

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Лашко Юрій Вікторович

УДК 621.316.9

**ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВІД АВАРІЙНИХ
РЕЖИМІВ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Кременчуцькому державному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Кременчук

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент

Чорний Олексій Петрович,

Кременчуцький державний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри „Систем автоматичного управління та електропривода”,
м. Кременчук

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор

Сінчук Олег Миколайович,

ТОВ „ТД „Електричні машини” Міністерства промислової політики України, технічний директор, м. Харків

кандидат технічних наук, доцент

Чермалих Олександр Валентинович,

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”
Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри „Автоматизація управління електротехнічними комплексами”, м. Київ

Провідна установа – Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця

Захист відбудеться „6” квітня 2006 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.04 у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий „1” березня 2006 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електропривод змінного струму з асинхронними двигунами (АД) в теперішній час є найпоширенішим на промислових підприємствах металургійної, гірничо-видобувної промисловості, транспорту. Перспективи його розвитку пов'язані з необхідністю впровадження нових високоефективних систем керування, в тому числі на базі мікропроцесорних систем. Головною задачею цих систем є забезпечення ефективного функціонування та надійності електропривода. На жаль, стан надійності електропривода поки що є проблематичним. Щороку пошкоджується до 20-25% від загального числа встановлених АД. Це приводить до порушення неперервності технологічних процесів із подальшим браком продукції, витратам на відновлення та ремонт АД, а також на відновлення нормальних технологічних процесів виробництва. Реальні характеристики і параметри АД внаслідок ремонту або тривалої експлуатації змінюються і не відповідають паспортним. Існуючі пристрої та системи захисту, найпоширенішими серед яких є пристрої релейного захисту та автоматики, що настроєні на характеристики і параметри відповідно до паспорта двигуна, часто і об'єктивно неналежним чином реагують на зміну параметрів робочих процесів.

Зазначені обставини зумовлюють необхідність підвищення вимог щодо експлуатації двигунів, урахування їх реальних індивідуальних характеристик і параметрів, які можуть змінитися в процесі ремонту або під час роботи, нових підходів до принципів побудови пристроїв і систем захисту, розроблення моделей і методів управління процесами захисту двигунів.

Застосування таких систем захисту дозволить впровадити технологію контролю обладнання за станом і реалізувати принцип запобігання, який реалізується шляхом аналізу енергетичних процесів через неперервний контроль із екстраполяцією і забезпечує раннє (передаварійне) визначення потенціальних пошкоджень, дефектів, що розвиваються в АД.

Тож, актуальною є проблема підвищення ефективності систем захисту АД електроприводів з метою визначення аварійних і аварійно небезпечних режимів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану НДР, затвердженого радою Кременчуцького державного політехнічного Університету (КДПУ) на 1999-2004 рр. і ґрунтується на результатах науководослідних і дослідницько-конструкторських роботах, виконаних за участю здобувача у КДПУ "Дослідження і розробка теорії енергозбереження й енергозберігаючого електромеханічного устаткування" (тема 3Д/99-АПП, №0199U004068), "Дослідження та розробка систем енергомоніторингу електромеханічного обладнання промислових підприємств" (тема 7Д/01-

ЦЕНТР, №0103U000804), “Обґрунтування та розробка раціональних методик і алгоритмів визначення характеристик сигналів електромеханічних систем в реальних умовах експлуатації” (тема 123В/04-КІС, №0104U010615), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності систем захисту на основі показників якості перетворення енергії для забезпечення надійної експлуатації електропривода з АД шляхом визначення аварійно небезпечних і аварійних режимів його роботи.

Для досягнення мети поставлені та розв’язані такі задачі:

- аналіз інформативності показників якості перетворення енергії, як діагностичних параметрів аварійних режимів роботи АД, та встановлення на їх основі залежності зміни режимів роботи АД;
- теоретичне обґрунтування необхідності підвищення ефективності захисту АД електроприводів, яке може бути досягнуто за умови застосування показників якості перетворення енергії для реалізації захисту за принципом запобігання;
- розробка методів підвищення інтелектуальних функцій захисту АД електроприводів для контролю його робочого режиму на основі показників якості перетворення енергії та реалізації способів захисту зі змінюваною вставкою спрацювання, контролю і прогнозу теплового стану двигуна;
- розробка математичних моделей та експериментальні дослідження системи захисту.

Об’єктом дослідження є процеси перетворення енергії в АД при виникненні аварійно небезпечних режимів.

Предметом дослідження є захист АД при виникненні аварійно небезпечних та аварійних режимів.

Методи досліджень. При виконанні поставлених задач використовувались: загальна теорія перехідних процесів і методи математичного моделювання асинхронних двигунів, обчислювальної математики, методи спектрального гармонічного аналізу та вейвлет-перетворення, методи вимірювань й обробки даних та експериментальні дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше запропоновано виконувати захист і визначення аварійно небезпечних режимів АД за показниками якості перетворення енергії на основі яких розширені функції захисту і прийняття рішення шляхом застосування логічних ознак режимів роботи АД та вирішальних правил;
- вперше контроль режиму роботи АД запропоновано виконувати за відношенням потужностей флукуаційних коефіцієнтів вейвлет-перетворення споживаної потужності на

двох суміжних інтервалах, що на відміну від відомих методів робить систему невибагливою до дискретності, тривалості вимірювання та стійкою до рівня завад;

- теоретично обґрунтований метод змінювання вставки спрацювання за струмом, який полягає в обчисленні добутку визначеного поточного максимального значення показника нерівномірності завантаження струмом фазних обмоток статора та встановленого значення вставки, що на відміну від існуючих струмових захистів дозволяє опосередковано враховувати технічний стан двигуна;

- подальший розвиток отримав метод прогнозування температури обмоток статора, який на відміну від відомих методів визначення температури та прогнозу часу досягнення граничного значення ґрунтується на застосуванні енергетичного показника нерівномірності завантаження фаз струмом.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- наведені в дисертаційній роботі методи рекомендовано для практичного застосування при розробці мікропроцесорних систем захисту АД електроприводів промислових підприємств металургійної, гірничовидобувної, електромашинобудівної галузей та транспорту;

- використання розроблених у роботі методів, які ґрунтуються на застосуванні показників якості перетворення енергії, дозволяє розширити регламентовані функції захисту, враховуючи реальний технічний стан АД, і тим підвищити ефективність і надійність експлуатації електроприводів з АД;

- розроблено структуру та принцип реалізації мікропроцесорної системи захисту АД електроприводів від аварійно небезпечних та аварійних режимів за принципом запобігання.

Результати досліджень прийняті для впровадження у проект системи захисту АД в ВАТ «Електрозахист» (м. Харків). Теоретичні результати роботи та розроблене програмне забезпечення використовується в навчальному процесі кафедри систем автоматичного управління та електропривода Кременчуцького державного політехнічного університету у курсі „Системи захисту та автоматики електромеханічного обладнання” та науково-дослідній роботі студентів, магістрів.

Особистий внесок здобувача в розробку наукових результатів, що виносяться на захист:

- розроблено метод неперервного контролю режиму роботи АД, який полягає в обчисленні характеристики режиму та ґрунтується на застосуванні вейвлет-перетворення до сигналу миттєвої потужності;

- розроблено принцип контролю пускового режиму АД на основі апарату вейвлет-перетворення;

- розроблено методи, структуру та принцип реалізації системи захисту АД від аварійно небезпечних та аварійних режимів за принципом запобігання з автоматичним регулюванням вставки спрацювання, з прогнозом нагріву обмоток статора двигуна і визначення часу, за який температура досягне граничних значень;

- розроблено математичні моделі та програмне забезпечення для дослідження й аналізу режимів роботи АД в комплексі "система електропостачання-двигун-навантаження", та отримано підтвердження запропонованих теоретичних і технічних рішень.

Апробація результатів. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи докладено на міжнародних науково-технічних конференціях: "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (Крим, м. Алушта, 2001, 2005 рр.), "Проблеми створення нових машин і технологій" (м. Кременчук, КДПУ, 2001р.), "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації" (м. Кременчук, КДПУ, 2002-2005 рр.), міжнародному симпозіумі SIEMA'2004 "Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика." (м. Харків, 2004 р.), на наукових семінарах НАН України "Електромеханіка, проблеми енергоперетворення та енергоресурсозбереження" КДПУ протягом 2000-2005 років.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 28 друкованих наукових працях, з них 19 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 1 стаття у науково-технічному журналі, 4 тез доповідей науково-технічних конференцій, 4 патенти України на винахід.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Повний обсяг дисертації 226 сторінок, з них 56 ілюстрацій по тексту, 28 ілюстрацій на 17 сторінках; 10 таблиць по тексту, 39 таблиць на 36 сторінках; 4 додатка на 22 сторінках та 126 найменування використаних літературних джерел на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано ідею, мету та задачі досліджень. Сформульовано наукову новизну та положення, що виносяться на захист. Розглянуто практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У першому розділі здійснено аналіз причин аварійності АД і встановлено, що першопричини виникнення аварій у своїй більшості є результатом своєчасно невизначених та неусунених дефектів обладнання, ремонту, монтажу або експлуатації. Доведено, що зазначені фактори зумовлюють взаємозв'язок між якістю електропостачання, технічним станом двигуна,

навантаженням та процесами перетворення енергії. Цей взаємозв'язок приводить до того, що аварійність АД визначається комплексом “мережа-двигун-навантаження” і безпосередньо проявляється в двигуні.

На основі огляду та аналізу принципів побудови, функціональних властивостей існуючих пристроїв релейного захисту різного виконання та типів захисту, що в них реалізовано, зроблено висновок, що за межі існуючої концепції щодо принципів побудови та організації захисту виходять питання врахування індивідуальних характеристик двигуна, набутих у результаті ремонту або внаслідок зміни його поточного (реального) технічного стану.

Зазначено, що чисельність і варіантність систем і пристроїв, що використовуються для захисту АД, не дозволяє однозначно вирішити питання захисту електричної машини та системи електропривода. Для підвищення ресурсу та надійності обладнання, зменшення витрат, пов'язаних із ремонтом і простоями, необхідно вирішувати питання вдосконалення систем захисту шляхом їх реалізації за принципом запобігання, що потребує пошуку та реалізації нових методів захисту і втілення їх у відповідні системи та пристрої.

Зазначено, що системи захисту як автоматичні пристрої, які працюють за призначенням, відповідно до плану цілеспрямованої дії – забезпечення захисту – можна розглядати такими, що мають певний рівень інтелекту.

На підставі виконаного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано задачі дисертаційної роботи, в яких увагу сконцентровано на підвищенні рівня інтелекту систем захисту електропривода з АД.

У другому розділі розроблено математичні моделі для аналізу аварійно небезпечних режимів, що формуються в АД під впливом якості електропостачання, технічного стану двигуна та навантаження. Прийнято застосування показників якості перетворення енергії, як нових інформативних діагностичних ознак, та їх аналізу на основі апарату вейвлет-перетворення для контролю відхилень від нормального режиму роботи АД. Такими ознаками є група показників, до якої входять коефіцієнти: енергетичних втрат і, нерівномірності завантаження фаз струмом і нерівномірності тепловиділення в обмотках, зміни моменту та зміни віброхарактерстик, який відображає погіршення вібраційних характеристик. Їх визначення базується на використанні вейвлет-перетворення за ліфтинг-схемою, застосованої до дискретних сигналів фазної напруги і струму, отриманих з джерел первинної інформації, та до розрахункових дискретних значень миттєвої потужності і моменту.

Контроль за зміною енергетичних процесів в АД запропоновано здійснювати на основі введеної характеристики режиму (1), яка обчислюється за потужностями флуктуаційних коефіцієнтів, отриманих за ліфтинг-схемою для двох суміжних часових інтервалів, що містять

розрахункові дискретні значення миттєвої потужності:

(1)

де, - флуктуаційні коефіцієнти першого (попереднього) та другого (поточного) інтервалів, що аналізуються відповідно до методу.

В основу характеристики h покладено один з підходів, який застосовується при наближеному вирішенні проблеми Беренса-Фішера при аналізі вибірок із генеральної сукупності з невідомими дисперсіями, оснований на обчисленні параметру, який залежить від відношення дисперсій - потужностей d -коефіцієнтів двох інтервалів.

Використання апарату вейвлет-перетворення зумовлене: ефективністю його застосування до нестационарних сигналів, невимогливістю щодо їх дискретизації, здатністю до фільтрації, високою швидкістю, яка забезпечується на рівні базового алгоритму, довільним вибором інтервалу для розкладання сигналу розміром де n – кількість відліків на інтервалі. Визначено та доведено ефективність застосування ліфтинг-схеми при обробці сигналів із завадами. Встановлено правомірність обробки таких цифрових сигналів на часових інтервалах, що містять не менше ніж 128 і 256 відліків з дискретністю s .

Дано обґрунтування необхідності та здійснено на основі комп'ютерного моделювання дослідження якості перетворення енергії АД потужністю 11..110 кВт для режимів: неякісного електропостачання при якісному технічному стані двигуна, якісного електропостачання при неякісному технічному стані двигуна, неякісного електропостачання при неякісному технічному стані двигуна.

Досліджені процеси у випадку виникнення виткового замикання в фазі А обмотки статора, величина якого задавалася коефіцієнтом в діапазоні 0..10% для номінального режиму роботи двигуна, і побудовані характеристики режиму h (рис.1). Моделювання виникнення виткового замикання виконано за умови його постійності, а при розрахунку дискретних значень миттєвої потужності сигнали фазної напруги і струму підлягали завадам, що мають нормальний розподіл з параметрами (0,1). Встановлено, що характеристика h , за зазначених умов (рис. 1), є чутливою до змін енергетичних процесів.

За результатами досліджень та виконаного аналізу доведено доцільність застосування зазначеної групи показників якості перетворення енергії та запропонованої характеристики режиму для реалізації функцій контролю системи захисту, визначено властивість обраної групи енергетичних показників щодо їх здатності опосередкованого врахування можливої зміни технічного стану АД при виконанні функцій захисту.

Рис. 1. Характеристики режиму h , отримані при моделюванні виникнення

виткового замикання в фазі А обмотки статора

У третьому розділі розроблені методи, призначені для підвищення ефективності систем захисту електропривода з АД, які зумовлюють підвищення їх інтелекту.

У розділі дано теоретичне обґрунтування необхідності змінювання вставки спрацювання функції захисту за струмом. У процесі експлуатації АД його режим роботи, за незначних відхилень від нормального, може бути допустимим з точки зору існуючих типів захисту і небезпечним з точки зору виникнення потенційного аварійного режиму і, як наслідок, аварійної зупинки двигуна. Доведено, що небезпека пов'язана із процесами перерозподілу енергетичних і теплових потоків під час переходу до нового режиму, які по-різному можуть впливати на конструктивні частини двигуна, в результаті чого новий усталений режим характеризується новими характеристиками та параметрами. Зокрема, наслідки такого перерозподілу для нового двигуна - одні, а для двигуна, що пройшов капітальний ремонт або експлуатувався тривалий час, - інші. Розроблений спосіб змінювання вставки спрацювання реалізується за виразом:

$$, \tag{2}$$

де h - величина вставки за струмом, значення якої визначається за паспортом АД, передбачуваними умовами експлуатації та відповідною методикою; $h_{\text{нов}}$ - нове значення вставки; $I_{\text{ф}}$ - значення показника завантаження фаз струмом, визначені у поточному режимі роботи двигуна.

Виконані дослідження свідчать про доцільність застосування методу змінювання вставки спрацювання. На рис. 2 наведено залежності: характеристики режиму h , яка обчислена за виразом (1); вставки спрацювання за струмом h (у відносних одиницях); показника завантаження струмом фаз обмоток статора; еквівалентного струму, обчисленого відносно номінального струму, отримані для номінального режиму роботи АД 4A132M4, 11кВт для випадків: імітації виникнення несиметрії напруги живлення величиною $u_{\text{н}}/U_{\text{н}}$ у момент t с. - рис. 2, а; імітації виникнення несиметрії напруги живлення за умов випадку 1, але з попередньою імітацією виникнення несиметрії активних опорів обмотки статора величиною 5% у момент часу t с. - рис. 2,б.

Рис. 2. Результати досліджень змінювання вставки спрацювання

Доведено (рис.2), що не значне відхилення параметрів електропостачання та параметрів заступної схеми АД приводить до якісної зміни його енергетичного стану, що зумовлює виникнення потенційно аварійно небезпечних режимів роботи, пов'язаних з перерозподілом енергетичних і теплових процесів.

Для реалізації теплового захисту АД запропоновано вдосконалення відомого методу,

що регламентований стандартом МЕК 60255-8, відповідно до якого нагрів двигуна визначається за тепловою моделлю, а функція захисту від перегріву реалізується через контроль його нагріву, вираженого відносно базового. Вдосконалення методу визначення нагріву АД полягає у введенні до відомої моделі показника нерівномірності завантаження фаз струмом:

$$\dots \tag{3}$$

де θ - перевищення температури обмотки у поточний момент часу t ; θ_0 - початкове перевищення температури обмотки, обумовлене попереднім режимом; θ_{st} - стала нагріву (або охолодження) обмотки, β - показник нерівномірності завантаження фаз струмом (- відповідна фаза АД), α - коефіцієнт вставки. З порівняльного аналізу, за результатами комп'ютерного моделювання, встановлено, що похибка визначення нагріву фаз обмоток статора АД для випадку застосування показника нерівномірності фаз струмом не перевищує 1%.

Показано, що запропоноване вдосконалення методу визначення температури обмоток АД надає можливість використання моделі (3) й для випадків, коли під час експлуатації АД змінюється його технічний стан, і значення номінального струму не відповідає паспорту, а також невідомої або зміненої перевантажувальної характеристики двигуна.

У розділі запропоновано метод прогнозування теплового стану обмоток статора АД та визначення часу спрацювання захисту. Застосування даного методу дозволяє запобігти аварійного відключення АД у випадках, коли режим роботи двигуна не є номінальним, але аварійно небезпечним. Метод ґрунтується на застосуванні моделі (3) і надає можливість отримання рівнянь для розрахунку кривих холодного і нагрітого стану та визначення відповідного часу спрацювання захисту при заданій величині вставки. Такий підхід не потребує визначення додаткових геометричних та електричних параметрів конструктивних частин АД. Рівняння моделі мають такий вигляд:

- для холодного стану

$$\dots \tag{4}$$

$$\dots \tag{5}$$

- для нагрітого стану

$$\dots \tag{6}$$

$$\dots \tag{7}$$

де, α - коефіцієнт вставки, θ_{st} - стала нагріву.

Рівняння (4) - (5) використовуються для визначення нагріву та часу спрацювання захисту при запуску АД з холодного стану, а рівняння (6) - (7) - залежно від поточного коефіцієнту, починаючи з нагріву, який відповідає моменту визначення зміни режиму АД (наприклад, через збільшення навантаження або внаслідок зміни поточного технічного стану двигуна)

або, за необхідності, - від прогнозного значення показника (\dots) .

Відповідно до методу, за рівняннями (4)-(7) розроблено алгоритм прогнозування, в якому при зміні, у поточному режимі роботи АД, характеристики, погіршенні теплового навантаження за показниками, \dots , час спрацювання захисту визначається за максимальним значенням показника завантаження фаз струмом. Для випадку “дозволеної” подальшої роботи двигуна здійснюється прогнозування температури для значення i , відповідно, часу, за який вона її досягне. Алгоритмом передбачено реалізацію автоматичної зміни величини \dots у випадку, коли поточне її значення є занадком великим і потребує зменшення для виконання прогнозування за умови достатнього запасу часу для роботи АД та спрацювання захисту в поточному режимі.

З метою розширення функціональних можливостей системи захисту запропоновано спосіб контролю пускового режиму АД, в основу якого покладено особливості поведінки характеристики h у даному режимі. На підставі моделювання пускових режимів АД з навантаженням, що не залежить від швидкості (\dots) , та вентиляторним навантаженням, встановлено, що в усіх випадках характерним для закінчення пускового режиму є, залежно від характеру пускового режиму та потужності двигуна, наявність ”провалу” характеристики h . Доведено, що зазначену властивість характеристики h можна вважати інформативною ознакою закінчення пускового режиму АД. На рис. 3 наведено діаграми: швидкості обертання ротора ω , значення якої нормовані на величину номінальної; пускового струму, нормованого відносно максимального значення; максимального значення показника \dots та характеристики режиму h .

Рис. 3. Діаграми пуску АД з номінальним навантаженням

Спосіб контролю пускового режиму АД здійснюється за логічним виразом:

$$\dots \quad (8)$$

де \dots - коефіцієнт провалу (стрибка) характеристики режиму, який визначається значенням; t_{τ} - час пуску двигуна. Величина вважається достатньою для урахування випадків затягнутого та важкого пусків.

Встановлено, що контроль пуску АД за виразом (8) може бути посиленним застосуванням енергетичних показників \dots та за логічним виразом:

$$\dots \quad (9)$$

За виразом (9) пуск АД вважається успішним, коли величини характеристики режиму h , показника нерівномірності завантаження фаз струмом, коефіцієнта зміни моменту за допустимий час пуску t_n одночасно набудуть своїх нормальних значень: 0,5; 1; 0 відповідно.

У розділі показано, що підвищення ефективності захисту, характерною рисою якого є

визначення потенційно аварійно небезпечних режимів роботи АД і своєчасне реагування на них, потребує певної оперативності від системи захисту. З цією метою розроблено розвинуту систему прийняття рішення. Її реалізацію запропоновано здійснити на алгоритмічно-програмному (АП) та конструктивному рівнях. Центральною ланкою АП забезпечення системи захисту є цільова функція, яка описує ситуаційні варіанти режимів роботи АД, на основі яких формується вирішальне правило, за яким може бути здійснено перехід зі стану до стану протягом часового інтервалу, де, - стан, у якому АД відключений від мережі; S - множина можливих станів, що формуються за сукупністю множини параметрів $\{ \}$, які визначають у момент часу t_k стан за множиною $\{ \}$; w – управляючий вплив, за яким перехід між станами може бути як безумовним, так й умовним, тобто вплив w може формуватися з витримкою в часі; Z – кінцева множина, що визначає норми параметрів за паспортом двигуна: для показника енергетичних втрат у цілому – 100%, а за фазами – 33,33%; для показників нерівномірності завантаження фаз струмом і нерівномірності тепловиділення – 100%; для показників зміни моменту та віброхарактеристик – 0%. Допустимі межі множини Z можуть бути визначені за результатами статистичного опрацювання аварійно небезпечних та аварійних станів АД.

Показано, що для реалізації прийняття рішення у термінах станів можуть бути застосованими логічні ознаки режимів роботи АД та правило розв’язку типу “Якщо ... то ...”. Сформовані логічні ознаки та правила розв’язку дозволяють на основі контрольованих параметрів охопити та утворити повний набір комбінацій для визначення і реалізації вирішального правила, за яким визначається можливість подальшої роботи АД.

Тож, захист, який функціонує на основі реальної інформації, запропонованих методів її обробки, надає можливість запобігання розвитку аварійно небезпечного режиму роботи шляхом оцінки ступеню і динаміки його зміни, опосередкованого врахування індивідуальних особливостей двигуна, яких він може набути в процесі експлуатації, змінювання вставки спрацювання, залежно від поточного режиму роботи двигуна.

На основі загальноприйнятих підходів і розроблених моделей сформульовано вимоги щодо експлуатаційних можливостей і додаткових сервісних функцій розробленої системи захисту АД електроприводів.

Для реалізації на апаратному рівні розроблено структурну схему мікропроцесорної (МП) системи захисту на основі елементної бази фірми Microchip Technology Inc. Принципи, що закладені в реалізацію апаратно-програмного комплексу, забезпечують конвеєрну обробку даних за схемою “отримання-передача-обробка інформації”, а організація функцій захисту на рівні задач забезпечується паралельним виконанням компонент при математичній обробці

даних за допомогою розробленого програмного забезпечення. Для цього виконано синтез регламентованих типів захисту та розроблених захистів інтелектуального характеру.

Запропонована реалізація системи захисту АД електроприводів на основі розробленого математично-алгоритмічного та апаратно-програмного забезпечення підвищує рівень інтелекту захисту, сприяє його мобільності, ефективності і надійності.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням та перевірці основних положень дисертаційної роботи.

Для відпрацювання алгоритмічного та математичного забезпечення системи захисту розроблено комп'ютеризований комплекс на основі застосування технології віртуальних інструментів на базі пакету LabView фірми National Instruments та лабораторного стенду. Сформульовано вимоги щодо його функціонування, визначено структуру, здійснено обґрунтування та розробку апаратно-програмного забезпечення.

Розроблений комп'ютеризований комплекс може бути використаним як для проведення експериментальних досліджень із застосуванням лабораторного стенду, так і для роботи в режимі комп'ютерного експерименту. Робота комплексу в режимі комп'ютерного експерименту дозволяє, на основі розроблених математичних моделей проводити дослідження та аналіз системи “електропостачання-двигун-навантаження-захист” шляхом інтерактивного

впливу на параметри кожної підсистеми для імітації виникнення динамічних

Рис. 4 Розрахункові осцилограми миттєвих значень фазної і середньої потужностей впливів.

У розділі наведено програму експериментальних досліджень, відповідно до якої отримано експериментальні осцилограми сигналів фазної напруги і струму для різних режимів роботи АД. Виконано розрахунки й аналіз показників за ГОСТ 13109-97 і показників якості перетворення енергії. Доведено, що при неякісному електропостачанні за показниками α і β зі значеннями, наближеними до допустимих 2% і 8% відповідно, та з погіршенням стану працюючого АД, навантаження якого збільшується, але не досягає номінального (з до), змінюються енергетичні процеси в АД, про що свідчить збільшення значення характеристики режиму h до величини 0,63 у момент її визначення. Фрагмент розрахункових осцилограм миттєвих значень фазної і середньої потужностей (у приведених одиницях за часом) наведений на рис. 4 і відповідає інтервалу зміни енергетичних процесів у АД і спрацювання захисту.

На рис. 5, відповідно до рис. 4, наведено фрагмент розрахункових осцилограм максимального за значенням показника нерівномірності завантаження струмом фаз обмоток статора і приведенного значення температури τ . Вісь абсцис подана у точках обчислення k (рис.

5), їх кількість обмежена числом 22.

Рис. 5 Розрахункові залежності показника і значення температури τ .

Аналіз залежностей (рис. 5) свідчить, що за визначених вище умов проведення експериментальних досліджень та при значеннях допустимої температури і вставки спрацювання причиною спрацювання захисту (при) є саме перевищення значення допустимої температури $\tau_{\text{д}}$. При цьому максимальне значення показника не досягає визначеної величини вставки $k_{\text{в}}$.

Проведені дослідження та їх аналіз доводять правомірність і адекватність розроблених методів підвищення ефективності систем захисту АД електроприводів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково-практичної задачі підвищення ефективності систем захисту для забезпечення надійної експлуатації електропривода з АД шляхом визначення аварійно небезпечних і аварійних режимів його роботи.

У результаті проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Проаналізовано причини аварійного виходу з ладу АД, методи та засоби їх захисту і підходи, що покладено в основу їх побудови. Встановлено, що на даний час актуальними і перспективними є створення і розробка нових методів і засобів захисту електропривода з АД при зміні параметрів і характеристик двигуна для забезпечення надійної та ефективної експлуатації.

2. Доведено доцільність застосування показників якості перетворення енергії як інформативних ознак потенційно аварійно небезпечних режимів роботи АД з метою підвищення ефективності систем захисту електропривода з АД. Шляхом математичного моделювання для режимів: неякісне електропостачання та якісний технічний стан двигуна, якісне електропостачання та неякісний технічний стан двигуна і неякісне електропостачання та неякісний технічний стан двигуна, встановлено, що показники якості перетворення енергії характеризують енергопроцеси в АД і опосередковано враховують можливу зміну поточного технічного стану двигуна.

3. Розроблений метод контролю поточного режиму АД оснований на застосуванні характеристики режиму, яка має інформативну ознаку, достатню для визначення потенційно аварійного режиму АД. Розрахунок характеристики режиму потребує визначення відношення флуктуаційних коефіцієнтів, отриманих за ліфтинг-схемою вейвлет-перетворення, до дис-

кретного сигналу миттєвої потужності на суміжних інтервалах.

4. Розроблено метод контролю закінчення пускового режиму АД на основі використання запропонованої характеристики режиму. Встановлено, що наприкінці пуску АД характеристика режиму має характерний „провал”, що прийнятий за ознаку закінчення пускового режиму.

5. Обґрунтована можливість реалізації захисту АД електроприводів за принципом запобігання. Розроблений спосіб змінювання вставки спрацювання за струмом, який ґрунтується на використанні поточного максимального значення показника нерівномірності завантаження струмом фазних обмоток статора, який на відміну від загальноприйнятих захистів за струмом, дозволяє “враховувати” потенційно аварійні режими АД і здійснити запобіжне його вимикання.

6. На відміну від відомих, запропоновані методи основані на використанні енергетичного показника нерівномірності завантаження фаз струмом у рівнянні нагріву АД для реалізації функції захисту від перегріву, а для прогнозу – у рівняннях холодного та гарячого стану. Це дозволяє у будь-якому усталеному режимі роботи АД визначати не тільки температуру обмоток, а і прогнозувати час, через який вона набуде граничних значень.

7. Розширення функціональних можливостей і підвищення ефективності системи захисту здійснюється за умови застосування показників якості перетворення енергії з виконанням функцій аналізу поточного режиму роботи АД на основі логічних ознак режимів роботи двигуна, вирішальних правил і використання апарату прийняття рішення.

8. Організація функцій захисту за запропонованим принципом апаратно-програмної побудови запропонованої системи захисту забезпечується конвеєрною обробкою даних за циклічною схемою “отримання-передача-обробка”.

9. Експериментальні дослідження алгоритмічного і програмного забезпечення систем захисту АД електроприводів на лабораторному дослідному комплексі довели коректність та адекватність запропонованих методів та їх використання для промислових підприємств.

10. Результати досліджень прийняті для впровадження у проект системи захисту АД в ВАТ «Електрозахист» (м. Харків). Теоретичні результати роботи та розроблене програмне забезпечення використовуються в навчальному процесі кафедри систем автоматичного управління та електропривода КДПУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

(Основні)

1. Лашко Ю.В., Черный А.П. К вопросу создания интеллектуальных защит асинхрон-

ных двигателей // Проблемы создания новых машин и технологий. - Кременчуг: КГПИ. - 2000. - Вып. 1/(8). – С. 132-133.

Здобувачем проведено аналіз можливих шляхів підвищення ефективності захисту АД електроприводів.

2. Лашко Ю.В., Черный А.П. Статистическая модель асинхронного двигателя в структуре модуля интеллектуальной защиты // Проблемы создания новых машин и технологий. - Кременчуг: КГПУ. - 2000. - Вып. 2/(9). – С. 324-326.

Здобувачем створено статичну модель і розроблено її програмну реалізацію.

3. Лашко Ю.В., Черный А.П. Концепция построения интеллектуальных защит асинхронных двигателей // Проблемы создания новых машин и технологий. - Кременчуг: КГПУ. - 2001. - Вып. 1/(10). – С. 221-225.

Здобувачем зроблений аналіз, формулювання математичної постановки задач щодо побудови захисту асинхронних двигунів.

4. Лашко Ю.В., Черный А.П. Учет насыщения магнитной цепи асинхронного двигателя в его математической модели // Проблемы создания новых машин и технологий. - Кременчуг: КГПУ. - 2001. - Вып. 2(11). – С. 159-162.

Здобувачем отримано розрахункові формули для врахування насичення магнітного ланцюга у математичній моделі асинхронного двигуна, та виконано програмну реалізацію і дослідження отриманої моделі.

5. Волощенко А.В, Родькин Д.И., Черный А.П., Лашко Ю.В. Принципы построения систем определения скорости асинхронного электропривода // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчуг: КДПУ. – 2001. - Вып. 2(11). – С. 144-145.

Здобувачем виконано програмну реалізацію та дослідження способу визначення швидкості асинхронного електропривода.

6. Черный А.П., Волощенко О.М., Гладырь А.И., Головка О.С. Лашко Ю.В., Модифицированный метод определения момента асинхронного двигателя по экспериментальным данным // Вісник Національного Технічного університету, “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. - Вып. 10. - С. 127-132.

Здобувачу належить математична модель АД з урахуванням зміни параметрів статорних і роторних кіл.

7. Лашко Ю.В. Экспериментальное определение индуктивности контура намагничивания цепи асинхронного двигателя // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчуг: КДПУ. – 2002. - Вып. 1(12). - С. – 345-347.

8. Лашко Ю.В., Черный А.П. Имитатор модуля интеллектуальной защиты асинхронных

двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ. - 2003. Вип. 1(18). – С.182-185.

Здобувачу належить розробка математичного, програмного забезпечення імітатора захисту, та здійснення його тестування.

9. Лашко Ю.В., Черный А.П. Критерии принятия решения в интеллектуальных защитах асинхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2003. - Вип. 2(19), Т1. – С.34-39.

Здобувачу належить визначення критеріїв прийняття рішення в системі захисту.

10. Лашко Ю.В., Чорний О.П., Сидоренко В.М. Интеллектуальный захист електродвигунів з урахуванням критеріїв якості перетворення енергії // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк: ДонНТУ. - 2003. - Вип. 67. – С. 113-115.

Здобувачем розроблено структури системи захисту зі застосуванням функцій захисту інтелектуального характеру.

11. Лашко Ю.В., Чорний О.П. Вейвлет-аналіз в задачах контролю режимів роботи асинхронного двигуна та його захисту // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2004. - Вип. 2(25). – С. 161-164.

Здобувачем проаналізовано можливості застосування апарату вейвлет-перетворення у задачах контролю режимів роботи АД, розроблено спосіб контролю на основі уведеного виразу характеристики режиму, проведено дослідження.

12. Лашко Ю.В., Чорний О.П., Донченко О.А. Интеллектуальный пристрій захисту асинхронних двигунів // Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград: КНТУ, 2004. - Вип.15. – С. 34-40.

Здобувачу належить розробка функціональної структури системи захисту та структури її програмного забезпечення.

13. Лашко Ю.В., Чорний О.П. Система захисту асинхронних двигунів з регульованою уставкою відключення // Електротехніка і електромеханіка. – 2005.- №5. – С. 35-39.

Здобувачем розроблено спосіб захисту з регульованою вставкою спрацювання за струмом.

14. Лашко Ю.В., Черный А.П. Системы “интеллектуальной” защиты электроприводов: понятие, определение и принципы функционирования // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2005. - Вип. 2(31). – С.37-39.

Здобувачем сформульовані принципи побудови “інтелектуального” захисту електроприводів.

15. Лашко Ю.В., Грабовський М.С., Мастеровий В.Я. Визначення і прогнозування теплового стану обмоток асинхронного двигуна // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2005. - Вип. 3(32). – С.160-163.

Здобувачу належить розробка модифікованої моделі визначення теплового стану обмоток АД, алгоритму прогнозування та проведення досліджень.

16. Лашко Ю.В., Чорний О.П. Контроль пускового режиму асинхронних двигунів на основі показників якості перетворення енергії // Вісник Національного технічного університету, “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2005. - Вип. 45. - С. 324-327.

Здобувачем розроблений спосіб контролю закінчення пускового режиму АД та проведені експериментальні дослідження.

17. Пат. 69523А Україна, 7 Н02Р5/04. Пристрій захисту асинхронного двигуна / Родькін Д.Й., Черный А.П., Живора В.Ф., Лашко Ю.В., Сидоренко В.М. - № 2003042859; Заявл. 02.04.2003; Опубл. 22.05.2003; Бюл. № 9. – 16 с.

Здобувачу належить розробка функціональної схеми пристрою, алгоритму та програмного забезпечення.

18. Пат. 71353А Україна, 7 Н02Р5/04. Пристрій захисту асинхронного двигуна / Родькін Д.Й., Черный А.П., Живора В.Ф., Лашко Ю.В., Сидоренко В.М. - № 20031212262; Заявл. 24.12.2003; Опубл. 15.11.2004 Бюл. № 11. – 16 с.

Здобувачу належить розробка функціональної схеми блоку зміни вставки спрацювання.

АНОТАЦІЇ

Лашко Ю.В. Захист асинхронних двигунів електроприводів від аварійних режимів на основі показників якості перетворення енергії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут” – Харків - 2006.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності систем захисту асинхронних двигунів електроприводів шляхом розробки нових методів і алгоритмів, що реалізують функції захисту на основі застосування показників якості перетворення енергії і забезпечують роботу системи за принципом запобігання.

Проведено комп’ютерні та експериментальні дослідження процесів якості перетворення енергії АД для випадків: (не)якісного електропостачання при (не)якісному технічному стані двигуна, в результаті яких доведено, що підвищення ефективності систем захисту здій-

снюється застосуванням показників якості перетворення енергії в АД, як інформативних ознак зміни його режиму роботи і, мають властивість щодо опосередкованого врахування поточного реального технічного стану двигуна. Розроблено метод контролю зміни поточного режиму роботи АД, який ґрунтується на застосуванні уведеної характеристики режиму роботи АД, що обчислюється за відношенням потужностей вейвлет-коефіцієнтів, отриманих за ліфтинг-схемою, застосованої до дискретних значень миттєвої потужності. У роботі виконано обґрунтування та розроблено метод змінювання вставки спрацювання за струмом, модифікацію методів визначення і прогнозування теплового стану двигуна, спосіб контролю закінчення пускового режиму. Запропоновані апаратно-програмні рішення для забезпечення конвеєрної обробки даних за схемою “отримання-передача-обробка інформації” з організацією функцій захисту на рівні задач із паралельним виконанням їх компонент при математичній обробці даних.

Коректність і працездатність розроблених методів і алгоритмів підтверджена лабораторними експериментами.

Ключові слова: електропривод, контроль та захист, вейвлет-перетворення, вставка спрацювання, тепловий стан, прогнозування.

Лашко Ю.В. Защита асинхронных двигателей электроприводов от аварийных режимов на основе показателей качества преобразования энергии. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет „Харьковский политехнический институт” – Харьков - 2006.

Диссертация посвящена повышению эффективности систем защиты асинхронных двигателей электроприводов путем разработки новых методов и алгоритмов, которые реализуют функции защиты на основе использования показателей качества преобразования энергии и обеспечивают работу системы по упреждающему принципу.

Обоснована взаимосвязь между качеством электроэнергии, техническим состоянием двигателя, нагрузкой, которая приводит к тому, что аварийность АД определяется комплексом “сеть-двигатель-нагрузка” и проявляется непосредственно в двигателе. Проведены компьютерные и экспериментальные исследования процессов качества преобразования энергии в АД для случаев: (не)качественного электропитания при (не)качественном техническом состоянии двигателя, в результате которых доказано, что повышение эффективности систем защиты осуществляется применением показателей качества преобразования энергии в АД в качестве информативных признаков изменения его режима работы, которые позволяют кос-

венно учитывать реальное техническое состояние двигателя. Разработан метод контроля изменения текущего режима работы АД, который основывается на использовании введенной характеристики режима работы АД, вычисляемой по отношению мощностей вейвлет-коэффициентов, полученных применением лифтинг-схемы к дискретным значениям мгновенной мощности. Выполнено теоретическое обоснование и разработан метод изменения уставки срабатывания по току. Для реализации тепловой защиты АД предложено усовершенствование известного метода, заключающееся во введении в уравнение модели нагрева двигателя показателя неравномерности загрузки током фаз обмоток статора. Предложена модификация метода прогнозирования температуры и определения времени отключения АД на основе использования указанного показателя в уравнениях холодного и горячего состояния. Расширены функции системы защиты за счет предложенного метода контроля пускового режима АД, основанного на выявлении “провала” характеристики режима в окончательной фазе разгона двигателя.

Выполнен синтез регламентированных и разработанных новых функций защиты. Предложены аппаратно-программные решения, обеспечивающие конвейерную обработку данных по схеме “получение-передача-обработка информации” с организацией функций защиты на уровне задач с параллельным выполнением их компонент при математической обработке данных.

Корректность и работоспособность разработанных методов и алгоритмов подтверждена лабораторными экспериментами.

Ключевые слова: электропривод, контроль и защита, вейвлет-преобразование, уставка срабатывания, тепловое состояние, прогнозирование.

Lashko Y.V. Defense of asynchronous motors of electro drivers from malfunctions on the basis of indexes of quality of transformation of energy. – Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical science of specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” – Kharkiv - 2006.

Dissertation is devoted the increase of efficiency of the systems of defense of asynchronous motors of electro drives development of new methods and algorithms which will realize the functions of defense on the basis of application of indexes of quality of transformation of energy and provide work of the system on principle of prevention.

It is proved that the increase of efficiency of the systems of defense is carried out application of indexes of quality of transformation of energy in AE, as informing signs of change of his office

hours and, are a characteristic in relation to the mediated account of the current real technical status of engine.

Computer and experimental researches of processes of quality of transformation of energy are conducted in AM for cases: (not)quality power supply at (not)quality technical state of motor, which it is proved as a result of, that the increase of efficiency of the systems of defense is carried out application of indexes of quality of transformation of energy in AM, as informing parameters of change of his office hours and, are a characteristic in relation to the mediated account of the current real technical status of motor. The method control of change of insertion working is developed on a current, modification of methods of determination and prognostication of the thermal state of engine, method of control of completion of the starting mode.

The synthesis of the regulated and developed new functions of defense is executed. Vehicle-programmatic solutions, providing the conveyer processing of data on a chart “receipt-transmission-treatment of information” with organization of functions of defense at the level of tasks with concurrent execution their component at the mathematical processing of data, are offered.

Correctness and capacity of the developed methods and algorithms is confirmed laboratory experiments.

Keywords: electric drive, control and defence, wavelet-transformation, response level, thermal state, prognostication.

Підписано до друку 24.02.2006р. Формат 145×215.
Формат паперу 60×90/16. Папір офсетний. Друк RISO.
Ум. друк арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення №10654
Відповідальність за зміст поданого для друку матеріалу несе автор.

Надруковано в типографії КДПУ
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20