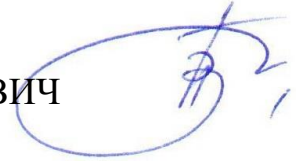


Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

ПАНЧЕНКО ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ



УДК 629.4.083:001.76

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ
МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ЛОКОМОТИВІВ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Панченко Сергій Володимирович,
Український державний університет
залізничного транспорту, кафедра автоматики та
комп'ютерного телекерування рухом поїздів,
професор кафедри.

Опоненти: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Віктор Петрович,
Державний університет інфраструктури та технологій,
кафедра електромеханіки та рухомого складу
залізниць, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор
Боднар Борис Євгенович,
Український державний університет науки і
технологій, кафедра локомотивів, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор;
Любарський Борис Григорович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», кафедра електричного
транспорту та тепловозобудування, завідувач кафедри.

Захист відбудеться “16” травня 2025 р. о 10.⁰⁰ год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Реферат розісланий “14” квітня 2025 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Прохорченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна, як одна з провідних держав у галузі залізничного транспорту в Європі, має великий потенціал для впровадження ресурсозберігаючих технологій в процесі експлуатації локомотивів. Однак залізнична галузь України функціонує в умовах обмежених фінансових ресурсів, значного зношення тягового рухомого складу (ТРС) і високих витрат на його утримання. Близько 70 % локомотивів мають вік понад 30 років, що перевищує нормативні терміни служби. В таких умовах продовження життєвого циклу локомотивів є ключовим завданням. Ефективна експлуатація локомотивів шляхом впровадження ресурсозберігаючих методів і технологій дозволить зменшити експлуатаційні витрати, підвищити надійність роботи ТРС і уникнути значних витрат на його оновлення.

Україна є імпортозалежною щодо енергоресурсів, і залізничний транспорт споживає значну частину електроенергії та дизельного пального. Зростання цін на енергоресурси та їх дефіцит, спричинений воєнними діями та кризами, вимагають пошуку способів зниження енергоспоживання. Ресурсозберігаючі технології, які включають системи моніторингу енергоефективності та оптимізації експлуатаційних режимів роботи, дозволяють скоротити витрати енергії та знизити собівартість перевезень.

Більшість залізничних колій, систем тягового енергопостачання та локомотивів в Україні експлуатуються у зношеному стані. Це спричиняє надмірно високу частоту технічних відмов, що тягне за собою зниження швидкості руху поїздів і зростання ризиків аварій. У таких умовах критично важливим є впровадження систем моніторингу технічного стану ТРС у реальному часі для попередження аварійних ситуацій і планування ремонтних робіт.

Україна активно інтегрується у світові екологічні тренди, спрямовані на скорочення викидів парникових газів і впровадження енергоефективних технологій. Локомотиви, особливо дизельні, є джерелом значних викидів CO₂, що суперечить цілям сталого розвитку та європейським екологічним стандартам. Застосування ресурсозберігаючих технологій дозволить не лише знизити енергоспоживання, а й зменшити екологічний вплив залізничного транспорту.

Руйнування транспортної інфраструктури внаслідок воєнних дій на території України підвищує важливість залізничного транспорту для перевезення пасажирів, військових вантажів і гуманітарної допомоги. В таких умовах надійність роботи ТРС стає критично важливою. Ресурсозберігаючі технології можуть забезпечити стабільність роботи локомотивів навіть у складних умовах завад та обмежених ресурсів.

Отже, дослідження спрямоване на розвиток ресурсозберігаючих технологій у сфері експлуатації локомотивів, є надзвичайно актуальним для України з огляду на економічні, енергетичні, екологічні та соціальні виклики. Впровадження таких технологій дозволить не лише покращити функціонування залізничної галузі, а й сприятиме сталому розвитку транспортної інфраструктури в умовах інтеграції до ЄС і подолання наслідків військових дій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 07.04.2021 р. № 321-р., наукових досліджень в рамках грантової програми «UK-Ukraine R&I twinning» за темою «Комплексна оптимізація залізничних вантажних перевезень в Україні: залізничні шпали, рухомий склад та логістика» (ДР № 0123U102700), у якому автор брав участь як відповідальний виконавець, та науково-дослідних робіт, у яких автор брав участь як виконавець, а саме: «Система стандартів безпеки праці. Вимоги безпеки під час технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів та рефрижераторного рухомого складу» (ДР №0122U000287) та «Розроблення програмного забезпечення для убезпечення конфіденційної інформації» (ДР №0125U001109).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вирішення науково-прикладної проблеми формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їхнього тягового обладнання.

Для досягнення заданої мети в роботі поставлено такі задачі наукових досліджень:

- провести аналіз сучасних вітчизняних і закордонних методів і технічних засобів експлуатації локомотивів та існуючих наукових підходів щодо їхнього удосконалення;
- розробити математичну модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному ТЕД, що дозволить провести аналітичний та числовий опис технічного стану обмоток статора АД шляхом аналізу спектрального складу струму ПЧ – АД;
- розробити імітаційну модель АД для аналізу пускових та несиметричних режимів роботи і формування зразкових баз даних системи моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації;
- провести імітаційне моделювання процесу векторного керування асинхронним ТЕД для дослідження впливу аварійних режимів експлуатації двигунів на їхні енергетичні показники, робочі характеристики та життєвий цикл;
- запропонувати завадостійкі методи моніторингу та контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складних завад;
- провести синтез пристрою оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою, для виявлення пошкоджень обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі;
- провести синтез пристрою оптимального приймання зондувального сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади для здійснення моніторингу технічного стану ТЕД під час експлуатації;
- розробити математичну модель процесу розповсюдження зондувальних сигналів, що дозволить провести аналітичний та числовий опис їхніх параметрів у будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму і контролювати його технічний стан під час експлуатації;

- розробити метод моніторингу ТЕД постійного струму для вчасного виявлення можливих ушкоджень двигунів у процесі експлуатації та вжиття заходів щодо їх усунення;

- синтезувати нейрорегулятор NARMA-L2 для системи векторного керування ТЕД для визначення показників характеристик двигунів з метою оптимізації режимів їхньої роботи;

- удосконалити систему моніторингу електрообладнання локомотивів для підвищення її завадостійкості та точності контролю технічного стану ТЕД у реальному часі та енергоефективності експлуатації в умовах локомотивного депо;

- провести техніко-економічне обґрунтування ефективності впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів в експлуатаційному парку локомотивів.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації тягового рухомого складу в умовах дії обмежень щодо наявності енергетичних та матеріальних ресурсів.

Предмет дослідження – завадостійкі методи і технічні засоби моніторингу та контролю в реальному часі технічного стану тягового обладнання локомотивів.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на використанні таких методів: теорія електричних кіл, теорія диференціальних рівнянь та чисельні методи розрахунків для моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні; теорія електричних машин, теорія прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є, використання пакетів моделювання ANSYS, MathCAD, Matlab/Simulink для моделювання впливу перехідних процесів і аварійних режимів роботи на технічний стан тягових двигунів локомотивів; теорія оптимального приймання сигналів і математична статистика для синтезу пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану ТЕД; методи гармонічного аналізу для створення моделей завод, що впливають на роботу систем моніторингу ТЕД; основи теорії нейронних мереж для синтезу нейрорегулятора NARMA-L2 асинхронного ТЕД.

Наукова новизна одержаних результатів. Розвинуто наукові основи з формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їхнього тягового обладнання, що дозволить подовжити «життєвий цикл» локомотивів і забезпечить збільшення обсягів перевезень вантажів у сучасних умовах.

Вперше:

- розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному ТЕД, що дозволило провести аналітичний та числовий опис технічного стану обмоток статора АД шляхом аналізу спектрального складу струму ПЧ – АД;

- розроблено імітаційну модель АД, яка дозволяє виконати аналіз пускових та несиметричних режимів роботи для формування зразкових баз даних системи моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації;

- запропоновано завадостійкий метод моніторингу та контролю технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складних завад, що дозволило виявляти пошкодження двигунів на ранній стадії їх утворення;

- синтезовано пристрій оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою, що дозволило виявляти пошкодження обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі;

- запропоновано метод моніторингу ТЕД постійного струму, який базується на введенні в кола живлення двигунів зонduючого гармонічного сигналу і спостереження викликаного ним струму, що дозволило вчасно виявляти їх можливі ушкодження в процесі експлуатації та вживати заходів щодо їх усунення;

- розроблено математичну модель процесу розповсюдження зондувальних сигналів, що дозволило провести аналітичний та числовий опис їхніх параметрів у будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму і виконати синтез пристрою контролю його технічного стану під час експлуатації в умовах дії завад.

Дістали подальшого розвитку:

- імітаційна модель процесу векторного керування асинхронним ТЕД, що дозволило дослідити результати впливу аварійних режимів експлуатації двигунів на їхні енергетичні показники, робочі характеристики та життєвий цикл;

- синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи векторного керування ТЕД, що дозволило визначити показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту ТЕД як в перехідних процесах, так і при стрибкоподібному накиданні навантаження з метою оптимізації режимів роботи двигуна.

Удосконалено:

- пристрій оптимального приймання зонduючого сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади, що дозволило визначити їхні характеристики та здійснювати моніторинг технічного стану ТЕД під час експлуатації;

- систему моніторингу електрообладнання локомотивів, що дозволило підвищити її завадостійкість і точність контролю технічного стану ТЕД в реальному часі та енергоефективність в умовах локомотивного депо.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений комплекс ресурсозберігаючих завадостійких методів та засобів контролю технічного стану тягового обладнання локомотивів дає змогу у реальному часі в умовах наявності складних завад здійснювати моніторинг та контроль ефективності роботи ТЕД у процесі експлуатації. Це дозволило:

- скоротити витрати електроенергії на тягу поїздів шляхом оптимізації режимів роботи ТЕД;

- за рахунок виявлення ушкоджень ТЕД на ранній стадії завадити появи аварійних режимів їх роботи та зупинці поїздів на ділянках залізниць;

- здійснювати технічне обслуговування та ремонт ТЕД за фактичним станом.

Розроблені імітаційні моделі пускових, несиметричних і аварійних режимів роботи асинхронних ТЕД дозволяють сформувати зразкові бази даних для

наступного контролю та моніторингу їхнього технічного стану в процесі експлуатації.

Визначення залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку дозволило адекватно оцінити вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів.

Удосконалено та запатентовано відмовостійкий колійний індуктивний датчик (Патент України 127127), який може бути використано у системах для контролю стану ділянки залізничної колії (вільно, зайнято), системах контролю та обліку роботи транспортних засобів, пристроях рахунку осей, вимірювання швидкості та прискорення рухомого складу.

Практичне значення отриманих результатів підтверджене відповідними актами впровадження на підприємствах у регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» (м. Харків) та в навчальний процес кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки і Навчально-наукового центру освіти дорослих Українського державного університету залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем, або за його безпосередньої участі. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1] – визначення характеру комутаційних процесів в системі ПЧ-АД; [2] – визначення середньорічного споживання електричної енергії на тягу при впровадженні швидкісного руху; [3] – формування виразу цільової функції відповідно до визначеного критерію оптимальності; [4] – імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат; [5] – визначення річних втрат потужності сонячної електростанції тягової підстанції; [6] – моделювання впливу несиметрії мережі на характеристики тягового асинхронного двигуна; [7] – порівняльний аналіз показників роботи залізничного та автомобільного транспорту України; [8] – алгоритм прогнозування оцінки зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів перевезень вантажів завдяки подовженню «життєвого циклу» локомотивів; [9] – отримання виразу для визначення струму конденсатора трифазного, автономного, дворівневого інвертора напруги через струми фаз навантаження; [10] – врахування додаткових втрат потужності, спричинених дією вищих гармонік струму в обладнанні електротехнічного комплексу фотоелектричної станції; [11] – розроблення імітаційної моделі векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом; [12] – розроблення 3D моделі та дослідження роботи статичної фотоелектричної системи встановленої на даху тягової підстанції; [13] – одержання характеристик фотоелектричної станції за зміни температурного режиму та ступеня опромінення фотомодулів; [14] – отримання діаграми зайнятості частотної області струмами завад; [15] – визначення часових співвідношень між сигналом та імпульсною завадою з урахуванням початку та кінця інтервалу спостереження; [16] – конкретизація сформованої цільової функції стосовно ситуацій наявності та відсутності зондувального сигналу; [17] – реалізація алгоритму навчання нейромережі регулятора на основі авторегресії з ковзаючим

середнім NARMA-L2; [18] – визначення спектру вхідних параметрів та задавання їхніх величин для блоку пульта керування моделі тепловозу ЧМЕЗ; [19] – синтез оптимального приймаючого пристрою інформаційних сигналів тональних рейкових кіл, які спостерігаються на фоні адитивної п'ятикомпонентної завади; [20] – розроблення функціональної схеми реєстратора відмовостійкого колійного індуктивного датчика; [21] – аналіз фаз роботи пристрою накопичення енергії у разі його бортового розміщення при оптимізації пікового споживання тягової потужності електропоїзда метрополітену; [22] – проведений аналіз застосування різних типів накопичувачів енергії на рухомому складі; [23, 27] – дослідження варіантів впровадження альтернативних джерел в системи електропостачання рухомого складу залізниць та 3D модель будівлі тягової підстанції з інсталюваними сонячними панелями; [24] – визначення узагальненого критерію оцінки ефективності, який характеризує інформаційну спроможність процесу автоматичного управління і контролю тягового рухомого складу; [25] – проведений аналіз систем накопичення тягової енергії локомотивів; [26] – розроблення концепції інтелектуальної системи тягового електропостачання, яка забезпечує моніторинг і керування переданням електроенергії до тягової мережі; [28, 32] – моделювання двигуна постійного струму в програмному комплексі ANSYS та дослідження можливостей використання нейрорегулятора в системі керування тяговим електроприводом; [29-31] – оцінка якісних властивостей кореляційно-регресійної моделі залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку та вартісна оцінка доцільності впровадження системи контролю технічного стану вітчизняних локомотивів; [33, 34] – порівняльний аналіз різних типів регуляторів швидкості та часові характеристики активної та реактивної потужностей тягового електродвигуна локомотива з нейрорегулятором швидкості та ПІ-регулятором швидкості; [35] – аналіз можливості формування тестового сигналу в діапазоні частот струму, завади мають малі амплітуди; [36] – визначення переліку параметрів кожної з рухомих одиниць, які визначаються за допомогою точкових колійних датчиків. Дослідження, висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на 12 наукових конференціях: 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2019) (Czech Republic, Ceske Budejovice); IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2020) (Ukraine, Kyiv); International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) (Ukraine, Kharkiv); 32 Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Україна, м. Харків); 9 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект», НТУ «ХПІ», 2022 (Україна, м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції ФЕНІКС-2022 «Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність» НТУ «ХПІ», 2022 (Україна, м. Харків); XXV Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія-2022», Східноукраїнський національний

університет ім. В. Даля, 2022 (Україна, м. Сєверодонецьк); 18 Науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика», УкрДУЗТ, 2022 (Україна, м. Харків); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту», ХНУМГ, 2022 (Україна, м. Харків); 16 Міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», ІТРК, НАУ, 2023 (Україна, м. Київ); 15 Міжнародній науково-практичній конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», НУ ЛП, 2023 (Україна, м. Львів), 11 Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» НТУ «ХПІ, 2024 (Україна, м. Харків).

У повному обсязі результати дисертаційної роботи обговорені та схвалені на розширеному семінарі кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки УкрДУЗТ.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 36 наукових працях: 21 основній праці, з яких 16 статей у наукових фахових виданнях України; 4 наукових статтях, що індексуються наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS (з них 3 – третього квартилю (Scopus Q3) та 1 – WoS); 1 – в іноземному періодичному науковому виданні; 1 патенті України на винахід та 15 публікаціях, які додатково відображають наукові результати досліджень.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація має вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел з 257 найменувань і 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 358 сторінок, у тому числі 326 сторінок основного тексту, 20 таблиць, 86 рисунків, 32 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, об'єкт, предмет і завдання дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про апробації роботи і публікації основних результатів.

У першому розділі проаналізовано проблеми ресурсозбереження в процесі експлуатації тягового рухомого складу залізниць. Шляхом порівняльного аналізу встановлено, що середній вік локомотивів в Україні становить 40 років, що більше ніж в 2 рази порівняно з розвинутими країнами. Визначено, що модернізація локомотивів значно знижує експлуатаційні витрати і підвищує ефективність ТРС та дозволяє продовжити «життєвий цикл» ще на 10-15 років. Проаналізовані сучасні методи та засоби формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації ТРС. Проведений аналіз умов функціонування та причин відмов ТЕМ, що дозволило визначити ключові фактори, які впливають на їхню надійність, термін служби та ефективність роботи. Досліджені методи та засоби моніторингу енергоефективності роботи ТРС залізниць. Проаналізовані системи електропостачання залізниць, що

містять у своєму складі відновлювальні джерела енергії. Окреслені проблеми і перспективи розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів.

У питання впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів і подовження життєвого циклу локомотивів значний внесок зробили науковці та фахівці багатьох науково-дослідних закладів і ЗВО: Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця» (м. Київ), Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків), Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро), Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків), Національного транспортного університету (м. Київ), Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Київ) та ін. За кордоном над питаннями інтеграції ресурсозберігаючих технологій на локомотивах та моторвагонному рухомому складі працюють такі компанії: Alstom, Siemens Mobility, General Electric, Bombardier Transportation, Stadler Rail, Hitachi Rail, CAF, Hyundai Rotem, Mitsubishi Heavy Industries, Kawasaki Heavy Industries, Wabtec Corporation, CRRC Corporation та ін.

Питання ресурсозбереження в процесі експлуатації локомотивів та подовження їхнього життєвого циклу висвітлені у роботах: М. М. Бабаєва, О. Б. Бабаніна, Б. Є. Боднара С. Г. Буряковського, О. Л. Голубенка, Г. К. Гетьмана, Ю. М. Дацуна, Д. С. Жалкіна, М. І. Капіци, Ю. Є. Калабухіна, О. С. Крашенініна, Б. Г. Любарського, В. Г. Маслієва, С. В. Мямліна, В. І. Носкова, В. І. Омеляненко, С. В. Панченка, В. Г. Пузиря, О. М. Сінчука, Е. Д. Тартаковського, В. П. Ткаченка, О. В. Устенка, М. В. Хвороста, G. Acampora, P. Bonissone, L. Brown, M. Cipek, M. Edwards, A. Fayad, R. Furuta, P. Gołębiowski, W. Gunsellmann, S. Hillmansen, M. Iden, Z. Jiang, Z. Kljaic, S. Lebedevas, G. Li, H. Liang, V. Martinis, T. Painter, R. Peterson, Q. Qingquan, Z. Zhong-Xi та ін.

Виокремлені перспективні напрямки розвитку ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів, основними з яких є інтеграція гібридних систем, розвиток та удосконалення систем моніторингу енергії технічного стану локомотивів, рекуперативне гальмування в поєднанні з накопичувачами енергії, вдосконалення паливних систем та використання альтернативних видів палива.

За результатами всебічного аналізу масиву публікацій встановлено, що питанням використання заводозахисних систем моніторингу параметрів локомотивів не було приділено достатньої уваги. З огляду на це є актуальною проблема формування ресурсозберігаючої структури взаємодії локомотива із зовнішніми системами. Важливими елементами цієї структури є: система електропостачання локомотивного депо з інтегрованими ВДЕ, ресурсозберігаюча система керування локомотивом і система моніторингу локомотива.

Це зумовлює необхідність детального розгляду цього питання як одного з найбільш ефективних ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи проведено моделювання впливу перехідних процесів і аварійних режимів на технічний стан тягових двигунів локомотивів.

На сьогодні у частотно-керованих асинхронних двигунах знаходять широке застосування трифазні дворівневі автономні інвертори напруги, які порівняно з багаторівневими мають ряд недоліків, а саме, більш низький ККД, меншу вихідну потужність і більший вміст вищих гармонік у навантаженні та мережі живлення.

Це обумовило їх подальше дослідження з метою зниження рівня гармонік, підвищення ККД, а також забезпечення можливості довгострокового прогнозування надійності роботи в реальному масштабі часу та моделювання електричних перехідних процесів у топологічних елементах кола трифазного дворівневого автономного інвертора напруги (рисунок 1), що дасть змогу проводити аналіз динамічних режимів роботи пристроїв зі складними комутаціями з метою підвищення їхньої енергоефективності.

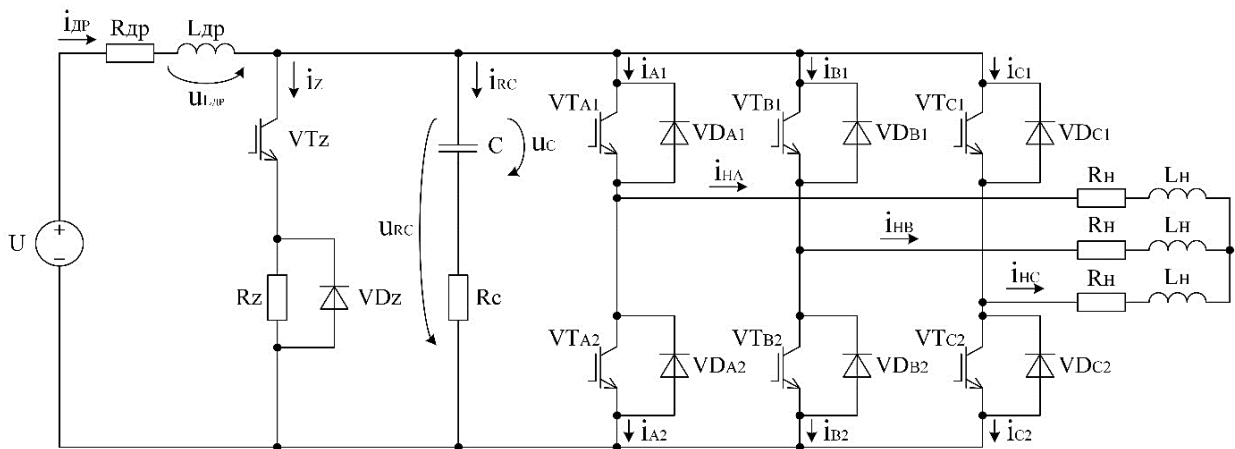


Рисунок 1 – Трифазний дворівневий автономний інвертор напруги

Для визначення будь-якого струму та напруги у трифазному дворівневому автономному інверторі напруги та у його навантаженні замінено напругу u_{RC} на колі CR_C на залежне джерело електрорушійної сили (ЕРС) e_{RC} , і застосовано відомий прийом перенесення цього джерела до інших гілок схеми. У результаті вихідну схему, подану на рисунку 1, фрагментовано на три залежні підсхеми, подані на рисунку 2.

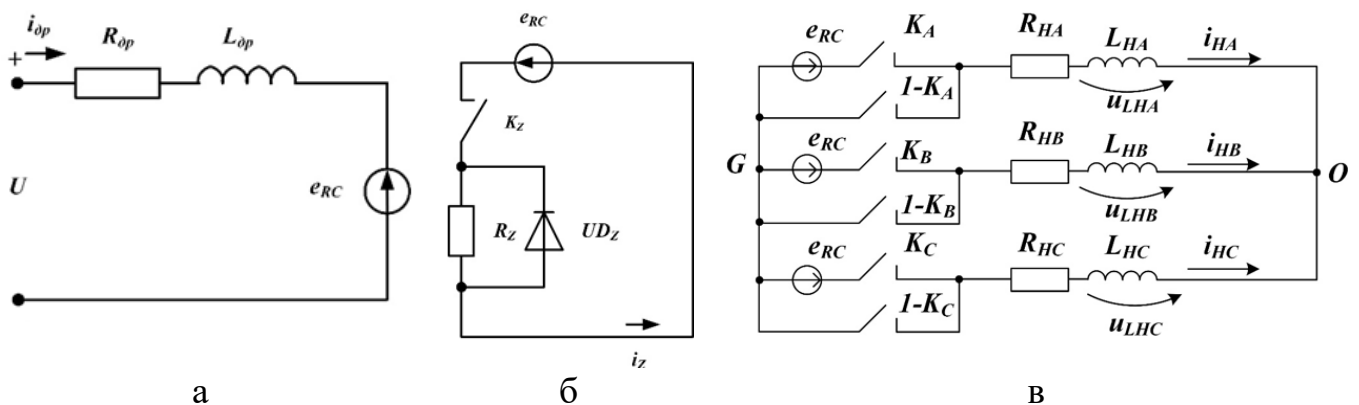


Рисунок 2 – Фрагменти залежних підсхем трифазного дворівневого автономного інвертора напруги

Для визначення операторних зображень фаз А, В та С замінено позначення ключових транзисторів VT_Z , VT_{A1} , VT_{B1} , VT_{C1} , VT_{A2} , VT_{B2} , VT_{C2} на позначення ідеальних ключів відповідно K_Z , K_A , K_B , K_C , $(1 - K_A)$, $(1 - K_B)$, $(1 - K_C)$. Ідентифікатори ключів служать одночасно і кодами стану кожного з них: верхні ключі замкнені при $K_A=1$, $K_B=1$, $K_C=1$, у цей же час $(1 - K_A)=0$, $(1 - K_B)=0$, $(1 - K_C)=0$, що означає розімкненість відповідних нижніх ключів.

У результаті перетворень отримані струми навантаження фаз А, В та С:

$$I_{HA}(p) = \frac{(K_A - K_B) \cdot \frac{u_C(0+)}{p} + (K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p) \cdot Q(p)}{Y} + \frac{(K_A - K_B) \cdot (K_B - K_C) \cdot Z_{RC}(p) N(p)}{D(p)} + \frac{(K_A - K_B) \cdot Z_{RC}(p) \cdot L_{\partial p} i_{\partial p}(0+)}{D(p) Z_{\partial p}(p)} + \frac{N(p) Z_{HB}(p) + L_{HA} i_{HA}(0+) - L_{HB} i_{HB}(0+)}{Y}, \quad (1)$$

$$\text{де } D(p) = \left(R_C + \frac{1}{pC} \right) \cdot \left[\frac{1}{B} + \frac{1}{Z_{\partial p}(p)} \right] + 1;$$

$$N(p) = \frac{(K_B - K_C) \left[\frac{u_C(0+)}{p} + Z_{RC}(p) \cdot Q(p) \right] + L_{HB} i_{HB}(0+)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)} - \frac{L_{HC} i_{HC}(0+) - \frac{(K_B - K_C) Z_{RC}(p) L_{\partial p} i_{\partial p}(0+)}{Z_{\partial p}(p) \cdot D(p)}}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)};$$

$$Y = \frac{(K_A - K_B)^2 \cdot Z_{RC}(p)}{D(p)} - \frac{(K_A - K_B) \cdot (K_B - K_C) Z_{RC}(p) M(p)}{D(p)} + Z_{HA}(p) + Z_{HB}(p) [1 + M(p)].$$

$$I_C(p) = I_A(p) \cdot M(p) - N(p) \quad (2)$$

$$I_B(p) = -I_A(p) - I_C(p), \quad (3)$$

$$\text{де } M(p) = \frac{(K_A - K_B)(K_B - K_C) \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} - Z_{HB}(p)}{(K_B - K_C)^2 \cdot \frac{Z_{RC}(p)}{D(p)} + Z_{HB}(p) + Z_{HC}(p)}.$$

Інші струми знайдено з урахуванням поточної комбінації ключів K_A , K_B і K_C . Результати математичного моделювання у програмі MathCAD 15 роботи системи ПЧ–АД, а саме струмів та їхнього спектрального складу при симетричному навантаженні, наведено на рисунках 3 та 4.

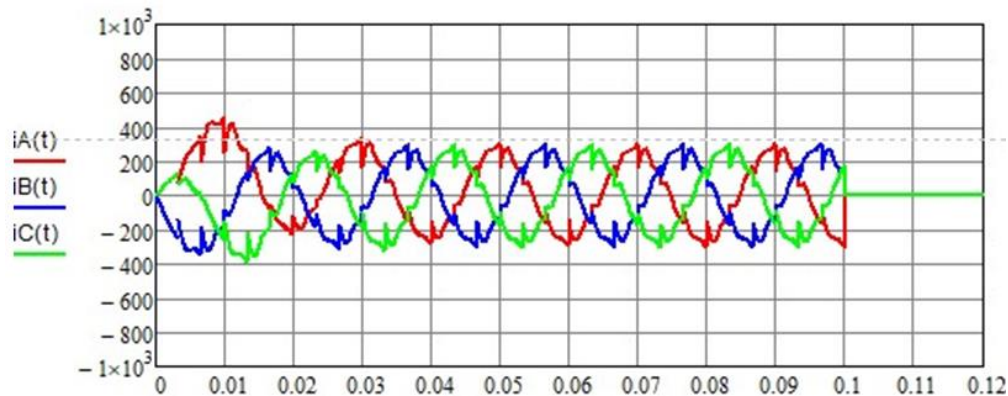


Рисунок 3 – Форми струмів в системі ПЧ–АД при симетричному навантаженні

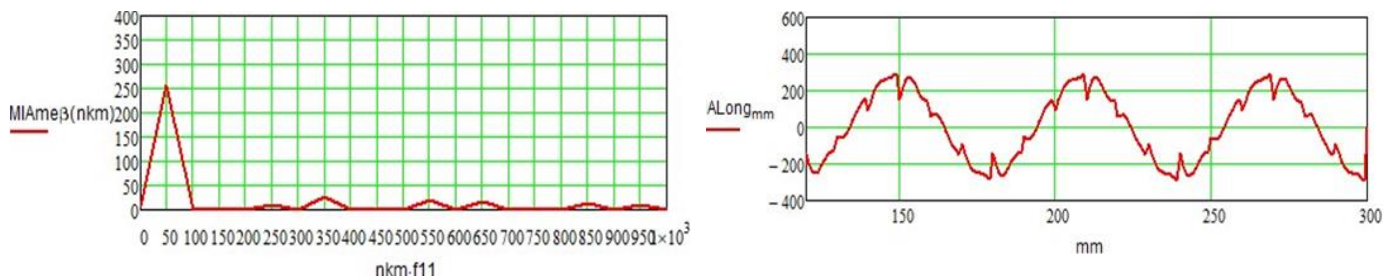


Рисунок 4 – Спектральний склад струму ПЧ–АД при симетричному навантаженні:
 $MIAME\beta(nkm)$ – комплексна амплітуда гармоніки; $nkm.f11$ – номер гармоніки струму

Результати математичного моделювання у програмі MathCAD 15 роботи ПЧ–АД, а саме форм струмів та їхнього спектрального складу при аварійному режимі роботи (обрив фази В) наведено на рисунках 5 та 6.

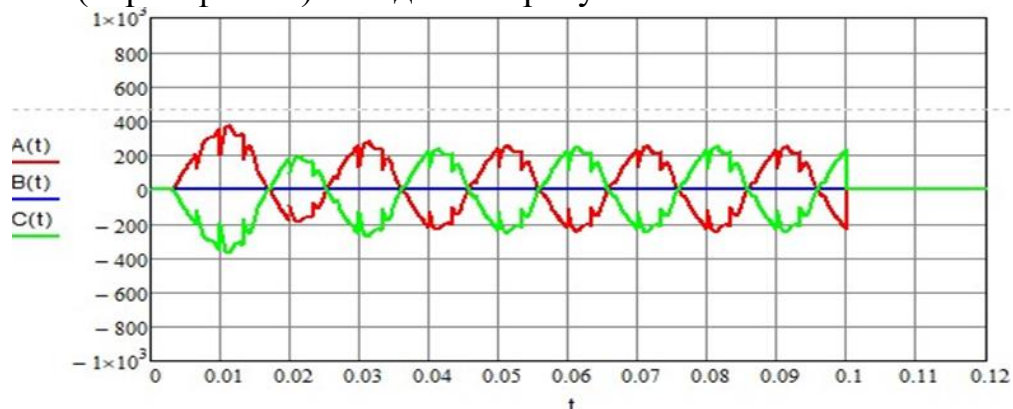


Рисунок 5 – Форми струмів в системі ПЧ–АД при обриві фази В

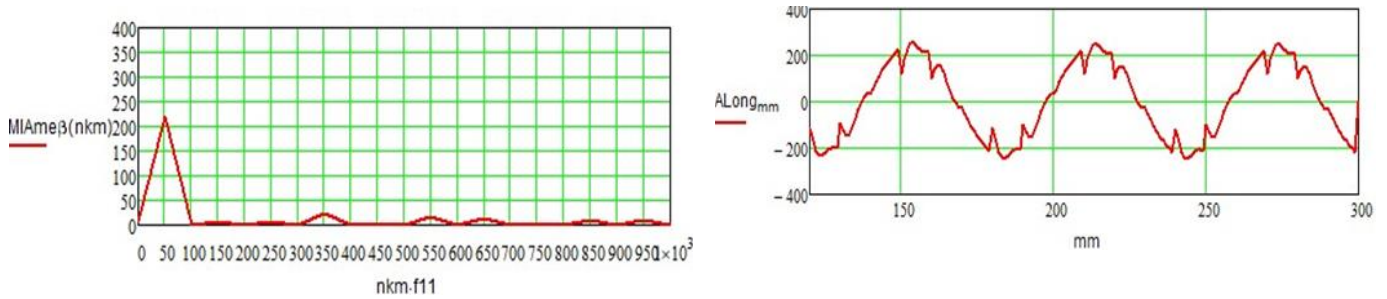


Рисунок 6 – Спектральний склад струму ПЧ–АД при обриві фази В:
 $MI_{Ame\beta}(nkm)$ – комплексна амплітуда гармоніки; $nkm.fl1$ – номер гармоніки струму

Моделювання показує наявність змін у спектральному складі струмів статора при пошкодженні обмоток, що у подальшому дозволить створювати бази даних їхнього технічного стану залежно від виду пошкоджень.

У роботі проведено імітаційне моделювання пускових та несиметричних режимів роботи тягових двигунів.

Для дослідження асинхронного двигуна використана еквівалентна двофазна модель у нерухомій системі координат α, β . Вона створена шляхом розкладання просторових векторів фазних величин на ортогональні осі прямокутної системи координат α, β . При цьому вісь α співпадає з віссю a трифазної координатної системи a, b, c .

У результаті отримано систему рівнянь, які описують роботу асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α, β в операторній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2'} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2'} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}; \\ M_{EM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{EM} - M_C) \end{array} \right. , \quad (4)$$

$$\text{де } R_e = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; T_e = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_e}; T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}.$$

Для моделювання обрано тяговий асинхронний електродвигун АД914-У. Результати моделювання та отримані характеристики двигуна АД914-У в програмі ANSYS наведені на рисунках 7 та 8.

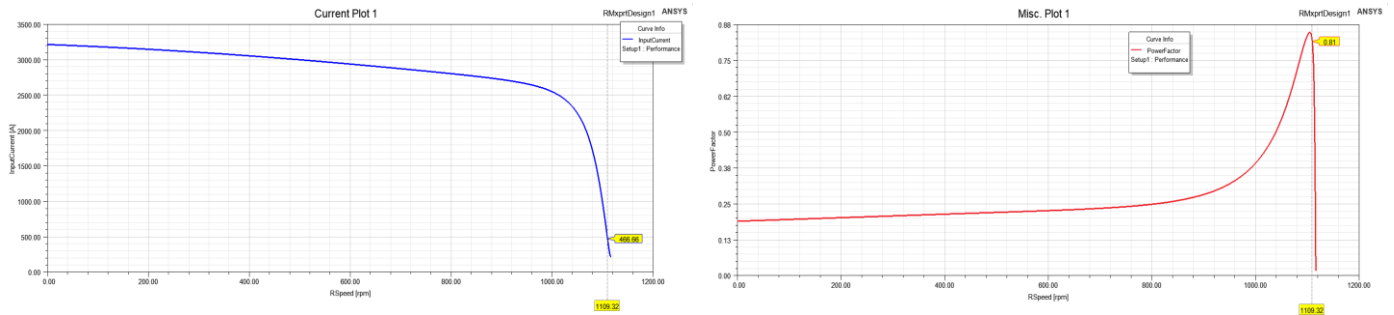


Рисунок 7 – Вхідний струм (паспортний 450 А) та коефіцієнт потужності (паспортний 0,91) АД914-У

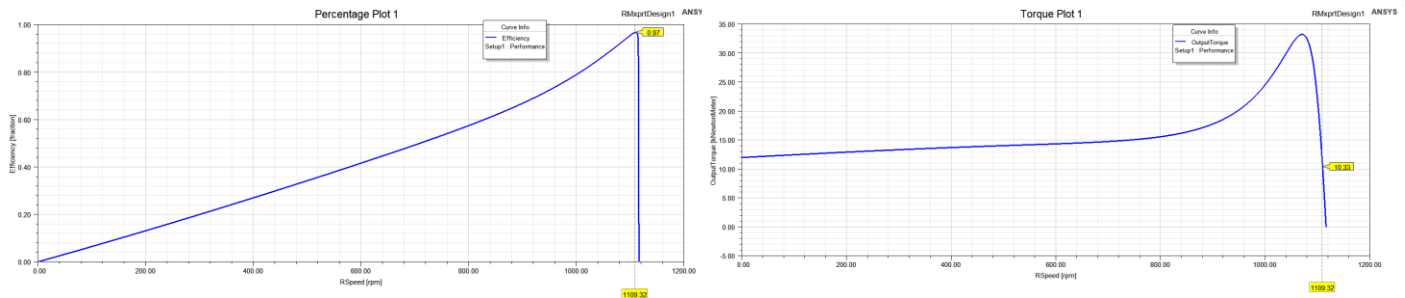


Рисунок 8 – ККД (паспортний 96,5 %) та момент (паспортний 10400Н·м)

Результати моделювання та отримані параметри свідчать про близькість розробленої імітаційної моделі до реального двигуна АД914-У, електричні характеристики якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Електричні характеристики двигуна АД914-У

Параметр	Значення
Номінальна лінійна напруга, В	1870
Частота струму статора, Гц	55,9
Потужність на валу, кВт	1200
Номінальний струм, А	450
Номінальний момент, Н·м	10400
Частота обертання ротора, об/хв	1140
ККД	0,955
Коефіцієнт потужності	0,870
Активний опір фази статора, Ом	0,0026
Активний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,0181
Індуктивний опір фази статора, Ом	0,213
Індуктивний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,161
Індуктивний опір намагнічуючого контура, Ом	6,48

Відносна похибка моделювання склала: за моментом двигуна 0,67 %, за вхідним струмом 3,7 %, за коефіцієнтом потужності 7,95 %, за коефіцієнтом корисної дії – 0,52 %.

На основі системи рівнянь (4) в програмному середовищі Matlab/Simulink розроблено імітаційну модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат α , β (рисунок 9).

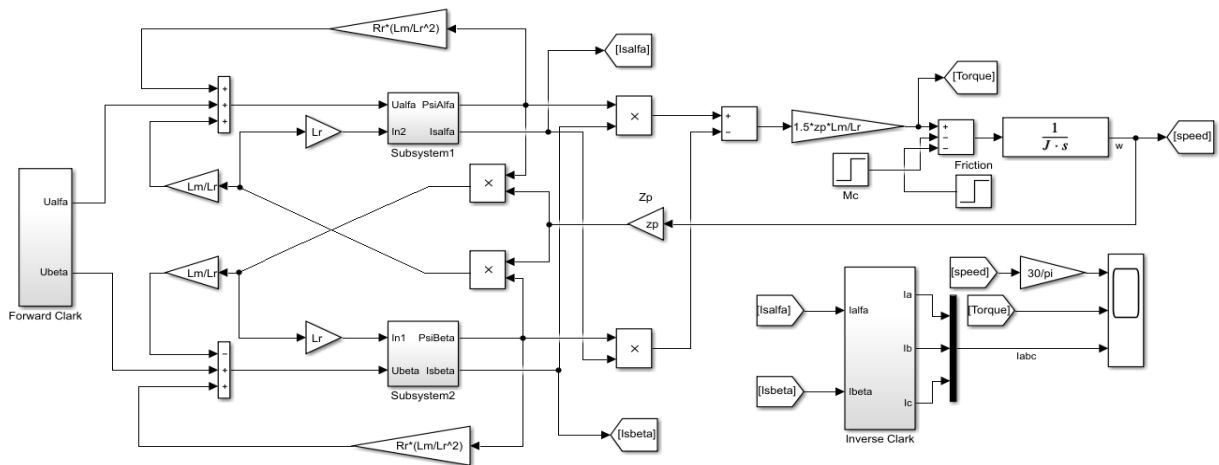


Рисунок 9 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат

Отримано характеристики швидкості обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму за прямого пуску АД і симетричного режиму живлення (рисунок 10).

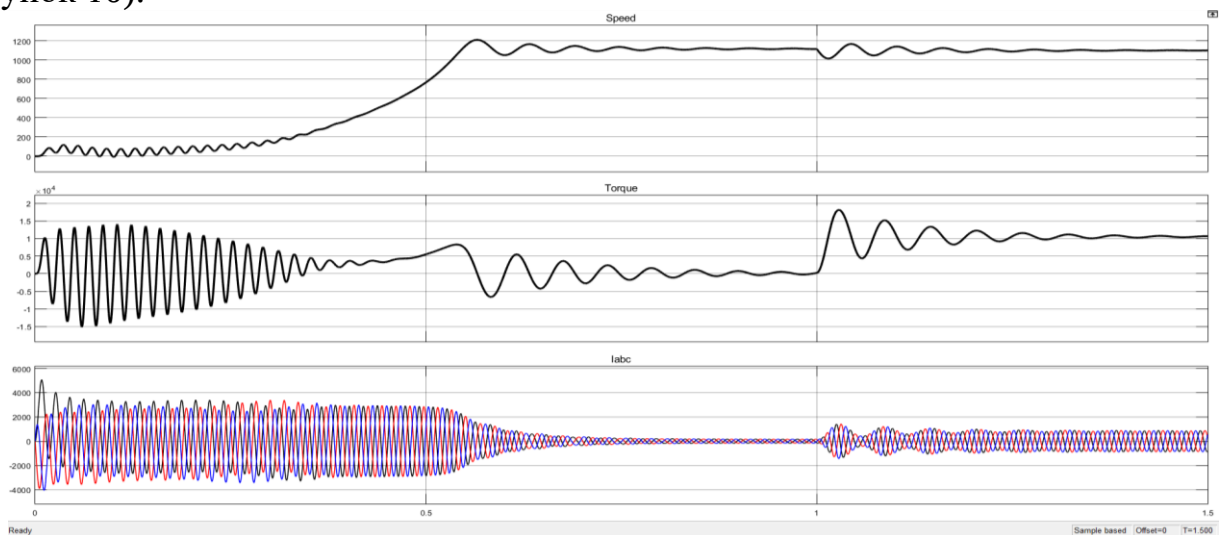


Рисунок 10 – Характеристики швидкості, моменту та осцилограми струмів двигуна за симетричного режиму живлення

Аналіз результатів модулювання показав, що за несиметрії напруги в асинхронних електродвигунах виникають магнітні поля, що обертаються з подвійною синхронною швидкістю в протилежному напрямку обертання ротора. У результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент і нагрів двигуна за рахунок струмів подвійної частоти. Термін служби повністю навантаженого АД, який працює за несиметрії напруги 4 %, зменшується в 2 рази, за несиметрії 5 % потужність двигуна зменшується на 5-10 %.

Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії для зворотної послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж нормується 2 та 4 % відповідно. Однак в системі тягового електропостачання змінного струму значення коефіцієнта несиметрії може сягати 6-12 %.

Для імітаційного моделювання впливу несиметрії на АД було використане програмне забезпечення Ansys Simplorer (рисунок 11, а). Імітаційна модель складається з джерела трифазної напруги, асинхронного двигуна, блоку завдання несиметрії фазної напруги джерела живлення (1) та блоку завдання моменту опору (2). Як тестовий двигун був використаний тяговий асинхронний електродвигун АД914-У з параметрами, наведеними на рисунку 11, б.

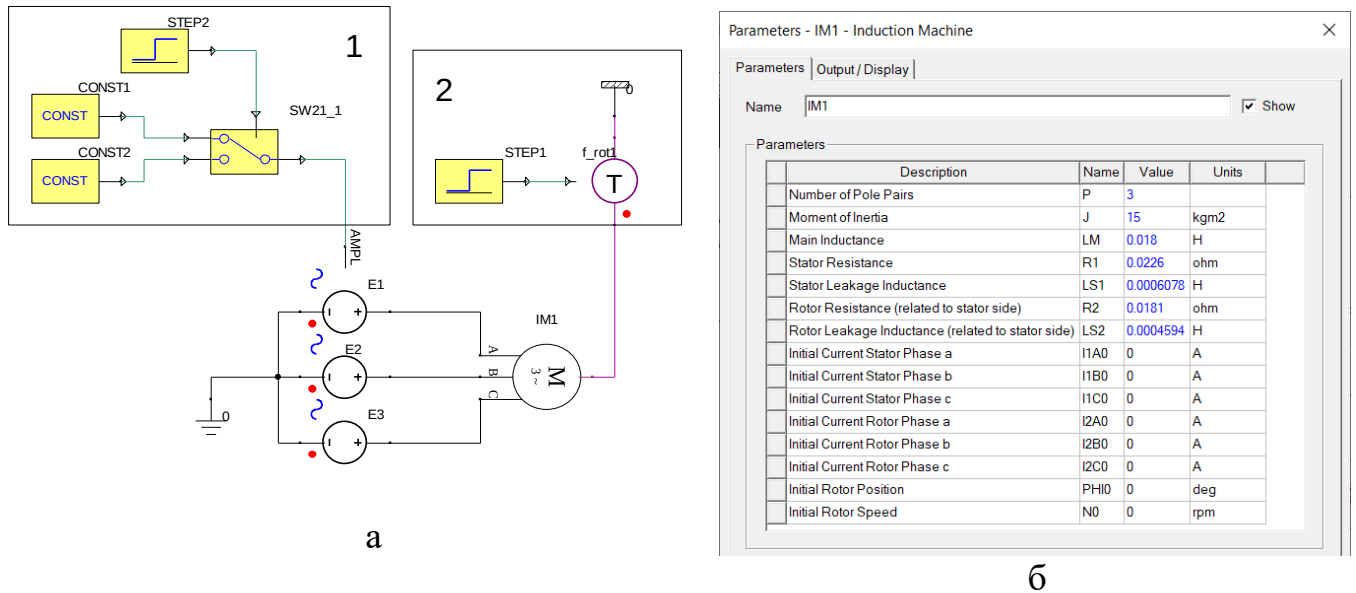


Рисунок 11 – Імітаційна модель (а) та параметри (б) ТЕД АД914-У

Для моделювання несиметрії напруги використовувався перемикач, який змінює значення фазної напруги з номінальної ($U_H = 1100$ В) на понижену ($U = 1078$ В), що відповідає несиметрії у 2 % в момент часу $t = 1,4$ с. Результати моделювання наведено на рисунках 12-13.

На рисунку 13 подано графік частоти обертання АД при несиметрії напруги живлення. На рисунку 14 зображений порівняльний графік електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимах живлення.

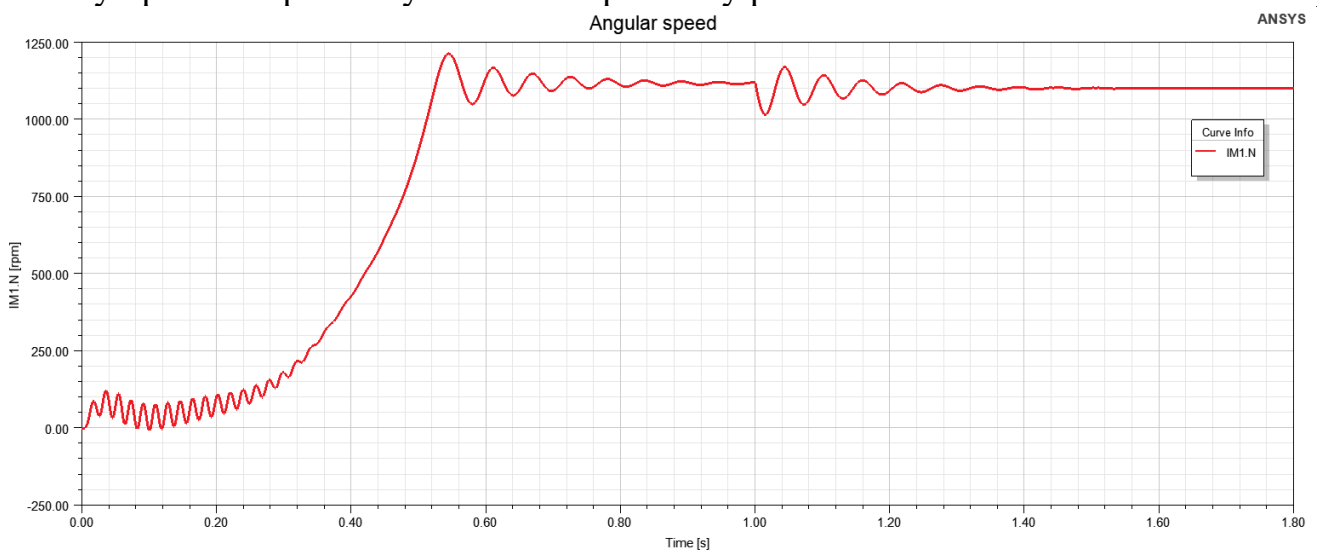


Рисунок 12 – Графік частоти обертання ТЕД

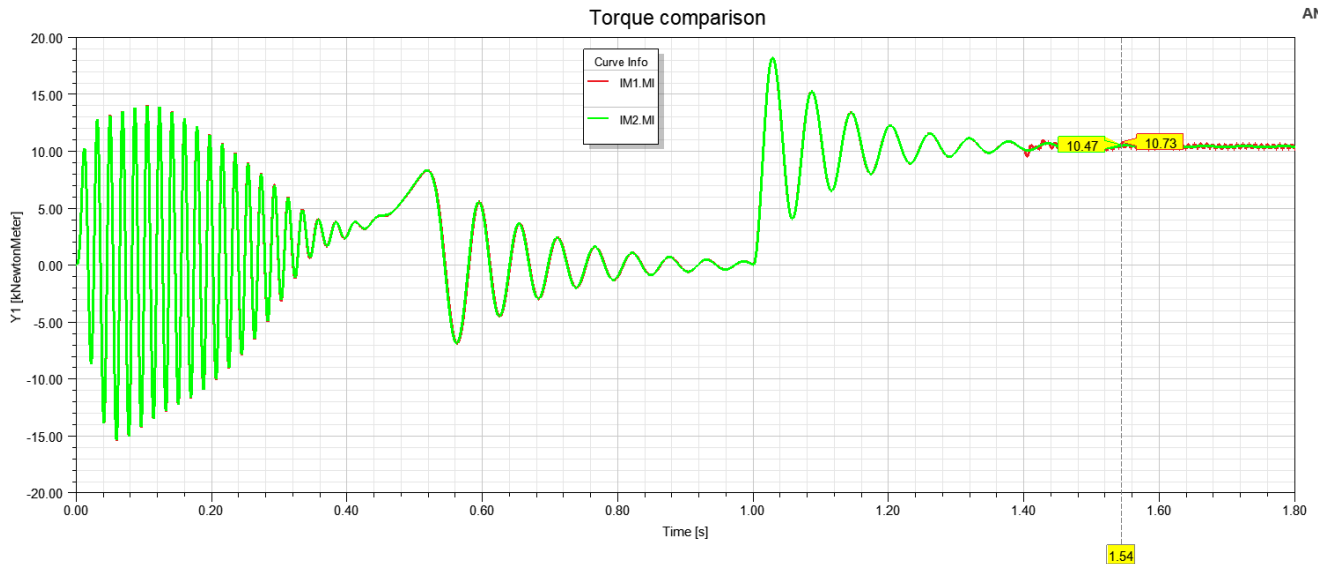


Рисунок 13 – Характеристика електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимах живлення

З графіків видно, що відхилення напруги однієї фази на 4 % призводить до зниження частоти обертання в межах 1 об/хв та значних пульсацій електромагнітного моменту $\pm 5\%$ від номінального значення, що призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та старіння ізоляції за рахунок додаткового нагріву обмоток двигуна.

Для дослідження електромагнітних процесів за аварійних режимів, а саме короткому замиканні силового ключа автономного інвертора напруги та зникненні напруги живлення, в середовищі Matlab розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) тяговим асинхронним електроприводом, силова частина якої складається з тягового асинхронного електродвигуна АД914-У, дворівневого інвертора, вхідного фільтра, блока регулювання напруги ланки постійного струму (рисунок 14).

Для аналізу змін електромагнітних процесів, що протікають під час аварійних режимів, насамперед необхідно провести імітаційне моделювання системи у нормальному режимі роботи.

Як порівнювані параметри обрано частоту обертання, фазні струми, електромагнітний момент і напругу ланки постійного струму (рисунок 15) і проведено Фур'є-аналіз струму фази А I_{sa} (рисунок 16).

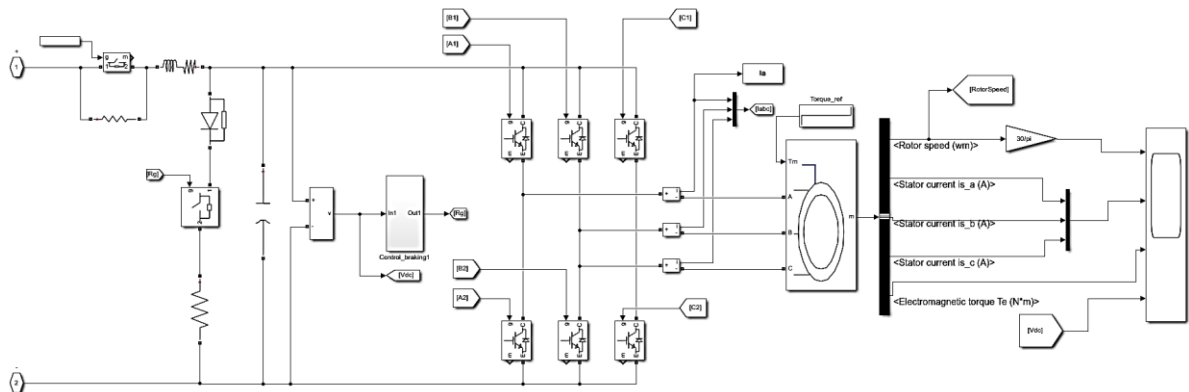


Рисунок 14 – Силова частина системи

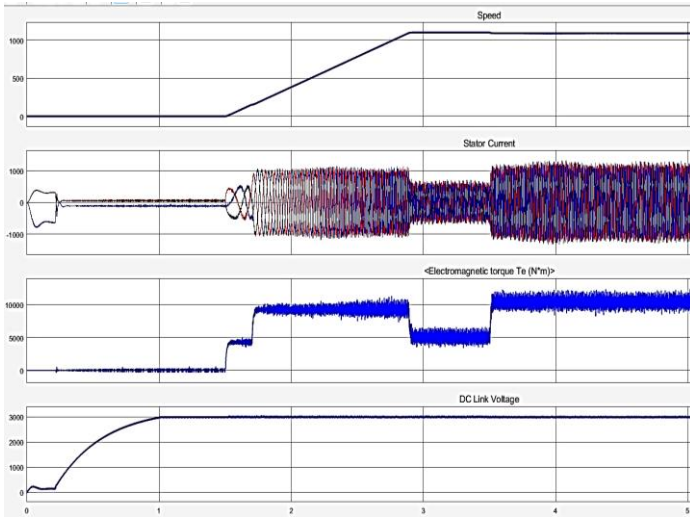


Рисунок 15 – Характеристики в нормальному режимі роботи

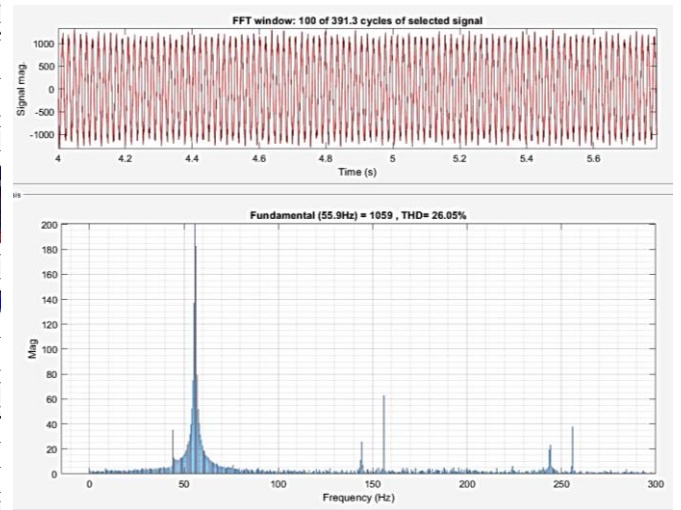


Рисунок 16 – Фур'є-аналіз струму I_{sa} нормального режиму роботи

Внутрішнє коротке замикання (КЗ) в моделі було реалізовано шляхом подання хибного сигналу керування на закриття силового транзистора протягом 0,2 с. Результати моделювання електромагнітних процесів для цього випадку показані на рисунках 17 та 18.

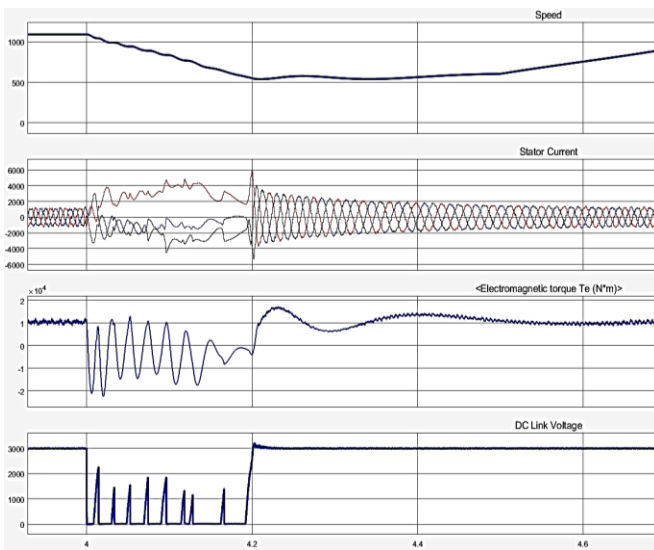


Рисунок 17 – Результати моделювання ТЕД при КЗ транзистора АІН

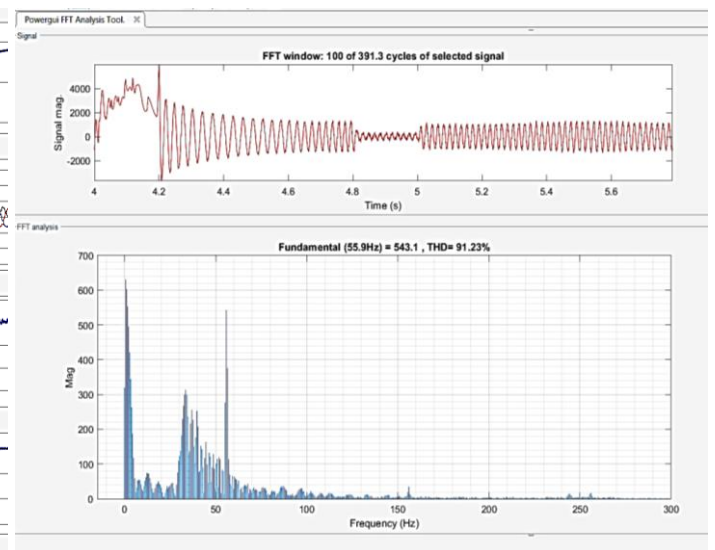


Рисунок 18 – Фур'є-аналіз струму I_{sa} при КЗ транзистора АІН

Наведені осцилограми показують, що режим короткого замикання силового ключа характеризується малим часом протікання електромагнітних процесів і призводить до швидкого падіння частоти обертання, значних пульсацій моменту, пікового трикратного струмового перевантаження та появи субгармонік, амплітуди деяких навіть перевищують основну.

Осцилограми електромагнітних процесів та спектральний склад струму I_{sa} у системі за зникнення напруги живлення показані на рисунках 19 і 20.

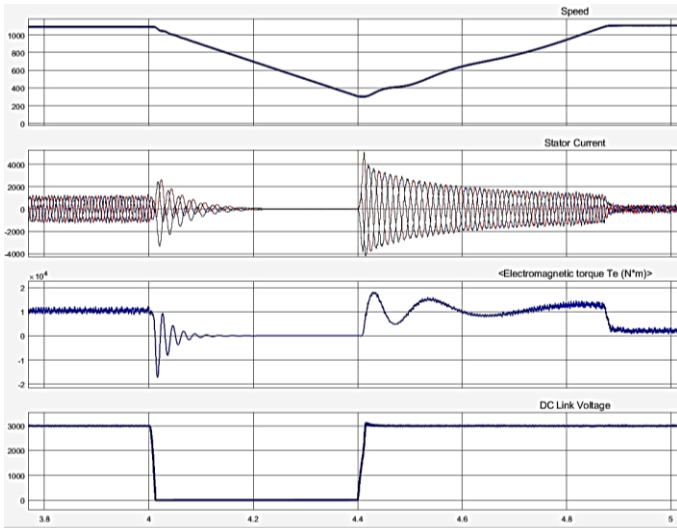


Рисунок 19 – Результати моделювання за зникнення напруги живлення

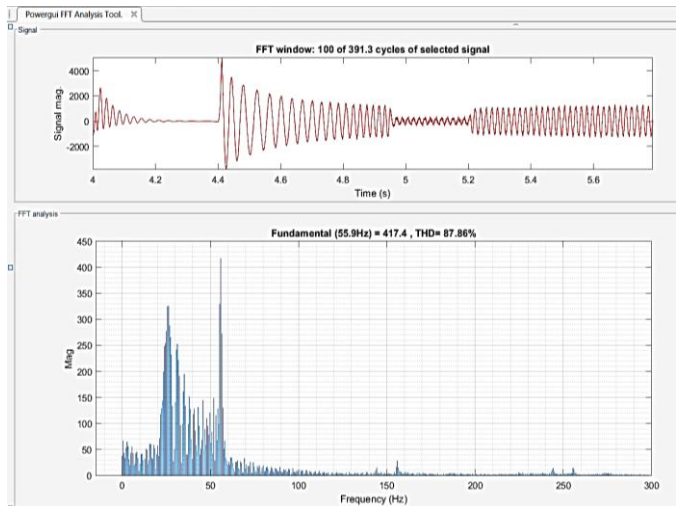


Рисунок 20 – Фур'є-аналіз струму I_{sa} за зникнення напруги живлення

Як видно з результатів, за зникнення напруги живлення відбувається різке зниження електромагнітного моменту, що призводить до «перекидання двигуна», а при відновленні напруги живлення – підвищення фазних струмів до рівня пускових, швидке підвищення напруги на конденсаторі фільтра. Фур'є-аналіз фазного струму з моменту зникнення напруги живлення і до повернення до номінального режиму показує зменшення амплітуди основної гармоніки на 60 %, появу значної кількості субгармонік з амплітудами, що не перевищують амплітуду основної.

У **третьому розділі** реалізовано формування завадостійких методів і засобів моніторингу в реальному часі технічного стану асинхронних тягових двигунів.

В одну з фаз обмотки статора ТЕД було штучно введено тестовий сигнал у вигляді струму з постійними параметрами. Потужність цього сигналу є настільки малою, що вона не впливає на обертальний момент двигуна. Інтервал спостереження $[T_1, T_2]$ струмових процесів в обмотці є достатньо малим, щоб протягом нього параметри тягового струму теж були постійними. Сам цей тяговий струм утворений шляхом ШІМ імпульсів постійної амплітуди.

За цих умов струм фази, який є сумою кількох складових, визначено за виразом:

$$i(t) = s(t) + I_0 + i_{sp}(t) + i_{ges}(t) + i_{tr}(t) + i_p(t), \quad (5)$$

де I_0 – постійна складова. При живленні двигуна двополярною ШІМ-напругою вона може бути відсутня;

$i_{sp}(t)$ – живильна синусоїдна складова;

$i_{ges}(t)$ – псевдопилкоподібна різниця між результатом інтегруючого перетворення ШІМ-напруги в струм $i_{out}(t)$ фазної обмотки і струмом $i_{sp}(t)$;

$i_{tr}(t)$ – складова, викликана зубцевими гармоніками;

$i_p(t)$ – імпульсна завада, викликана короточасними процесами в живильній мережі (втрата контакту пантографа, наведення від грозових розрядів).

Кожне з коливань, що міститься в правій частині виразу (5), характеризується не тільки виглядом часової залежності, але й індивідуальною сукупністю параметрів, об'єднаною у вектор $\vec{\lambda}$. У подальшому будемо вважати, що постійну

складову I_0 відфільтровано, або вона була відсутня з самого початку (як при двополярній ШІМ). З урахуванням зазначеного, вираз (5) набуває вигляду

$$i(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp}) + i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges}) + i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr}) + i_p(t, \vec{\lambda}_p), \quad (6)$$

Ескіз спектра ШІМ-напруги подано на рисунку 21. На ньому як f_c позначена частота несучого пилоподібного коливання ШІМ.

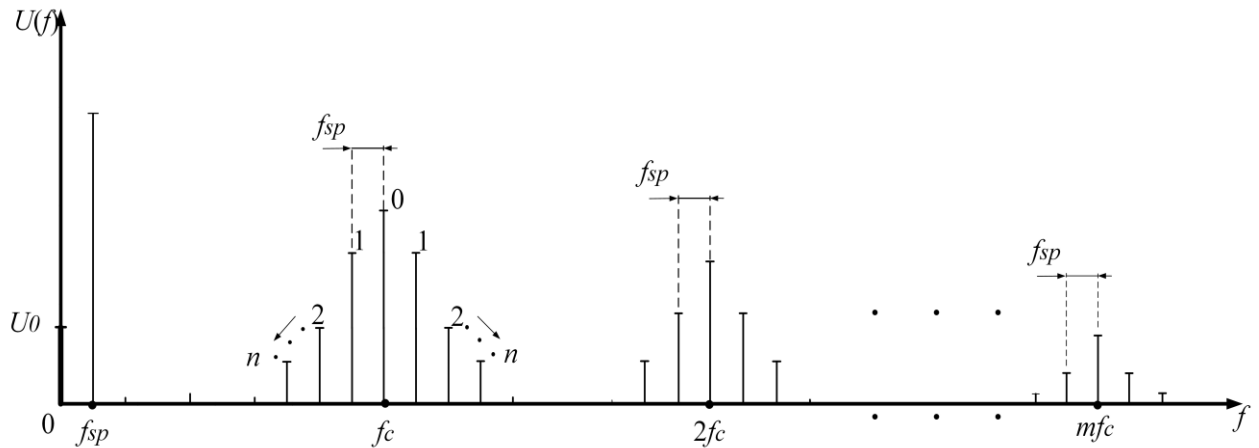


Рисунок 21 – Спектр ШІМ-напруги

Амплітуди гармонік змінюються за законом:

$$\frac{1}{m} \cdot J_n(0,5\pi m M), \quad (7)$$

де $J_n(x)$ – функція Бесселя n -го порядку;

M – індекс модуляції ШІМ;

m – номер пелюстки спектра.

Частота струму викликаного зубцевими гармоніками визначена за виразом:

$$f_{tr} = \frac{f_{sp} \cdot z_2 (1-s)}{p} \pm l f_{sp}, \quad (8)$$

де f_{sp} – частота живильної напруги;

z_2 – кількість зубців ротора;

s – ковзання;

p – кількість пар полюсів;

l – ціле непарне число – номер гармоніки зубцевого струму.

Типові для тягових двигунів числові значення $f_{sp} = [20...60]$ Гц; $z_2=40$; $p=3$; $s=0,05$. За таких умов матимемо $f_{sp} = (25,4...762) \pm (2...60) \cdot l$, $l = 1, 3, 5, 7, \dots$

Ураховуючи гармоніки включно по 17-ту, отримаємо, що частоти зубцевих гармонік лежать від 0 (при $l = -12$) до 1992 Гц.

Отже, узагальнення цих компонентів $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$ і $i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr})$ призводить до діаграми зайнятості частотної області, поданої на рисунку 22.

Тобто можна вважати вільною від дії цих двох компонентів ділянку частот від 2 до 19 кГц

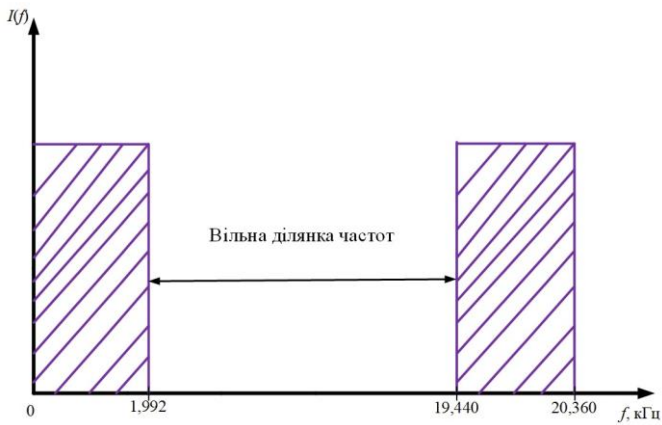


Рисунок 22 – Зайнятість частотної області заводовими струмами

Імпульсну заваду зімітовано як послідовність статистично незалежних відліків гаусівської випадкової величини з середнім квадратом відхилення 0,005 А і нульовим середнім значенням, промодульовану за амплітудою обвідною кривою $A \cdot t \cdot e^{-\gamma t}$, підтвердженою експериментальними дослідженнями. Параметри A та γ цієї кривої за кожного моделювання були підібрані так, щоб забезпечити задану амплітуду I_p і тривалість τ_p імпульсу завади. Змодельовані три варіанти тривалості цього імпульсу $\tau_p = T_2 - T_1$, $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$ і $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$. Обчислено середньоквадратичні похибки σ_I оцінки амплітуди сигналу та σ_φ оцінки початкової фази сигналу. Результати моделювання показані на рисунку 23, а, б.

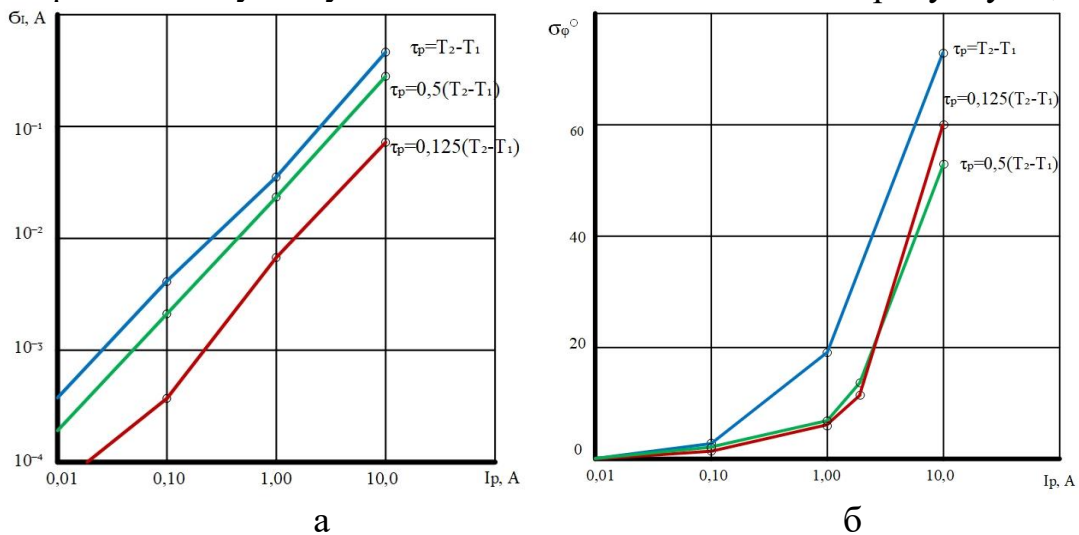


Рисунок 23 – Обчислені величини середньоквадратичних похибок оцінки амплітуди сигналу (а) та початкової фази сигналу (б)

Як показали результати моделювання, розроблена математична процедура оцінювання параметрів тестового сигналу забезпечує високу точність цього оцінювання в широких діапазонах інтенсивності імпульсної завади та перекриття сигналу і завади в часі.

Дотримання конструктивно встановлених параметрів обмотки статора трифазного асинхронного двигуна є критично важливим для його подальшої експлуатації. Такий контроль можна забезпечити введенням в цю обмотку

Для визначення точнісних характеристик оцінювання параметрів тестового сигналу і робочих меж співвідношення амплітуд тестового сигналу та імпульсу було виконане комп'ютерне моделювання сигналу, імпульсу та обробки їхньої адитивної суміші.

Параметри сигналу: $I_{ms} = 0,1$ А, $f_s = 2500$ Гц, $\varphi_s = 75^\circ$, інтервал спостереження $(T_2 - T_1) = 0,01$ с, інтервал дискретизації за часом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

спеціального тестового струму і вимірюванням його параметрів. Однак низка факторів призводить до спотворення вимірюваних електричних коливань, а відтак – до помилок у визначенні технічного стану ТЕД. Зростання насиченості транспортними засобами та новими електричними пристроями навколишнього середовища, робота яких призводить до проникнення завад у вимірювані електричні коливання, викликає зростання і потенційно можливого відсотку неправильних рішень системи контролю технічного стану.

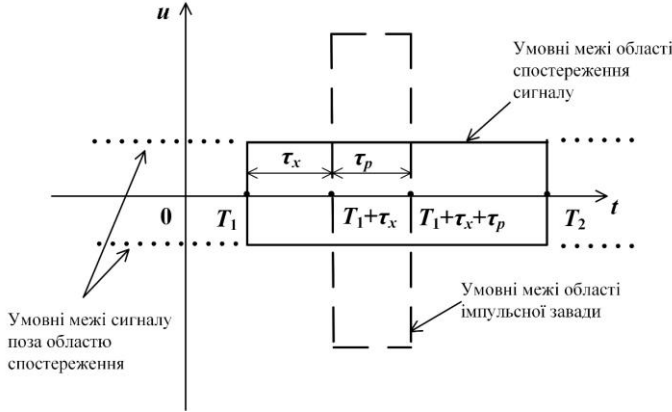


Рисунок 24 – Часові співвідношення між сигналом та імпульсною завадою

Тому набуває все більшої актуальності розв'язання задачі отримання якомога можливо менш залежних від завад величин параметрів тестових електричних коливань.

На рисунку 24 показані часові співвідношення між сигналом та імпульсною завадою.

Тут T_1 і T_2 – відповідно початок та кінець інтервалу спостереження, а τ_x – зсув моменту виникнення завади відносно початку інтервалу спостереження; τ_p – тривалість імпульсу завади.

Отримано вираз для визначення умовної щільності імовірності реалізації u реально спостереженого коливання:

$$p(u|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = p(i|\vec{\lambda}, \tau_x, \tau_p) \approx \frac{1}{(2\pi N_0 F_p)^{F_p(T_2-T_1)} \left(\frac{N_p}{N_0}\right)^{F_p \tau_p}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{[i(t) - I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)]^2}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt \right\}, \quad (9)$$

де $i(t)$ – сума сигналу та завад, яка безпосередньо спостерігається.

Отримано вирази, які дозволяють обчислити оцінки амплітуди та початкової фази тестового струму обмотки ТЕД:

$$\hat{\varphi}_s = \arctg \frac{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \cos \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}{\int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \sin \omega t}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt}, \quad (10)$$

$$\hat{I}_{ms} = \frac{2}{T_2 - T_1 - \tau_p} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{i(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} dt, \quad (11)$$

Структурну схему пристрою, який реалізує отриману процедуру оцінювання, наведено на рисунку 25.

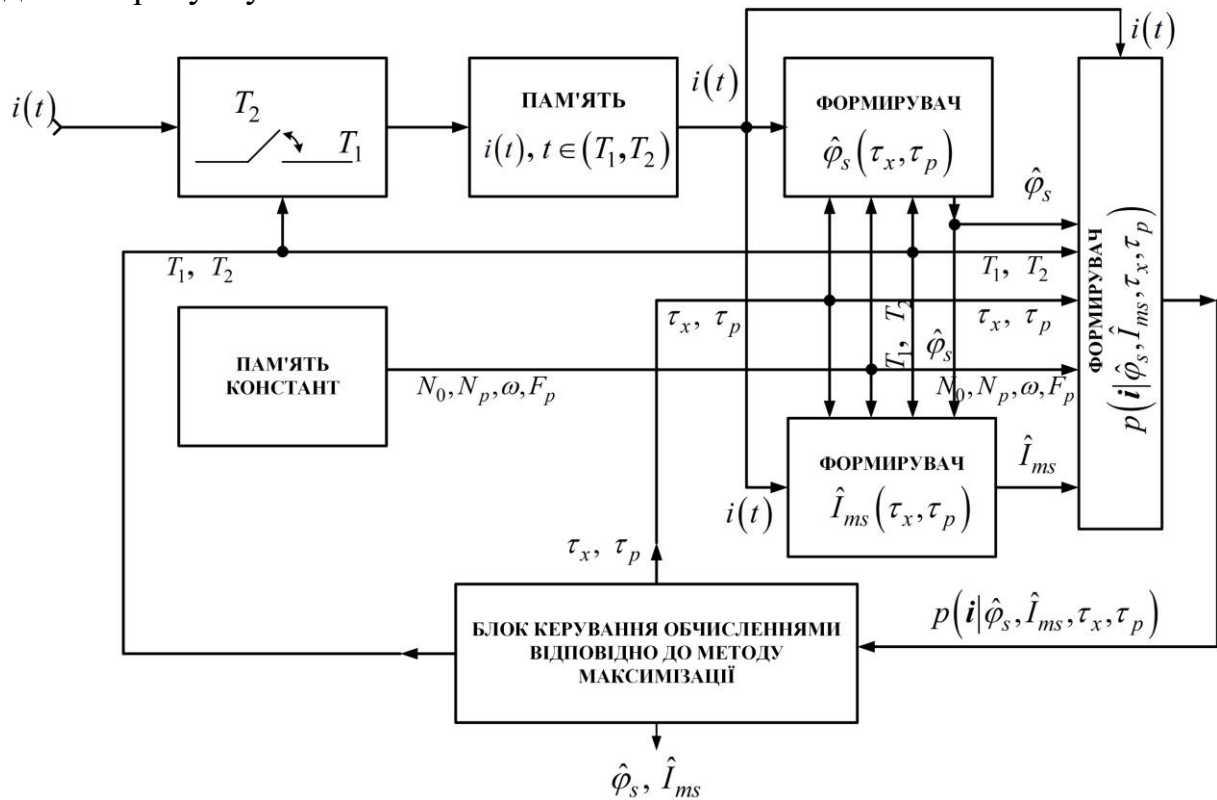


Рисунок 25 – Структурна схема пристрою, який реалізує отриману процедуру оцінювання параметрів зондувального синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою

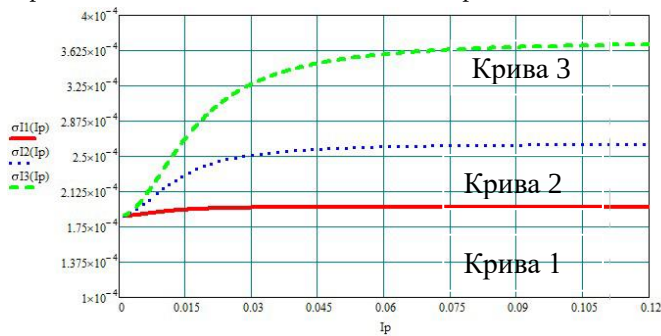
Процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу сформовано у вигляді, який дає змогу застосувати широке коло доступних методів розрахунку кінцевих величин оцінок при максимізації функції правдоподібності за часовими параметрами імпульсної завади.

За наявності завад, викликаних втручанням спотворюючих факторів у спостережені часові залежності досліджуваних коливань, визначені величини є наближеними оцінками фактичних числових значень. Знаходження співвідношень для визначення потенційно досяжної точності оцінок параметрів синусоїдного коливання, спотвореного дією короткочасної імпульсної завади дало б змогу визначити об'єктивні межі технічних можливостей систем передавання інформації та досяжної точності вимірювальних пристроїв.

Ситуація, в якій необхідно отримати оцінки амплітуди та початкової фази синусоїди та знайти межі Крамера-Рао для отриманих оцінок, є наступною. На інтервалі часу $[T_1, T_2]$ існує синусоїда з невідомими амплітудою I_{ms} і початковою фазою φ_s та відомою частотою ω . На всій довжині інтервалу адитивно до синусоїди діє неперервний шумовий гаусівський стаціонарний випадковий процес із спектральною густиною потужності величиною $0,5N_0$, рівномірною в інтервалі частот $[-F_p, F_p]$ і величиною 0 поза цим інтервалом. В середині вказаного інтервалу часу на проміжку $[T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p]$ також адитивно діє імпульс у вигляді

фрагменту гаусівського стаціонарного випадкового процесу зі спектральною густиною потужності $0,5N_p$, рівномірною в тому ж інтервалі частот і величиною 0 поза цим інтервалом.

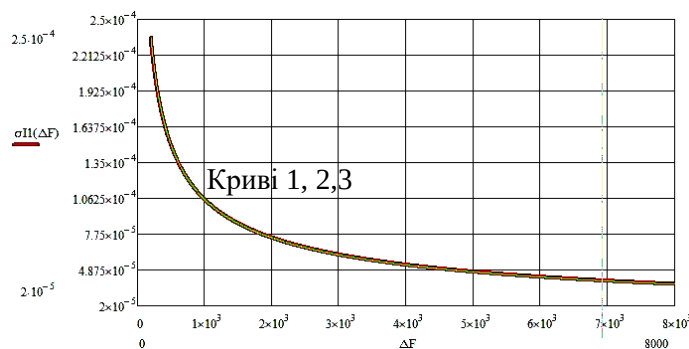
На рисунках 26 і 27 наведено результати обчислення залежностей мінімального середньоквадратичного відхилення (МСВ) оцінок відповідно амплітуди та фази від I_p за $I_{ms}=0,1$ А; $I_{n0,5}=0,02$ А; $T_2 - T_1 = 0,01$ с; $\Delta F = 16$ кГц і трьох величин тривалості імпульсу. Крива 1 відповідає $\tau_p = 0,1(T_2 - T_1)$, крива 2 – $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$, крива 3 – $\tau_p = 0,75(T_2 - T_1)$.



Рисунки 26 – Залежність МСВ оцінки амплітуди синусоїди від амплітуди імпульсу завади

Рисунки 27 – Залежність МСВ оцінки початкової фази синусоїди від амплітуди імпульсу завади

На рисунку 28 наведено графік залежності МСВ оцінки амплітуди від ΔF за $I_{n0,5}=10^{-3}$ А; $I_p=1$ А; $T_2 - T_1=0,01$ с; $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$. На рисунку 29 наведено графіки залежності МСВ оцінки фази від ΔF за тих самих початкових даних. Крива 1 відповідає $I_{ms}=0,01$ А, крива 2 – $I_{ms} = 0,05$ А, крива 3 – $I_{ms} = 0,1$ А.



Рисунки 28 – Залежність МСВ оцінки амплітуди синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

Рисунки 29 – Залежність МСВ оцінки початкової фази синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

Зменшення величин МСВ із зростанням величини ΔF при сталих I_p та $I_{n0,5}$ пояснюється зменшенням спектральних густин потужності обох завад.

У четвертому розділі виконана реалізація ресурсозберігаючих технологій експлуатації тягового рухомого складу на ділянках залізниць в умовах дії складних завад.

Для ситуацій наявності (12) та відсутності (13) зондувального сигналу технічного контролю асинхронних ТЕД визначені відповідні цільові функції:

$$\xi_S \approx \sum_{k=1}^K v_{P_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{P_k} + \sum_{k=1}^K v_{Q_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Q_k} + \sum_{k=1}^K v_{C_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{C_k} + \sum_{k=1}^K s_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k s_k +$$

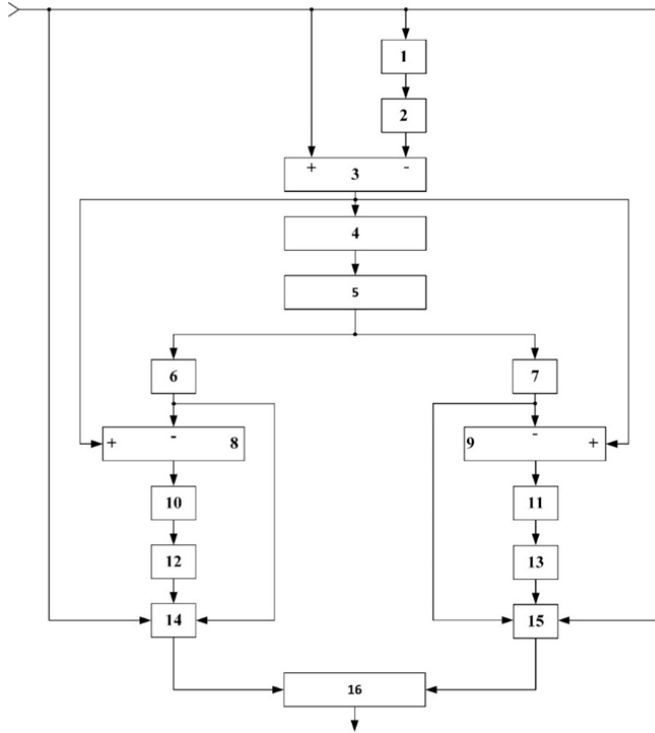
$$+ \sum_{k=1}^K v_{T_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{T_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{P_k} v_{T_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{P_k} v_{Q_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{T_k} v_{Q_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{T_k} v_{C_k} + 2 \sum_{k=1}^K s_k v_{T_k}. \quad (12)$$

$$\xi_F \approx \sum_{k=1}^K v_{P_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{P_k} + \sum_{k=1}^K v_{Q_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{Q_k} + \sum_{k=1}^K v_{C_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{C_k} + \sum_{k=1}^K v_{T_k}^2 - 2 \sum_{k=1}^K u_k v_{T_k} +$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^K v_{P_k} v_{T_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{P_k} v_{Q_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{T_k} v_{Q_k} + 2 \sum_{k=1}^K v_{T_k} v_{C_k}. \quad (13)$$

Після цього на підставі обчислення величин цільових функцій ξ_S і ξ_F , порівняння їх між собою ухвалюється рішення про наявність чи відсутності зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД.

Структурну схему відповідного пристрою наведено на рисунку 30. Допоміжні пристрої аналого-цифрового перетворення та синхронізації тут не наведено.



Для реалізації пристрою з наведеною на рисунку 30 структурою раціонально використовувати мікропроцесори загального призначення з двопотоковим опрацюванням даних або спеціалізовані процесори опрацювання сигналів, які широко доступні на сьогодні.

Схема включає: 1 – формувач оцінок величин U_{OP} , U_{mP} , f_P , φ_P ; 2 – блок відновлення імпульсу $v_P(t)$; 3 – суматор («+» – вхід підсумовування, «-» – вхід віднімання); 4 – блок перетворення Фур'є; 5 – формувач оцінок параметрів коливачів $s(t)$, $v_C(t)$, $v_Q(t)$ і величин τ_s і τ_c ; 6 – блок відновлення коливачів $v_C(t) + v_Q(t)$; 7 – блок відновлення коливачів $s(t) + v_C(t) + v_Q(t)$; 8, 9 – суматори («+» – входи підсумовування, «-» – входи віднімання); 10, 11 – блоки автоматичного виявлення гармонік; 12, 13 – блоки відновлення коливачів $v_T(t)$;

Рисунок 30 – Структурна схема пристрою оптимального приймання зондувального сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД

14 – блок обчислення ξ_F ; 15 – блок обчислення ξ_S ; 16 – пристрій вибору меншої з величин.

Для чисельного оцінювання завадостійкості розробленого пристрою проведено комп'ютерне моделювання сигналу та завад і подальший розрахунок їхніх енергетичних характеристик. На рисунку 31 подано графік залежності вхідного сигналу пристрою від часу на інтервалі тривалістю 1 с. Корисний сигнал має несучу частоту 420 Гц і частоту модуляції 8 Гц, завада від ТРК має несучу частоту 480 Гц і частоту модуляції 12 Гц. Амплітуда U_{ms} корисного сигналу дорівнює 0,042 В.

Амплітуда завади від ТРК дорівнює 0,01 В. Необхідні для подальшого енергетичного розрахунку параметри інших завад такі: амплітуда несинусоїдальної завади v_T від тягового перетворювача локомотива 0,8 В; амплітуда несинусоїдальної завади v_Q від тягового струму та наведень від лінії електропередачі 0,09 В; амплітуда імпульсної завади 1,5 В за тривалості імпульсу $\tau_p = 0,05$ с; середньоквадратичне відхилення σ_{Π} стаціонарного гаусівського шуму 0,19 В за рівномірного спектра завширшки ΔF 2500 Гц.

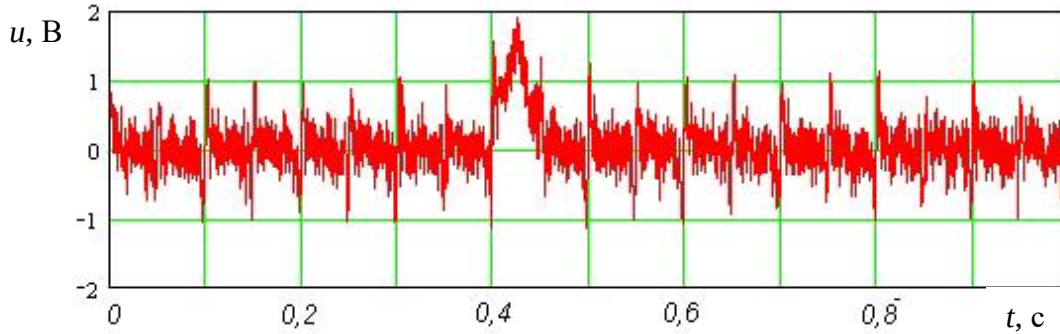


Рисунок 31 – Сигнал контролю технічного стану асинхронних ТЕД, спотворений імпульсною завадою, завадою від тягового струму і лінії електропередач, завадою від тягового перетворювача і безперервним гаусівським шумом $f_s = 420$ Гц

Залежності спектру вхідного сигналу від частоти подано на рисунку 32.

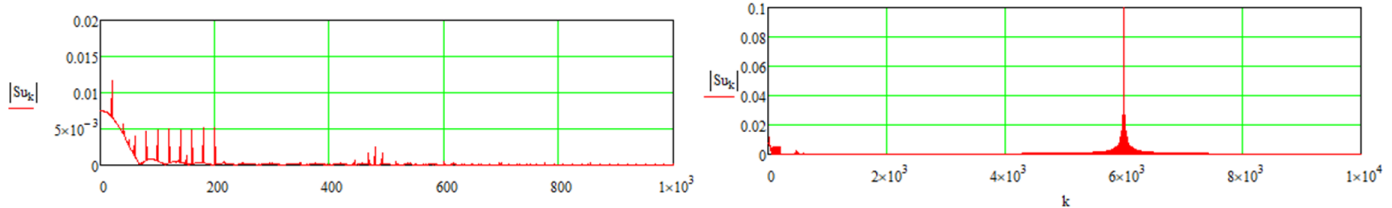


Рисунок 32 – Залежність спектру вхідного сигналу від частоти

Отриманий вираз дає величину потенційної завадостійкості розробленого пристрою, що використовує ізольований логарифм відношення правдоподібності (ІЛВПМ):

$$P_{EM} = 1 - \Phi \left\{ \sqrt{q_s \cdot (1 + \delta - 2\rho_{s1}) \cdot 0,25} \right\}, \quad (14)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ – функція нормального розподілу; $q_s = \frac{2E_1}{N_0}$ – відношення

енергії E_1 коливання Z_{Sk} до спектральної густини потужності гаусівського шуму N_0 ; $N_0 = \sigma_{\Pi}^2 / \Delta F$; δ – відношення енергії E_2 коливання Z_{Fk} до енергії коливання Z_{Sk} ;

$E_1 = \sum_{k=1}^K z_{Sk}^2 \cdot \Delta t$; $\Delta t = 1/(2\Delta F)$ – інтервал дискретизації вхідного коливання u_k за часом; $\rho_{s1} = B_s / E_1$ – нормована взаємна кореляційна функція коливань Z_{Sk} і Z_{Fk} ;

$B_s = \sum_{k=1}^K Z_{Sk} \cdot Z_{Fk} \cdot \Delta t$ – взаємна кореляційна функція зазначених вище коливань.

На основі результатів розрахунків побудовано криві залежностей величини P_{EM} від амплітуди U_{ms} для кожного з трьох числових значень величини (рисунок 33).

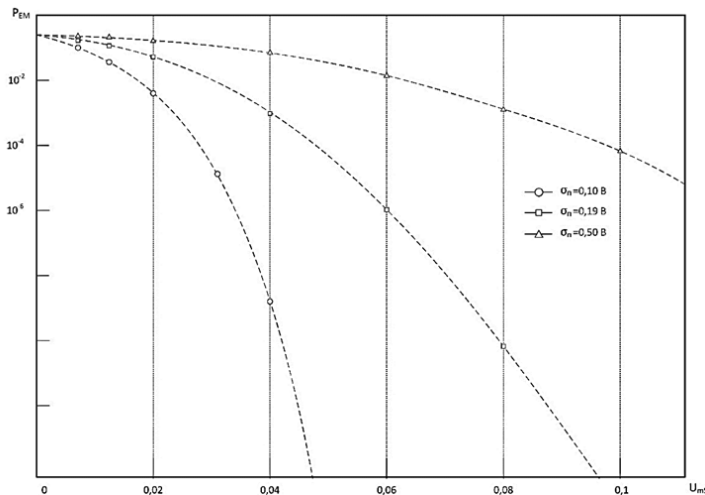


Рисунок 33 – Залежність середньої ймовірності помилки розрізнення P_{EM} від амплітуди U_{ms} зонduючого сигналу контролю технічного стану асинхронних ТЕД за різних величин σ_{PI}

У середньому на ТЕД припадає 20-25 % загальної кількості відмов усього обладнання локомотивів. Основними причинами відмов ТЕД є: пробої ізоляції обмоток, міжвиткові замикання в якорях, полюсах, компенсаційних обмотках, неприпустиме зниження опору ізоляції, пошкодження з'єднання між полюсами і обмотками, вихід з ладу головних полюсів, руйнування бандажу та ін.

Для спостереження за технічним станом двигуна запропоновано безконтактно ввести в коло його живлення зонduючий гармонічний сигнал і спостерігати викликаний ним струм. Це потребує встановлення математичного зв'язку між вели-

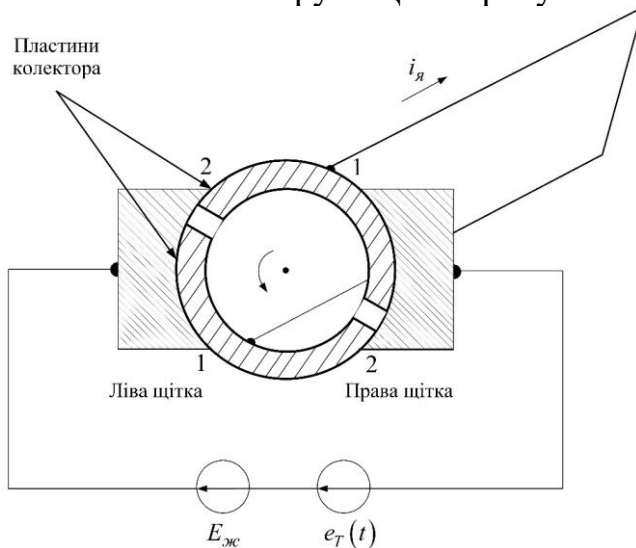


Рисунок 34 – Підключення секції двигуна

Результати розрахунку величини P_{EM} дають змогу зробити висновок, що розроблений пристрій надійно розпізнає ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад. Варіювання амплітуд структурно-детермінованих завад під час розрахунків показало, що наведені залежності мало чутливі до цих змін.

Це означає стійкість пристрою до впливу структурно-детермінованих завад врахованих типів.

чинами параметрів його кіл і величинами параметрів спостереженого струму.

У роботі розглянуто колекторний двигун постійного струму з послідовним збудженням, у коло живлення якого введено змінну напругу з постійними параметрами, зокрема, з кутовою частотою ω_T (рисунок 34).

Стрілкою показано напрям обертання якоря. Умовні позначення: $E_{ж}$ – джерело живлення постійною напругою; $e_T(t)$ – джерело синусоїдної напруги; 1 – збігаючий край щітки; 2 – набігаючий край щітки; $i_{я}$ – струм секції якоря.

У роботі прийнято допущення, що як опори елементів конструкції, так і перехідні опори між ними є лінійними. За цієї умови до розгляду роботи секції застосовано принцип накладання та окремо розглянуті ефекти, викликані дією джерела постійної напруги та джерела змінної напруги. Побудовано схему

заміщення показаного на рисунку 34 фрагмента двигуна для джерела напруги зонduючого сигналу (рисунок 35).

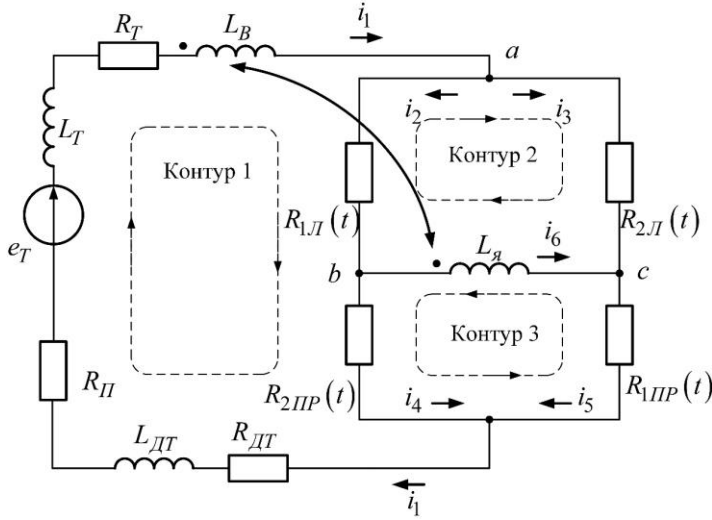


Рисунок 35 – Схема заміщення секції та колекторно-щіткового вузла

чий край з опором $R_{2Л}(t)$ відповідно на струми i_2 та i_3 . Через збігаючий край правої щітки (його опір $R_{1ПР}(t)$) протікає струм i_5 , а через набігаючий край правої щітки (його опір $R_{2ПР}(t)$) протікає струм i_4 . Струм секції якоря позначено як i_6 .

Отримане рівняння для струму кола живлення, який викликаний дією джерела e_T у кінцевому вигляді:

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + a(t) \cdot \frac{di_1}{dt} + b(t) \cdot i_1 = f(t), \quad (15)$$

Проведено оцінювання ефективності процесу контролю та управління, здійснюваного системою автоматичного управління (САУ):

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{H_0(t, \tau) - H(t, \tau)}{H_0(t, \tau)} \quad (16)$$

За виразом (16) встановлено, що ідеальна САУ матиме значення ефективності $\mathcal{E}_I(t, \tau) = 1$, а реальна – значення $\mathcal{E}_I(t, \tau) < 1$. Однак така ситуація не враховує динаміку процесу контролю та управління, складність і вартість системи автоматичного управління. Ці недоліки можна усунути шляхом введення іншого співвідношення для ефективності САУ:

$$\mathcal{E}(t, \tau) = \frac{K_I(t, \tau)}{K_{IO}(t, \tau)}, \quad (17)$$

де $K_I(t, \tau) = \frac{I_{\max}(t, \tau)}{C_{\Sigma}(t, \tau)}$ – максимальна кількість інформації, одержувана САУ в розрахунках на одиницю її загальної вартості;

$I_{\max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i\max}(t, \tau)$ – максимальна кількість інформації, яку отримують під час контролю за m параметрами процесу;

Джерело постійної напруги тут враховано його внутрішнім активним опором $R_П$, а джерело синусоїдної напруги – його активним опором R_T та внутрішньою індуктивністю L_T . Індуктивність обмотки збудження позначена $L_Б$, індуктивність обмотки якоря $L_Я$, взаємна індуктивність між ними – $M(t)$. Зазначимо, що взаємна індуктивність є функцією часу з огляду на обертання якоря. Викликаний джерелом e_T струм i_1

розтікається через збігаючий край лівої щітки (опір $R_{1Л}(t)$) та її набігаючий край з опором $R_{2Л}(t)$ відповідно на струми i_2 та i_3 . Через збігаючий край правої щітки (його опір $R_{1ПР}(t)$) протікає струм i_5 , а через набігаючий край правої щітки (його опір $R_{2ПР}(t)$) протікає струм i_4 . Струм секції якоря позначено як i_6 .

$$K_{IO}(t, \tau) = \frac{I_{\max \max}(t, \tau)}{C_{\min}(t, \tau)} - \text{максимальна середня кількість інформації, одержувана}$$

САУ під час контролю за m параметрами процесу в розрахунку на одиницю мінімальної загальної вартості ідеалізованої САУ;

$$I_{\max \max}(t, \tau) = \sum_{i=1}^m I_{i \max \max}(t, \tau) - \text{максимальна середня кількість інформації,}$$

одержувана під час контролю об'єкта за m параметрами.

З урахуванням розглянутих вище співвідношень і рівності $I_{\max \max}(t, \tau) = m$ отримано остаточну формулу для оцінювання ефективності системи автоматичного управління (САУ) і контролю тягового рухомого складу:

$$\Theta(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^m [H_{0i}(t, \tau) - H_i(t, \tau)] C_{\min}(t, \tau)}{m \sum_{i=1}^m C_i(t, \tau)} \quad (18)$$

За результатами розрахунків величина ефективності САУ з урахуванням економічних витрат склала 0,945.

У роботі також був виконаний синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Для дослідження векторної системи керування було використано математичну модель АД в обертовій системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора d, q , яку можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_e i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} - \omega_k \sigma L_s i_{sq} - p \omega k_r \Psi_{rq}; \\ U_{sq} = R_e i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + p \omega k_r \Psi_{rd}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rd} + (\omega_k - p\omega) \Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rq} - (\omega_k - p\omega) \Psi_{rd}; \\ M = \frac{3}{2} p k_r (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}); \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases}, \quad (19)$$

де $R_e = R_s + k_r^2 R_r'$ – еквівалентний опір;

$T_r = L_r / R_r'$ – електромагнітна постійна часу ротора;

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_1 \cdot L_2)$ – коефіцієнт розсіювання;

U_{sd}, U_{sq} – напруга статора по осях d та q відповідно;

i_{sd}, i_{sq} – струм статора;

Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – потокозчеплення ротора;
 L_s – індуктивність статора;
 L_m – індуктивність розсіювання;
 k_r – коефіцієнт зв'язку ротора;
 ω_k – частота обертання системи координат;
 ω – електрична частота обертання ротора;
 p – кількість пар полюсів;
 M – електромагнітний момент;
 M_c – момент опору;
 J – момент інерції.

Для моделювання обрано асинхронний ТЕД АД914-У, основні технічні характеристики якого наведено в таблиці 1.

На основі системи рівнянь 19 та з урахуванням параметрів двигуна в середовищі Matlab була розроблена імітаційна модель системи векторного керування тяговим електродвигуном АД914-У з нейрорегулятором NARMA-L2 (рисунок 36).

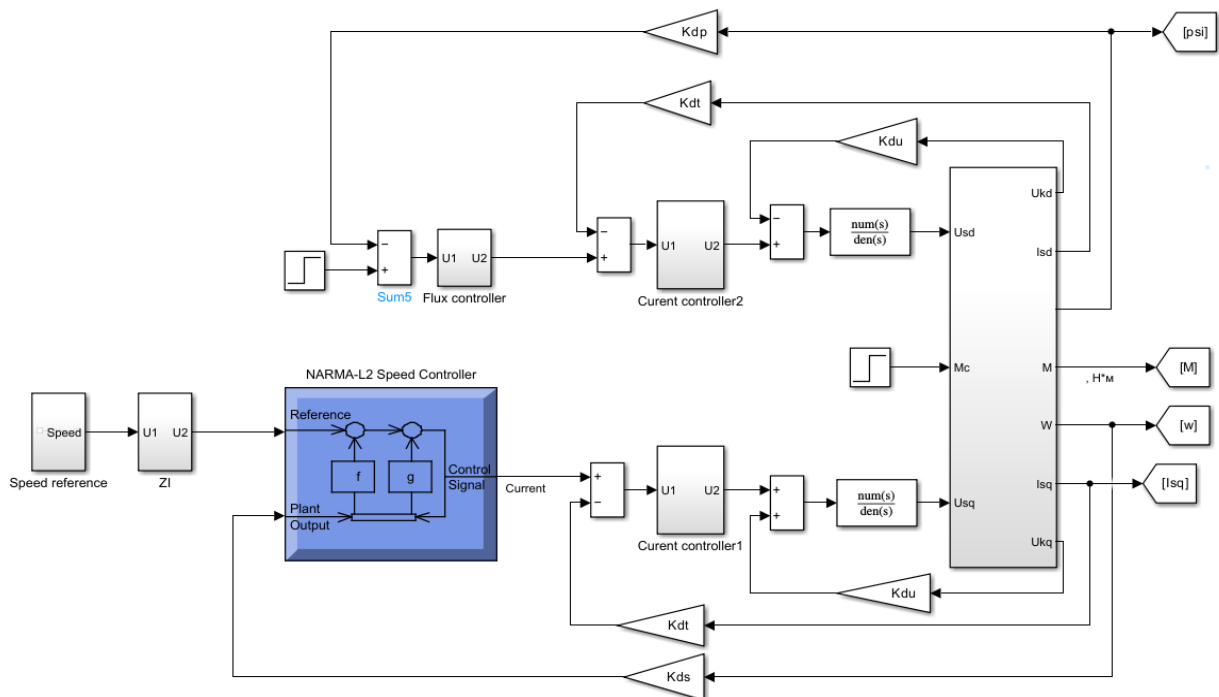


Рисунок 36 – Імітаційна модель векторного керування з нейрорегулятором NARMA-L2

Для навчання нейронної мережі було обрано 40000 тренувальних точок, які знімалися через інтервал у 0,01 с, 1000 циклів навчання та обрано алгоритм Левенберга-Марквардта.

У результаті навчання нейромережі похибка регулювання частоти обертання склала 10 об/хв, для чого було здійснено 70 навчальних циклів.

Для демонстрації можливостей нейрорегулятора NARMA-L2 проведено порівняльне імітаційне моделювання системи векторного керування з нейрорегулятором швидкості та ПІ-регулятором. Результати моделювання подано на рисунку 37. Червоним кольором позначені характеристики електродвигуна з нейрорегулятором швидкості, а синім – з ПІ-регулятором.

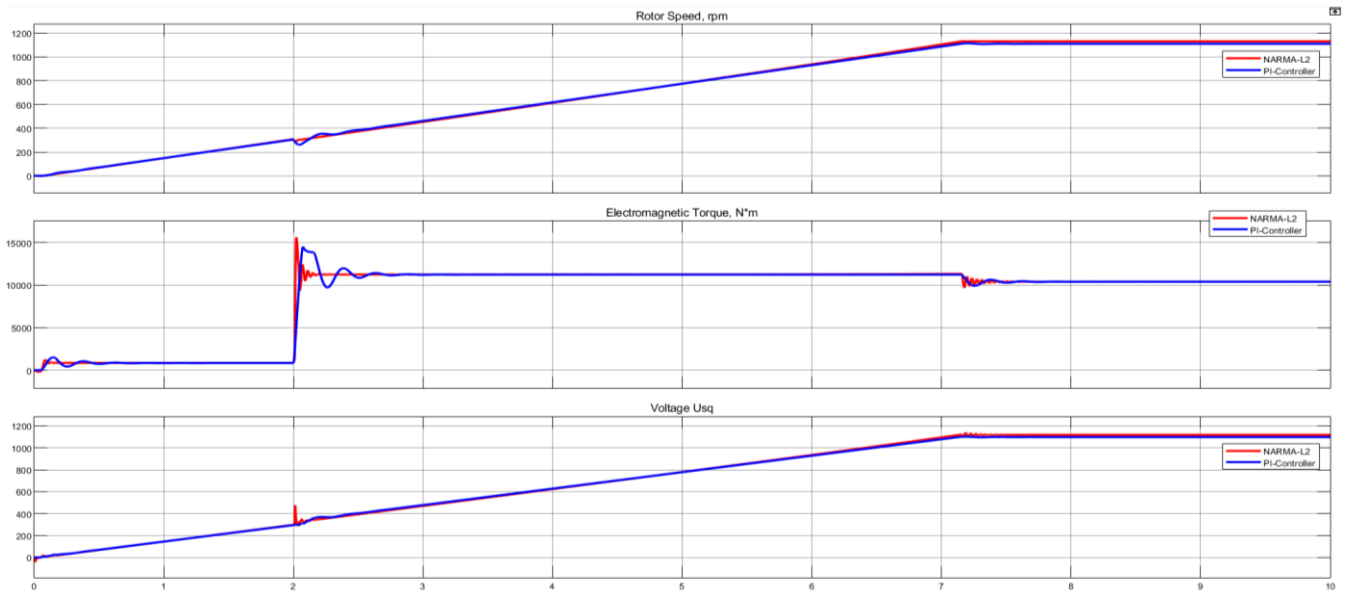


Рисунок 37 – Результати імітаційного моделювання з нейрорегулятором та ПІ-регулятором

У результаті імітаційного моделювання встановлено, що у системи з нейрорегулятором кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

У п'ятому розділі проведено економічну оцінку ефективності впровадження ресурсозберігаючих технологій в експлуатаційному парку локомотивів.

Проведено кореляційно-регресійний аналіз впливу наявності магістральних локомотивів та вантажних вагонів на обсяг перевезення вантажів. Він дозволив обґрунтувати висновок, що в теперішніх умовах саме локомотиви відіграють вирішальну роль у задоволенні потреб у масових вантажних перевезеннях.

Досліджено та обґрунтовано доцільність використання методів кореляційно-регресійного аналізу для побудови економіко-математичної моделі, що адекватно визначає вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів. Визначено залежність величини ВВП ПКС України від обсягів вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом. Було обрано парну лінійну регресію та оцінено її параметри методом найменших квадратів. Статистична значущість рівняння перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Використання моделі дало можливість отримати прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС України за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами за умови подовження їхнього строку експлуатації на п'ять років в обсязі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно.

Сукупний економічний ефект у результаті збільшення обсягів вантажних перевезень п'ятдесятьма локомотивами, обладнаних вітчизняними системами контролю їхнього технічного стану, за п'ять років очікується в розмірі 3765,50 млн грн; загальна рентабельність цього інноваційного заходу складає 1,21 (доходи в 1,21 раза перевищують суму витрат).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом впровадження інноваційних методів і технічних засобів моніторингу та контролю у реальному часі технічного стану їхнього тягового обладнання.

На основі проведених досліджень сформульовано основні висновки.

1. Проведений аналіз існуючих досліджень умов експлуатації ТРС показав, що середній знос локомотивів в Україні сьогодні становить 96,8 %, у тому числі електровозів – 93,3 %, магістральних тепловозів – 99,6 %, а маневрових тепловозів – 99,9 %. Середній вік електровозів складає 40,6 років за нормативного віку в 30 років, магістральних тепловозів – 30,7 років за нормативних 20 років, маневрових тепловозів – 35,8 років за нормативних 25 років. Проаналізовано основні фактори, які безпосередньо впливають на тривалість «життєвого циклу» локомотивів. Визначено, що модернізація локомотивів значно знижує експлуатаційні витрати і підвищує ефективність ТРС та дозволяє продовжити «життєвий цикл» ще на 10-15 років. Досліджений міжнародний досвід подовження життєвого циклу локомотивів свідчить про ефективність цього підходу за умови адаптації до конкретних умов експлуатації.

Проте незважаючи на наявність багатьох досліджень проблему продовження життєвого циклу локомотивів досі не вирішено. Тому формування ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, які значною мірою впливають на їхній життєвий цикл, залишається актуальною науково-прикладною проблемою.

2. Розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у частотно-керованому АД, яка дозволяє виявляти вплив технічного стану обмоток статора АД на спектральний склад струму ПЧ–АД і визначати сукупність його параметрів, що підлягають числовому оцінюванню, й автоматично враховувати поточну конфігурацію комутуючих перемикачів. Результати моделювання в MathCAD показали наявність змін у спектральному складі струмів статора в аварійному режимі роботи, що у подальшому дозволить накопичувати бази даних їхнього технічного стану залежно від виду пошкоджень.

3. Розроблено імітаційну модель АД, що дозволило провести аналіз пускових і несиметричних режимів роботи асинхронного ТЕД АД914У та з використанням пакетів моделювання ANSYS і MATLAB сформувати зразкові бази даних для подальшого моніторингу його технічного стану в процесі експлуатації з урахуванням того, що термін служби повністю навантаженого АД, який працює за несиметрії напруги 4 %, зменшується в 2 рази, а за несиметрії 5 % потужність двигуна зменшується на 5-10 %. За несиметричного режиму живлення ТЕД було встановлено, що відхилення напруги однієї фази на 2 % викликає значні коливання як електромагнітного моменту, так і частоти обертання, а це в свою чергу призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та додаткового нагріву обмоток двигуна. Відносна похибка

моделювання складала: за моментом двигуна 0,67 %, вхідним струмом 3,7 %, коефіцієнтом потужності 7,95 %, ККД – 0,52 %.

4. Проведено імітаційне моделювання процесу векторного керування асинхронним ТЕД, що дозволило дослідити номінальні та аварійні режими роботи тягового електродвигуна АД914У в процесі експлуатації. Результати імітаційного моделювання показали, що аварійні режими навіть при короткочасній тривалості (0,2 с при короткому замиканні та 0,4 с при зникненні напруги живлення) здатні призвести до значних пошкоджень і спричинити зупинку електродвигуна. Обидва випадки призводять до кратних струмових перевантажень, збільшення спотворень фазного струму до 65 %, появи субгармонік з високими амплітудами (у випадку короткого замикання навіть вище основної гармоніки) і значних пульсацій електромагнітного моменту. Крім того, повернення з аварійного режиму до нормального на номінальні характеристики відбувалось за моменту, який складав 20 % номінального, а коефіцієнт спотворення фазного струму склав 26 %. Це дозволяє визначити граничні межі процесу векторного керування ТЕД.

5. Запропоновано метод моніторингу технічного стану асинхронних ТЕД в умовах дії складної адитивної завади, що дозволяє здійснювати контроль ТЕД в реальному часі під час експлуатації.

6. На базі дослідження електромагнітного оточення локомотива в процесі експлуатації визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження тестового струму в обмотці трифазного ТЕД, що дозволило шляхом аналізу спектрального складу цих завад встановити діапазон частот, у якому їхня спектральна щільність найменша, саме для тягового двигуна АД-914У вона складає обмежені діапазони частот 0...2 кГц і 19,64...20,36 кГц, що дозволяє встановити діапазон частот, де вплив завад буде найменшим, а саме від 2 до 19 кГц вільний від усіх завад, окрім імпульсної. У ньому доцільно розмістити (локалізувати) тестовий сигнал (можна і вище 20,36 кГц, але зі зростанням частоти збільшується й опір індуктивно-ємнісного кола фази, і для отримання прийнятної величини сигналу знадобиться й більша потужність генератора цього сигналу).

7. З урахуванням можливих варіантів часових залежностей залишкових завад розроблено математичну процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу, що дозволило шляхом комп'ютерного моделювання визначити точнісні характеристики цієї процедури в широкому діапазоні інтенсивності завади і ступеня перекриття сигналу і завади за часом. Обчислено середньоквадратичні похибки σ_I оцінки амплітуди сигналу та σ_φ оцінки початкової фази сигналу, які для струму $I_p = 0,01$ А складають відповідно $5,6 \cdot 10^{-5}$ та 0,067 при тривалості τ_p імпульсу завади $\tau_p = 0,125 (T_2 - T_1)$;

8. Проведено синтез пристрою оцінювання параметрів зонduючого синусоїдного сигналу адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою для виявлення пошкоджень обмоток асинхронного ТЕД у реальному часі, що забезпечує отримання більш наближених до реальності оцінок параметрів тестового сигналу та пов'язаних з ними величин електричних параметрів обмотки, а відтак – підвищує точність діагностування технічного стану двигуна.

9. Для статистичної моделі адитивної суміші сигналу та завад, яка описана функцією щільності розподілу ймовірності миттєвого значення, визначено вирази для границь Крамера-Рао оцінок амплітуди та початкової фази синусоїди при її спостереженні на фоні суміші імпульсної та неперервної шумових завад, що дозволяє обчислити величини мінімального середньоквадратичного відхилення (МСВ) результатів досліджень. Залежності МСВ оцінки амплітуди від ΔF при $I_{n0,5}=10^{-3}$ А; $I_p=1$ А; $T_2-T_1=0,01$ с; $\tau_p=0,5(T_2-T_1)$ знаходиться в межах « $2,5 \times 10^{-4}$ - $4,875 \times 10^{-5}$ ». Отже, отримані найвищі граничні точності оцінок є абсолютними, оскільки вони розраховані за всіх відомих параметрів функції щільності розподілу ймовірності спостереженої реалізації вхідного коливання.

10. Проведено синтез пристрою оптимального приймання зонduючого сигналу обмоток тягових двигунів на тлі адитивної п'ятикомпонентної завади для здійснення моніторингу технічного стану ТЕД під час експлуатації. Чотири компоненти завади є структурно-детермінованими, а п'ята являє собою широкосмуговий гаусівський шум, що дозволило розпізнати ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад. Залежність середньої ймовірності похибки розрізнення P_{EM} від амплітуди U_{ms} зонduючого сигналу за різних величин середньоквадратичної напруги шуму σ_{II} знаходиться в межах « $2,04 \cdot 10^{-4}$ - $0,486$ ». Результати розрахунку величини P_{EM} дозволяють зробити висновок, що розроблений пристрій надійно розпізнає ситуацію наявності тестового зонduючого сигналу у вхідній суміші цього сигналу і типових завад.

11. Розроблено математичну модель процесу розповсюдження зонduючих сигналів, яка дозволяє провести аналітичний та числовий опис їхніх параметрів у будь-якій вітці схеми заміщення тягового двигуна постійного струму. Отримані в ході розрахунків рівняння залишаються справедливими для будь-якої форми тестової напруги. Це дозволяє знайти аналітичний опис напруги на будь-якому елементі як самого двигуна, так і кола його живлення.

12. Розроблено метод моніторингу ТЕД постійного струму, який базується на введенні в кола живлення двигунів зонduючого гармонічного сигналу і спостереження викликаного ним струму, що дозволило вчасно виявляти їхні можливі пошкодження в процесі експлуатації та вживати заходів щодо їх усунення.

13. Виконано синтез нейрорегулятора швидкості на основі авторегресії з середнім NARMA-L2, реалізованого в бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab у системі керування асинхронним ТЕД АД914У. Для навчання нейронної мережі було обрано 40000 тренувальних точок, які знімалися через інтервал у 0,01 с, 1000 циклів навчання та обрано алгоритм Левенберга-Марквардта. У результаті навчання нейромережі похибка регулювання частоти обертання склала 10 об/хв, для чого було здійснено 70 навчальних циклів. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання частоти обертання та електромагнітного моменту в перехідних процесах, однак при стрибкоподібному накиданні навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

14. Удосконалено систему моніторингу електрообладнання локомотивів, що дозволило підвищити її завадостійкість і точність контролю технічного стану ТЕД в реальному часі та енергоефективність експлуатації в умовах локомотивного депо, а

також здійснити перехід до обслуговування та ремонту двигунів за фактичним станом.

15. Проведено розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження результатів дисертаційної роботи, а саме:

- інноваційних заходів, що дозволяють подовжити експлуатаційні можливості наявного локомотивного парку, а саме рекомендації з удосконалення систем моніторингу технічного стану тягових двигунів локомотивів;

- методів та засобів контролю технічного стану тягових двигунів локомотивів у реальному часі;

- визначення залежності обсягів вантажних залізничних перевезень від кількості магістральних локомотивів та вантажних вагонів експлуатаційного парку, що дозволяє адекватно оцінити вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів.

Обґрунтовано економічну доцільність впровадження ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів, а саме завадостійкої системи моніторингу тягових двигунів локомотивів, виходячи з можливості її використання у локомотивних депо регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», що має суттєве значення для підвищення ефективності роботи загальнодержавної транспортно-логістичної системи.

На підставі отриманих даних визначено очікувану величину додаткового ВВП ПКС України, яку можливо отримати від впровадження протягом п'яти років запропонованих у роботі завадостійких методів моніторингу тягових двигунів на п'ятдесяти локомотивах АТ «Укрзалізниця» у результаті їхньої модернізації, в розмірі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно (35,6 тис. дол. в розрахунку на один локомотив за рік).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Супрун О. Д., Семененко О. І., Панченко В. В., Семененко Ю. О. Дослідження електромагнітних перехідних процесів у частотно-керованому електроприводі перемикальних пристроїв трансформаторів тягових підстанцій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 25–36. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i6.119929>.

2. Акімов О. І., Заїка Л. В., Панченко В. В., Панютін О. М. Розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 181. С. 43–50. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156417>.

3. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оптимальне приймання інформаційних сигналів в умовах дії п'ятикомпонентної завади. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229062>.

4. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна за допомогою імітаційної моделі. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3. С. 3–6. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240446>.

5. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження втрат енергії в сонячній електростанції на тяговій підстанції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 196. С. 149–160. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.242262>.

6. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>.

7. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 199. С. 89–98. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>.

8. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Вплив подовження «життєвого циклу» локомотивів на ВВП країни та економіку залізничної галузі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2022. Вип. 200. С. 36–48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696>.

9. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Моделювання електричних перехідних процесів у частотно-керованому асинхронному двигуні. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i2.259696>.

10. Луценко І. М., Рухлова Ю. Н., Кириченко М. С., Панченко В. В., Циган П. С. Підвищення енергоефективності режимів розподільчих мереж із фотоелектричними станціями. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. № 1 (193). С. 99–106. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099>. (видання індексується в базі Scopus, Q3).

11. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження аварійних режимів роботи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 56–63. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277955>.

12. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295>.

13. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 73–82. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i3.290140>.

14. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора

трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 28–37. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i4.296413>.

15. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зонduючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 52–60. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307682>.

16. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 25–32. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>.

17. Панченко В. В., Туренко О. Г. Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 для системи тягового асинхронного електропривода. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 208. С. 180–187. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308623>.

18. Buriakovskiy S. G., Maslii A. S., Panchenko V. V., Pomazan D. P., Denis I. V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No 2. P. 59–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.10>. (видання індексується в базі *Web of Science*).

19. Panchenko S., Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, Issue 9 (111). P. 94–102. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235835>. (видання індексується в базі *Scopus*, Q3).

20. Відмовостійкий колійний індуктивний датчик : пат. 127127 Україна : МПК B61L1/08, B61L25/00, G08G7/00; № а201906666 ; заявл. 20.06.2019 ; опубл. 10.05.2023, Бюл. № 23.

Публікації у виданнях інших держав

21. Mezitis M., Panchenko V., Yatsko S., Vashchenko A., Sidorenko A., Sansyzbajeva Z. Selection of mathematical model of on-board capacity energy storage as element of hybrid traction unit of motor car rolling stock. *Journal of Measurements in Engineering*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21818>. (видання індексується в базі *Scopus Q3*, закордонне видання).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

22. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 158–163. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160105>. (включено до наукометричної бази *Scopus*).

23. Panchenko V. V., Masliy A. S., Kharin R. O. Prospects of introducing alternative sources of energy on Ukrainian railways : International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. P. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012008> (включено до наукометричної бази Scopus).

24. Akimov A. I., Akimova J. A., Panchenko V. V., Odiehov M. M. The composite functional statistical criterion for evaluating the effectiveness of the automatic control process and system. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) 18th-20th November, Kharkiv, Ukraine. [Citation A. I. Akimov] *et al* 2021. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012001>. (включено до наукометричної бази Scopus).

25. Яцько С. І., Карпенко Н. П., Панченко В. В., Ващенко Я. В. Розвиток обладнання розподільних пристроїв тягового електропостачання. Частина І. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 172. С. 37–48.

26. Plakhtii O., Trubchaninova K., Panchenko V., Anannieva O. Improving the Energy Efficiency of Railway Electrical Traction by Creating Smart Grid System. *ICTE in Transportation and Logistics 2019 (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure)*. 2019. P. 337–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_42.

27. Панченко В. В., Харін Р. О Модернізація систем електропостачання залізниць шляхом застосування альтернативних джерел енергії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* : тези стендових доповідей та виступів учасників 32-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 24–25 жовтня, 2019 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2019. № 4 (додаток). С. 36–37.

28. Бабаєв М. М., Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового електродвигуна 1AL4668DT у програмному комплексі Ansys. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 12.

29. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Подовження «життєвого циклу» локомотивів шляхом їх модернізації як фактор впливу на економічний розвиток. *Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції : проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2022* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 31 травня 2022 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. С. 67–70.

30. Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Пріоритетний напрямок технічної політики Укрзалізниці в теперішній період. *Технологія-2022* : XXV матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 27 травня 2022 р., м. Сєвєродонецьк / укл. : Тарасов В. Ю., Зубцов Є. І. Сєвєродонецьк : Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, 2022. С. 118–119.

31. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Ефективність автоматизації оперативного контролю технічного стану локомотивів.

Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика : матеріали 18-ї науково-практичної міжнародної конференції (2-3 червня 2022 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2022. С. 94–96.

32. Панченко В. В., Туренко О. Г. Застосування штучних нейронних мереж в системі керування тяговим електроприводом. *Стан та перспективи розвитку електричного транспорту* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2022 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 158–160

33. Панченко В. В., Туренко О. Г. Порівняльний аналіз типів регуляторів для керування електродвигунами змінного струму. *Матеріали шістнадцятої міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» ІТРК-2023, 23-24 травня*. Київ : НАУ, 2023. С. 221–222.

34. Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г. Аналіз роботи системи тягового асинхронного електропривода електрорухомого складу з різними типами регуляторів швидкості. *Матеріали п'ятнадцятої міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології»* : збірник наукових праць / під загальною редакцією І. Кравця, О. Возняка ; НУЛП. Львів. 2023. С.74–76

35. Ananieva O. M., Babaiev M. M., Panchenko V. V., Davydenko M. H. Justification of the selection of the frequency range for the location of the test signal of the stator windings of a three-phase asynchronous electric motor. *Інформатика, управління та штучний інтелект* : тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 4.

36. Спосіб ідентифікації поїзда під час руху : пат. 133387 Україна : МПК B61L1/00, B61L25/02. № u201808240 ; заявл. 26.07.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.

АНОТАЦІЯ

Панченко В. В. Розвиток наукових основ формування ресурсозберігаючих методів, технологій та технічних засобів експлуатації локомотивів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (273 – залізничний транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми формування ресурсозберігаючих технологій експлуатації локомотивів шляхом подальшого розвитку науково-обґрунтованих методів, моделей та технічних засобів моніторингу у реальному часі технічного стану тягового рухомого складу.

Проаналізовані умови роботи та причини відмов тягових електричних машин локомотивів. Розглянуто світовий досвід впровадження систем моніторингу енергоефективності локомотивів, виконане моделювання впливу перехідних процесів та аварійних режимів роботи на технічний стан тягових електродвигунів локомотивів. Розроблено математичну модель електричних перехідних процесів у трифазному дворівневому автономному інверторі напруги та його навантаженні. Розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною широтно-імпульсною модуляцією тяговим асинхронним електроприводом. Визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження тестового струму в обмотці тягового електродвигуна. Проведено синтез пристрою оптимального приймання зонduючого сигналу контролю технічного стану асинхронних тягових електродвигунів. Виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів. Отримані результати розрахунків підтвердили доцільність прийнятих рішень.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, «життєвий цикл» локомотивів, тяговий електродвигун, імпульсна завада, завадостійкий пристрій.

ABSTRACT

Panchenko V. V. Development of Scientific Foundations for the Formation of Resource-Saving Methods, Technologies, and Technical Means for Locomotive Operation – A Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.07 – Rolling Stock of Railways and Train Traction (273 – Railway Transport). – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is dedicated to addressing the scientific and applied problem of forming resource-saving technologies for locomotive operation by further developing scientifically grounded methods, models, and technical means for real-time monitoring of the technical condition of traction rolling stock.

The relevance of the topic is further reinforced by the rising cost of energy resources, particularly due to the war in Ukraine, the need to mitigate the environmental

impact of railway transport, the aging locomotive fleet, the introduction of digital technologies in locomotive management, and the development and integration of renewable energy sources into the country's energy system. The lack of a comprehensive scientific approach to the formation of resource-saving locomotive operation methods slows down the integration of energy-efficient technologies and complicates the adaptation of railway transport to modern conditions.

The working conditions and causes of failures in locomotive traction electric machines have been analyzed. Five primary causes of traction motor failures have been identified and classified by frequency in percentage terms.

A two-phase simulation model of the traction asynchronous motor in a stationary coordinate system has been synthesized. This model allows for the determination of rotation frequency, electromagnetic torque, and three-phase current characteristics during direct start-up.

A mathematical procedure for estimating the parameters of the test signal has been developed. Through computer modeling of the case involving a sinusoidal test signal, the accuracy characteristics of this procedure were determined across a wide range of interference intensity and varying degrees of temporal overlap between the signal and interference.

An optimality criterion for signal reception has been determined, and a corresponding objective function has been formulated and optimized, considering the mutual correlation relationships between the components of the additive mixture of signal and interference.

A synthesis of an optimal receiver for the probing signal used in monitoring the technical condition of asynchronous traction electric motors has been performed.

An analysis of the railway performance indicators revealed that the waiting time for the formation (and disbanding) and dispatch of a freight train accounted for approximately 33% of the wagon cycle time, primarily due to a shortage of locomotives, while, for various reasons, about 70% of the operational wagon fleet was idle simultaneously. Based on these findings, it was concluded that a priority task in forming the technical policy of the railway sector for the medium term is the implementation of innovative measures that will extend the operational capabilities of the existing locomotive fleet.

It has been determined that the total economic effect resulting from the increased freight transportation volumes by fifty locomotives equipped with domestic systems for monitoring their technical condition is expected to reach 3,765.50 million UAH over five years; the overall profitability of this innovative measure is 1.21 (revenues exceed costs by a factor of 1.21); moreover, the development and implementation of domestic systems on fifty locomotives, as opposed to purchasing foreign-made analogs, will yield savings of over 32.6 thousand US dollars.

Keywords: resource-saving technologies, locomotive life cycle, traction electric motor, impulse interference, interference-resistant device.

ПАНЧЕНКО ВЛАДИСЛАВ ВАДИМОВИЧ

УДК. 629.4.083:001.76

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ
МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ЛОКОМОТИВІВ**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Маслій А.С.

Підписано до друку 11 квітня 2025 р.
Формат 60x84 1/16 Папір для множних апаратів
Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,0
Замовлення № 320. Тираж 80 прим.

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту
61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.