

УДК 621.313.292.004.53

**В. Ю. Кучерук**, д-р техн. наук, проф.  
**О. П. Войтович**, канд. техн. наук, стар. викл.

## СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: [kucheruk@mail.ru](mailto:kucheruk@mail.ru), [o\\_voytovych@mail.ru](mailto:o_voytovych@mail.ru)

*Присвячено розробленню та дослідженню систем діагностування електромоторів, які працюють на підвищених частотах обертання. Розроблено систему діагностування електромоторів з комплексним урахуванням несправностей за неперервного діагностування на основі нейронечіткого підходу. Запропоновано використовувати аналоговий нейроконтролер, основною перевагою застосування якого є швидкість і точність отримання діагнозу за рахунок опрацювання даних з аналогових вимірюваних каналів.*

*Thesis is devoted to development and research of system of electromotor diagnosis, which is working on increasing angular velocity. The methods of electromotor diagnosis with complexly taking into account faults by special testing and continuous inspection based on neural-fuzzy methods are developed. Based on offered methods formed hardware and software, which are used in developed system of electromotor diagnosis. The analog neuralcontroller using is offered. The main preferences of such approach are accuracy and speed of diagnoses receiving due to data processing with analog measurement channel.*

### Вступ

Підвищення надійності, безпеки та ефективності існуючих методів контролю і технічної діагностики стає дедалі важливішим завданням 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. Низьку надійність безконтактних ЕМ зумовлено низькою якістю електричної енергії, неякісним ремонтом і старінням конструкційних матеріалів. Наприкінці ХХ – початку ХХІ ст. з розвитком обчислювальної техніки та мікропроцесорних систем керування розвивались відповідні системи контролю та діагностування, націлені на підтримку ефективного функціонування електрообладнання.

### Аналіз досліджень і публікацій

За класичних підходів використовують обмеження або перевірку зміни деяких вихідних змінних [1]. Оскільки вони не дають детальної інформації і не дозволяють діагностувати несправність, дедалі більше розвиваються методи, що ґрунтуються 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. Діагнози несправностей визначають за допомогою класифікації або стратегії логічного висновку [2; 3].

### Постановка завдання

Часто несправності, що виникають у середині електромоторів, можуть бути визначені через тривалий час, 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, актуальним завданням є створення апаратного та програмного забезпечення, яке дозволить приймати діагностичне рішення в реальному часі на підставі аналізу зміни параметрів ЕМ. Це може бути досягнуто створенням інтелектуальної моделі, яка інтерпретує значення контрольованих параметрів у реальному часі. Складність поставленого завдання полягає в тому, що ЕМ є складними нелінійними 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. У цьому випадку доцільно для вирішення поставленого завдання використовувати засоби нечіткої логіки та нейронних мереж. Важливим чинником застосування нейронечіткого методу діагностування є навчання і тестування нейронної

мережі. Для навчання і тестування обирають різні вибірки. При цьому необхідно враховувати, що навчальна вибірка має містити більш складний режим роботи, ніж тестувальна, а потім і робоча, інакше похибка буде перевищувати допустимі межі, оскільки мережа не буде «знати», як поводити себе в такій ситуації. Метою цієї роботи є розроблення 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

Запропоновано метод проектування інтелектуальної моделі оцінювання технічного стану та діагностування ЕМ, що ґрунтується на формалізації за допомогою адаптивних нейронечітких систем. Нейронечітка мережа апроксимує вихід об'єкта, який моделюється за справного технічного стану. Електричні мотори в справному технічному стані можна подати деякою еталонною нелінійною функцією. Для створення системи технічного діагностування параметри справного ЕМ беремо як початкові, відносно яких розглядаються наступні зміни параметрів.

Метод технічного діагностування ЕМ у реальному часі на основі нейронечіткої мережі буде сприяти як зниженню імовірності пропуску дефекту, так і помилковому його виявленню, і доцільний для діагностування технічного стану ЕМ.

Аналіз стану ЕМ та діагноз ґрунтуються на оцінці співвідношення між зміною параметрів входу та параметрів виходу. Нейронечітка мережа апроксимує вихід об'єкта, який моделюється за справного технічного стану. Електричний мотор у справному технічному стані можна подати деякою еталонною нелінійною функцією.

Розглянемо основні складові частини ЕМ [4], структурну схему якої показано на рис.1. Вентильний ЕМ складається з генератора зразкового струму (ГЗС), на виході якого формуються зразкові струми. На контролері ШІМ (КШІМ) відбувається керування IGBT інвертором (IGBT). На виході ЕМ з постійними магнітами (ЕМПМ) за допомогою сенсорів положення ротора вимірюється та подається на генератор зразкового струму.

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

Перевіряти придатність та пошук несправностей силового кола можна лише після того, як буде перевірена справність системи керування вентиллями [5; 6].

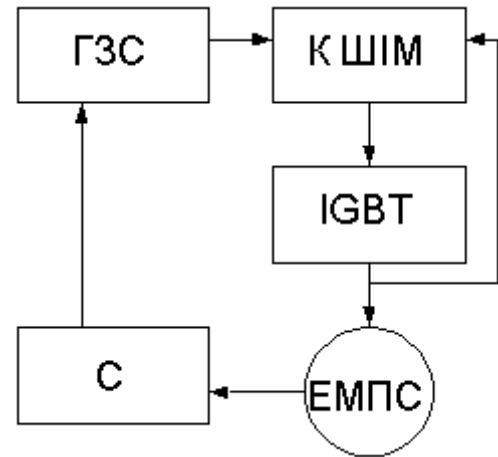


Рис.1. Структурна схема ЕМ

Для перевірки технічного стану трьох сенсорів (двох сенсорів положення ротора та сенсора, що визначає напругу керування) використаємо такий підхід [7]. Ураховуючи мажоритарний критерій визначення несправностей (імовірність виходу з ладу одного сенсора значно вища, ніж двох одночасно), можна припустити, що зміни вимірювальних сигналів з трьох каналів будуть відбуватися одночасно, або не відбуватись взагалі. Тому для визначення несправності одного із сенсорів необхідно відслідковувати зміну сигналу у вимірювальних каналах і порівнювати, чи відбулися ці зміни одночасно.

Діагностуючи силову частину, 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  $I_{ж}$  перевищує значення максимально допустимого струму живлення  $I_{max}$ , тобто виконується умова

$$I_{ж} > I_{max},$$

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

У разі обриву обмотки ЕМ різко зростає пульсація струму в колі живлення. У випадку обриву одного з ключів частота пульсацій буде в два рази меншою. Тобто за незмінного сигналу керування  $U_{к}$  зміна сигналу струму живлення  $I_{ж}$  буде більшою за попереднє значення [7]. Для

діагностування цих несправностей можна використати такий критерій:

$$\begin{cases} |U_k| > \Delta U, \\ |I_{ж}| < \Delta I, \end{cases}$$

де  $\Delta U$ ,  $\Delta I$  – мінімальні значення зміни напруги та струму за час  $\Delta t$ .

На основі вищенаведеного розроблено алгоритм діагностування.

1. Вимірювання значень  $U_1$  (напруга на  $C_1$ ),  $U_2$  (напруга на  $C_2$ ),  $U_k$  (керувальна напруга),  $I_{ж}$  – струм живлення.

2. Перевірка на справність каналів сенсорів положення ротора та керувального 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 – діагностування.

Додатковим параметром є температура ЕМ, перевищення якої за норму сигналізує про несправності в електричній або механічній частинах.

Із застосуванням цього алгоритму в числовому вигляді може виникнути ситуація, коли один із сенсорів спрацював швидше від іншого, або зміна сигналу відбулась в межах похибки вимірювання, а система покаже наявність несправності.

Щоб уникнути цієї ситуації, пропонуємо використовувати нейронечіткий підхід.

Під час діагностування стану ЕМ постає питання визначення певних класів несправностей, що виникають. Позначимо клас несправності, що може виникнути в ЕМ,  $FQ_i$ , де  $FQ_0$  – відповідає за справний мотор, а  $FQ_i$  (якщо  $i \neq 0$ ) – певним класам несправностей. Основні класи несправностей, які можна визначити за поданою вище методикою:

- $FQ_1$  – несправний сенсор  $C_1$ ;
- $FQ_2$  – несправний сенсор  $C_2$ ;
- $FQ_3$  – несправний сенсор каналу керування;
- $FQ_4$  – коротке замикання ключа;
- $FQ_5$  – обрив силового ключа;
- $FQ_6$  – обрив обмотки ЕМ;
- $FQ_7$  – невідома несправність.

Як вхідні дані використаємо такі:

–  $\Delta U_{c1} = U_{c1(i+1)} - U_{c1i}$  зміна сигналу першого сенсора  $C_1$ ;

–  $\Delta U_{c2} = U_{c2(i+1)} - U_{c2i}$  зміна сигналу другого сенсора  $C_2$ ;

–  $\Delta U_k = U_{k(i+1)} - U_{ki}$  зміна сигналу керування;

–  $I_{ж}$  – струм живлення;

–  $\Theta$  – температура ЕМ;

Якщо всі параметри в нормі, проте  $\omega_r$  перевищує граничнодопустимі значення, то потрібно проводити додаткові дослідження.

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

Структурну схему системи технічного діагностування ЕМ з автоматичним класифікатором на основі Silimann 120 сх показано на рис. 2.

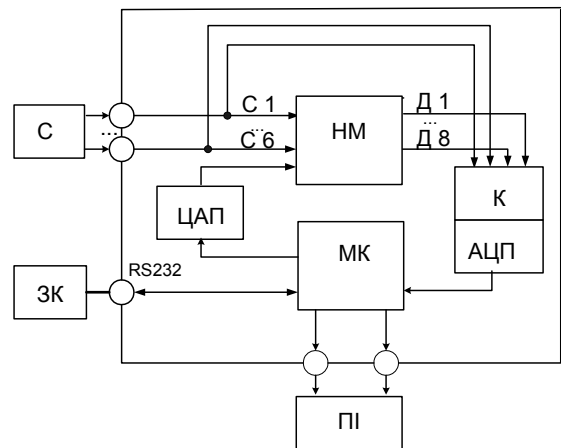


Рис. 2. Структурна схема системи діагностування ЕМ з аналоговим нейроконтролером: С – сенсор; ЗК – зовнішній комп'ютер; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; НМ – нейромережа; МК – мікроконтролер; ПІ – пристрій індикації; Д – діагноз; К – комутатор; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

Мікроконтролер керує процесом перезаписування вагових коефіцієнтів синапсів під час навчання мережі та реалізує зв'язок за допомогою драйвера RS232 із зовнішнім комп'ютером. За допомогою ЦАП отримується аналогова величина вагового коефіцієнта, що завантажується.

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. Отримувати вагові коефіцієнти для навчання та тренування НМ необхідно на окремому зовнішньому комп'ютері. Навчання описується в зразковому наборі даних, який потім спрямовується на Silimann 120 сх.

Для навчання і тестування обрано різні вибірки. При цьому було враховано, що навчальна вибірка має передбачати більш складний режим роботи, ніж тестувальна, а потім і робоча, оскільки в іншому випадку похибка буде перевищу-

вати 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.

Метод технічного діагностування ЕМ у реальному часі на основі нейронечіткої мережі сприяє як зниженню імовірності пропуску дефекту, так і помилковому його виявленню, і доцільний для винесення діагнозів про технічний стан ЕМ.

### Висновки

1. Розроблено метод технічного діагностування ЕМ у реальному часі в процесі експлуатації. Як діагностичні параметри використано струм живлення  $I_{ж}$ , зміни напруг на датчиках положення ротора і керувальної напруги, кутову швидкість і температуру.

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

3. Надалі 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, N 5. – P. 1015–1020.
4. Войтович О. П. Метод діагностування вентильних двигунів на основі нейронечітких систем // Вісн. Хмельниц. нац. ун-ту. – 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.: Изд-во «Наука. Л. О.», 1985. – 164 с.
7. Боровиков М. А., Доманов В. И., Доманов А. В. Функциональная диагностика вентильного двигателя // Вестн. Ульянов. ГТУ. – №2. – 2001. – С. 15–18.
8. Мельниченко А. Обучение вместо программирования // Электронные компоненты и системы. – № 12 (88). – 2004. С. 36–37.

Стаття надійшла до редакції 20.11.06.