

УДК 621.313

В.Ю. КУЧЕРУК, О.П. ВОЙТОВИЧ, І.А. ДУДАТЬЄВ*Вінницький національний технічний університет, Україна***ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ**

В статті розглянуто принципи розроблення та досліджено систему діагностування електромоторів, які працюють на підвищених частотах обертання. Розроблено систему діагностування електромоторів з комплексним врахуванням несправностей при безперервному діагностуванні (в реальному часі) на основі нейронечіткого підходу, в якій враховуються такі діагностичні параметри як зміна сигналу сенсорів положення ротора, напруги керування, струму живлення і температури, а також приймається рішення про наявність семи класів можливих несправностей. Запропоновано використовувати аналоговий нейроконтролер, основною перевагою якого є швидкість та точність отримання діагнозу за рахунок опрацювання даних безпосередньо з аналогових вимірюваних каналів.

діагностування, електромотор, нейронечіткі методи, класи несправностей, безперервне діагностування, реальний час, нейроконтролер

Вступ

Покращення надійності, безпеки та ефективності існуючих методів контролю та технічної діагностики стає все важливішою задачею для багатьох технічних процесів. Особливо це стосується таких галузей як автомобільний та залізничний транспорт, хімічне виробництво та електроенергетика, побутова та медична техніка. Надійність електричних моторів (ЕМ) промислових електроприводів досить низька. Щорічно виходить з ладу і ремонтується до 30 % парку використовуваних безконтактних ЕМ. Переважна більшість з них після ремонту повертається на підприємство й експлуатується до наступного виходу з ладу. Низька надійність безконтактних ЕМ обумовлена низькою якістю електричної енергії, неякісним ремонтом і старінням конструкційних матеріалів. З розвитком обчислювальної техніки та мікропроцесорних систем керування розвивались відповідні системи контролю та діагностування, націлені на підтримку ефективного функціонування електрообладнання.

Аналіз досліджень і публікацій. При класичних підходах використовується обмеження або перевірка зміни деяких вихідних змінних [1]. Так як вони не дають детальної інформації та не дозволяють діа-

гностувати несправність, все більше розвиваються методи, основані на моделі об'єкта з використанням вхідних та вихідних сигналів. Ці методи базуються, наприклад, на оцінці параметрів, контрольних рівняннях або експертних станах. Також розвивається підхід на основі моделі сигналу. Визначення діагнозів несправностей відбувається за допомогою класифікації або стратегії логічного висновку [2, 3].

Постановка завдання. Часто несправності, що виникають в середині електромоторів, можуть бути визначені по проходженню тривалого проміжку часу, а раптові виходи з ладу цих ЕМ можуть спричинити великі втрати. Рання та достовірна діагностика несправностей приводить до зупинення розвитку аварійних ситуацій та скорочення часу простою. Вона також дозволяє позбавитись шкідливих, часом небезпечних, впливів несправностей на технологічні системи та процеси.

Отже, актуальною задачею є створення апаратного та програмного забезпечення, яке дозволить приймати діагностичне рішення в реальному часі на основі аналізу зміни параметрів ЕМ. Це може бути досягнуто шляхом створення інтелектуальної моделі, яка інтерпретує значення контрольованих параметрів в реальному часі. Складність поставленої задачі полягає в тому, що ЕМ є складними неліній-

ними об'єктами. Вихідні параметри залежать від багатьох факторів: зміни вхідних параметрів, параметрів стану та завод і збурень. Часто діагностичне рішення приймається лише з огляду на досвід експерта без достатнього теоретичного обґрунтування. В цьому випадку доцільним для вирішення поставленої задачі є використання засобів нечіткої логіки та нейронних мереж.

Важливим моментом при застосуванні нейронечіткого метода діагностування є навчання та тестування нейронної мережі. Для навчання та тестування обирають різні вибірки. При цьому необхідно враховувати, що навчальна вибірка повинна представляти більш складний режим роботи, ніж тестувальна, а потім і робоча, оскільки в іншому випадку похибка буде перевищувати допустимі межі, так як мережа не буде знати, як поводити себе в такій ситуації.

На основі вищесказаного, метою даної статті є розробка системи технічного діагностування ЕМ за допомогою нейронечіткої системи, яка працює в реальному часі, що дозволить визначати несправності та їх причину безпосередньо на етапі експлуатації ЕМ.

Основна частина

Запропонований метод проектування інтелектуальної моделі оцінки технічного стану та діагностування ЕМ, оснований на формалізації за допомогою адаптивних нейронечітких систем. Нейронечітка мережа апроксимує вихід об'єкта, який моделюється при справному технічному стані. ЕМ в справному технічному стані можна представити деякою еталонною нелінійною функцією. При створенні системи технічного діагностування параметри справного ЕМ беремо як початкові, відносно яких розглядаються наступні зміни параметрів.

Аналіз стану ЕМ та прийняття діагнозу оснований на оцінці співвідношення між зміною параметрів входу та параметрів виходу. Нейронечітка мережа апроксимує вихід об'єкта, який моделюється при

справному технічному стані. ЕМ в справному технічному стані можна представити деякою еталонною нелінійною функцією. При створенні системи технічного діагностування параметри справного ЕМ беремо як початкові, відносно яких розглядаються наступні зміни параметрів.

Розглянемо основні складові частини ЕМ [4], структурна схема наведена на рис. 1. Вентильний ЕМ складається з генератора зразкового струму (ГЗС), на виході якого формуються зразкові струми. На контролері ШІМ (К ШІМ) відбувається керування IGBT інвертором (IGBT). На виході електричного мотора з постійними магнітами (ЕМПМ) за допомогою сенсорів положення ротора вимірюються положення ротора та подається на генератор зразкового струму.

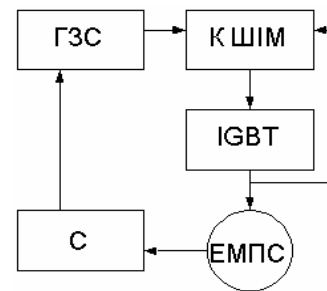


Рис. 1. Структурна схема ЕМ

Всі вузли, що входять в ЕМ, потребують постійної діагностики технічного стану.

Особливу специфіку в роботу та характеристики БЕМП вносять живлення від напівпровідникових комутаторів та використання сенсорів Холла, як сенсорів положення ротора. Перевірку придатності та пошук несправностей силового кола можна робити лише після того, як буде перевірена справність системи керування вентильми [5, 6].

Для перевірки технічного стану трьох сенсорів (двох сенсорів положення ротора та сенсору, що визначає напругу керування) використаємо наступний підхід [7]. Враховуючи мажоритарний критерій визначення несправностей (ймовірність виходу з ладу одного сенсора значно вище, ніж двох одночасно) можна припустити, що зміни вимірювальних

сигналів з трьох каналів будуть відбуватися одночасно, або не відбуватись взагалі. Тому для визначення несправності одного з сенсорів необхідно відслідковувати зміну сигналу у вимірювальних каналах і порівнювати, чи відбулися ці зміни одночасно.

При діагностуванні силової частини можна визначити такі несправності:

- несправність силового ключа (обрив);
- несправність силового ключа (коротке замикання);
- обрив обмотки ЕМ.

Коротке замикання одного з ключів (пробій) по колу зворотного зв'язку впливає на решту ключів, збільшуючи їх електричне навантаження [6], що може призвести до каскадного розвитку аварійної ситуації. Отже, якщо струм живлення $I_{жс}$ перевищує значення максимально допустимого струму живлення I_{max} , тобто виконується умова

$$I_{жс} > I_{max}, \quad (1)$$

то це вказує на коротке замикання в одного з ключів (пробій). Така несправність вимагає негайного вимкнення ЕМ для запобігання подальшого виходу з ладу решти ключів.

При обриві обмотки ЕМ різко зростає пульсація струму в колі живлення. У випадку обриву одного з ключів частота пульсацій буде в два рази менша. Тобто при незмінному сигналі керування U_k , зміна сигналу струму живлення $I_{жс}$ буде більшою за попереднє значення [7]. Для діагностування цих несправностей можна використати наступний критерій.

$$\begin{cases} |U_k| > \Delta U, \\ |I_{жс}| < \Delta I, \end{cases} \quad (2)$$

де ΔU , ΔI – мінімальні значення зміни напруги та струму за час Δt .

На основі вище сказаного розроблено алгоритм діагностування.

1. Вимірювання значень U_1 (напруга на С1), U_2 (напруга на С2), U_k (керуюча напруга), $I_{жс}$ – струм живлення.

2. Перевірка на справність каналів сенсорів положення ротора та керуючого сигналу.

3. Перевірка на коротке замикання ключів.

4. Перевірка на обрив ключа.

5. Перевірка на обрив обмоток ЕМ.

6. Висновок про справність. У випадку виникнення несправності – винесення діагнозу.

Як додатковий параметр виступає температура ЕМ, вихід якої за норму сигналізує про несправності в електричній або механічній частинах.

При застосуванні даного алгоритму в числовому вигляді може виникнути ситуація, коли один з сенсорів спрацював скоріше ніж інший, або зміна сигналу відбулась в межах похибки вимірювання, а система покаже наявність несправності.

Щоб уникнути цієї ситуації, пропонується використовувати нейронечіткий підхід.

За допомогою традиційних методів вирішення задачі ТД БЕМП реалізувати досить складно. Складність виникає при пошуку статистичних даних, їх обробці та пошуку апроксимуючої функції. Результати роботи такої системи є не дуже високими. Щоб вирішити ці проблеми, зручно використовувати апарат нечіткої логіки, де залежності входів системи та виходів задаються на основі лінгвістичної людської логіки, а не точних цифр, з якими складно працювати. Показники таких систем набагато вище, ніж систем на чітких числах. Застосування конкретної діагностичної моделі залежить від вигляду порушення нормального ходу, вхідної інформації, знань експерта. Найбільш застосовуваними є моделі діагностування на основі нечіткої логіки та нейронних мереж.

При діагностуванні стану ЕМ постає питання визначення певних класів несправностей, що виникають. Позначимо клас несправності, що може виникнути в ЕМ FQi , де $FQ0$ – відповідає за справний мотор, а FQi (при $i \neq 0$) – певним класам несправності. Основні класи несправностей, які можна визначити за поданою вище методикою:

– $FQ1$ – несправний сенсор С1;

– $FQ2$ – несправний сенсор С2;

- FQ3 – несправний сенсор каналу керування;
- FQ4 – коротке замикання ключа;
- FQ5 – обрив силового ключа;
- FQ6 – обрив обмотки ЕМ;
- FQ7 – невідома несправність.

В якості вхідних даних використаємо наступні:

- $\Delta U_{c1} = U_{c1(i+1)} - U_{c1i}$ зміна сигналу першого сенсору C1;
- $\Delta U_{c2} = U_{c2(i+1)} - U_{c2i}$ зміна сигналу другого сенсору C2;
- $\Delta U_{k} = U_{k(i+1)} - U_{ki}$ зміна сигналу керування;
- $I_{ж}$ – струм живлення;
- Θ – температура ЕМ.

Якщо всі параметри в нормі, проте ωr виходить за допустимі межі, значить необхідно проводити додаткові дослідження.

Для реалізації системи діагностування ЕМ, яка працює в реальному часі, використано плату аналогового нейроконтролера Silimann 120cx. Основною перевагою використання аналогового нейроконтролера є швидкість та точність отримання діагнозу за рахунок опрацювання даних з аналогових вимірюваних каналів [8].

Структурна схема системи технічного діагностування ЕМ з автоматичним класифікатором на основі Silimann 120 cx показана на рис. 2.

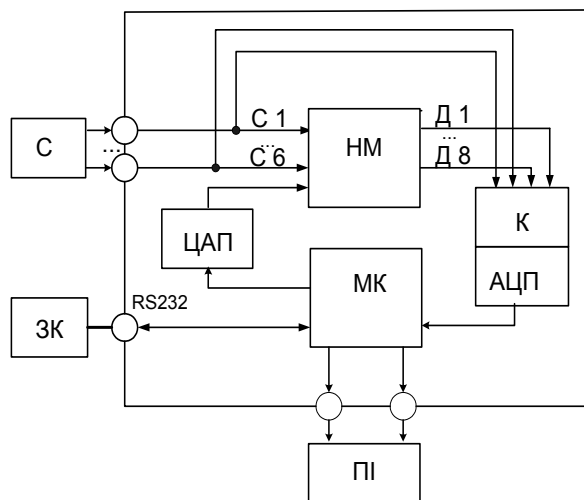


Рис. 2. Структурна схема системи діагностування ЕМ з аналоговим нейроконтролером

На рис. 2 прийняті такі позначення: С – сенсор; ЗК – зовнішній комп’ютер; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; НМ – нейромережа; МК – мікроконтролер; ПІ – пристрій індикації; Д – діагноз; К – комутатор; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

Мікроконтролер керує процесом перезаписування вагових коефіцієнтів синапсів при навчанні мережі та реалізує зв’язок за допомогою драйвера RS232 з зовнішнім комп’ютером. За допомогою ЦАП отримується аналогова величина вагового коефіцієнта, що завантажується.

Silimann 120cx [8] – це інтегральна схема з великою ступеню інтеграції. У неї також включено мікросхему штучної нейромережі, яка виконує раніше вивчені функції. Тренування відбувається за допомогою зовнішнього комп’ютера та спеціального програмного забезпечення.

Частина схеми, що включає нейромережу, є повністю паралельною та аналоговою. Вона складається з 10 входів, 6 прихованих нейронів та 10 виходів, загалом використовуються 120 синапсів. Додатково включено 6 порогових елементів у прихованому шарі та 10 порогових елементів на вихідному шарі. Порогові елементи отримуються за допомогою постійного сигналу через додатковий вхідний нейрон. Загалом у НМ використовуються 136 синапсів.

Тренування отриманої системи відбувається за допомогою спеціального програмного забезпечення Silimann Trainer, за допомогою якого відбувається безпосередньо навчання НМ та виведення отриманих результатів на рідинно-кристалічний індикатор, або безпосередньо на комп’ютер. Отримання вагових коефіцієнтів для навчання та тренування НМ необхідно на окремому зовнішньому комп’ютері. Навчання описується в зразковому наборі даних, який потім направляється на Silimann 120 cx.

Для навчання та тестування обрано різні вибірки. При цьому було враховано, що навчальна вибірка повинна представляти більш складний режим робо-

ти, ніж тестувальна, а потім і робоча, оскільки в іншому випадку похибка буде перевищувати допустимі межі, оскільки мережа не буде знати, як поводити себе в такій ситуації.

Для повноти отримання діагностичної інформації ЕМ було досліджено в декількох режимах роботи. Репрезентативними режимами роботи ЕМ для визначення діагностичних параметрів є режими пуску, статичний режим, самогальмування, ударне навантаження, повторно-динамічний режим.

Коротко описати алгоритм роботи системи можна так. Починається робота з тестування безпосередньо самої системи на наявність всіх складових та їх зв'язків. Далі створюється або обирається набір тестових файлів із значеннями зразкових сигналів, за допомогою яких буде навчатися нейромережа. Після цього проводиться тренування нейромережі. Якщо навчання не досягло успіху, тобто критерій тренування не досяг мінімуму (умова 1), то необхідно змінювати настройки тренування. У випадку, якщо після повторного навчання не виконується умова 1 і неможливо змінити настройки тренування (умова 2), необхідно змінювати тренувальні файли, поки не виконається критерій.

Метод технічного діагностування ЕМ в реальному часі на основі нейронечіткої мережі сприяє як зниженню ймовірності пропуску дефекту, так і помилкового його виявлення, і доцільний для винесення діагнозів про технічний стан ЕМ.

Висновки

1. Розроблено метод технічного діагностування ЕМ у реальному часі при експлуатації. Як діагностичні параметри використані струм живлення $I_{жс}$, зміни напруг на датчиках положення ротора і керуючої напруги, кутова швидкість та температура.

2. Запропоновано використати аналоговий нейроконтролер для визначення технічного стану ЕМ та причини можливої несправності, яка використовує розроблений метод.

3. В подальшому планується збільшити кількість можливих діагнозів та діагностичних ознак системи технічного діагностування ЕМ.

Література

1. Кучерук В.Ю. Класифікація та аналіз методів оцінки стану електричних машин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 1999. – № 4. – С. 56-62.
2. Кучерук В.Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів: Монографія. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. – 195 с.
3. Moseler O., Iserman R. Application of model-based fault detection to a brushless DC motor // IEEE Transactions on industrial electronics, Oct. 2000. – Vol. 47, No. 5. – P. 1015-1020.
4. Войтович О.П. Метод діагностування вентильних двигунів на основі нейронечітких систем // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Ч.1, т.1. (68). – С. 222-225.
5. Техническая диагностика вентильных преобразователей / В.В. Маркин, В.Н. Миронов, С.Г. Обухов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
6. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. – Л.: Наука, ленингр. отд., 1985. – 164 с.
7. Боровиков М.А., Доманов В.И., Доманов А.В. Функциональная диагностика вентиального двигателя // Вестник Ульяновского ГТУ, 2001. – № 2. – С. 15-18.
8. Мельниченко А. Обучение вместо программирования // Электронные компоненты и системы. – 2004. – № 12 (88). – С. 36-37.

Надійшла до редакції 13.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Дубовой, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.