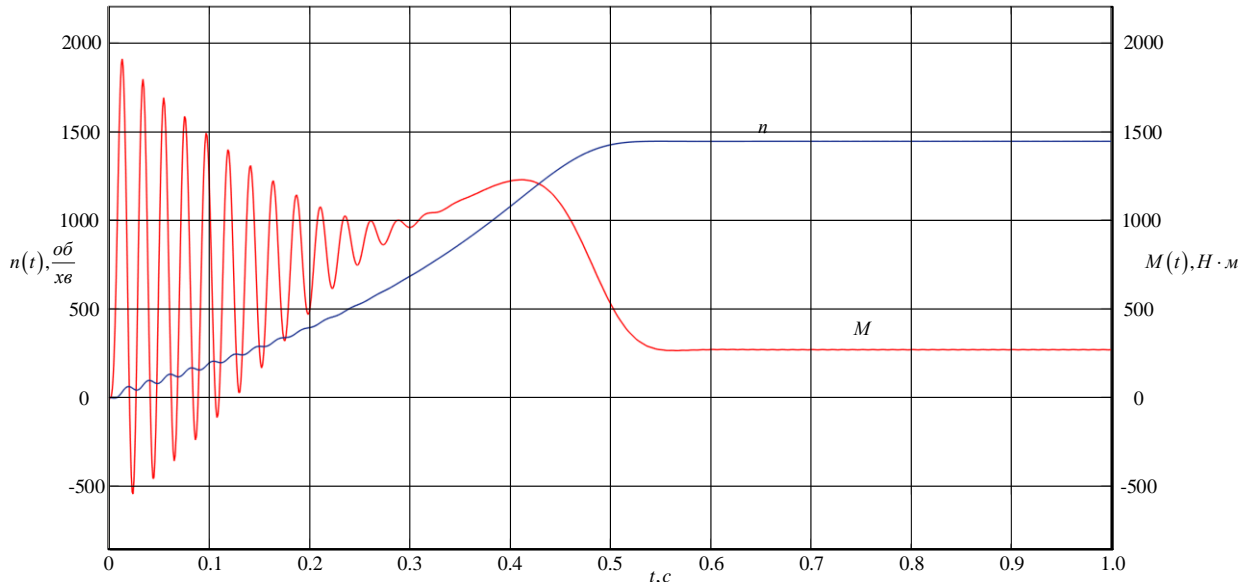


Рисунок 2 - Криві перехідного процесу для електромагнітного моменту (M) та обертів валу двигуна (n).

Доопрацьовано метод визначення власних і взаємних індуктивностей фаз статора та ротора асинхронного двигуна з несиметричними обмотками і їх зв'язків з механічними змінними, заснований на порівнянні двох виразів збереженої магнітної енергії. Порівняння результатів розрахунку взаємної індуктивності запропонованим методом і результатів, знятих експериментально, показали високу точність методу (похибка склала $\delta = -2,65\%$). Це покращить результати моделювання асинхронного двигуна, що має несиметричні обмотки при дослідженні роботи приводу допоміжних машин, так як фазорозчіплювач є асинхронною машиною з несиметричними обмотками статора.

Для режиму роботи системи допоміжних машин коли фазорозчіплювач працює в генераторному режимі, запропоновано новий підхід до моделювання приводу допоміжних машин, який полягає в заміні розчіплювача фаз системою несиметричних напруг. Це пов'язане з тим, що при включених тягових двигунах в установленому режимі завжди працюють мотор-вентилятори. Режим пуску фазорозчіплювача за тривалістю, в порівнянні з часом роботи в сталому режимі, є незначним і при дослідженні електромагнітних процесів в системі допоміжного приводу ним можна знехтувати. Також при дослідженні роботи приводу допоміжних машин не враховувалась робота мотор-компресора. Це пов'язано з періодичністю включення мотор-компресора.

Розраховані статорні струми, падіння напруг в ланцюгах статора та фазні електрорушійні сили фазорозчіплювача. За електрорушійними силами фазорозчіплювача визначені фазні напруги статора мотор-вентилятора.

Для умов експлуатації мотор-вентилятора, а саме – живлення від несиметричної системи напруг, виконано корекцію його моделі. Для аналізу динамічних процесів в асинхронному двигуні, що живиться від несиметричної системи напруг, система напруг живлення розкладено на нульову, пряму та зворотну послідовності.

Нульова послідовність розраховується за формулою

$$\dot{E}_{0A} = \dot{E}_{0B} = \dot{E}_{0C} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{sA} + \dot{E}_{sB} + \dot{E}_{sC}), \quad (3)$$

пряма послідовність

$$\dot{E}_{1A} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{sA} + a \cdot \dot{E}_{sB} + a^2 \cdot \dot{E}_{sC}); \quad \dot{E}_{1B} = a^2 \cdot \dot{E}_{1A}; \quad \dot{E}_{1C} = a \cdot \dot{E}_{1A}. \quad (4)$$

зворотна послідовність

$$\dot{E}_{2A} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{sA} + a^2 \cdot \dot{E}_{sB} + a \cdot \dot{E}_{sC}); \quad \dot{E}_{2B} = a \cdot \dot{E}_{2A}; \quad \dot{E}_{2C} = a^2 \cdot \dot{E}_{2A}, \quad (5)$$

де - $a = e^{-j120^\circ}$, \dot{E}_{sA} , \dot{E}_{sB} , \dot{E}_{sC} - фазні напруги статора.

Кожна послідовність напруг живить свій блок моделей, описаних вище. Результируючий момент є сумою моментів кожної послідовності.

З врахуванням зазначених змін в моделі мотор-вентилятора в середовищі Mathcad виконане моделювання роботи приводу допоміжних машин електровозу та побудовані залежності струму, що протікає через обмотку власних потреб та напруги на цій обмотці (рис. 3) з врахуванням форми кривої напруги на струмоприймачі, для яких розраховано коефіцієнт потужності допоміжного приводу електровозу. Значення коефіцієнту потужності склало $K_p = 0,755$.

Досліджено взаємний вплив роботи тягового при-воду та приводу допоміжних машин електровозу.

Напруга на тяговій обмотці трансформатора може бути визначена, як

$$u_{TO}(t) = u_2(t) - M \cdot k_{23} \cdot \frac{di_{OBI}(t)}{dt}, \quad (6)$$

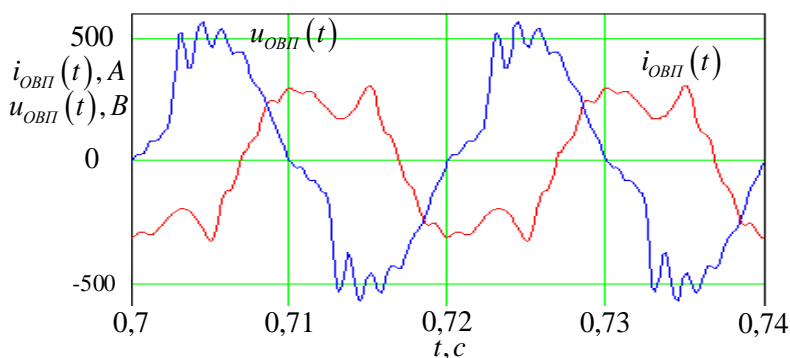


Рисунок 3 - Криві напруги ($u_{OBI}(t)$) і струму в обмотці власних потреб ($i_{OBI}(t)$) при відключених ТЕД

де $u_2(t)$ - миттєве значення напруги на тяговій обмотці при відключених допоміжних машинах; $i_{OBI}(t)$ - миттєве значення струму, що протікає в обмотці власних потреб; $k_{23} = 0,027$ - коефіцієнт зв'язку між тяговою обмоткою та обмоткою власних потреб; M - взаємна індуктивність між тяговою обмоткою та

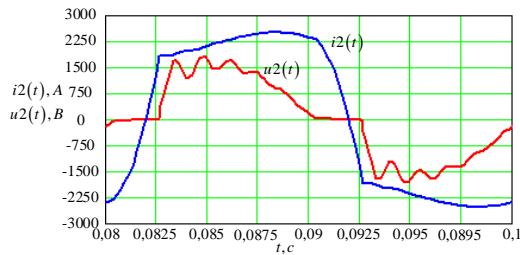


Рисунок 4 - Часові діаграма струму ($i_2(t)$) секції електро-возу напруги ($u_2(t)$) на вторинній обмотці тягового трансформатора при включених допоміжних машинах експлуатації електровозу

За допомогою спектральних складових, розрахованих та побудованих в програмному середовищі Mathcad, розраховане значення коефіцієнту потужності тягового приводу при включених допоміжних машинах, яке аналогічне значенню, розрахованому при виключених допоміжних машинах і рівним $K_p = 0,837$.

Виконано аналіз впливу системи тягового приводу на роботу приводу допоміжних машин. Напруга на обмотці власних потреб трансформатора визначається, як

$$u_{ОВП}(t) = u'_{ОВП}(t) - M \cdot k_{23} \cdot \frac{di_{ТО}(t)}{dt}, \quad (8)$$

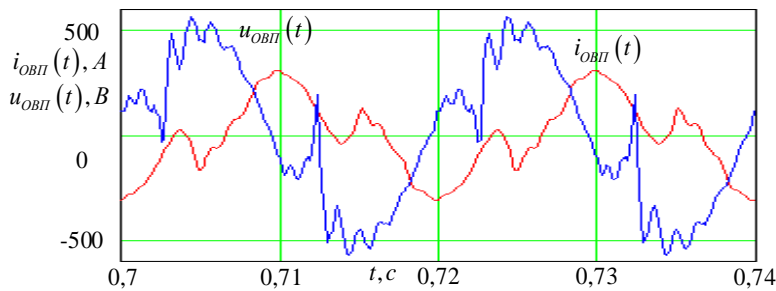


Рисунок 5 - Часові діаграми струму ($i_{ОВП}(t)$) та напруги ($u_{ОВП}(t)$) на обмотці власних потреб тягового трансформатора при включених тягових двигунах

зробити висновок, що форми кривих напруги та струму в обмотці власних потреб зазнали істотних змін. Це свідчить про те, що робота системи тягового приводу здійснює істотний вплив на роботу системи допоміжних машин.

За допомогою спектральних складових, розрахованих та побудованих в програмному середовищі Mathcad, розраховане значення коефіцієнту потужності допоміжного приводу при включених тягових двигунах, яке склало $K_p = 0,713$,

обмоткою власних потреб розрахована за формулою

$$M = \sqrt{L_2 \cdot L_3}, \quad (7)$$

де L_2 - індуктивність тягової обмотки; L_3 - індуктивність обмотки власних потреб.

Отримано залежності напруги і струму в тяговій обмотці трансформатора при включених допоміжних машинах (рис. 4).

Порівняння часових діаграм струму секції електровозу і напруги на вторинній обмотці тягового трансформатора при включених та при відключених допоміжних машинах показало, що привід допоміжних машин майже не здійснює впливу на тяговий привід. За допо-

могою спектральних складових, розрахованих та побудованих в програмному середовищі Mathcad, розраховане значення коефіцієнту потужності тягового приводу при включених допоміжних машинах, яке аналогічне значенню, розрахованому при виключених допоміжних машинах і рівним $K_p = 0,837$.

Виконано аналіз впливу системи тягового приводу на роботу приводу допоміжних машин. Напруга на обмотці власних потреб трансформатора визначається, як

$$u_{ОВП}(t) = u'_{ОВП}(t) - M \cdot k_{23} \cdot \frac{di_{ТО}(t)}{dt}, \quad (8)$$

де $u'_{ОВП}(t)$ - миттєве значення напруги на обмотці власних потреб при відключених тягових двигунах; $di_{ТО}(t)$ - миттєве значення струму, що протікає в тяговій обмотці.

Отримано залежності напруги і струму в обмотці власних потреб трансформатора при включених тягових двигунах (рис. 5). Порівняння рис. 4 та рис. 5 дало можливість

зробити висновок, що форми кривих напруги та струму в обмотці власних потреб зазнали істотних змін. Це свідчить про те, що робота системи тягового приводу здійснює істотний вплив на роботу системи допоміжних машин.

За допомогою спектральних складових, розрахованих та побудованих в програмному середовищі Mathcad, розраховане значення коефіцієнту потужності допоміжного приводу при включених тягових двигунах, яке склало $K_p = 0,713$,

що менше значення, розрахованого при виключених тягових двигунах ($K_p = 0,755$).

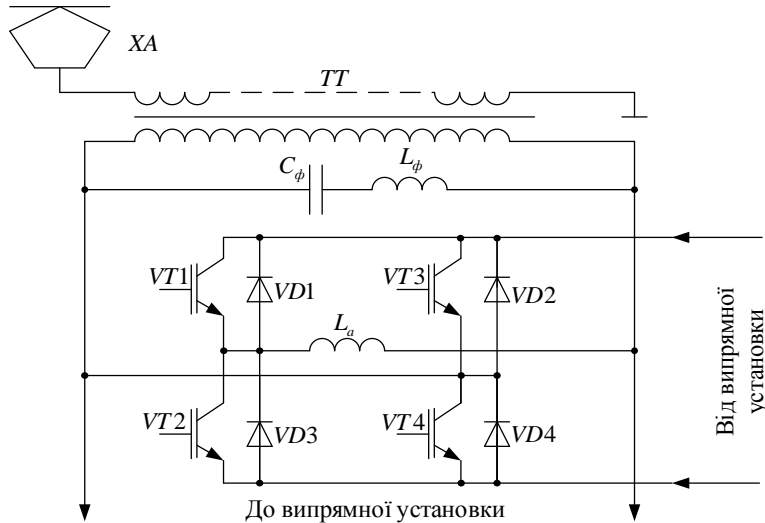


Рисунок 6 - Схема підключення гібридного фільтру



Рисунок 7 - Функціональна схема керування активною частиною КРП

складу сигналу керування для транзисторів інвертора, до складу блоку визначення гармонійних складових входить фільтр лінійного передбачення. Це дозволить виконати прогноз значення наступного відліку сигналу тягового струму та, не дивлячись на те, що процес зміни тягового струму має випадковий неергодичний характер, після фільтрації застосувати дискретне перетворення Фур'є.

Виконано аналіз методів реалізації фільтрів лінійного передбачення та запропоновано для прогнозування в системах електричної тяги спектральних складових використовувати метод Левінсона-Дарбіна, перевагами якого є висока стійкість алгоритму, незначні об'єми обчислення, можливість роботи з дійсними числами, незначна накопичувальна похибка обчислення.

Доопрацьовано та адаптовано метод Левінсона-Дарбіна для аналізу вищих гармонійних складових струмів і напруг в системах тягового приводу та приводу допоміжних машин.

В стандартних позначеннях алгоритм Левінсона-Дарбіна полягає в наступному.

Запропоновано принципіву схему гібридного компенсатора реактивної потужності (рис. 6).

Розраховано елементи пасивного фільтру, який складається з послідовно включених конденсатора ємністю C і дроселя з індуктивністю L .

Розраховано елементи силової частини активного фільтру, який являє собою автономний інвертор струму, що побудований на силових транзисторах $VT1 - VT4$.

Розроблено структурну схему системи керування активним фільтром (рис. 7).

На відміну від структурних схем-прототипів, робота яких основана на видаленні із спектру тягового струму основної гармоніки, інверсії гармонік, що залишилися і формування з отриманого спектрального

Задаються початкові умови

$$E_0 = R_0. \quad (9)$$

Коефіцієнти автокореляції визначається за допомогою виразу

$$R_i = \sum_{l=1}^L y(l) \cdot y(l-i), \quad (10)$$

де $y(l)$ - дискретний відлік величини, що досліджується, в даний момент часу;
 $y(l-i)$ - дискретний відлік величини, що досліджується, із затримкою на i тактів.

Послідовно на кроці ітерації i ($i=1,2,\dots,K$) здійснюються обчислення по рекурентним формулам:

$$r_i = \frac{R_i - \sum_{k=1}^{i-1} a_k^{(i-1)} \cdot R_{i-k}}{E_{i-1}}; \quad (11)$$

$$a_k^{(i)} = r_i; \quad (12)$$

$$a_k^{(i)} = a_k^{(i-1)} - r_i \cdot a_{i-k}^{(i-1)}, \quad 1 \leq k \leq i-1; \quad (13)$$

$$E_i = (1 - r_i^2) \cdot E_{i-1}. \quad (14)$$

Передбачення збільшується на одиницю з кожним кроком, поки не досягне значення K . Остаточне рішення визначається на кроці K співвідношенням

$$a_k = a_k^{(K)}, \quad 1 \leq k \leq K. \quad (15)$$

Суть методу визначення спектральних складових струмів і напруг в ланцюгах тягового приводу електровозів змінного струму, що пропонується, полягає в наступному:

- на статистичний ряд вхідних даних $x(n)$ накладається вікно Хеммінга довжиною L ;

- приймається, що передатна функція лінійної системи рівна одиниці;

- складається систему рівнянь для вхідних даних $x(n)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{a}_1 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-1) \cdot y(l-1) + \bar{a}_2 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-2) \cdot y(l-1) + \dots + \bar{a}_K \cdot \sum_{l=1}^L y(l-K) \cdot y(l-1) = \sum_{l=1}^L y(l) \cdot y(l-1); \\ \bar{a}_1 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-1) \cdot y(l-2) + \bar{a}_2 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-2) \cdot y(l-2) + \dots + \bar{a}_K \cdot \sum_{l=1}^L y(l-K) \cdot y(l-2) = \sum_{l=1}^L y(l) \cdot y(l-2); \\ \vdots \\ \bar{a}_1 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-1) \cdot y(l-K) + \bar{a}_2 \cdot \sum_{l=1}^L y(l-2) \cdot y(l-K) + \dots + \bar{a}_K \cdot \sum_{l=1}^L y(l-K) \cdot y(l-K) = \sum_{l=1}^L y(l) \cdot y(l-K), \end{array} \right. \quad (16)$$

- вибирається порядок прогнозування K та із складеної системи рівнянь виділяється перший блок розміром $(K \times K)$ для даних з індексом від 0 до $K-1$;

- для кожного рівняння першого блоку даних розраховуються коефіцієнти фільтру прогнозування $a_k^{(i)}$ за допомогою методу Левінсона-Дарбіна та розраховується значення вихідного сигналу за виразом

$$\bar{y}(n) = \sum_{k=1}^K a_k^{(i)} \cdot y(n-k); \quad (17)$$

- здійснюється перехід до наступного блоку даних, збільшивши індекс строки кожного рівняння на одиницю;
- для кожного рівняння блоку даних розраховуються коефіцієнти фільтру прогнозування $a_k^{(i)}$ за допомогою методу Левінсона-Дарбіна. Значення вихідного сигналу розраховуються тільки для останнього рівняння блоку;
- кількість блоків, що обробляються, буде рівною $L - K - 1$;
- визначаються спектральні складові для отриманого ряду стаціонарних детермінованих вихідних сигналів за допомогою дискретного перетворення Фур'є

$$\bar{Y}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} \bar{y}(n) \cdot e^{-j \cdot n \cdot k \cdot \frac{2 \cdot \pi}{L}}, \quad (18)$$

де k - номер гармонійної складової; $\bar{Y}(k)$ - значення гармонійної складової k , зображене в комплексній формі.

Система керування виконана програмно в середовищі MatLAB. Залежності напруги та струму в тяговій обмотці трансформатора наведені на рис. 8.

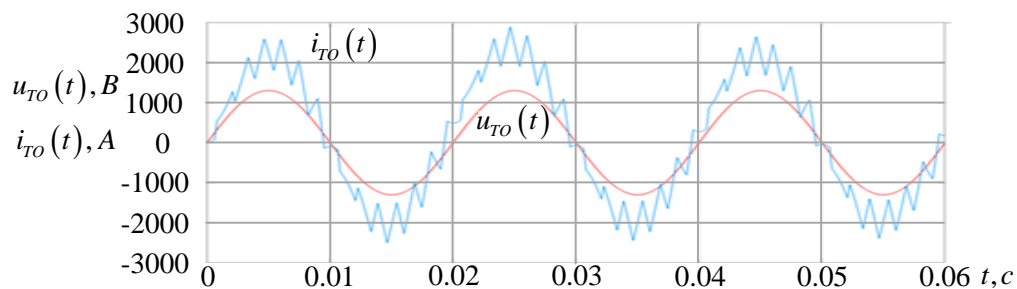


Рисунок 8 - Залежності напруги та струму в тяговій обмотці трансформатора

Розрахований коефіцієнт потужності тягового приводу показує, що впровадження розробленого гібридного КРП призведе до збільшення коефіцієнту потужності тягового приводу до $K_p = 0,969$.

Запропоновано в приводі допоміжних машин замість розчіплювача фаз застосувати статичний перетворювач, який складається з керованого випрямляча, фільтру та автономного інвертора напруги. Отримано криві напруги та струму обмотки власних потреб трансформатора (рис. 9).

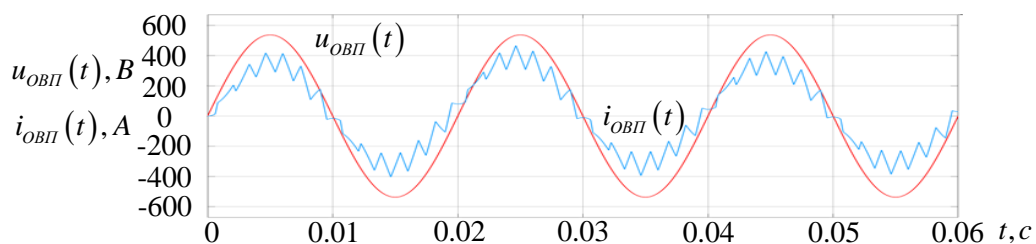


Рисунок 9 - Залежності напруги та струму на обмотці власних потреб

Розрахований коефіцієнт потужності допоміжного приводу показує, що впровадження розробленого статичного перетворювача замість фазорозчіплювача призведе до збільшення коефіцієнту потужності допоміжного приводу до $K_p = 0,977$.

Четвертий розділ дисертації присвячено оцінці втрат потужності в тяговому та допоміжному приводах електровозу до впровадження гібридного КРП і статичного перетворювача та після впровадження.

Коефіцієнт корисної дії тягового приводу електровозу розраховується за як

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}, \quad (19)$$

де P_2 - механічна потужність на валу тягового двигуна; ΔP - втрати потужності в тяговому приводі.

Коефіцієнт потужності визначається як

$$\chi_{ТП} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_{ДВ} + \Delta P}{S_1}, \quad (20)$$

де S_1 - потужність, що споживається мережевою обмоткою тягового трансформатора; ΔP - втрати потужності в тяговому приводі.

Втрати в тяговому приводі без компенсатора визначається за виразом

$$\Delta P = \Delta P_{ТР} + \Delta P_B + \Delta P_{ЗР} + \Delta P_{ДВ} \quad (21)$$

де $\Delta P_{ТР}$ - втрати в тяговому трансформаторі; ΔP_B - втрати в випрямній установці; $\Delta P_{ЗР}$ - втрати в згладжуючому реакторі; $\Delta P_{ДВ}$ - втрати в тягових двигунах.

Втрати в тяговому приводі з компенсатором визначається як

$$\Delta P = \Delta P_{ТР} + \Delta P_B + \Delta P_{ЗР} + \Delta P_{ДВ} + \Delta P_{АФ}, \quad (22)$$

Розраховані та побудовані залежності ККД тягового приводу та коефіцієнту потужності від корисної потужності на валу тягових двигунів до та після модернізації (рис. 10).

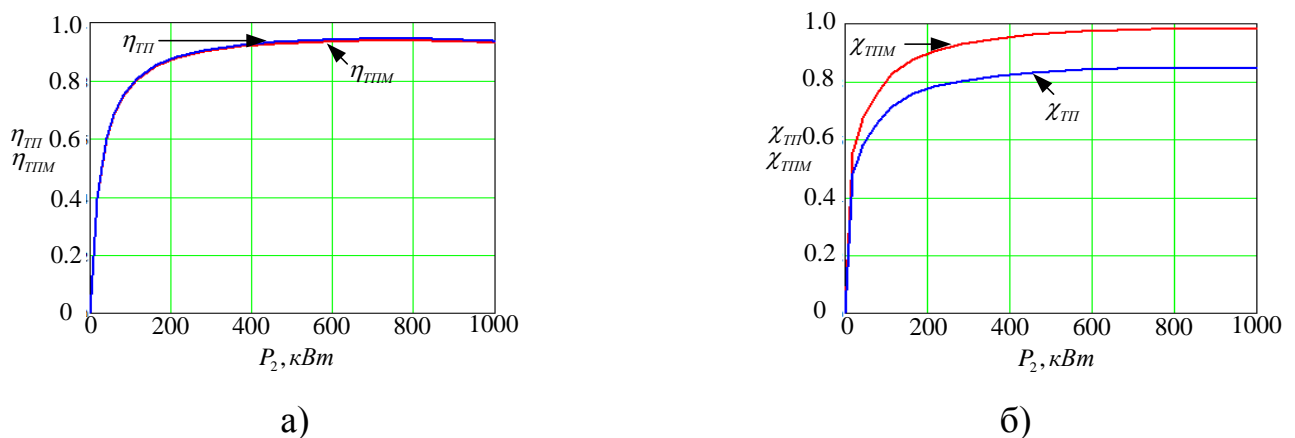


Рисунок 10 - Залежність ККД тягового приводу секції електровозу ВЛ-80^К (а) та залежність коефіцієнта потужності (б) тягового приводу електровозу від потужності на валу двигунів до та після модернізації

Розраховані втрати активної потужності в приводі допоміжних машин до впровадження статичного перетворювача замість фазорозчіплювача і після впровадження.

ККД приводу допоміжних машин до модернізації визначається за виразом

$$\eta_{ПДМ} = \frac{P_a}{P_a + \Delta P_{\text{доп.пр.}}} = \frac{P_a}{P_a + \Delta P_{TR} + \Delta P_{\text{ад}} + \Delta P_{\text{рф}}}, \quad (23)$$

де P_a - механічна потужність на валу машин допоміжного приводу; ΔP_{TR} - втрати в обмотці допоміжних машин тягового трансформатора; $\Delta P_{\text{ад}}$ - втрати в асинхронних двигунах мотор-вентиляторів і мотор-компресора; $\Delta P_{\text{рф}}$ - втрати в розчіплювачі фаз.

Коефіцієнт потужності допоміжного приводу до модернізації буде складати

$$\chi_{\text{доп.пр.}} = \frac{P_2}{S_1} = \frac{P_{DM} + \Delta P_{\text{доп.пр.}}}{S_1} \quad (24)$$

де S_1 - потужність обмотки допоміжного приводу тягового трансформатора; P_{DM} - потужність допоміжних машин електровозу; $\Delta P_{\text{доп.пр.}}$ - втрати потужності в допоміжному приводі.

Втрати потужності в допоміжному приводі після модернізації

$$\Delta P_{\text{доп.пр.}} = P_a + \Delta P_{TR} + \Delta P_{\text{ад}} + \Delta P_{\text{В.АИН}} + \Delta P_{\phi}, \quad (25)$$

де $\Delta P_{\text{В.АИН}}$ - втрати в керованому випрямлячі і автономному інверторі напруги статичного перетворювача; ΔP_{ϕ} - втрати в фільтрі перетворювача.

Розраховані та побудовані залежності ККД приводу та коефіцієнту потужності від корисної потужності на валу мотор-вентилятора до та після модернізації (рис. 11).

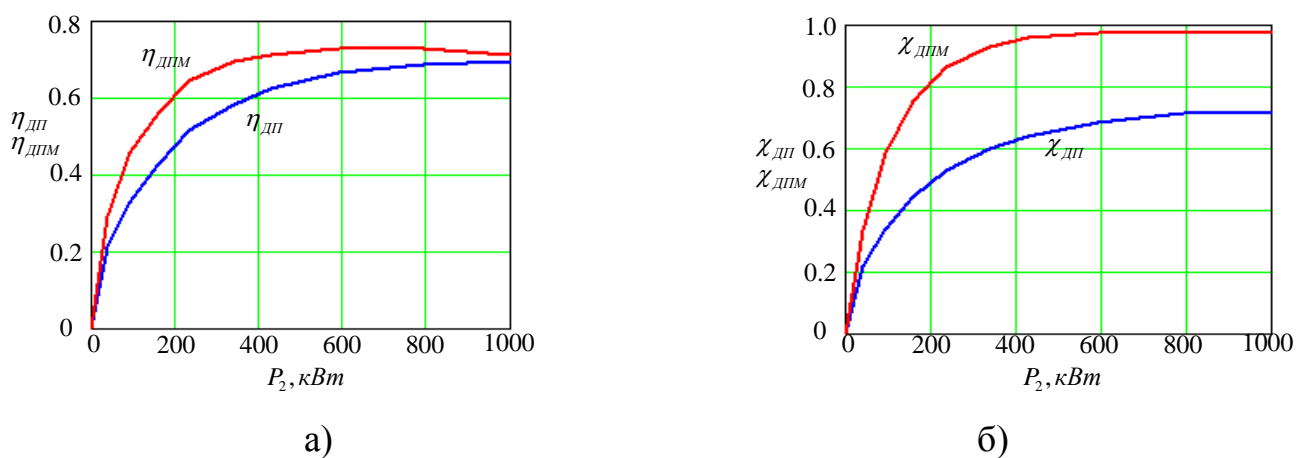


Рисунок 11 - Залежність ККД допоміжного приводу секції електровозу ВЛ-80^К (а) та залежність коефіцієнту потужності (б) допоміжного приводу електровозу від потужності на валу двигунів до та після модернізації

Сумарне зменшення втрат повної потужності при впровадженні КРП та модернізації системи живлення допоміжних машин складе $1839, \text{kB} \cdot \text{A}$. Це свідчить про доцільність впровадження розробленого компенсатора реактивної потужності та запропонованої модернізації системи живлення допоміжних машин на електровозах серії ВЛ-80^{Т,К}.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене актуальне та важливе науково-технічне завдання – підвищення коефіцієнту потужності електровозів змінного струму шляхом впровадження КРП з адаптованою до параметрів напруги контактної мережі системою керування.

В роботі отримані наступні основні результати.

1. Проведеним комплексом досліджень факторів, які сприяють зниженню коефіцієнта потужності на електровозах змінного струму отримано, що найбільший вплив здійснюють відставання тягового струму від напруги та несинусоїдальність напруги та струму. Аналіз напрямків підвищення коефіцієнту потужності електровозів змінного струму показав, що найбільш ефективним є застосування ГКРП. На підставі аналізу напрямків підвищення коефіцієнту потужності електровозів змінного струму встановлено, що на форму кривої напруги в контактній мережі та, відповідно, і на спектральний склад напруги здійснює вплив ряд експлуатаційних факторів, серед яких: відстань від електровоза до тягової підстанції, знаходження або відсутність в даній фідерній зоні іншого ЕРС, проходження фідерної зони іншим ЕРС, параметри контактної мережі, як «довгої лінії», тощо. Розглянуті фактори призводять до доцільності врахування зміни напруги в контактній мережі як випадкового неергодичного процесу, до якого неможливо застосування методів перетворення Фур'є при аналізі спектрального складу напруги та струму. Запропоновано при побудові системи керування активною частиною КРП використовувати методи кореляційного аналізу;

2. Засобами моделювання електромеханічних процесів, що відбуваються в системі тягового приводу електровозу змінного струму та визначенням з їх використанням коефіцієнту потужності приводу встановлено, що значення коефіцієнту потужності тягового приводу (0,837) не відповідає вимогам НКРЕ КП (не менше 0,9).

3. Проведено вдосконалення математичної моделі за рахунок використання методу визначення та врахування власних і взаємних індуктивностей асинхронного двигуна з несиметричними обмотками при переході від узагальненої електричної машини до реальної. Порівняння даних, отриманих шляхом моделювання, з експериментальними результатами показало високу збіжність (відносна похибка склала 2,65%), що дозволяє із значною достовірністю моделювати роботу розчіплювача фаз в системі допоміжних машин при проведенні подальших досліджень.

Отриманий за допомогою моделювання динамічних процесів, що відбуваються в системі допоміжного приводу електровозу змінного струму, коефіцієнт потужності допоміжного приводу складає $\chi_{\text{дон.пр.}} = 0,755$, що не відповідає вимогам НКРЕ КП (не менше 0,9);

4. При дослідженні процесів взаємного впливу роботи тягового та допоміжного приводу встановлено, що робота допоміжних машин майже не впливає на роботу тягового приводу, а робота тягового приводу здійснює істотний вплив на енергетичні показники приводу допоміжних машин (коефіцієнт потужності зменшився до значення 0,713).

При модернізації системи живлення врахування взаємного впливу роботи тягового та допоміжного приводу дозволило скорегувати роботу статичного перетворювача і отримати підвищення коефіцієнту потужності приводу допоміжних машин.

5. Розроблена принципова схема ГКРП з керованою активною частиною, робота якої адаптована до параметрів тягового електропостачання. Силова схема запропонованого ГКРП складається з автономного інвертору струму та з пасивного LC-фільтра, що дозволило за допомогою LC-фільтру зменшити кут відставання між напругою тягової обмотки трансформатора та тяговим струмом та зменшити вміст вищих гармонійних складових тягового струму.

6. Розроблено схему керування активною частиною КРП, в якій запропоновано включити до складу блоку визначення гармонійних складових фільтр лінійного передбачення на основі доопрацьованого методу Левінсона-Дарбіна. Використання фільтру лінійного передбачення дозволяє спрогнозувати наступний відлік сигналу тягового струму та, не зважаючи на випадковий та неергодичний характер процесу зміни тягового струму, після фільтрації застосувати дискретне перетворення Фур'є. По отриманому значенню коефіцієнту потужності тягового приводу з КРП встановлено, що впровадження розробленого ГКРП призводить до збільшення коефіцієнту потужності тягового приводу до $K_p = 0,969$.

7. З метою збільшення коефіцієнту потужності в приводі допоміжних машин запропоновано провести заміну розчіплювача фаз статичним перетворювачем, який складається з керованого випрямляча, фільтру та автономного інвертора напруги. Згідно проведених розрахунків використання статичного перетворювача забезпечує збільшення коефіцієнту потужності приводу до $K_p = 0,977$.

8. Проведено оцінювання ефективності використання запропонованих заходів модернізації через розраховані втрати активної потужності базового та модернізованого електровозу. Сумарне зменшення втрат повної потужності при впровадженні компенсатора реактивної потужності та модернізації системи живлення допоміжних машин складає $1839, \text{кВ} \cdot \text{А}$. Проведені дослідження свідчать про доцільність впровадження розробленого компенсатора реактивної потужності та запропонованої модернізації системи живлення допоміжних машин на електровозах серії ВЛ-80^{Т,К}.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гулак С. А., Слепухин А. Ю., Черных Ю. М., Ермоленко Э. К. Метод уменьшения высших гармоник в напряжении питания тягового привода электровозов переменного тока с коллекторными двигателями/С.А. Гулак, А.Ю. Слепухин, Ю.М. Черных, Э. К. Ермоленко //«Вестник БелГУТ: Наука и транспорт». Научно-практический журнал. – Гомель: БелГУТ, 2014. - №1 (28). – С. 11 – 12.

Здобувачем запропоновано адаптувати систему автоматичного керування з параметричним налаштуванням, побудовану на основі функцій Ляпунова, для зменшення вищих гармонік в напрузі живлення електровозів змінного струму з колекторними двигунами.

2. Гулак, С., Ермоленко, Е. Модель системи «Тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привод електровоза серії ВЛ-80^{Т,К}»/С. Гулак, Е. Ермоленко //Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 28. - К.: ДЕТУТ, 2016. - С. 99-109.

Здобувачем запропоновано модель «Тягова підстанція – контактна мережа – тяговий привод електровозу», виконана програмному пакеті MatLAB.

3. Гулак, С.О., Ермоленко, Черних, Ю.М., Усватов, М.О. Визначення динамічних змінних узагальненого асинхронного двигуна/С.О. Гулак, Е.К. Ермоленко, Ю.М. Черних, М.О. Усватов//Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – К.: ДЕТУТ, 2016. – №. 29. – С. 143-153.

Здобувачем запропоновано метод розрахунку консервативних та неконсервативних змінних, необхідних для побудови моделі узагальненої асинхронної машини в $\alpha - \beta$ і $d - q$ координатах.

4. Гулак С., Ермоленко Е., Гаюр А., Сидоренко О. Модель мотор-вентилятора електровоза ВЛ-80к при несиметрії фазних напруг та несинусоїдальній напрузі живлення/С.О. Гулак, Е.К. Ермоленко, А.В. Гаюр, О.В. Сидоренко//Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 30. К.: ДЕТУТ, 2017. – С. 139 - 148.

Здобувачем запропоновано перетворення системи диференціальних рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна в загальмованих координатах для побудови математичної моделі асинхронного двигуна, напруга живлення якого має несинусоїдальний характер.

5. Гулак С.О., Ермоленко Е.К. Розробка математичної моделі для дослідження роботи приводу допоміжних машин електровозів серій ВЛ-80^{Т,К}, що працюють в несинусоїдальному та несиметричному режимах/С.О. Гулак, Е.К. Ермоленко//Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - №2 (243). – 2018. – С. 80 – 92.

Здобувачем запропоновано спрощену систему диференціальних рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна шляхом вираження фазних струмів

фазними потокощепленнями та розраховані фазні електрорушійні сили розціплювача фаз при роботі чотирьох мотор-вентиляторів.

6. Гулак, С. Методичні рекомендації щодо застосування моделі фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні/С.О. Гулак//Транспортні системи і технології. – К.: ДУІТ, 2018. - №1(32). – С. 4-13.

Здобувачем запропоновано рекомендації щодо застосування моделі фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні.

7. Гулак, С., Єрмоленко, Е., Заїка, Д. Аналіз впливу електрорухомого складу на показники якості електроенергії тягової системи електропостачання. /С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Д.О. Заїка//Транспортні системи і технології – К.: ДУІТ, 2019. - №1(33). – С. 156-170.

Здобувачем запропоновано методика розрахунку фактичного внеску спотворення електрорухомим складом показників якості тягової системи електропостачання.

8. Goolak, S., Gerlici, J., Sapronova, S., Tkachenko, V., Lack, T., Kravchenko, K. Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives/S. Goolak, J Gerlici, S Sapronova, V Tkachenko, T Lack, K Kravchenko//Communications-Scientific letters of the University of Zilina. – 2019. – Vol. 21. – Issue. 2. – P. 24-31.

Здобувачем запропоновано методика розрахунку фазних і взаємних індуктивностей асинхронного двигуна як функцій геометричних параметрів обмоток.

9. Гулак С.О. Обґрунтування можливості застосування адаптивних методів керування для побудови системи керування комбінованим компенсатором реактивної потужності/С.О. Гулак//Матеріали XLIV наук.-практ. конф. [«Сучасні проблеми залізничного транспорту»]. – К.: ДЕТУТ. - 2014. – Ч. 1. –С. 197.

10. Гулак С.О. Обґрунтування застосування активних методів компенсації реактивної енергії на електровозах змінного струму серії ВЛ80к,т/С.О. Гулак//Матеріали наук.-практ. конф. [«Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті»]. – К.: ДЕТУТ. - 2014. – С. 39.

11. Гулак С. О. Єрмоленко Е. К. Розробка моделі допоміжного приводу електровозів змінного струму ВЛ80т,к для дослідження електромагнітних процесів з метою визначення впливу вищих гармонійних складових на режими роботи допоміжних машин/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко//Матеріали XLVII наук.-практ. конф. [«Залізниця: вчора, сьогодні, завтра»]. – К.: ДЕТУТ. - 2016. – С. 93.

12. Гулак С.О., Єрмоленко Е.К., Черних Ю.М. Математична модель приводу допоміжних машин електровозів серії ВЛ-80Т,К для дослідження роботи приводу в несиметричному та несинусоїдальному режимах/С.О. Гулак, Е.К. Єрмоленко, Ю.М. Черних//Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф. [«Транспорт і логістика: проблеми та рішення»]. – Одеса: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет. - 2018. – С. 68.

13. Гулак С.О., Черних Ю.М., Черняк Ю.В. Визначення власних і взаємних індуктивностей в асинхронному двигуні з несиметричними обмотками/ С.О.

Гулак, Ю.М. Черних, Ю.В. Черняк//Матеріали 79 Міжнародної наук.-практ. конф. [«Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»]. – Дніпро: ДНУЗТ, 2019. – С. 131.

АНОТАЦІЇ

Гулак С.О. Підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму за рахунок адаптованої до системи електропостачання компенсації реактивної потужності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.09 – «Електротранспорт» 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України. Харків, 2020.

Дисертація присвячена створенню наукових основ вибору оптимальних параметрів та режимів роботи системи компенсації реактивної потужності на електровозах змінного струму та адаптації роботи системи компенсації до параметрів тягового електропостачання.

Для виконання досліджень розроблені математичні та програмно-орієнтовані моделі роботи тягового та допоміжного приводу електровозу змінного струму (на прикладі електровозу ВЛ-80^К). Відмінними особливостями цих моделей є можливість врахування взаємного впливу роботи тягового приводу і допоміжних агрегатів та режимів роботи електровозу. Виконано експериментальне підтвердження адекватності розроблених імітаційних моделей з реальним тяговим та допоміжним приводом для рухомого складу.

На основі розроблених моделей досліджено електромагнітні процеси в тяговому та допоміжному приводах, що дозволило якісно та кількісно їх оцінити.

Розроблено силову схему гібридного КРП та схему керування його активної частини. Основою системи керування є метод визначення спектрального складу тягового струму на основі алгоритму Левінсона-Дарбіна, що дозволить адаптувати роботу компенсатора до параметрів системи електропостачання. Запропоновано в системі допоміжного приводу застосувати статичний перетворювач замість фазорозчіплювача. Розрахунок втрат повної потужності до та після модернізації підтвердив економічну доцільність впровадження компенсатора реактивної потужності та застосування статичного перетворювача в системі допоміжних машин замість фазорозчіплювача.

Розроблені наукові положення є ефективним інструментом модернізації існуючого парку вантажних електровозів змінного струму серій ВЛ-80^Т та ВЛ-80^К і створення нового електрорухомого складу залізниць. Результати дисертаційної роботи впроваджені у «Науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» (м. Київ), ДП «Український науково-дослідницький інститут вагонобудування» (м. Кременчук) та у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (м. Київ).

Ключові слова: електрорухомий склад, електротранспорт, тяговий привод, допоміжний привод, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, нелінійність, несинусоїдальність, несиметрія.

Гулак С.А. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока за счет адаптированной к системе электроснабжения компенсации реактивной мощности. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.09 «Электротранспорт» 141 - электроэнергетика, электротехника и электромеханика) - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» МОН Украины. Харьков, 2020.

Диссертация посвящена созданию научных основ выбора оптимальных параметров и режимов работы системы компенсации реактивной мощности на электровозах переменного тока и адаптации работы системы компенсации с параметрами тягового электроснабжения.

Для выполнения исследований разработаны математические и программно-ориентированные модели работы тягового и вспомогательного приводов электровоза переменного тока (на примере электровоза ВЛ-80^К). Отличительными особенностями этих моделей является возможность учета взаимного влияния работы тягового привода и вспомогательных агрегатов и режимов работы электровоза. Выполнено экспериментальное подтверждение адекватности разработанных имитационных моделей с реальным тяговым и вспомогательным приводами для подвижного состава.

На основе разработанных моделей исследованы электромагнитные процессы в тяговом и вспомогательном приводах, что позволило качественно и количественно их оценить.

Разработана силовая схема гибридного компенсатора реактивной мощности и схема управления его активной части. Основой системы управления является метод определения спектрального состава тягового тока на основе алгоритма Левинсона-Дарбина, что позволит адаптировать работу компенсатора к параметрам системы электроснабжения. Предложено в системе вспомогательного привода применить статический преобразователь вместо фазорасщепителя. Расчет потерь полной мощности до и после модернизации подтвердил экономическую целесообразность внедрения компенсатора реактивной мощности и применения статического преобразователя в системе вспомогательных машин вместо фазорасщепителя.

Разработанные научные положения являются эффективным инструментом модернизации существующего парка грузовых электровозов переменного тока серий ВЛ-80^Т и ВЛ-80^К и создания нового электроподвижного состава железных дорог. Результаты диссертационной работы внедрены в «Научно-исследовательском и конструкторско-технологическом институте железнодорожного транспорта» АО «Укрзалізниця» (г. Киев), ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» (г. Кременчуг) и в учебном

процессе Государственного университета инфраструктуры и технологий (г. Киев).

Ключевые слова: электроподвижной состав, электротранспорт, тяговый привод, вспомогательный привод, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, нелинейность, несинусоидальность, несимметрия.

Goolak S.O. Increasing the energy performance of AC electric locomotives through reactive power compensation adapted to the power supply system. - Qualifying research paper as manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy) in specialty 05.22.09 - "Electrotransport" 141 - Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine. Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to creation of scientific bases of choice of optimum parameters and modes of operation of the system of reactive power compensation on electric locomotives operating on alternating current.

The factors that have the greatest impact on the quality of traction power supply from the side of the electric rolling stock of alternating current are analyzed. Factors that cause the greatest distortion of the voltage form of the catenary include higher harmonic components, which are introduced into the traction power supply system by electric rolling stock.

It is shown that such factors as poor current collection, passage of electric rolling stock of the feeder zone, the presence of several units of electric rolling stock in one feeder zone, modes of operation of electric rolling stock lead to the fact that the process of voltage change in the catenary is nondeterministic for the analysis of the spectral composition of the traction current of an electric locomotive, the application of classical Fourier transform methods is incorrect.

Analysis of circuit solutions for compensation of reactive power consumed by electric rolling stock of alternating current showed that to date the most optimal solution is the use of hybrid compensators. In such compensators, the passive part reduces the phase shift between the voltage of the secondary winding of the traction transformer and the traction current, and the active part removes the higher harmonic components of the traction current. The active part of the hybrid compensator is a stand-alone current inverter and an inverter control system. The control system performs spectral analysis of the traction current, forms an algorithm for the generation of autonomous inverter higher harmonics, the same amplitude but antiphase to the higher harmonics of the traction current. Existing control systems use Fourier transform methods to determine the spectral components of the traction current, but in real operating conditions of the electric rolling stock they are incorrect. It is proposed to apply the methods of correlation spectral analysis to determine the spectral components of the traction current.

Mathematical and program-oriented models of work of traction and auxiliary drive of an electric locomotive of an alternating current (on the example of the locomotive VL-80k) have been created. The unique features of these models are the

ability to take into account the mutual influence of the traction and auxiliary drives and the operating modes of electric locomotives.

The technique of calculating the parameters of asynchronous motors for asymmetrical stator windings has been improved. The relationship between such parameters as the scattering inductance and the mutual inductance with the geometric parameters of the windings is shown. This technique was used to create a mathematical model for the drive of auxiliary machines, in particular for the simulation of the phase splitter.

It is proposed to investigate electrodynamic processes in auxiliary machine actuators in steady state operation, to replace the phase splitter with an asymmetrical voltage system that feeds the motors of fans.

The mutual influence of traction actuator and auxiliary motors operation was investigated. The results of the study made it possible to clarify the spectral composition of the current in the traction and auxiliary drive circuits.

The use of a hybrid reactive power compensator in traction drive circuits is substantiated. The elements of the passive and active part of the compensator are calculated. A control system for the active part of the reactive power compensator has been developed, which is based on the block of determination of harmonic components of traction current and suppression in the current spectrum of zero and higher harmonic components.

A new scientific approach to the determination of the spectral components of the traction current is proposed. It is based on the application of the linear prediction method of Levinson-Darbin. This approach allows to take into account the random nature of the voltage and, as a consequence, the traction current, and to adapt the work of the compensator to the voltage of the contact network. The application of this approach also allows taking into account such factors as the nature of the mode of operation of the electric locomotive, the passage of the boundaries of the sections of the contact network, etc.

Adjusted mathematical model of traction actuator when using of reactive power compensator, calculated and constructed amplitude-frequency and phase-frequency spectral characteristics of voltage and current on the traction winding of the transformer. The power factor of the upgraded traction actuator is calculated.

The justified is use of a static converter instead of a phase splitter in the auxiliary drive power supply system. The system of mathematical modeling of the auxiliary drive of the electric locomotive is executed; the amplitude-frequency and phase-frequency spectral characteristics of the voltage on the winding of the transformer and the current flowing through the winding of its own needs are calculated and constructed. The power factor of the upgraded auxiliary actuator is calculated.

The losses of active and full power in the traction and auxiliary drives of the locomotive were calculated before and after the modernization. The dependences of the efficiency and the power factor of the drives before and after the modernization were calculated. The results obtained indicate that the efficiency of the traction drive after the use of the compensator decreased by 0,6% a factor and the power factor

increased by 3,2% . Auxiliary drive efficiency after upgrading increased by 1,5% , and power factor increased by 26,4% .

The developed scientific provisions are an effective tool for modernization of the existing fleet of electric locomotives of the VL-80t and VL-80k series and the creation of a new electric rolling stock of railways. The results of the dissertation were implemented at the Scientific Research Design and Engineering Institute of Railway Transport of OJSC “Ukrzaliznytsya” (Kyiv), SE «Ukrainian Research Institute of Carriage» (Kremenchuk) and in the educational process of the State University of Infrastructure and Technology (Kyiv).

ГУЛАК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ
ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА РАХУНОК АДАПТОВАНОЇ ДО СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Підписано до друку 08.10.2020 р.

Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.

Зам. № 2106-00/20

Надруковано в редакційно-видавничому відділі

Державного університету інфраструктури та технологій

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготовлювачів видавничої продукції Серія ДК № 6148 від 18.04.18 р.
03049, м. Київ-49, вул. Івана Огієнко, 19