

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Жуков Сергій Олександрович

УДК 656(1-21):681.5

Мікропроцесорні пристрої для технічного діагностування тягових електродвигунів  
постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор  
Мокін Борис Іванович,  
Вінницький національний технічний університет,  
ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Чорний Олексій Петрович,  
Кременчуцький державний політехнічний  
університет ім.М. Остроградського,  
директор інституту електромеханіки,  
енергозбереження і комп'ютерних технологій

доктор технічних наук, професор  
Кучерук Володимир Юрійович,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри метрології та  
промислової автоматики

Захист відбудеться " 28 " 03 2009 р. о 9<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГУК, ауд.210.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий " 27 " 02 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ситуація, яка склалася на сьогоднішній день в галузі електротранспорту, викликає занепокоєння. Повне оновлення електротехнічного обладнання в цій галузі не відбувалося ще з радянських часів і вимагає, наразі, значних капіталовкладень. Сам електротранспорт відіграє дуже важливу роль в нашому суспільстві. Щодня мільйони людей користуються різними видами електротранспорту. В таких умовах виникає необхідність максимально використовувати робочий ресурс електротехнічного обладнання, що знаходиться в експлуатації, та з максимальною ефективністю попереджувати аварійні ситуації, які можуть виникати в результаті раптового виходу з ладу окремих елементів обладнання.

На сьогоднішній день трамвайний парк як м.Вінниці, так і багатьох інших міст України складається переважним чином з вагонів, у яких уже давно вичерпався термін експлуатації. А подальша експлуатація електрообладнання понад нормативний строк може призводити до непередбачуваного виходу з ладу з аварійними наслідками.

З метою запобігання аварійних ситуацій застосовуються різні методи і засоби діагностування обладнання і своєчасного виявлення небезпечних дефектів. Але сьогодні діагностуванням трамваїв займаються лише в міських трамвайних депо, при цьому використовуються застарілі методи та засоби діагностування, які були створені ще багато років тому, і які не завжди дозволяють виявити небезпечні дефекти та якісно оцінити функціональний стан обладнання трамвая, особливо в процесі його нормальної експлуатації. Електропривод, як одна із найважливіших ланок електрообладнання трамвая, потребує розробки нових засобів діагностування і оцінювання стану з використанням сучасної елементної бази у першу чергу. При розробці таких засобів, слід врахувати і те, що найбільшу ефективність будуть мати такі засоби, котрі діагностування та оцінювання стану об'єкта проводитимуть на основі кількох інформативних параметрів і в темпі процесу, а також дозволятимуть це здійснювати під час роботи об'єкта, тобто будуть мобільними. А цього можна досягти, лише застосувавши мікропроцесорну техніку.

Таким чином, створення мікропроцесорних засобів контролю за технічним станом електропривода трамвая в процесі його експлуатації, які могли б забезпечувати високу якість оцінки ресурсу і прогнозування аварійного стану обладнання на протязі усього терміну його експлуатації на об'єкті є задачею актуальною як в науковому плані, так і в плані підвищення ефективності транспортного обслуговування населення.

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

Вибраний напрямок досліджень співпадає з напрямком досліджень за такими держбюджетними науково-дослідними роботами Вінницького національного технічного університету (ВНТУ), де автор роботи брав участь як виконавець:

1) № 84-Д-236 (№ держ. реєстрації 0101U004674) на тему “Математичні моделі для технічної діагностики та прогнозування стану засобів міського електротранспорту”, затвердженою Міністерством освіти і науки України на 2001–2003 роки;

2) №84-Д-263 (№ держ. реєстрації 0104U000743) на тему “Синтез способів та систем для діагностування засобів міського електротранспорту”, затвердженою Міністерством освіти і науки України на 2004–2006 роки.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи спрямована на підвищення достовірності діагностування технічного стану електропривода шляхом розробки і впровадження мікропроцесорних пристроїв контролю та діагностування параметрів тягових електроприводів постійного струму, що використовуються в більшості видів міського електротранспорту, в процесі їх нормальної експлуатації.

Об'єктом дослідження є процеси діагностування технічного стану тягових електродвигунів постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації.

Предметом дослідження є мікропроцесорні пристрої для технічної діагностики

тягових електродвигунів постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації.

Відповідно до поставленої мети, у дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі основні задачі:

- проаналізувати існуючі наукові розробки з питань діагностування, оцінювання та прогнозування стану тягових електроприводів постійного струму;
- розробити математичні моделі для оцінювання стану елементів тягових електродвигунів постійного струму;
- синтезувати структури пристроїв для діагностування тягових електроприводів постійного струму з використанням запропонованих моделей;
- розробити алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних пристроїв для діагностування тягових електродвигунів постійного струму;
- синтезувати мікропроцесорну систему для комплексної діагностики тягового електропривода постійного струму в процесі його нормальної експлуатації.

Методи дослідження. При виконанні поставлених задач використовувались: теорія вимірювань для отримання вхідних даних математичних моделей, теорія ідентифікації для визначення параметрів об'єктів в режимі нормальної експлуатації, математичний апарат секвенцій для синтезу структур систем діагностування, теорія мікропроцесорів для розробки функціональних схем пристроїв.

Наукова новизна одержаних результатів.

В результаті проведених досліджень отримано наступні нові наукові результати:

1. Вперше розроблена мікропроцесорна система діагностування тягового електроприводу постійного струму в процесі його нормальної експлуатації, яка дозволяє, на відміну від існуючих, одночасно оцінювати рівень вібрацій та якість змазки в підшипниках тягового електродвигуна і технічний стан його колектора.

2. Вперше запропоновано новий метод оцінки адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування, призначений для тестування правильності побудови секвенціальної моделі на основі оригінального підходу до формалізації з застосуванням стандартних програмних середовищ.

3. Дістав подальший розвиток метод синтезу мікропроцесорних пристроїв діагностування в задачах оцінювання стану тягових електродвигунів постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації на основі математичного апарату секвенцій, що дозволяє за мінімізованими секвенціальними моделями безпосередньо реалізувати структури цих пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів.

Найбільшу практичну цінність мають такі одержані результати:

1. Запропоновані мікропроцесорні пристрої діагностування тягових електродвигунів постійного струму підвищують ефективність експлуатації електротранспорту, за рахунок прогнозованого виявлення несправностей ще до їх виникнення і, як наслідок, попередження аварійних ситуацій та зменшення кількості зупинок вагонів на маршрутах.

2. Новий метод оцінки адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування дозволяє уникати помилок при розробці секвенціальної моделі на етапі синтезу цих систем.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено на КП «Вінницьке трамвайно-тролейбусне управління» (м. Вінниця).

Окремі теоретичні результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес при викладанні лекцій, проведенні практичних та лабораторних занять з дисциплін «Надійність і діагностика систем керування та автоматизації», яка читається для студентів спеціальності 6.092200(01) – «Електричні системи і комплекси транспортних засобів», та «Надійність і діагностика електрообладнання», яка читається для студентів спеціальності 6.092200(03) – «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Особистий внесок здобувача. В усіх роботах здобувача, опублікованих у

співавторстві, йому належать такі результати: [1-5] – розробка моделей, методів, алгоритмів та пристроїв для оцінювання технічного стану електродвигунів постійного струму; [6] – розробка підходу до визначення адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування; [7-10] – розробка структурних схем пристроїв та вимірювальних каналів пристроїв для контролю технічного стану електричного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на таких конференціях: XXXIV-XXXVI науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області у 2005 – 2007 роках; VIII–IX Міжнародних конференціях “Контроль і управління в складних системах” (КУСС–2005, КУСС–2008), які проводилися у Вінницькому національному технічному університеті 24–28 жовтня 2005 року та 21–24 жовтня 2008 року.

Публікації. Основний зміст роботи опубліковано в 10 наукових працях, в тому числі у 6 статтях у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України та 4 патентах України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел (140 найменувань) та 3 додатків. Основний зміст викладено на 112 сторінках друкованого тексту, містить 37 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 138 сторінок.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність і стан досліджень наукової проблеми, підстави і вихідні дані для проведення дослідження. Також викладено: актуальність теми дисертації, мету, задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації і публікації здобувача.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану з питань діагностування транспортних електроприводів постійного струму. Окрема увага приділена аналізу існуючих методів і засобів діагностування технічного стану колектора тягового двигуна постійного струму, методів і засобів діагностування технічного стану підшипників та методів і засобів визначення якості змазки в підшипниковому вузлі. Проведений огляд методів і засобів для діагностування елементів тягового електропривода показав, що:

1. Теоретично розроблені та експериментально апробовані методи і засоби діагностування елементів електропривода переважно орієнтовані на визначення технічного стану обладнання за допомогою випробувальних стендів при виведенні його з експлуатації.

2. Існуючі методи та засоби, що використовуються для діагностування технічного стану елементів електропривода в режимі нормальної експлуатації, не придатні для здійснення такого діагностування в повному обсязі.

3. Переважна більшість існуючих засобів, що використовуються для діагностування елементів електропривода, реалізуються без використання мікропроцесорної техніки, що унеможливорює об'єднання кількох таких засобів в одну комплексну систему діагностування.

У другому розділі обґрунтовано необхідність створення пристрою для оцінювання технічного стану колекторів тягових електричних двигунів постійного струму. Запропоновано оцінювати технічний стан колектора за значенням струму через контакт між щіткою та колекторними пластинами.

Характеристику струму, який внаслідок нестабільності контакту між щіткою та колекторними пластинами є нестаціонарним випадковим процесом, для подальших досліджень дискретизовано та відцентровано. Дискретизація здійснена по пластинам колектора за один його повний оберт, що дає 145 дискретних значень струму. Центрування здійснено, починаючи з другого оберту колектора, шляхом віднімання від кожного значення струму, що протікає в контакті між щіткою та і-ою колекторною пластиною, середнього

значення останніх 146 значень струмів. Якщо дослідити таким чином характеристику струму на протязі, наприклад, 11 обертів колектора (інформативними будуть лише 10 обертів, перший оберт завжди буде використовуватися лише для центрування характеристики струму) та розрахувати середні арифметичні значення відповідних значень струмів, то при справному стані колектора значення кожного такого середнього повинне наближатися до нуля.

Запропонована математична модель (1) для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму, на прикладі трамвая типу КТ4SU, у вигляді:

$$\left| a_{i\Sigma}^* \right| = \left| \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T a_{i+k \cdot Z}^* \right| \leq \delta, \quad (1)$$

де  $Z = 145$  – кількість пластин колектора;

$T = 10$  – кількість повних обертів колектора;

$\delta$  – поріг, який обмежуватиме допустимі значення  $a_{i\Sigma}^*$ , при яких можлива нормальна робота двигуна

$i = 1, 2, \dots, 145$ ;

$a_i^*$  - відцентроване значення струму, що протікає через контакт між щіткою та  $i$ -ю пластиною колектора, яке знаходиться за формулою:

$$a_i^* = a_i - \frac{1}{Z+1} \sum_{k=0}^Z a_{i-k}, \quad (2)$$

де  $i = Z+1, Z+2, \dots, 11Z$ ;

При розробці системи оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна використано дискретну форму представлення сигналів.

Для синтезу структури системи оцінювання технічного стану колектора тягового двигуна трамвая використано математичний апарат секвенцій.

Розроблено граф процесу функціонування пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму, на прикладі трамвая типу КТ4SU. Виходячи з графа, отримана система секвенційних рівнянь, що визначає математичну модель функціонування пристрою для оцінювання стану колектора тягового електричного двигуна трамвая. Після мінімізації система секвенцій має вигляд:

(3)

На підставі отриманої математичної моделі, синтезовано структуру пристрою для оцінювання технічного стану колекторів тягових електричних двигунів постійного струму (рис.1). Перший етап синтезу полягає в побудові функціональної схеми, яка реалізує систему секвенційних рівнянь. Кожна з цих секвенцій реалізується схемою співпадань, на вході якої подаються сигнали, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенції, та двостабільним елементом, до входу котрого через діодну матрицю підключений вихід схеми співпадання.

На другому етапі синтезу структури системи для оцінювання технічного стану колектора отриману функціональну схему системи приводять до вигляду, зручного для реалізації в обраній елементній базі.

Рис. 1. Структура пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електродвигуна, що реалізована на елементах, які випускаються серійно

На схемі : 1 – сенсор SI струму, що протікає в контактї між робочою щіткою та пластинами колектора; 2, 5, 12 – логічні елементи І; 3 – пристрій вибірки та зберігання ПБЗ; 4 – АЦП А/D; 6 – функціональний блок ФБ; 7 – комутатор SW; 8, 15 – регістри RG; 9 – блок запуску БЗ; 10, 18 – R-S тригери Т; 11 – сенсор синхронізації по пластинам колектора; 13 – формувач імпульсів FI; 14, 17, 20 – двійкові лічильники СТ2; 16 – функціональний перетворювач ФП; 19 – блок індикації; 21 – компаратор; 22 – суматор S; 23 – блок задання порогового значення БЗП.

Розроблено алгоритм, в основу якого закладені принципи роботи пристрою, структура якого зображена на рис.1 та функціональну схему (рис.2) мікропроцесорного пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму. Розроблений мікропроцесорний пристрій має високу швидкість та високу точність вимірювань, а його реалізація не потребує значних економічних витрат.

Рис.2. Схема функціональна пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електродвигуна

В третьому розділі запропонована математична модель (4-6), придатна для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна, з використанням розкладу параметричних функцій в ряди Фур'є:

$$x_{сер.кв} = \sqrt{\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2)} ; \quad (4)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots ; \quad (5)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(k\omega_1 t) dt, \quad k = 1, 2, \dots , \quad (6)$$

де  $a_k, b_k$  - амплітуди складових компонентів вібрації;

$k$  - номер гармонічної складової;

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \omega$  - частота першої гармоніки;

$\omega$  - кутова швидкість ротора тягового електродвигуна.

Звичайно, кількість гармонік при практичному застосуванні виразу (4) не береться нескінченною, а обмежується рівнем значимих гармонік, що не виходить за межі двадцяти.

Порівнюючи отримане середнє значення амплітуди вібрацій з еталонним можна визначити наявність дефекту, а оцінюючи кількісно величину перевищення еталонної амплітуди можна визначити де знаходиться дефект

При розробці пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій використано дискретну форму представлення сигналів, оскільки це дає значні переваги при зберіганні та обробці інформації. Для синтезу структури пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна використано математичний апарат секвенцій.

Розроблено граф процесу функціонування пристрою для оцінювання технічного стану

підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій.

Виходячи з графа, отримана система секвенційних рівнянь, що визначає математичну модель функціонування пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій. Після мінімізації система секвенцій має вигляд:

(7)

На основі математичної моделі синтезовано структуру пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій (рис.3). Перший етап синтезу полягає в побудові функціональної схеми, яка реалізує систему секвенційних рівнянь. На другому етапі синтезу структури пристрою для оцінювання технічного стану підшипника отриману функціональну схему пристрою приведено до вигляду, зручного для реалізації в обраній елементній базі. Пристрій дозволяє оцінити технічний стан підшипників у будь-який момент часу.

Рис. 3. Структура пристрою для оцінювання технічного стану підшипника тягового електричного двигуна за рівнем вібрацій

На схемі: 1, 51 – вібрдатчики ВД, що встановлені відповідно на корпусі першого та другого підшипників; 2, 52 – підсилювачі сигналу П; 3, 53 – пристрої вибірки та зберігання ПВЗ; 4, 54 - АЦП А/D; 5, 8, 24, 37, 55, 58 – компаратори; 6, 56 – блоки індикації; 7, 10, 13, 26, 38, 46, 49, 57 – логічні елементи "I"; 9, 12, 17, 30, 32, 45, 48 – генератори імпульсів G; 11, 14, 18, 22, 31, 35, 39, 47, 50 – двійкові лічильники СТ2; 15, 16, 25, 40, 43, 44 – формувачі імпульсів FI; 19, 41 – логічні елементи "H"; 20, 42 – регістри RG; 27 – цифровий сенсор швидкості обертання ротора двигуна СШ; 21, 23, 28, 34, 36 – функціональні перетворювачі ФП; 29, 33 – цифрові суматори.

В більшості випадків оцінювання стану підшипникового вузла за середнім значенням амплітуди вібрацій не дозволяє з високою точністю визначити місце дефекту. При необхідності точного визначення місця дефекту в якості діагностичного параметра доцільно взяти амплітуди кількох перших гармонік сигналу вібрацій. Амплітуди гармонік визначаються з співвідношення відповідних коефіцієнтів ряду Фур'є за формулами (5) та (6). Аналізуючи появу високих гармонік, а також амплітуду цих гармонік можна буде з високою точністю визначити джерело додаткових коливань.

Експериментальним шляхом встановлюється яким чином впливає поява того чи іншого дефекту на гармонічний склад сигналу вібрацій, з яким дефектом пов'язана поява певної гармоніки, яким є критичне значення тої чи іншої гармоніки тощо. На основі отриманих експериментальних даних відповідним чином програмується мікроконтролер, який і буде основою діагностичної системи. На рис.4 показано, як можна реалізувати пристрій для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій з використанням однокристального мікропроцесора AT90S8535.

Рис.4. Схема функціональна пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем вібрацій

В четвертому розділі наведено залежність температури підшипника від кількості змазки у самому підшипнику. Цю залежність можна розглядати тільки як приклад, оскільки кожен транспортний електропривод має свій тип підшипника, свої специфічні умови роботи, а тому побудувати уніфіковану залежність температури підшипника від кількості та якості змазки неможливо. Для побудови такої залежності для конкретного підшипника конкретного електропривода потрібно провести серію експериментів, побудувати залежності для різної температури навколишнього середовища, які потім можна апроксимувати підходящими



кривими і вивести аналітичну залежність, якою безпосередньо користуватись для даних підшипників. Очевидно, що з часом ця залежність буде зміщуватись, адже під час роботи підшипника до змазки потраплятимуть металічні домішки, які впливатимуть і на температуру підшипника і на якість його змазки. Запропоновано алгоритм побудови математичної моделі, придатної для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електродвигуна у вигляді параболи:

(8)

коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  якої можна знайти за методом найменших квадратів, мінімізуючи вираз:

(9)

Розглянуто приклад отримання математичної моделі та її ідентифікації. При розробці пристрою для оцінювання якості змазки підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем температури використано дискретну форму представлення сигналів. А для синтезу структури підсистеми оцінювання стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая за рівнем температури використано математичний апарат секвенцій.

За задумом, пристрій для оцінювання якості змазки підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем температури повинна інформувати водія про поточний рівень і забрудненість змазки у підшипнику. Рівень і забрудненість змазки визначається в залежності від робочої температури підшипника за градуальною характеристикою, побудованою експериментально. На основі цієї інформації водій повинен приймати рішення про подальшу експлуатацію вагону.

Розроблено граф процесу функціонування пристрою для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електродвигуна.

Виходячи з графа, отримана система секвенційних рівнянь, що визначає математичну модель функціонування пристрою для оцінювання якості змазки підшипника за рівнем температури. Після мінімізації система секвенцій має вигляд:

(10)

На основі математичної моделі синтезовано структуру пристрою (рис.5) для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електродвигуна.

Рис. 5. Структура пристрою для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електродвигуна

На схемі: 1, 10, 32 – датчики температури ДТ, що вимірюють відповідно температуру першого підшипника, оточуючого середовища та другого підшипника; 2, 11, 33 – елементи вибірки та зберігання ПВЗ; 3, 12, 34 - АЦП А/D; 4, 15, 23, 35 – компаратори; 5, 8, 17, 21, 29 – генератори імпульсів G; 6, 16, 24, 30 – логічні елементи "І"; 7, 18, 26, 31 – двійкові лічильники СТ2; 9, 25 – формувачі імпульсів FI; 13 – функціональний перетворювач ФП; 14, 22 – цифрові суматори; 19, 27 – регістри RG; 20, 28 – блоки індикації.

Реалізовано пристрій для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі, використовуючи мікропроцесорну техніку (рис.6), що сприяє його комплексуванню разом з іншими пристроями в єдину мікропроцесорну систему діагностування тягового електроприводу транспортного засобу.

Синтезовану структуру можна використовувати як безпосередньо в вагонах електротранспорту, так і при стендових випробуваннях. Пристрій дозволяє оцінити якість змазки в підшипниковому вузлі у будь-який момент часу.

Рис.6. Схема функціональна пристрою для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електродвигуна

В п'ятому розділі розроблено структуру (рис.7) та алгоритм роботи мікропроцесорної системи діагностування тягового електропривода трамвая, яка враховує рівень вібрацій в підшипниках тягового електродвигуна електропривода постійного струму, технічний стан колектора тягового електродвигуна та якість змазки в підшипниках тягового електродвигуна і є результатом комплексування в єдину систему усіх мікропроцесорних пристроїв, розроблених в дисертації.

Рис. 7. Розгорнута структура мікропроцесорної системи діагностування тягового електропривода постійного струму

В основу функціонування мікропроцесорної системи діагностування тягових електричних двигунів електропривода закладено ті ж принципи, що були використані у мікропроцесорних пристроях, синтезованих в попередніх розділах. Проте, об'єднуючи три пристрої, враховано те, що в одному вагоні електротранспорту розташовані декілька тягових двигунів. Наприклад, в одному вагоні трамвая КТ4SU, що використовується у м. Вінниці, розташовані чотири тягових електродвигуна. Тож процес вимірювання окремих параметрів, що входять в різні математичні моделі, можна поєднати.

Запропоновано новий метод оцінки адекватності секвенційного опису мікропроцесорних систем діагностування, призначений для тестування правильності побудови секвенційної моделі, на основі оригінального підходу до формалізації з застосуванням стандартних програмних середовищ.

Метод пропонує здійснювати формалізацію та алгоритмізацію операцій під час моделювання секвенціального опису логічного блоку комп'ютеризованої системи у спеціальній комп'ютерній програмі у такій послідовності:

- 1) введення в програму назв та характеристик (у т.ч. в яких таблицях і де зберігаються результати зчитування сигналів через порти комп'ютера — це можуть бути таблиці і на іншому комп'ютері, доступні через мережу) вхідних та вихідних сигналів;
- 2) синтез програмного коду підпрограми генерування в циклі змінних стану  $T_i$  ( $i = 1, \dots, N$ );
- 3) налагодження механізму обробки та зберігання результатів обробки у відповідних таблицях бази даних;
- 4) налагодження інструментарію візуалізації результатів обробки у зручному для користувача вигляді;
- 5) забезпечення представлення результатів обробки у вигляді, зручному для передавання в інші програмні пакети — Matlab, Maple, Mathcad, MS Excel тощо;
- 6) автоматичний синтез програмного коду для обробки даних, синтез таблиць та форм бази даних в MS Access або MS Excel, які автоматизують усі попередні етапи в цілому;
- 7) тестування синтезованої логічної частини системи на прикладах, її удосконалення (можливе повторення та переналагодження забезпечення на окремих етапах).

Застосування запропонованого методу оцінки до систем секвенціальних моделей усіх мікропроцесорних пристроїв, розроблених у 2-му, 3-му та 4-му розділах дисертації, показало, що усі ці системи секвенцій адекватно описують процеси в пристроях.

В результаті прийнятого припущення, що закони розподілу похибки вимірювання струму електрообладнання та вимірюваного струму нормальні, запропоновано алгоритм побудови сумісного закону розподілу і розрахунку номограм для визначення помилок першого і другого роду, який легко узагальнюється і на інші інформативні параметри.

Помилка першого роду (випадок, коли приймається рішення, що струм знаходиться за межами поля допуску, але насправді він знаходиться в заданих межах) визначається за співвідношенням:

$$(11)$$

де  $I$  – вимірюваний струм,  $\Delta$  – допустиме відхилення від номінального значення струму,  $k_a$  – коефіцієнт асиметрії поля допуску,  $\Delta_T$  – похибка вимірювання струму, а помилка другого роду (випадок, коли приймається рішення, що струм знаходиться в заданих межах, але насправді він знаходиться за межами поля допуску) – за співвідношенням:

$$(12)$$

У додатках наведено оцінка похибок першого і другого роду та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку теорії і практики побудови пристроїв для технічного діагностування тягових електродвигунів постійного струму, завдяки мікропроцесорній реалізації яких стало можливим оцінювання стану тягових електроприводів транспортних засобів в процесі їх нормальної експлуатації, що суттєво підвищує надійність електротранспорту.

В результаті досліджень, здійснених по темі дисертаційної роботи, отримані наступні наукові і практичні результати:

1. Проаналізовано відомі методи та засоби діагностування тягових електроприводів постійного струму, що використовуються на електротранспорті. Показано, що подальший прогрес теорії і практики діагностування тягових електроприводів постійного струму можливий лише на шляху створення нових мікропроцесорних пристроїв діагностування та їх комплексування.

2. Запропоновано математичні моделі для інформативних параметрів, які характеризують стан таких найбільш вразливих елементів тягового електропривода постійного струму, як колектор та підшипниковий вузол тягового електродвигуна безпосередньо під час експлуатації вагона електротранспорту з використанням інформації про струм у колекторі та рівень вібрації і температуру.

3. Дістав подальший розвиток метод синтезу структур пристроїв діагностування з використанням математичного апарату секвенцій, за допомогою якого за розробленими математичними моделями інформативних параметрів синтезовано структури пристроїв діагностування стану колектора та підшипникових вузлів тягових електродвигунів постійного струму, що використовуються в системах електроприводу транспортних засобів.

4. Дістали подальший розвиток алгоритмічне та апаратне забезпечення пристроїв для діагностування тягових електродвигунів постійного струму.

5. Вперше синтезована комплексна мікропроцесорна система діагностування тягового електропривода електротранспортного засобу, яка одночасно в режимі нормальної експлуатації оцінює стан колектора і підшипникових вузлів тягових електродвигунів за інформацією про три інформативні параметри: струм у колекторі, рівень вібрацій та температура підшипникового вузла.

6. Вперше запропоновано новий метод оцінки адекватності секвенціального опису мікропроцесорної системи діагностування, алгоритм якого побудований з використанням стандартних програмних середовищ.

7. Запропонована методика оцінювання працездатності синтезованих пристроїв та алгоритм визначення характеристик, необхідних для її застосування.

Математичні моделі та мікропроцесорні пристрої і система діагностування розроблені для умов роботи тягових електроприводів трамваїв у КП «Вінницьке трамвайно-тролейбусне управління», але легко адаптуються і до умов роботи трамваїв в ТТУ інших міст України.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жуков С.О. Математическая модель для оценки состояния коллектора тягового двигателя трамвая / Б. І. Мокін, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №6. – С. 97–101.
2. Жуков С.О. Синтез структуры системы диагностирования состояния коллектора тягового двигателя трамвая / Б. І. Мокін, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №3. – С. 53–59.
3. Жуков С.О. Синтез структуры системы оценки состояния коллектора тягового двигателя трамвая / Б. І. Мокін, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №5. – С. 53–58.
4. Жуков С.О. Микроконтроллерное устройство для оценки состояния коллектора тягового двигателя трамвая / Б. І. Мокін, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С. 5–8.
5. Жуков С.О. Комп'ютеризована система діагностування технічного стану тягового електропривода / Б. І. Мокін, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3. – С.28-31.
6. Жуков С.О. Новый метод моделирования секвенциального опису комп'ютеризованої системи [Електронний ресурс] / Мокін Б.І., Мокін В.Б., Жуков С.О. // Електронне фахове видання. Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №2. – Режим доступу до журн. : <http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.htm>
7. Пат. 14408 Україна, МПК Н 02 К 13 / 14, Пристрій для аналізу комутації колекторних електричних машин постійного струму: Пат. 14408 Україна, МПК Н 02 К 13 / 14 / Мокін Б.І., Жуков С.О. (Україна) Держпатент. – № у 2005 10887; Заявл. 17.11.2005; Опубл. 15.05.2006; Бюл. № 5. – 8 с.
8. Пат. 16125 Україна, МПК G 07 С 3 / 10, Пристрій для контролю електричного двигуна: Пат. 16125 Україна, МПК G 07 С 3 / 10 / Мокін Б.І., Грабко В.В., Розводюк М.П., Жуков С.О. (Україна) Держпатент. – № у 2006 02168; Заявл. 27.02.2006; Опубл. 17.07.2006; Бюл. № 7. – 18 с.
9. Пат. 16647 Україна, МПК G 07 С 3 / 10, Пристрій для контролю електричного двигуна: Пат. 16647 Україна, МПК G 07 С 3 / 10 / Мокін Б.І., Грабко В.В., Розводюк М.П., Жуков С.О. (Україна) Держпатент. – № у 2006 02167; Заявл. 27.02.2006; Опубл. 15.08.2006; Бюл. № 8. – 20 с.
10. Пат. 26497 Україна, МПК Н 02 К 13 / 14, Пристрій для оцінки стану колектора електричної машини постійного струму: Пат. 26497 Україна, МПК Н 02 К 13 / 14 / Мокін Б.І., Жуков С.О. (Україна) Держпатент. – № у 2007 05202; Заявл. 11.05.2007; Опубл. 25.09.2007; Бюл. № 15. – 6 с.

#### АНОТАЦІЯ

Жуков С.О. Мікропроцесорні пристрої для технічного діагностування тягових електродвигунів постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 — Комп'ютерні системи та компоненти. — Вінницький національний технічний університет, Вінниця–2009.

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку теорії і практики побудови пристроїв для технічного діагностування тягових електродвигунів постійного струму, завдяки мікропроцесорній реалізації яких стало можливим оцінювання стану тягових

електроприводів транспортних засобів в процесі їх нормальної експлуатації, що суттєво підвищує надійність електротранспорту. У роботі запропоновані математичні моделі для інформативних параметрів, які характеризують стан таких найбільш вразливих елементів тягового електропривода постійного струму, як колектор та підшипниковий вузол тягового електродвигуна безпосередньо під час експлуатації вагона електротранспорту з використанням інформації про струм у колекторі та рівень вібрації і температуру. На основі запропонованих математичних моделей розроблені мікропроцесорні пристрої діагностування тягових електродвигунів постійного струму та структура мікропроцесорної системи діагностування тягового електроприводу постійного струму в процесі його нормальної експлуатації, яка, на відміну від існуючих, одночасно оцінює рівень вібрацій та якість змазки в підшипниках тягового електродвигуна і технічний стан його колектора. Запропоновано новий підхід до визначення адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування, призначений для тестування правильності побудови секвенціальної моделі на основі оригінального підходу до формалізації з застосуванням стандартних програмних середовищ.

Ключові слова: електропривод, електродвигун, електротранспорт, колектор, підшипник, діагностування, оцінювання стану, секвенційний апарат, мікропроцесор.

#### АННОТАЦИЯ

Жуков С.О. Микропроцессорные устройства для технического диагностирования тяговых электродвигателей постоянного тока в процессе их нормальной эксплуатации. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 — Компьютерные системы и компоненты. — Винницкий национальный технический университет, Винница—2009.

Диссертационная работа посвящена последующему развитию теории и практики построения устройств для технического диагностирования тяговых электродвигателей постоянного тока, благодаря микропроцессорной реализации которых стала возможной оценка состояния тяговых электроприводов транспортных средств в процессе их нормальной эксплуатации, которая существенно повышает надежность электротранспорта.

Во введении раскрыта сущность и состояние исследований научной проблемы, основания и исходные данные для проведения исследования. Также изложено: актуальность темы диссертации, цель, задачи исследования, научную новизну и практическое значение полученных результатов, личный взнос соискателя и апробацию результатов диссертации и публикации соискателя.

Первый раздел посвящен анализу современного состояния по вопросам диагностирования транспортных электроприводов постоянного тока. Отдельное внимание уделено анализу существующих методов и средств диагностирования технического состояния коллектора тягового двигателя постоянного тока, методов и средств диагностирования технического состояния подшипников и методов и средств определения качества смазки в подшипниковом узле.

Показано, что теоретически разработанные и экспериментально апробированные методы и средства диагностирования элементов электропривода преимущественно ориентированы на определения технического состояния оборудования с помощью испытательных стендов при выводе его из эксплуатации. Также показано, что существующие методы и средства не позволяют осуществить в полном объеме диагностирование технического состояния элементов электропривода в режиме нормальной эксплуатации. В результате проведенного анализа сделан вывод про необходимость дальнейшего развития теории анализа и синтеза новых технических средств диагностирования.

Во втором разделе предложена математическая модель и синтезирована структура устройства для оценивания технического состояния коллектора тягового электрического

двигателя постоянного тока в процессе его нормальной эксплуатации.

На основе предложенной математической модели разработаны алгоритм и функциональная схема микропроцессорного устройства для оценивания технического состояния коллектора тягового электрического двигателя постоянного тока в процессе его нормальной эксплуатации.

В третьем разделе предложена математическая модель, на основе которой синтезирована структура устройства для оценивания состояния подшипникового узла тягового электрического двигателя постоянного тока за уровнем вибраций.

На основе предложенной математической модели разработаны алгоритм и функциональная схема микропроцессорного устройства для оценивания состояния подшипникового узла тягового электрического двигателя постоянного тока за уровнем вибраций.

В четвертом разделе предложен алгоритм построения математической модели, которая позволит оценивать качество смазки в подшипниковом узле тягового электродвигателя.

На основе математической модели синтезирована структура устройства для оценивания качества смазки в подшипниковом узле тягового электрического двигателя постоянного тока. Также на основе предложенной математической модели разработаны алгоритм и функциональная схема микропроцессорного устройства для оценивания качества смазки в подшипниковом узле тягового электрического двигателя постоянного тока.

Пятый раздел посвящен комплексованию предложенных устройств для диагностирования отдельных параметров тяговых электродвигателей постоянного тока. Разработаны структура и алгоритм работы этой комплексной микропроцессорной системы диагностирования электропривода трамвая, которая учитывает уровень вибраций в подшипниках тягового электродвигателя трамвая, техническое состояние коллектора тягового электродвигателя трамвая и качество смазки в подшипниках тягового электродвигателя. В основу функционирования микропроцессорной системы диагностирования тяговых электрических двигателей электропривод заложен те же принципы, которые были использованы в микропроцессорных устройствах, синтезированных в предыдущих разделах. Однако, объединяя три устройства, учтено то, что в одном вагоне электротранспорта расположено несколько тяговых двигателей.

Предложен новый метод оценивания адекватности секвенциального описания микропроцессорной системы диагностирования, предназначенный для тестирования правильности построения секвенциальной модели, на основе оригинального подхода к формализации с использованием стандартных сред разработки. Применение предложенного метода оценки к системам секвенциальных моделей всех микропроцессорных устройств, разработанных во 2-м, 3-м и 4-м разделах диссертации, показало, что все эти системы секвенций адекватно описывают процессы в устройствах.

Предложен метод оценивания ошибок первого и второго рода предложенных микропроцессорных устройств на примере одного из информативных параметров.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Ключевые слова: электропривод, электродвигатель, электротранспорт, коллектор, подшипник, диагностирование, оценивание состояния, секвенционный аппарат, микропроцессор.

## ANNOTATION

Zhukov S.O. The microprocessor devices for technical diagnosis of hauling electric motors of direct-current in the process of their normal exploitation. – A manuscript.

Dissertation on the competition of graduate degree of candidate of engineering sciences on

speciality 05.13.05 are the Computer systems and komponenty. it is the Vinnytcia National Technical University, Vinnytsia –2009.

Dissertation work is devoted subsequent development of theory and practice of construction of devices for the technical diagnosticating of hauling electric motors of direct-current, due to microprocessor realization of which became possible evaluation of the state of hauling electromechanics of transport vehicles in the process of their normal exploitation which promotes reliability of electro-trance-port substantially. Mathematical models are in-process developed for informing parameters, which characterize the state of such the most vulnerable elements of hauling elek-troprivoda of direct-current, as collector and bearing knot of hauling electro-engine directly during exploitation of carriage of elektrotransporta from ispol'-zovaniem information about a current in a collector and level of vibration and temperature. On the basis of the offered mathematical models the microprocessor devices of diagnosticating of hauling electric motors of direct-current and structure of microsystem of diagnosticating of hauling electromechanic of direct-current are developed in the process of his normal exploitation which, unlike existing, simultaneously estimates the level of vibrations and quality of greasing in bearings of hauling electric motor and technical state of his collector. The new going is offered near determination of adequacy of sekvencial'nogo description of microsystems of diagnosticating, intended for testing of rightness of construction of sekvencial'noy model on the basis of the original going near formalization with the use of standard software environments.

Keywords: electromechanic, electric motor, elektrotransport, collector, bearing, diagnosticating, evaluation of the state, sekvencionnyy vehicle, mikroproces-litter.

Підписано до друку 23.02.2009 р. Формат 29,7Ч42 j  
Наклад 100 прим. Зам. № 2009–042  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59