

Б. І. Мокін, С. О. Жуков



**МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ
ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ПРОЦЕСІ
ЇХ НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

Б. І. Мокін, С. О. Жуков

**МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ
ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
В ПРОЦЕСІ ЇХ НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Монографія

Вінниця

ВНТУ

2011

УДК 681.518.54:621.33

ББК 30.82:31.261.2

М74

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 27.05.2010 р.).

Рецензенти:

О. П. Чорний, д. т. н., професор

В. Ю. Кучерук д. т. н., професор

Мокін, Б. І.

М74 Мікропроцесорні пристрої для технічного діагностування тягових електродвигунів постійного струму в процесі їх нормальної експлуатації : монографія / Б. І. Мокін, С. О. Жуков. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 116 с.

ISBN 978-966-641-403-1

В монографії представлені розроблені авторами математичні моделі для вдосконалення методів технічного діагностування тягових електродвигунів постійного струму та синтезовані на їхній основі мікропроцесорні пристрої для технічного діагностування тягових електродвигунів в процесі їх нормальної експлуатації.

Робота розрахована на інженерно-технічних працівників трамвайно-тролейбусних управлінь, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, які спеціалізуються в галузі математичного моделювання та технічного діагностування міського електротранспорту.

УДК 656(1-21):681.5

ББК 30.82:31.261.2

ISBN 978-966-641-403-1

© Б. Мокін, С. Жуков, 2011

ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1 Аналіз наукових розробок з питань оцінювання стану тягових електродвигунів постійного струму	9
1.1. Обґрунтування актуальності дослідження	8
1.2. Аналіз робіт з діагностування технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму	13
1.3. Аналіз робіт з діагностування технічного стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна постійного струму	15
1.4. Аналіз робіт з діагностування якості змазки підшипникового вузла тягового електричного двигуна постійного струму	19
1.5. Висновки та постановка задач дослідження	21
Розділ 2 Математична модель та структура пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна	23
2.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження	23
2.2. Математична модель для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна	24
2.3. Синтез структури пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна	26
2.4. Практична реалізація синтезованої структури	34

2.5. Мікропроцесорна реалізація пристрою для оцінювання стану колектора тягового електричного двигуна	37
2.6. Висновки	40
Розділ 3 Математична модель та структура пристрою для оцінювання стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна за рівнем вібрацій	41
3.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження	41
3.2. Математична модель для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна за рівнем вібрацій	42
3.3. Синтез структури пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна за рівнем вібрацій.....	44
3.4. Практична реалізація синтезованої структури.....	50
3.5. Мікропроцесорна реалізація пристрою для оцінювання технічного стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна за рівнем вібрацій	54
3.6. Висновки	57
Розділ 4 Математична модель та структура пристрою для визначення якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електричного двигуна	58
4.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження	58

4.2. Математична модель для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електричного двигуна	59
4.3. Синтез структури пристрою для оцінювання якості змазки підшипникового вузла тягового електродвигуна за рівнем температури	62
4.4. Практична реалізація синтезованої структури.....	70
4.5. Мікропроцесорна реалізація пристрою для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електричного двигуна.....	73
4.6. Висновки	76
Розділ 5_Комплексування запропонованих мікропроцесорних пристроїв у мікропроцесорну систему діагностування електропривода постійного струму в процесі його нормальної експлуатації.....	77
5.1. Комплексування запропонованих мікропроцесорних пристроїв в систему діагностування тягового електропривода постійного струму	77
5.2. Метод оцінки адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування.....	82
5.3. Оцінювання помилок першого і другого роду при визначенні інформативних параметрів, використаних в мікропроцесорних пристроях діагностування.....	89
5.4 Висновки	94
Висновки	95
Додаток А Оцінка помилок першого і другого роду	96
Література.....	101

ВСТУП

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 багатьох 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, які 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.

У книзі описана розробка мікропроцесорної системи діагностування тягового електропривода 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. 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.

Практична цінність одержаних результатів полягає в тому, що 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. Метод оцінки адекватності секвенціального опису мікропроцесорних систем діагностування дозволяє уникати помилок при розробці секвенціальної моделі на етапі синтезу цих систем.

Пристрої діагностування розроблені для умов роботи трамваїв у КП «Вінницьке трамвайно-тролейбусне управління», але легко адаптуються і до умов роботи трамваїв в ТТУ інших міст України.

Книга містить п'ять розділів.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану з питань діагностування транспортних електроприводів постійного струму. Особливо увага приділена аналізу існуючих методів і засобів діагностування технічного стану колектора тягового двигуна постійного струму, методів і засобів діагностування технічного стану підшипників та мето-

дів і засобів визначення якості змазки в підшипниковому вузлі. Обумовлена необхідність пошуку нових рішень в цій області.

В другому розділі запропоновано математичну модель та синтезовано структуру пристрою для оцінювання технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму в процесі його нормальної експлуатації. Розроблено структуру пристрою та алгоритм, а також функціональну схему його мікропроцесорної реалізації.

В третьому розділі запропоновано математичну модель та структуру пристрою для оцінювання стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна постійного струму за рівнем вібрацій. Розроблено структуру пристрою та алгоритм, а також функціональну схему його мікропроцесорної реалізації.

В четвертому розділі запропоновано алгоритм побудови математичної моделі та синтезовано структуру пристрою для оцінювання якості змазки в підшипниковому вузлі тягового електричного двигуна постійного струму. Розроблено структуру пристрою та алгоритм, а також функціональну схему його мікропроцесорної реалізації.

У п'ятому розділі описано комплексування запропонованих пристроїв для діагностування окремих параметрів тягових електродвигунів постійного струму. Розроблено структуру та алгоритм роботи цієї комплексної мікропроцесорної системи. Запропоновано новий підхід до оцінювання адекватності секвенціального опису мікропроцесорної системи діагностування. Запропоновано алгоритм оцінювання помилок першого і другого роду запропонованих мікропроцесорних пристроїв на прикладі одного із інформативних параметрів.

Текст книги написаний С. О. Жуковим з використанням частини матеріалів його кандидатської дисертації, постановка задачі в якій і керівництво дослідженнями здійснювалось професором Б. І. Мокіним. Б.І. Мокіним здійснено і загальне редагування книги.

Відгуки, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Видавництво ВНТУ.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОЗРОБОК З ПИТАНЬ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1. Обґрунтування актуальності дослідження

Нині стан справ з діагностуванням тягових електроприводів постійного струму на транспорті в режимі їх нормальної експлуатації вимагає суттєвого покращення.

В подальшому будемо виходити з того, що метою технічного діагностування є встановлення та вивчення параметрів, які характеризують стан технічних систем для прогнозування можливих відхилень, в тому числі за допустимі межі, внаслідок чого виникають аварійні ситуації та відмови обладнання, а також розробка методів та засобів експериментального визначення стану цих систем з метою своєчасного попередження порушень нормального режиму роботи. Методи технічного діагностування застосовують для раціональної організації процесів контролю роботоспроможності обладнання, пошуку та прогнозування несправностей [1].

В експлуатаційних умовах більша частина несправностей виявляється тільки тоді, коли вони проявляються явно або значно. Несправності, які ведуть до незначного збільшення затрат електроенергії на рух, зносу базових та змінних деталей, можуть бути не помічені водіями чи ремонтним персоналом. Для виявлення несправностей на різних стадіях, запобігання дефектів та відмов в експлуатаційних умовах, прогнозування часу виконання відповідних ремонтних операцій та профілактичного обслуговування необхідний контроль технічного стану вузлів, агрегатів та апаратів засобами технічного діагностування.

При розробці методів діагностування електричних машин важливою і порівняно складною задачею є визначення оптимального набору діагностичних параметрів, які використовуються при діагностуванні і характеризують технічний стан об'єкта, що контролюється [2–4].

Діагностичні параметри можуть бути загальними (інтегральними), конкретними та взаємозалежними. Загальні, або інтегральні, діагнос-

тичні параметри характеризують технічний стан об'єкта в цілому. До інтегральних параметрів можна віднести потужність двигуна, загальний рівень шуму двигуна тощо. Конкретні діагностичні параметри незалежно один від одного вказують на цілком конкретні несправності досліджуваного об'єкта.

Взаємозалежні діагностичні параметри вірно характеризують несправність тільки при взаємному порівнянні в фіксованому режимі роботи. Зазвичай, значення діагностичних параметрів вимірюються безпосередньо на об'єкті діагностування. Однак в деяких випадках використовують непрямі методи, тобто шукані значення параметрів визначають шляхом обробки значень інших параметрів, пов'язаних з діагностичними відомими функціональними залежностями [1].

Оскільки зміни технічного стану неминучі, то вузли, агрегати і апарати рухомого вагона необхідно постійно контролювати, що викликає необхідність впровадження на підприємствах міського електротранспорту (МЕТ) засобів технічного діагностування. Метою технічного діагностування будь-якого електрообладнання є забезпечення економічної його експлуатації при забезпеченні потрібної надійності і зменшенні до мінімуму витрат на технічне обслуговування та ремонт [5]. Цієї мети можна досягти, відслідковуючи технічний стан електрообладнання в процесі експлуатації.

Електричний двигун є головним елементом тягового ЕП трамвая і дуже коштовною та трудомісткою при ремонті частиною електричного обладнання. Статистика показує, що він дуже часто виходить з ладу, а це призводить до зупинки не тільки одного вагона, але припиняється рух по колії взагалі, допоки поламаний трамвай не буде відбуксовано іншим у депо. Це обумовлює необхідність здійснювати діагностування технічного стану тягового двигуна трамвая.

На практиці застосовують різні методи і засоби для діагностування електричних двигунів. Однак необхідно відзначити, що і посьогодні не існує універсального методу, який дозволив би врахувати всі фактори, під дією яких зменшується термін роботи електричного двигуна.

Як відомо, вразливішою частиною електричної машини постійного струму є її колектор. За статистикою саме через пошкодження або

вихід із ладу колектора відбувається найбільша кількість відмов електричного двигуна, усунення яких в більшості випадків потребує проведення капітального ремонту електричної машини. Основною причиною виходу колектора з ладу є його механічний знос, який буде збільшуватись при перевищенні допустимих струмів та температур [2–4].

Також одним із слабких місць у тяговому електроприводі трамвая є підшипниковий вузол. Вірний діагноз підшипникового вузла в багатьох випадках визначає спроможність працювати усього механізму [6].

Більшість транспортних електроприводів постійного струму складаються з кількох тягових електродвигунів. Наприклад, тяговий електропривод трамваїв типу КТ4SU, що використовуються у місті Вінниця, складається з двох пар тягових електричних двигунів постійного струму послідовного збудження. Кожна пара електродвигунів живиться постійним струмом від контактного проводу напругою 600 В. З'єднані пари двигунів послідовно один з одним і кожен з них працює на окрему колісну пару. В зв'язку з цим, доцільною була б розробка комплексної системи технічного діагностування, яка б контролювала стани найслабкіших ланок усіх електричних двигунів, що входять до складу тягового електропривода [7].

Одним із ефективних способів забезпечення якісної експлуатації електрообладнання є діагностика його стану в процесі нормального режиму роботи. Для виявлення та аналізу тих чи інших несправностей основних вузлів та елементів електрообладнання, як правило, здійснюється спостереження за відхиленням вимірюваних параметрів та інших характеристик цього обладнання.

У тих випадках, коли безпосередній контроль не можливий, застосовуються методи, які полягають у моделюванні процесів у тому числі з використанням кореляційних зв'язків між тими параметрами, що контролюються і тими, що ні.

Призначена для діагностування апаратура складається з пристроїв для вимірювання контролюючого параметра і власне пристроїв діагностування, які перетворюють інформацію, отриману від вимірювальних пристроїв, у відповідності до заданого алгоритму.

Сучасний рівень розвитку засобів вимірювання та обчислювальної техніки відкриває нові шляхи підвищення ефективності використання електрообладнання, одним з яких є використання оперативної технічної діагностики.

З позицій отримання та використання діагностичної інформації принципово важливо розділити загальний комплекс діагностики стану електрообладнання на задачі оперативної і, так званої, ремонтної діагностики. Ремонтна діагностика здійснюється на зупиненому обладнанні в процесі його ревізій та ремонтів. На відміну від цього оперативна діагностика здійснюється на працюючому обладнанні з використанням методів функціональної діагностики. [8]

У роботах [8, 9] автори наголошують на тому, що комплексний характер діагностичного контролю створює можливість для отримання інтегральних оцінок стану обладнання. Це в свою чергу повинно надати можливість використовувати діагностичну інформацію не тільки для оперативного керування обладнанням та аналізу умов його роботи, а й для більш обґрунтованого планування ремонтного обслуговування з урахуванням поточного стану обладнання.

Автори звертають увагу на те, що основними задачами діагностування залишаються: підвищення надійності обладнання шляхом підвищення якості його експлуатації завдяки розвитку та удосконаленню діагностичного контролю; запобігання, по можливості, розвитку аварійних ситуацій шляхом виявлення дефектів на різних стадіях їх розвитку та удосконалення системи планово-попереджувальних ремонтів з урахуванням фактичного стану та умов експлуатації обладнання.

На сьогоднішній день актуальною є проблема капітально-відновлювального ремонту з продовженням строку служби електротранспорту. Одним із важливих напрямків модернізації є застосування різних систем діагностування та моніторингу технічного стану та параметрів експлуатації електротранспорту [10].

Для розв'язання задачі діагностування тягових електроприводів доцільним є застосування сучасних засобів мікропроцесорної техніки.

1.2. Аналіз робіт з діагностування технічного стану колектора тягового електричного двигуна постійного струму

У роботі тягових електродвигунів трамваїв процес комутації відіграє досить важливу роль.

Комутацією в машинах постійного струму, як відомо [11], називається процес зміни струму в секціях якірної обмотки в момент переходу з однієї паралельної гілки обмотки в іншу. Принцип комутаційних явищ у тягових електродвигунах такий же, як і в стаціонарних установках, однак специфічні умови їхньої роботи значно погіршують загальні умови комутації і сприяють виникненню іскріння під щітками та між колекторними пластинами.

При обертанні якоря щітки роблять безперервне переключення колекторних пластин та пов'язаних з ними секцій. Якщо щільність струму, тобто струм, що приходиться на одиницю поверхні зіткнення щітки з колектором, у якому-небудь місці цієї поверхні стає занадто великою, матеріал щітки розжарюється і з'являються маленькі дугові розряди, які ми спостерігаємо у вигляді іскріння під щіткою. Іскріння поступово руйнує щітки та поверхню колектора. В залежності від сили іскріння руйнування колектора або щітки йде швидше або повільніше. При дуже сильному іскрінні вольтова дуга витягується колектором з-під щітки і перекидається на щітку іншої полярності. Машина і мережа виявляються при цьому замкнутими через вольтову дугу накоротко. Це явище, яке носить назву «колового вогню», руйнує електричну машину. Найнадійнішими в експлуатації є машини, що мають безіскрову комутацію, тобто комутацію без помітного іскріння або з дуже слабким, допустимим іскрінням [12].

На рівні міських трамвайних депо діагностування технічного стану тягового електропривода, у тому числі колектора тягового електродвигуна, не відбувається взагалі, оскільки на сьогоднішній день усі трамвайні депо працюють за системою планово-попереджувального ремонту (ППР), яка передбачає періодичне проведення технічного обслуговування і ремонтів через визначені, заздалегідь встановлені терміни. Планово-попереджувальний ремонт колектора тягового двигуна трамвая починається з візуального огляду стану колектора, потім, при

необхідності, здійснюється шліфування поверхні колектора, проточка канавок між ламелями та балансування. Але така система є зовсім не оптимальною, оскільки проведення планових ремонтів відбувається без попереднього визначення технічного стану об'єкта ремонту. Відповідно, знімається з маршруту вагон на декілька днів, ремонтний персонал в цей час здійснює великий обсяг робіт, пов'язаних з розбиранням вузлів для оцінювання їх технічного стану. Досить часто після цього виявляється, що не було потреби в ремонті і технічний стан вузла задовільний. Можлива і інша ситуація, яка ще гірша за своїми наслідками – вихід з ладу вузла електропривода в період між планово-попереджувальними ремонтами, тобто під час роботи вагона на маршруті. А це призводить до того, що на певний час паралізується рух транспорту на цьому напрямку і знімаються одночасно два вагони з маршруту (той, що вийшов з ладу і той, який його дотягне до депо). Більше того, ремонт обладнання після аварійної ситуації, як правило, значно дорожче обходиться, ніж профілактичний.

Для того, щоб перейти до оптимальної стратегії експлуатації та ремонту колекторів тягових двигунів, необхідно використовувати методи та засоби оцінювання технічного стану об'єкта. При цьому визначати параметри та оцінювати стан об'єкта необхідно на всіх етапах його виготовлення (відновлення, модернізації) та експлуатації [13].

У роботі [10] автори пропонують використовувати уніфіковану систему для діагностування та моніторингу стану електровозів, яка складається з блоків індикації, блоку обробки сигналів, аналогових датчиків, комплекту датчиків струму і напруги та енергонезалежного регістратора. Головним недоліком системи є те, що вона дозволяє контролювати стан тільки релейно-контакторної апаратури, а також такі параметри роботи тягового електропривода, як струм і напруга.

У роботах [14, 15] автори пропонують використовувати метод оцінювання величини іскріння на колекторі електродвигуна за допомогою розрядної щітки, який дозволяє здійснювати моніторинг щіточно-колекторного вузла.

Але автори уточнюють, що найбільш зручно застосовувати цей метод тоді, коли щітка має розрізну конструкцію, інакше потрібно вносити зміни в конструкцію колекторно-щіточного вузла. Автори та-

кож звертають увагу на те, що за результатами моніторингу стану колекторно-щіткового вузла напрацьовану базу даних в процесі експлуатації можна використовувати як один із елементів системи діагностування та прогнозування ресурсу роботи тягових електродвигунів.

Відомо багато методів, засобів та пристроїв, які дозволяють покращити комутацію, визначити характер та інтенсивність іскріння на будь-якій колекторній пластині або групі пластин [16–31], але, поперше, їх реалізація також потребує внесення значних конструктивних змін у колекторно-щітковий вузол, а по-друге, вони не орієнтовані на інтеграцію у більш складну систему діагностування і в більшості випадків не можуть бути використані на працюючому обладнанні.

Автори робіт [32, 33] звертають увагу на доцільність як у технічному, так і в економічному аспекті використовувати сучасні засоби цифрової техніки, в тому числі мікропроцесорної техніки для реалізації засобів діагностування та моніторингу стану електрообладнання.

В роботах [34–36] автори пропонують використовувати системи діагностування якості комутацій на основі безконтактних датчиків-антен для реєстрації радіосигналів, які супроводжують комутаційне іскріння. Але залишаються поза увагою вибір корисного частотного спектра сигналів, що реєструються, способи фільтрації корисного сигналу та методи ефективної обробки отриманої інформації.

1.3. Аналіз робіт з діагностування технічного стану підшипникового вузла тягового електричного двигуна постійного струму

В електричних двигунах малої та середньої потужності, що працюють на відносно великих швидкостях, одне з найслабкіших місць – підшипниковий вузол.

Вірний діагноз стану підшипникового вузла в багатьох випадках визначає спроможність працювати усього механізму. Відомо, що кожен вузол електричної машини має свій закон утворення вібрацій, тому при виборі або розробці моделей вібрацій слід враховувати певні особливості роботи тих вузлів, що діагностуються [37].

У роботах [38, 39] звертається увага на те, що зібраний підшипниковий вузол можна контролювати тільки методом безрозбірної діагно-

стики. Тому вбачається доцільним використання для оцінювання стану підшипникового вузла тягового двигуна трамвая методу вібродіагностики. Це спростить процедуру пошуку дефектів та дозволить виявляти їх на ранніх стадіях, що в свою чергу дозволить попереджувати виникнення аварійних ситуацій.

У роботах [40–43] описані методи та засоби діагностики стану підшипників, основані на побудові та аналізі частотного спектру вібрацій. Проте залишаються труднощі, пов'язані з вибором необхідної кількості спектральних складових.

В роботах [44–48] автори стверджують, що основні дефекти, поява яких супроводжується високим рівнем вібрацій (дисбаланси, розцентровки, вироблення корпусних деталей тощо), пов'язані з частотою обертання ротора і кратними їй гармонічними складовими. Але до цих пір ще немає однозначної методики діагностування та конкретних ознак розділення цих дефектів, оскільки усі вони базуються на визначенні змін першої роторної гармоніки.

У багатьох розробках [49–56] приділена увага діагностуванню технічного стану підшипників в стаціонарних умовах за допомогою різноманітних стендових установок. Вони дозволяють достатньо точно визначати стан досліджуваного підшипника шляхом порівняння його експлуатаційних характеристик з характеристиками еталонного підшипника. Але усі ці методи потребують великих як матеріальних так і фізичних затрат, оскільки вимагають розбирання підшипникового вузла, а отже виведення з роботи усього вагона електротранспорту.

В роботах [57, 58] запропоновано метод та пристрій прогнозування ресурсу підшипників двигуна, який враховує такі експлуатаційні параметри як величина несоосності підшипників, величина зазору в підшипниках, температура та тиск змазки в підшипнику.

В роботі [59] автори також пропонують вимірювати тиск змазки в підшипнику і враховувати цей параметр при визначенні величини зносу підшипника. В усіх випадках потрібно мати справу з конструктивною модернізацією підшипникового вузла, що призводить до великих економічних затрат.

В роботі [60] автори пропонують спосіб діагностики стану підшипників, де в якості основних параметрів пропонується використовувати

ти середньоквадратичне та амплітудне значення амплітуди вібрацій. Практичну реалізацію автори не пропонують.

В роботах [61, 62] автори пропонують для більш точного оцінювання технічного стану підшипника використовувати чотири вібродатчики, що розташовані у взаємно перпендикулярних радіальних напрямках. Але практична реалізація запропонованого методу зводиться до створення діагностичного стенду.

У багатьох роботах [63–70] описуються розробки пристроїв, які здійснюють автоматичне сортування підшипників за їх технічним станом та придатності до подальшої експлуатації, контролюють якість виготовлення підшипників. Усі ці пристрої в якості основного діагностичного параметра використовують амплітуди вібрацій або складові спектри вібрацій. Але такі пристрої доречніші для використання на підприємствах, які масово виготовляють підшипники.

У своїй роботі [41] автори акцентують увагу на те, що найбільшою ефективності при діагностуванні стану підшипника досягають ті засоби, які можна використовувати на працюючому обладнанні.

В роботі [71–74] автори пропонують контролювати технічний стан підшипників, реєструючи сумарну тривалість металічних контактів за певний час між внутрішньою обоймою підшипника, тілами кочення та зовнішньою обоймою підшипника. Суть методу полягає в підключенні підшипника в електричне коло та реєстрації тривалості імпульсів струму, що протікає через підшипник, коли утворюються розриви масляної плівки і відбувається металічний контакт, тобто замикання електричного контуру.

За схожим принципом працює пристрій, запропонований в роботі [75]. Але в ньому в якості електричного параметра використовують мікророзряди, які виникають у масляній плівці підшипника під дією магнітного поля електричної машини. За інтенсивністю цих мікророзрядів визначають стан підшипника. Нажаль, такі методи можна використовувати тільки при стендових випробовуваннях підшипників.

Ще один спосіб оцінювання технічного стану підшипників, запропонований в роботах [76, 77], полягає у вимірюванні моменту опору обертання підшипника. Недоліком цього способу оцінювання стану підшипника є необхідність проведення двох дослідів з введенням до-

даткових коливань під час роботи підшипника. Це унеможливує використання цього методу на працюючому обладнанні.

Схожий спосіб діагностування підшипників запропоновано в роботі [78], проте тут автори пропонують з метою підвищення якості діагностування вимірювати миттєве значення центрованого моменту при прямому та зворотному обертаннях.

В роботі [79] запропоновано спосіб діагностики підшипників, який базується на аналізі амплітудного спектра підшипника, що обертається, збуджуючи в підшипнику ультразвукові коливання. В умовах працюючого обладнання, коли вагон електротранспорту знаходиться на маршруті, запропонований метод буде давати низьку якість діагностування, обумовлену наявністю великої кількості завод.

В роботі [80] запропоновано спосіб вібраційного контролю підшипників, суть якого полягає у вимірюванні вібрацій кільця підшипника, що не обертається при частоті, яка обумовлена дефектом підшипника. Таким чином, запевняють автори, шляхом врахування взаємного впливу дефектів поверхонь підвищується якість контролю.

Автори робіт [81, 82] радять в якості діагностичного параметра при моніторингу стану підшипника використовувати величину монтажного зазору, як найважливішого показника стану підшипника.

В роботі [83] автори пропонують спосіб діагностування підшипників, що оснований на вимірюванні кута обертання підшипника за допомогою вимірювальних датчиків з високою точністю вимірювань. При вимірюванні кутів обертання їх значення фіксують з постійним часовим кроком і при постійній швидкості обертання та за змінами кутів обертання в межах кроку визначають дефекти підшипника. Складність застосування запропонованого способу полягає в необхідності використання високоточних датчиків вимірювання кута обертання, оскільки за один оберт підшипника необхідно здійснити не менш ніж 400 вимірів.

У досить великій кількості робіт [45,84–89] описано розробки методів і засобів діагностування технічного стану підшипника, які базуються на вимірюванні амплітуди вібрацій в певному частотному спектрі. В роботі [90] навіть запропоновано спосіб одночасного контролю декількох підшипникових вузлів. Проте в більшості цих робіт розроб-

лені схеми пристроїв побудовані на застарілій елементній базі. Тому і виникає необхідність використання сучасної цифрової техніки при розробці пристроїв діагностування.

Автори роботи [80] погоджуються, що необхідно розробити простий та ефективний спосіб діагностування, який би дозволив за невеликих економічних затрат створити системи діагностування стану підшипників, що дозволили б відмовитись від неефективної системи планово-попереджувальних ремонтів.

В роботі [91] автори пропонують досить простий спосіб діагностування підшипників. Вимірюється час знаходження сигналу, пропорційного вібрації, від половини значення амплітуди до максимуму та від нуля до половини значення амплітуди. По співвідношенню виміряних величин роблять висновок про стан підшипникового вузла.

В роботі [92] автори аргументують необхідність аналізувати декілька інформаційних частот, що приводить до підвищення якості діагностування, оскільки з'являється можливість виявляти дефекти різного роду та враховувати зміни швидкості обертання підшипника. А в роботі [93] автори доводять, що величина дефекту підшипника пропорційна квадрату амплітуди вібрації на інформаційних частотах.

В багатьох роботах [94–97] авторами показано способи аналітичного аналізу вібраційних процесів за допомогою перетворень Фур'є. Визначені основні інформативні параметри та запропоновані методики точного оцінювання характеру вібраційного процесу за цими параметрами.

1.4. Аналіз робіт з діагностування якості змазки підшипникового вузла тягового електричного двигуна постійного струму

В роботах [40, 98, 99] звертається увага на те, що робота підшипника в значній мірі залежить від якості змазки в ньому. Недостатня кількість змазки в підшипнику або незадовільний її стан, обумовлений наявністю в змазці пилу, бруду, різноманітних домішок, приводить до появи розривів у масляній плівці під час роботи підшипника.

Наявність таких розривів призводить до появи металічних контактів між елементами підшипника, що, в свою чергу, поступово веде до

руйнування підшипника. І якщо вчасно не виявити цю проблему, підшипник або розвалюється, або заклинює. Зрозуміло, що обидва варіанти призводять до аварійної ситуації, можливого руйнування інших рухомих елементів електропривода, що призведе до необхідності проводити коштовний ремонт пошкодженого обладнання, а зупинка вагона на маршруті призведе до затору в певному напрямку руху.

В роботі [40] запропоновано спосіб визначення кількості змазки в підшипниковому вузлі. Стан змазки в підшипнику визначають шляхом порівняння з пороговим значенням кута відхилення шийки вала в підшипнику, який розраховується за формулою

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{2mgB}{I\Omega_0^2}\right), \quad (1.1)$$

де φ – кут відхилення шийки вала в підшипнику; I, m – момент інерції та маса вала підшипникового вузла; Ω_0 – частота згинаючої частоти вала; B – амплітуда виміряної гармонічної складової; g – прискорення сили тяжіння.

На жаль до практичної реалізації в сучасній елементній базі справа не дійшла. А це, як видно з формули, потребуватиме значних технічних та економічних затрат.

Відомі пристрої [100–104], призначені для вимірювання товщини шару змазки в підшипнику. Але необхідність внесення суттєвих конструктивних змін у структуру підшипникового вузла робить використання цих пристроїв не доцільним з точки зору затрат на їх інсталяцію у вагони електротранспорту.

Автори роботи [105] навіть розробили датчик товщини змащувального шару підшипника, який дозволяє здійснювати безперервне вимірювання, але складність пристрою та його значна собівартість робить доцільним використання приладу лише в лабораторних умовах.

Відомо багато складних установок [106, 107], які призначені для визначення різноманітних параметрів змазки у підшипнику, але специфіка їх будови робить актуальним їх використання лише в шарико-підшипниковій промисловості.

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-403-1>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-403-1>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-403-1>

Наукове видання

**Мокін Борис Іванович
Жуков Сергій Олександрович**

**МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ
ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
В ПРОЦЕСІ ЇХ НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Монографія

Редактор Н. Мазур
Оригінал-макет підготовлено С. Жуковим

Підписано до друку 10.03.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,7
Наклад 100 прим. Зам № 2011-070

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному
технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.