

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БЛИНДЮК ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ

УДК 629.42:621.3

**РАДІОЧАСТОТНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ РОБОТИ
ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Луганськ 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Електротехніка та електричні машини” Української державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Бабаєв Михайло Михайлович, Українська державна академія залізничного транспорту, завідувач кафедри “Електротехніка та електричні машини”.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Смирний Михайло Федорович, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, перший проректор;

кандидат технічних наук Носков Валентин Іванович, НДІ “Електроважмаш”, головний конструктор.

Провідна установа

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, кафедра “Локомотиви”, Міністерство транспорту України, м. Дніпропетровськ.

Захист відбудеться “25” червня 2002 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д29.051.03 у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а, к.241, корп.1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а.

Автореферат розісланий “17” травня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Осенін Ю.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Експлуатаційна надійність тягового рухомого складу є одним з основних

показників якості, що визначають економічну ефективність роботи залізничного транспорту, раціональне використання енергетичних і матеріальних ресурсів виробництва, а також забезпечують безпеку руху поїздів. В умовах фізичного старіння локомотивного парку, що відбувається в даний час на залізничному транспорті України, підвищення надійності експлуатації тягового рухомого складу неможливе без впровадження ефективних методів контролю якості технічного обслуговування і ремонту локомотивів. При цьому для забезпечення необхідних обсягів і термінів перевезень, безпеки руху поїздів необхідно так будувати стратегію технічного обслуговування устаткування, щоб постійно підтримувати його надійність на необхідному рівні, зменшувати час простою локомотивів через несправність їхніх вузлів, агрегатів і систем. Статистичний аналіз даних з відмов локомотивів, що знаходяться в експлуатації, показує, що причиною більшості ушкоджень є відмова електроустаткування в цілому і, зокрема, тягових електродвигунів (ТЕД). Якщо врахувати, що збитки від аварійного простою електричних машин протягом декількох годин часто перевищують їх собівартість, то неважко пояснити, чому останнім часом усе більший інтерес виявляється до проблеми створення методів довгострокового прогнозування надійності функціонування тягових двигунів, які базуються на принципово нових засобах комплексної діагностики. У загальному випадку контроль технічного стану тягового рухомого складу припускає комплексну оцінку апріорно заданого рівня надійності його агрегатів і систем як засобами бортової діагностики в процесі експлуатації, так і на стадії його технічного обслуговування і ремонту. Це викликає необхідність вирішення задачі керування технічним станом контрольованих об'єктів. При її вирішенні дуже важливо вміти об'єктивно визначати технічні характеристики об'єктів керування в даний момент часу з метою прийняття рішення про можливість чи неможливість подальшої експлуатації цих об'єктів, а також прийняття рішення про вид несправностей і про подальшу технологію роботи з об'єктами, визнаними непридатними до поточної експлуатації.

Виходячи з цього, виникає необхідність вирішення важливої науково-технічної проблеми удосконалення ефективності діагностування технічного стану локомотивів шляхом створення нових методів контролю якості роботи тягових електродвигунів.

Актуальність теми. Економічна ефективність роботи залізничного транспорту в значній мірі залежить від технічного стану локомотивного парку. Для забезпечення необхідних обсягів і термінів перевезень, безпеки руху поїздів необхідно так будувати стратегію технічного обслуговування локомотивів, щоб постійно підтримувати їхню надійність на необхідному рівні. У свою чергу, технічне обслуговування буде ефективним тільки за умови одержання оперативної і повної інформації про технічний стан тягових двигунів, причому оперативність і повнота інформації повинні бути забезпечені як в експлуатації, так і в депо при профілактичних і ремонтних роботах. Виходячи з цього, можна прийти до висновку, що діагностування ТЕД у даний час і на найближчу перспективу вимагає оптимального поєднання безупинного і дискретного (періодичного) контролю найбільш інформативних параметрів тягових двигунів, при цьому кращим є використання вмонтованих засобів контролю. Така стратегія діагностування забезпечить перехід від регламентного і календарного технічного обслуговування до більш ефективного технічного обслуговування за фактичним станом ТЕД. Таким чином, впровадження в практику нових методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану тягових двигунів, які створені на основі теоретичних розробок даної дисертаційної роботи, дозволяє кваліфікувати її як актуальну, спрямовану на розв'язання важливої науково-технічної задачі удосконалення ефективності контролю технічного стану локомотивів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електротехніки та електричних машин Харківської державної академії залізничного транспорту відповідно до планів науково-дослідних робіт академії, що проводяться в рамках галузевих програм у наукових напрямках Міністерства транспорту України за замовленням Державної адміністрації залізничного транспорту України. Провідний виконавець науково-дослідної роботи "Наукове обґрунтування реалізації Концепції розвитку

систем діагностування в локомотивному господарстві залізниць України” від 2000р., № 0101U002465.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вирішення наукової задачі підвищення ефективності контролю технічного стану тягових двигунів локомотивів. Для досягнення заданої мети в роботі поставлені такі основні задачі наукових досліджень:

- провести аналіз літературних джерел з проблеми технічного обслуговування та ремонту локомотивів з оцінкою основних факторів, що впливають на їхнє функціонування;
- теоретично обґрунтувати принципову можливість створення непрямих радіочастотних методів контролю якості роботи тягових двигунів;
- розробити методологію побудови пристроїв контролю ефективності експлуатації тягових машин;
- розробити математичні моделі інформаційних сигналів з метою оптимальної оцінки діагностичних параметрів контрольованих машин;
- розробити математичну модель лінії зв'язку між джерелом сигналу і пристроєм обробки інформації й оцінити її параметри;
- реалізувати запропоновану методологію підвищення ефективності контролю технічного стану тягових двигунів у вигляді безконтактного багатоканального процесора, що контролює надійність їхньої роботи;
- розробити математичні моделі пристроїв приймання й обробки інформації сигналів, прийнятих безконтактним датчиком;
- розробити алгоритм, що реалізує фільтровий метод оцінки контрольованих параметрів;
- провести експериментальні дослідження розроблених методів і засобів технічної діагностики тягових двигунів локомотивів;
- розробити методіку оцінки економічної ефективності впровадження розроблених пристроїв контролю якості роботи тягових двигунів.

Об'єктом досліджень є стратегії, режими і програми технічного обслуговування і ремонту локомотивів.

Предмет досліджень – тягові двигуни локомотивів.

Методи дослідження. У роботі використані теоретичні основи технічної діагностики, методи спектрального аналізу інформаційних сигналів, методи розпізнавання образів, статистична теорія вимірювальних радіосистем, теоретичні основи статистичної радіотехніки, методи прикладного аналізу часових рядів, теорія ідентифікації систем, числові методи розв'язання екстремальних задач.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в подальшому розвитку теоретичних основ удосконалення ефективності діагностування технічного стану тягового рухомого складу залізничного транспорту на основі впровадження нових радіочастотних методів і засобів контролю якості роботи тягових двигунів локомотивів, а саме:

- вперше розроблені теоретичні основи побудови непрямих радіочастотних методів контролю якості роботи тягових двигунів, що дозволило одержувати оперативну і повну інформацію про технічний стан їх вузлів, як в процесі експлуатації, так і в депо при профілактичних і ремонтних роботах;
- вперше розроблені теоретичні основи побудови систем контролю ефективності експлуатації тягових машин, що дозволило реалізувати пристрій оцінки якості комутації ТЕД у вигляді багатоканального процесора;
- вперше розроблені математичні моделі інформаційних сигналів з метою оптимальної оцінки діагностичних параметрів тягових машин, для чого виведені відповідні розрахункові співвідношення;
- вперше розроблена математична модель лінії зв'язку між джерелом сигналу і безконтактним датчиком пристрою обробки інформації у вигляді тракту, структурна схема якого складається з послідовно з'єднаних диференціального оператора D і підсилювача з

коефіцієнтом підсилення M , чисельно рівним взаємній індуктивності між іскровим каналом і котушкою датчика, що дозволило оцінити й оптимізувати параметри тракту;

- вперше розроблена математична модель обробки інформаційних сигналів, що реалізує фільтровий метод первинних оцінок контрольованих параметрів, який представлений у рекурентній формі, що забезпечує, по-перше, збільшення точності вторинних оцінок параметрів (аж до потенційної) у міру збільшення довжини послідовності первинних оцінок і, по-друге, збільшення оперативності одержання уточненої (вторинної) оцінки вимірюваного параметра на поточному кроці вимірювань;

- вперше запропоновано удосконалений критерій оцінки економічної ефективності використання пристроїв контролю якості роботи тягових двигунів локомотивів, обумовлений фінансовою вигодою, одержуваною від реалізації даного проекту внаслідок зниження їх експлуатаційних витрат.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Достовірність наукових результатів дисертації підтверджується порівнянням теоретичних розрахунків і результатів, отриманих при проведенні експериментальних досліджень розроблених методів і засобів технічної діагностики тягових двигунів локомотивів на дослідній станції локомотивного депо “Жовтень” Південної залізниці. Достовірність результатів ґрунтується на фундаментальних положеннях апробованих математичних методів дослідження та реальних вихідних даних.

Наукове значення роботи. Отримані результати спрямовані на розвиток теорії експлуатації і ремонту засобів транспорту в умовах ринкової економіки та розширення господарської самостійності залізниць.

Практичне значення одержаних результатів. Рекомендації, які отримані за запропонованою методикою обґрунтування технології контролю ефективності експлуатації тягових двигунів локомотивів, заснованої на вимірюванні параметрів радіовипромінювання, що виникає в процесі комутації тягових двигунів, дозволяють:

- підвищити ефективність і точність діагностики тягових двигунів локомотивів за рахунок упровадження неруйнуючих методів контролю їхніх основних параметрів;
- контролювати якість комутації електричних машин як пристроями бортової діагностики в процесі експлуатації, так і на стадії їхнього технічного обслуговування і ремонту;
- поліпшити технологію виконання технічного огляду і ремонту локомотивів.

Розрахунковий економічний ефект, одержуваний при впровадженні “Методики прогнозуючого контролю ефективності експлуатації тягових двигунів локомотивів” на Південній залізниці, складає в період з 2000 по 2010 роки 1711,9 тис. грн у цінах 2001 року.

Особистий внесок здобувача. Всі положення і результати, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: в роботі [2] - теоретичне обґрунтування адекватності математичної моделі комутації електричних машин постійного струму; в роботі [4] - теоретичне обґрунтування можливості використання методики прогнозуючого контролю для оцінки якості роботи тягових двигунів локомотивів; в роботі [5] - теоретичне обґрунтування можливості використання радіовипромінювання, що виникає в процесі комутації електричних машин, для оцінки якості комутації тягових двигунів; в роботі [6] - теоретичне обґрунтування й оцінка параметрів математичної моделі процесу комутації тягових двигунів; в роботі [7] - розробка методики проведення експериментів, аналіз і обробка результатів експериментальних досліджень; в роботі [9] – розробка моделі сигналу, сформованого поодиноким пакетом іскор.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали і результати дисертаційної роботи доповідалися й отримали схвалення:

- на 13-й міжнародній школі-семінарі “Перспективні системи управління на залізничному, промисловому і міському транспорті” (м. Алушта, 2000р.);

- на міжнародній науково-практичній конференції “Задоволення потреб населення великих міст у перевезеннях” (м. Харків, 2000 р.);
- на 14-й міжнародній школі-семінарі “Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті” (м. Алушта, 2001 р.);
- на щорічних науково-технічних конференціях Харківської державної академії залізничного транспорту з міжнародною участю спеціалістів залізничного транспорту (м. Харків, 2000, 2001 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано дев’ять статей у фахових наукових журналах, у тому числі три – без співавторів.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 143 сторінках машинописного тексту, включає 40 рисунків, 8 таблиць, список літератури з 116 назв на 12 сторінках і 3 додатки на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, формулюється мета, задачі дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Відображені основні наукові положення і результати досліджень, що виносяться на захист. Наведена інформація про структуру дисертації, публікації та апробацію робіт.

У першому розділі подано аналіз сучасного стану проблеми технічного обслуговування та ремонту локомотивів з оцінкою основних факторів, що впливають на їхнє функціонування. Локалізація і систематизація діагностичної інформації і, як наслідок, її найкраща інтерпретація й обґрунтованість заходів щодо технічного обслуговування локомотива істотно визначається тим, як структурований останній. В теорію надійності, діагностики та оптимізації систем технічного обслуговування локомотивів значним внеском є роботи Боднаря Б.Є., Браташа В.О., Голубенка О.Л., Кудряша А. П., Стрекопитова В.В., Тартаковського Е.Д. та ін. Теорія підвищення експлуатаційної надійності тягових двигунів розглядається в роботах Волкова В.К., Котеленця М.Ф., Кузнецова М.Л., Суворова А.Г. та ін. Проте в даний час на залізничному транспорті України проблема вдосконалення систем технічного обслуговування та ремонту локомотивів вирішується недостатньо. Як показала практика експлуатації, одночасна інтерпретація обслуговуючим персоналом усієї сукупності показників, які характеризують дуже різноманітні за своїми фізичними і функціональними характеристиками вузли й агрегати, виявляється неможливою. У зв'язку з цим існує задача упорядкування потоку діагностичної інформації. Її вирішенням є надання цьому потоку ієрархічної структури, при якій показники, аналізовані на все більш і більш високих рівнях агрегування вузлів локомотива, є усе більш і більш узагальненими. Практична реалізація зазначеного рішення набуває різноманітних форм. Відповідна глибина діагностування за узагальненими показниками, тобто детальність визначення технічного стану складових частин локомотива, гранично мала. Набагато більш глибокою є діагностика локомотивів з використанням багаторівневих комплексних систем діагностування. Нижній рівень утворюють датчики, установлені на вузлах устаткування; середній рівень – контролери і додаткові вимірювальні прилади, що контролюють технічний стан агрегатів локомотива (аж до секції локомотива); верхній рівень – центральний процесор, пристрої індикації і реєстрації, що формують кінцеву інформацію для поїзних і ремонтних бригад. Такий вид діагностування найбільше відповідає запитам експлуатаційних служб, тому що дозволяє вести докладний і постійний контроль вузлів і агрегатів локомотивів, накопичувати статистичний матеріал про зміну їхнього технічного стану. Використання багаторівневих комплексних систем діагностування, у свою чергу, вимагає вирішення ряду спеціальних задач. Так, побудова засобів нижнього рівня вимагає попереднього добору діагностичних параметрів за критерієм найбільшої інформативності. Результати вирішення задачі добору безпосередньо пов'язані із забезпеченням контрольнопридатності (тобто придатності до проведення контролю заданими засобами) і надійності локомотивних систем та витратами на технічні засоби

діагностування. У той же час побудова засобів середнього і, особливо, верхнього рівня вимагає вирішення задач переважно логічного і статистичного характеру, в остаточному підсумку – побудови спеціалізованих експертних систем. Велика увага приділяється в науково-технічній і виробничій літературі з діагностування і надійності таким принципово важливим елементам конструкції локомотивів, як тягові двигуни і, зокрема дизельні і дизель-електричні силові установки. Проблема забезпечення надійної роботи тягових електричних двигунів набуває усе більшої і більшої ваги. У цій області концентрується все більш значна частина зусиль фахівців залізничного транспорту. Тяговий електричний двигун (ТЕД) є принципово важливим елементом конструкції локомотива, істотно впливає на надійність останнього: через вихід з ладу ТЕД відбувається близько 30% усіх псування локомотивів. У зв'язку з цим існує задача вибору з усієї множини технічних показників, які характеризують поточний стан ТЕД, деякої підмножини найбільш інформативних параметрів. Тому задача визначення технічного стану ТЕД є багатокритерійною, і ступінь успішності її розв'язання визначається тим, наскільки коректно обрані і враховані діагностичні (контрольовані) параметри, за винятком ситуацій явних відмов. Такий підхід до діагностики базується на використанні складних і гнучких діагностичних моделей ТЕД, які описують останній як об'єкт, доступний аналізу методами математичної логіки. При цьому найбільш інтегроване електричне коло ТЕД доводиться розбивати на підкола, які далі розглядаються як окремі об'єкти діагностування, наприклад, окремі котушки полюсів, щітки, пластини колектора і т.д. Описаний підхід забезпечує найбільшу глибину діагностування і дозволяє вирішувати багато задач технічного обслуговування і ремонту електричних машин. Слід припустити, що оптимальна система технічної діагностики ТЕД повинна раціональним чином сполучати в собі глобальний і локальний контроль технічного стану. В електродвигунах постійного струму ушкодження обмоток як якоря, так і збудження, фізичні зміщення вузлів (наприклад, зміщення щіток з нейтралі) неминуче призводять до спотворення магнітного поля (і головного магнітного потоку) і, як наслідок, – до погіршення умов комутації в порівнянні з розрахунковими. З цього випливає, що числові характеристики процесу комутації пов'язані з технічним станом електродвигуна постійного струму в цілому, і їхній контроль безумовно необхідний для технічної діагностики таких двигунів. Крім факторів, пов'язаних із зовнішніми відносно колектора вузлами, ступінь іскріння визначається ще і порушеннями контакту між щітками і колектором, викликаними нерівностями і ушкодженням колектора, виступом окремих колекторних пластин і (чи) ізолюючих прокладок, поганим пришліфуванням, заїданням або вібрацією щіток. Комутація електродвигунів призводить також до появи електромагнітного випромінювання із широким спектром частот. Так, відповідно до діючої нормативної документації, при контролі нових або відремонтованих електродвигунів напругу радіоперешкод у живильній мережі і напруженість поля радіоперешкод слід заміряти за магнітною складовою - у діапазоні 0,15...30 мГц, за електричною складовою – у діапазоні 30...300 мГц. Відхилення комутації від прямолінійної призводить до появи додаткової складової реакції якоря – комутаційної. Слід зазначити принципову можливість оцінки комутації за зовнішнім електромагнітним полем електричного двигуна, але даний напрямок знаходиться в початковій стадії розробки. Тому в заключній частині розділу розглядається методика розробки нових непрямих радіочастотних методів контролю надійності роботи тягових двигунів і формулюються основні задачі, які обумовлюють мету проведених досліджень.

У другому розділі розглядаються теоретичні основи побудови радіочастотних методів контролю ефективності експлуатації тягових машин. Показано, що одним з найважливіших факторів, які визначають експлуатаційні характеристики електродвигуна постійного струму, є його якість комутації. Як показала практика, найбільшу інформацію про якість комутації несе залежність $i_{\text{д}}$ струму секції, що комутується, від часу. Безпосереднє спостереження процесу $i_{\text{д}}$ без препарування двигуна неможливе, однак для такого спостереження доступні інші процеси, зв'язані з $i_{\text{д}}$, наприклад, напруга, що наводиться цим струмом у полюсних обмотках або неконтактному датчику. Тому побудова компактної і достатньо адекватної моделі

залежності $i(t)$ представляє істотний інтерес. У роботі наведена методика побудови математичної моделі часової залежності струму секції, що комутується. Вона є сумою двох складових - струму i_n прямолінійної комутації і деякого додаткового струму i_o . Модель має такий вигляд:

$$i(t) = i_n(t) + i_o(t) = I_a \left[1 - 2 \frac{t}{T} \right] I_{me} e^{\Delta_e t} \sin \left[\Delta_{0e} t - 0,5 \Delta_e t^2 \right] \quad 0 \leq t \leq T; \quad (1)$$

$$0, \quad \text{при інших значеннях } t,$$

де e_k - комутуюча ЕРС секції, I_a - струм якоря; T - період комутації; $i_n = I_a \left[1 - 2 \frac{t}{T} \right]$.

Зокрема, виконана на комп'ютері оптимізація параметрів компактної моделі (1) за критерієм мінімуму середнього квадрата похибки відносно "точної" кривої залежності $i(t)$, побудованої на базі відомої складної моделі, призвела до таких величин: $\Delta_{02} = \frac{3,905 \Delta_e}{T}$, $\Delta_{02} = \frac{3,81 \Delta_e}{T^2}$, $\Delta_2 = \frac{1,799}{T}$, $I_{m2} = 0,0984 I_a$, коли $e_k = 2B$. При цьому $i_o(t)$ має вигляд частотно-модульованого синусоїдального коливання. Напряга, що наводиться в полюсній обмотці або датчику струмом секції, що комутується, описуваним виразом (1), має такий вигляд:

$$u_M(t) = M \frac{d i}{d t} = \left[2 I_a M \frac{1}{T} - M I_{me} \Delta_e e^{\Delta_e t} \sin \left[\Delta_{0e} t - 0,5 \Delta_e t^2 \right] \right] \quad (2)$$

$$\left[M I_{me} e^{\Delta_e t} \left[\Delta_{0e} - \Delta_e t \right] \cos \left[\Delta_{0e} t - 0,5 \Delta_e t^2 \right] \right]$$

$$0, \quad \text{при } 0 \leq t \leq T;$$

$$0, \quad \text{при інших значеннях } t.$$

Ця напряга, як і струм комутації, є періодичною імпульсною з періодом, що дорівнює періоду обертання якоря. Співвідношення (2) містить чотири невідомих параметри, що визначають процес комутації: Δ_e , Δ_{0e} , Δ_e , I_{me} . Для оцінки параметрів моделі необхідно так їх підібрати, щоб модель $u_M(t)$ виявилася найбільш близькою до результату спостереження $u(t)$ в деякому певному розумінні. Як критерій близькості в роботі використано мінімум середнього квадрата різниці між моделлю і спостереженням, тобто зроблено підгонку параметрів моделі за методом найменших квадратів. Отримані математичні вирази, що дозволяють організувати ітеративний процес обчислення параметрів комутації. Шукані параметри Δ_e , Δ_{0e} , Δ_e , I_{me} можна було б також обчислити, прирівнявши модель до спостереження в чотирьох точках. Однак на цьому шляху мають місце істотні джерела похибок, а саме:

- оскільки спостереження відбувається через індуктивний зв'язок, то слід очікувати великих високочастотних наведень;

- використання тільки чотирьох точок спостереження приводить до втрати інформації, що міститься в інших точках.

Ітеративний же метод у значній мірі послаблює ці фактори, тому що одночасно здійснює згладжування спостережень і використовує інформацію, що міститься у всіх відліках спостереження.

Ступінь іскріння на колекторі є інтегральним показником. Однак оцінка інтегрального рівня радіоперешкод не дозволяє визначити якість комутації кожної окремо взятої секції обмотки якоря. Тому в роботі вважається доцільним виконання більш детального аналізу отриманих за електромагнітним каналом сигналів, породжених іскрінням на колекторі. Для розв'язання даної задачі в заключній частині розділу розглядається формальний опис досліджуваних процесів, каналу передачі сигналу і пристрою обробки, який забезпечує необхідну, у рамках розв'язуваної задачі, детальність опису вищезгаданих об'єктів. При

формуванні моделі пакета іскор раціонально абстрагуватися від його багатопіковості й представити у вигляді одиночного імпульсу придатної форми, параметри якого однозначно визначають його енергію:

$$i(t) = \begin{cases} Ate^{-\lambda t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (3)$$

де A - швидкість наростання струму в момент $t = 0$;

λ - множник тимчасового масштабу.

Оскільки внесення змін у конструкцію двигуна (його препарування) за умовами розв'язуваної нами задачі неприпустиме, то знімання іскрового сигналу необхідно робити через неконтактний датчик. Найбільш стійким до експлуатаційних факторів датчиком струму є котушка індуктивності. Тому канал зв'язку між іскрою і пристроєм обробки буде індуктивним і його моделлю будуть послідовно з'єднані диференціальний оператор D і підсилювач з коефіцієнтом підсилення M , чисельно рівним взаємній індуктивності між іскровим каналом і котушкою датчика. Таким чином, модель каналу зв'язку може бути представлена у вигляді тракту, структурна схема якого зображена на рис. 1.

Відповідно до неї, спостережувана напруга $u(t)$, яка подається на пристрій обробки, формується в результаті підсилення струму в M разів, подальшого диференціювання результату підсилення і підсумовування отриманого коливання з перешкодовою компонентою $n(t)$:

$$u(t) = \begin{cases} M \frac{di}{dt} + n(t) & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases} \quad (4)$$

У третьому розділі розглядається методика визначення й оцінки характеристик якості контролю тягових двигунів. Для оцінки параметрів A і λ моделі (4) стосовно до періодичної комутації секції при роботі двигуна використані: метод ітеративної підгонки параметрів, оцінка параметрів пакета іскор за методом максимальної правдоподібності та оцінка параметрів іскріння з виключенням неінформативного параметра. Для розглянутого випадку логарифм функції правдоподібності $p(\mathbf{u} | \mathbf{a})$ описується співвідношенням:

$$\ln p(\mathbf{u} | \mathbf{a}) = \ln p(\mathbf{u} | A, \lambda) - \ln \left[\frac{2MA}{N_0} \int_0^{T_1} e^{-\lambda t} dt \right] U_1(\lambda) - \frac{1}{\lambda} \int_0^{T_2} e^{-\lambda t} dt U_2(\lambda) - \ln A, \lambda. \quad (5)$$

Тут енергетичне відношення “сигнал/перешкода”

$$\lambda = \frac{8M^2 A^2}{8\lambda N_0} \left[e^{-2\lambda T_1} \int_0^{T_1} e^{-\lambda t} dt \right]^2 + \int_0^{T_2} e^{-2\lambda t} dt \left[\int_0^{T_1} e^{-\lambda t} dt \right]^2,$$

де T_1 , T_2 - відповідно момент початку та момент закінчення спостереження;

N_0 - спектральна щільність потужності перешкод.

Крім того, у виразі (5) $U_1(\lambda)$ та $U_2(\lambda)$ є деякими зваженими інтегралами за часом від спостереження $u(t)$.

Задача пошуку $\max_{A, \lambda} p(\mathbf{u} | A, \lambda)$ може бути розв'язана як апаратними засобами, так і програмними. У будь-якому випадку слід врахувати, що залежність $p(\mathbf{u} | A, \lambda)$ напевно є багатоекстремальною за параметрами A і λ , в силу чого поставлена задача є задачею пошуку глобального максимуму. Тому при її розв'язанні апаратними засобами найбільш надійним

шляхом представляється обчислення залежності $\mathcal{L}(u|A, \Delta)$ на дискретній множині пар значень параметрів A і Δ , яка цілком покриває області прийнятих ними значень, і наступний вибор пари $[A_m, \Delta_n]$, що доставляє максимум функції $\mathcal{L}(u|A, \Delta)$. Такий підхід приводить до реалізації пристрою оцінки у вигляді багатоканального процесора, кожний з модулів обчислення величини $\mathcal{L}(u|A_i, \Delta_i)$ якого має структуру, представлену на рис.2. При розв'язанні задачі програмними засобами глобальний максимум також шукають на множині дискретних значень параметрів A і Δ . Розвинута логічна структура обчислювальних процесів пошуку глобального екстремуму може бути реалізована (у даний час) тільки на базі досить продуктивних ЕОМ. Тому вхідна реалізація $u(t) \in [T_1, T_2]$ повинна бути попередньо продискретизована за часом із кроком Δt , потім кожен відлік повинен бути підданий аналого-цифровому перетворенню. Після цього отриманий одномірний масив даних $\{u_k = u(t_k) \mid k = 1, \dots, k\}$ готовий до обробки з метою пошуку глобального екстремуму. Описані варіанти розв'язання забезпечують одержання оцінок A і Δ за методом максимальної правдоподібності в припущенні, що час t_3 затримки сигнальної складової спостереження $u(t)$ є несуттєвим випадковим параметром.

Як відомо, оцінки, отримані в такому припущенні, поступаються за точністю оцінкам, отриманим у результаті спільного оцінювання всіх невідомих параметрів. Отже, необхідно розглянути можливі шляхи досить точної оцінки параметрів A і Δ пакета іскор, що забезпечують прийнятний рівень апаратних витрат і (чи) обчислювальних ресурсів. Тому у заключній частині розділу розглядаються алгоритми фільтрації інформаційних сигналів, які неявно формують оцінку неінформативного параметра t_3 затримки сигнальної складової вхідної реалізації, забезпечуючи тим самим точний розрахунок кореляційного інтеграла. Як наслідок, підвищується точність оцінки положення максимуму функції правдоподібності в просторі параметрів, тобто підвищується точність оцінки самих інформативних параметрів. При цьому розглядаються: базовий алгоритм фільтрації; алгоритм узгодженої фільтрації в часовій області; алгоритм узгодженої фільтрації в частотній області; рекурентний алгоритм фільтрації. Встановлено, що алгоритм фільтрації первинних оцінок, представлений в рекурентній формі, забезпечує, по-перше, збільшення точності вторинних оцінок (аж до потенційної) у міру збільшення довжини послідовності первинних оцінок і, по-друге, збільшення оперативності одержання уточненої (вторинної) оцінки вимірюваного параметра на поточному кроці вимірів.

У четвертому розділі наведено результати перевірки ступеня відповідності запропонованої математичної моделі іскрового струму та моделі сигналу індуктивного датчика реальним процесам, що протікають в машині постійного струму. Дослідження виконано для машин двох типів. По-перше, в лабораторії електротехніки та електричних машин Харківської державної академії залізничного транспорту було проведено осцилографічне та спектрографічне дослідження іскріння в двигунах постійного струму типу П11 потужністю 0,7 кВт. Типовий вихідний сигнал датчика та відповідний спектр наведені на рис. 3,а та рис. 3,б.

Рис. 3. Осцилограма та спектр іскрового сигналу двигуна П11

Вони достатньо близько співпадають із відповідною часовою та частотною залежностями, одержаними в результаті теоретичного аналізу. Експериментально встановлено прямо пропорційну залежність між максимальною величиною іскрового сигналу та максимальною величиною вимірюваного спектру. Був також установлений прямо пропорційний зв'язок між амплітудою першого викиду вихідного сигналу датчика й експериментально зафіксованою максимальною величиною спектра S_{\max} . А оскільки, згідно з теоретичними висновками, максимальний струм іскри є

$$i_{\max} \approx \frac{A}{L_e}, \text{ де } L \approx 1/t^*,$$

і максимум спектра дорівнює $S_{\max} \approx \frac{MA}{2L}$, то $S_{\max} \approx 0,5 \cdot e \cdot M \cdot i_{\max}$. Тому за

експериментально знайденим S_{\max} цілком коректно робити висновок про максимальний струм іскри, тобто про ступінь іскріння машини. Таким чином, можна зробити висновок про достатню відповідність параметрів розробленої теоретичної моделі одиничної іскри в часовій і в частотній областях.

Для дослідження зв'язку величини S_{\max} з режимом роботи випробовуваної машини був виконаний двофакторний експеримент, у якому як незалежні змінні виступали струм збудження I_z і струм навантаження I_H двигуна. Величини цих параметрів виставлялися шляхом спільного регулювання реостатів R_z і R_H при незмінній величині живильної напруги контрольованого двигуна. У результаті експериментів доведено, що величина S_{\max} максимуму спектральної щільності вихідного сигналу датчика фізично закономірна і зв'язана з режимами роботи машини постійного струму.

Подальші дослідження були проведені на базі випробувальної станції ділянки з ремонту електричних машин цеху ремонту депо “Жовтень” Південної залізниці. Вимірювання проведено на тягових двигунах AL4846 dT електровоза ЧС-7, встановлених на стенді випробувальної станції.

Потужність двигуна – 770 кВт. Вихідний сигнал датчика та відповідний спектр наведені на рис. 4,а та рис.4,б. Вони досить близькі за формою до результатів спостережень, проведених над двигуном П11.

Рис. 4. Осцилограма та панорамний спектр іскрового сигналу двигуна AL4846 dT

Таким чином, експериментально показано, що спектральний аналіз іскрового сигналу за період порядку кількох секунд дозволяє отримати інформацію не тільки про ступінь іскріння, але й про більш детальні параметри середньостатистичної іскри та про її енергію, що важливо для врахування її теплової дії на щітково-колекторний апарат.

Крім того, в результаті спектрального аналізу іскрового сигналу вимірюється й частота обертання якоря двигуна. Експерименти також показали, що для встановлення точної кількісної залежності між ступенем іскріння за ГОСТ 183-74 та результатами вимірювань необхідно виконувати попередню калібровку вимірювального комплексу для кожного типу двигуна, кожного різновиду датчика та кожного місця встановлення датчика. Експерименти надійно довели повторюваність результатів як для різних екземплярів, так і для різних типів двигунів.

В заключній частині розділу приведена техніко-економічна оцінка ефективності розробки і впровадження засобів контролю якості роботи тягових двигунів локомотивів. Для цього використані середні прогнозні оцінки вантажообороту на електрифікованих ділянках Південної залізниці. Розрахунок приросту економічного ефекту від розробки, виробництва і використання засобів контролю якості роботи тягових двигунів електровозів, а також строку окупності одноразових витрат на їх розробку і виробництво показує, що сукупний приріст економічного ефекту при їх впровадженні на всіх електровозах Південної залізниці за життєвий цикл проекту з урахуванням приведення до першого року його реалізації складе 1711,9 тис. грн. При цьому строк окупності одноразових витрат на розробку і виробництво систем настане на третьому році реалізації проекту (2002 рік), тобто коли приріст економічного ефекту,

розрахований наростаючим підсумком, стане позитивним.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова задача підвищення ефективності контролю технічного стану тягових двигунів локомотивів. При цьому отримані такі результати:

1. Аналіз літературних джерел показує, що в умовах фізичного старіння локомотивного парку, що відбувається на залізничному транспорті України, підвищення надійності експлуатації тягового рухомого складу неможливо без упровадження нових методів контролю якості технічного обслуговування і ремонту тягових електродвигунів.

2. Розроблено теоретичні основи радіочастотних методів контролю якості роботи тягових електродвигунів, що дозволяють за допомогою безконтактних датчиків, установлених на контрольованих машинах, оцінювати рівні електромагнітного випромінювання, що виникає в процесі їхньої комутації. Це дає можливість здійснювати як періодичний, так і безупинний контроль параметрів тягових двигунів. При цьому чутливість запропонованих вимірювальних пристроїв склала 25 мкВ/розп.

3. Розроблено теоретичні основи побудови пристрою непрямого контролю якості комутації електричних машин, реалізованого у вигляді багатоканального процесора, який вирішує багатоекстремальну задачу пошуку глобального максимуму функції правдоподібності ΔU_A оцінки параметрів іскріння.

4. Розроблено математичні моделі інформаційних сигналів, що дозволяють оптимізувати діагностичні параметри і вибрати найбільш ефективні критерії оцінки якості роботи контрольованих двигунів.

5. Розроблено математичну модель каналу зв'язку, що враховує вплив факторів, що заважають, на роботу пристроїв обробки інформаційних сигналів. Це дозволило оцінити й оптимізувати параметри тракту передачі між іскровим каналом і вимірювальною обмоткою датчика.

6. Розроблено математичну модель пристрою обробки інформаційних сигналів, що реалізує фільтровий метод первинних оцінок контрольованих параметрів, представлений у рекурентній формі, що дало можливість підвищити оперативність оцінки вимірюваних параметрів.

7. У результаті експериментів підтверджений зв'язок між параметрами реального іскрового сигналу і його математичною моделлю. Показано, що спектральний аналіз іскрового сигналу дозволяє одержати інформацію не тільки про ступінь іскріння, але і про більш тонкі тимчасові параметри середньостатистичної іскри і її енергії, що важливо для обліку її теплового впливу на щітково-колекторний апарат. Установлено, що в результаті спектрального аналізу іскрового сигналу вимірюється і частота обертання якоря машини.

8. Удосконалено критерії оцінки економічної ефективності використання методів контролю якості роботи тягових двигунів. Показано, що розрахунковий економічний ефект від реалізації запропонованої методики контролю працездатності тягових машин досягається за рахунок зниження експлуатаційних витрат і складає в період з 2000 по 2010 роки 1711,9 тис. грн у цінах 2001 року.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Блиндюк В.С. Анализ методов и средств диагностики технического состояния локомотивов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. - №2. – С.110-112.
2. Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Давиденко М.Г., Соболев Ю.В. Математическая модель процесса коммутации электрических машин постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. - №5. – С.80-83.
3. Блиндюк В.С. Эффективность использования бортовых систем диагностики тяговых двигунів локомотивів // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип.41. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – С.107-112.

4. Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Демченко О.Ф. Прогнозуючий контроль параметрів тягових двигунів локомотивів. Частина 1. Методика прогнозуючого контролю // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип.42. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – С.5-15.
5. Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Давиденко М.Г. Електромагнітні методи контролю якості комутації тягових двигунів локомотивів // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип.44. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – С.9-12.
6. Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Давиденко М.Г., Соболев Ю.В. Математическая модель процесса коммутации электрических машин постоянного тока. Часть 2. Оценка параметров модели // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. - №2. – С.112-115.
7. Бабаев М.М., Блиндюк В.С. Экспериментальное исследование искрения машин постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. - №4. – С.102-107.
8. Блиндюк В.С. Визначення якості комутації на базі оцінки ступеня іскріння на колекторі // Міжвуз. зб. наук. пр. – Вип.45. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – С.88-94.
9. Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Давиденко М.Г., Соболев Ю.В. До оцінки ступеня іскріння на колекторі тягових двигунів // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. - №5. – С.78-80.

АНОТАЦІЯ

Блиндюк В.С. Радіочастотні методи контролю якості роботи тягових двигунів локомотивів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – “Рухомий склад залізниць та тяга поїздів”. - Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2002.

Дисертація присвячена питанням удосконалювання існуючих у даний час методів технічного обслуговування і ремонту тягового рухомого складу залізничного транспорту. У роботі проведено теоретичне узагальнення і вирішена наукова задача розробки і впровадження в технологічний процес діагностики тягових двигунів локомотивів радіочастотних методів і засобів контролю якості їхнього функціонування. На базі статистичної теорії вимірювальних радіосистем вперше розроблені теоретичні основи побудови непрямих радіочастотних методів оцінки діагностичних параметрів тягових машин. Розроблені математичні моделі інформаційних сигналів та лінії зв'язку між іскровим каналом і безконтактним датчиком пристрою обробки інформації, що дозволило оцінити й оптимізувати параметри тракту передачі сигналів. Синтезовано пристрій оцінки якості комутації тягових двигунів локомотивів у вигляді багатоканального процесора. Розроблена математична модель обробки інформаційних сигналів, що реалізує фільтровий метод первинних оцінок контрольованих параметрів, який представлений в рекурентній формі. Запропоновано удосконалений критерій оцінки економічної ефективності використання пристроїв контролю якості роботи тягових двигунів локомотивів.

Основні наукові результати роботи знайшли практичне застосування при дослідженнях, проведених на тягових двигунах AL4846 dT, встановлених на стенді випробувальної станції ділянки з ремонту електричних машин цеху ремонту депо “Жовтень” Південної залізниці.

Ключові слова: тяговий двигун, комутація, колектор, якість роботи, математична модель, датчик, оптимізація, ідентифікація, спектральний аналіз.

THE SUMMARY

Blindjuk V.S. A radio-frequency quality monitoring of quality of work of traction engines of locomotives. - The manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.22.07

– “The rolling-stock of railway and draft of trains”, - the Kharkov state academy of a railway transportation, Kharkov, 2002.

The dissertation is devoted to the perfection questions of the existing methods of maintenance service and railway traction rolling stock repair. The theoretical generalization is carried out and the scientific problem of the development and introduction of radio–frequency methods and means of their functioning quality monitoring into the technological process of traction diesel locomotives diagnostics has been solved. On the statistics theory basis of measuring radio–systems the theoretical fundamentals of indirect radio–frequency methods construction of the diagnostic parameters estimation of the traction machines are developed for the first time. The mathematical models of information signals and communication lines between the spark channel and the contact less sensor device of the information processing are elaborated. The device of surtching quality estimation of locomotive traction engines submitted as a multichannel processor has been synthesized. The mathematical models of information signals processing device realizing a filter method of initial estimation of controllable parameters is presented. The advanced criterion of economic efficiency estimation of the developed quality monitoring of locomotives traction engines work caused by the financial benefit is offered which is received from the realization of the given project owing the reduction of their operational expenses.

The basic scientific result of work have found practical application at during the experimental researches on traction engines AL4846d, established on the stand of test station of a section of electric machines repair of a repair shop “October” depot the Southern railway.

Key words: the traction engine, switching, a collector, quality of work, mathematical model, the gauge, optimization, identification, the spectral analysis.

АННОТАЦИЯ

Блиндюк В.С. Радиочастотные методы контроля качества работы тяговых двигателей локомотивов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – “Подвижной состав железных дорог и тяга поездов”. - Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2002.

Диссертация посвящена вопросам совершенствования существующих в настоящее время методов технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава железнодорожного транспорта. В работе проведено теоретическое обобщение и решена научная задача разработки и внедрения в технологический процесс диагностики тяговых двигателей локомотивов радиочастотных методов и средств контроля качества их функционирования. На базе статистической теории измерительных радиосистем впервые разработаны теоретические основы построения косвенных радиочастотных методов оценки диагностических параметров тяговых машин, позволяющие получать оперативную и полную информацию о их техническом состоянии. Разработаны математические модели информационных сигналов и линий связи между искровым каналом и бесконтактным датчиком устройства обработки информации, что позволило оценить и оптимизировать параметры тракта передачи сигналов. Канал связи в данном случае является индуктивным. Его математическая модель представляет последовательно соединенные дифференциальный оператор D и усилитель с коэффициентом усиления M , численно равным взаимной индуктивности между искровым каналом и катушкой датчика. При этом все помеховые компоненты рассматривались как единая аддитивная помеха. Поскольку она сформирована большим числом мало- и независимых факторов, то закон распределения ее мгновенных значений на выходе дифференциального оператора можно полагать Гауссовским. В установленном режиме работы двигателя помеха является стационарным процессом. Синтезировано устройство оценки качества коммутации тяговых двигателей локомотивов, представленное в виде многоканального процессора. Разработана математическая модель устройства обработки информационных сигналов, реализующая фильтровый метод первичных оценок контролируемых параметров. Предложенная модель представлена в рекуррентной форме и обеспечивает, во-первых, увеличение точности

вторичных оценок контролируемых параметров (вплоть до потенциальной) и, во-вторых, увеличение оперативности получения уточненной (вторичной) оценки измеренного параметра на текущем шаге измерений. Предложен усовершенствованный критерий оценки экономической эффективности использования разработанных методов контроля качества работы тяговых двигателей локомотивов, обусловленный финансовой выгодой, получаемой от реализации данного проекта вследствие снижения их эксплуатационных затрат.

Основные научные результаты работы нашли практическое применение при проведении экспериментальных исследований на тяговых двигателях AL4846 d, установленных на стенде испытательной станции участка ремонта электрических машин ремонтного цеха депо “Октябрь” Южной железной дороги. В результате экспериментов подтверждена связь между параметрами реального искрового сигнала и его математической моделью. Показано, что спектральный анализ искрового сигнала позволяет получить информацию не только о степени искрения, но и о более тонких временных параметрах среднестатистической искры и её энергии, что важно для учета её теплового воздействия на щеточно-коллекторный аппарат. Установлено, что в результате спектрального анализа искрового сигнала измеряется и частота вращения якоря машины. Эксперименты также показали, что для установления точной количественной связи между степенью искрения по ГОСТ 183-74 и результатами измерений с помощью описанного измерительного комплекса необходимо производить предварительную калибровку последнего для каждого типа испытуемой машины, для каждого места установки датчика и для каждого типоразмера самого датчика.

Ключевые слова: тяговый двигатель, коммутация, коллектор, качество работы, математическая модель, датчик, оптимизация, идентификация, спектральный анализ.