

ГРАНЯК В. Ф.

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>e-mail: titanxp2000@ukr.net

ГРИЩУК О. А.

Вінницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

e-mail: olegryshchuk@gmail.com

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ІНФОРМАТИВНОСТІ ДІАГНОСТУЮЧИХ ОЗНАК

У статті досліджено особливості побудови систем діагностування обертових електричних машин в реальних умовах їх експлуатації. Показано, що в зазначених режимах роботи існує проблема обмеженої інформативності вхідних інформаційних параметрів, що можуть бути використані для побудови таких систем. Обґрунтовано доцільність вибору типу вхідної інформації систем діагностування на основі методу еволюційного пошуку. Продемонстровано, що зазначений метод дозволяє більш повною мірою охопити простір пошуку, ніж, наприклад, градієнтні методи оптимізації, та отримати розв'язок, близький до оптимального, за відносно короткий час (малу кількість ітерацій).

Запропоновано концепцію та типову структурну схему системи діагностування обертових електричних машин на основі модифікованої нестандартної штучної нейроподібної мережі (ШНМ) та структуру самої ШНМ, що враховує при діагностуванні поточний режим роботи електричної машини та характеризується високою адаптивністю до об'єкта діагностування. Наведено приклад її апаратної реалізації.

Ключові слова: обертова електрична машина, діагностування, інформативна ознака, інформативність, селективність, вираженість, штучна нейроподібна мережа.

Valerii HRANIAK

Vinnytsia National Agrarian University

Oleh HRYSHCHUK

Vinnytsia Research Expert Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF BUILDING DIAGNOSTIC SYSTEMS OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES UNDER THE CONDITIONS OF LIMITED INFORMATIONALITY OF DIAGNOSTIC SIGNS

The article examines the peculiarities of the construction of systems for diagnosing rotating electric machines in the real conditions of their operation. It is shown that in the specified modes of operation there is a problem of limited informativeness of input information parameters that can be used to build such systems. At the same time, an additional limiting factor that must be considered when designing and implementing such equipment is the limited possibility of intervention in the design of the electric machine, which is usually limited to the manufacturing plant.

As a result of a thorough analysis of the latest research in the direction of the development of diagnostic systems for rotating electric machines, a systematization of the technological parameters of electric machines that are most suitable for use in diagnostic systems was carried out. It is shown that when choosing input parameters of diagnostic systems, it is advisable to consider their informativeness, selectivity, expressiveness and complexity of the acquisition algorithm. At the same time, it is substantiated that the choice of the optimal combination of diagnostic features cannot be considered from the point of view of superposition, since each of them will be characterized by the entropy of selectivity and severity relative to defects of different types.

The expediency of choosing the type of input information of diagnostic systems based on the method of evolutionary search is shown. It is demonstrated that the mentioned method allows to more completely cover the search space than, for example, gradient optimization methods, and to obtain a solution close to the optimal one in a relatively short time (a small number of iterations).

The concept and typical structural diagram of the system for diagnosing rotating electric machines based on a modified non-standard artificial neural network (ANN) and the structure of the ANN itself, which considers the current mode of operation of the electric machine during diagnosis and is characterized by high adaptability to the object of diagnosis, are proposed. An example of its hardware implementation is given.

Key words: rotating electric machine, diagnostics, informative feature, informativeness, selectivity, expressiveness, artificial neural network.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

При побудові систем діагностування обертових електричних машин суттєвою проблемою є як обмежена можливість втручання у їх конструкцію (здійснення якого зазвичай вважається грубим порушенням технічних умов експлуатації обладнання), так і необхідність вимірювання технічних параметрів останніх в режимі реального часу, що обумовлюється динамічністю розвитку дефектів [1, 2]. Враховуючи це, при побудові систем автоматичного контролю та діагностування обертових електричних машин типовим підходом є використання опосередкованих технологічних параметрів, таких як струм, напруга, вібросигнал, кліренс тощо, які є доступними для вимірювання з достатньою швидкістю безпосередньо у режимі реального часу роботи електричної машини. Про те, враховуючи високу складність електричних, магнітних та механічних зв'язків, що мають місце при роботі обертової електричної машини, є очевидним, що інформативність таких параметрів буде суттєво обмеженою. Зазначена обставина додатково

ускладнюватиметься і їх обмеженою селективністю, оскільки при доволі широкій номенклатурі можливих збурюючих факторів типовим явищем для переважної більшості опосередкованих ознак технічного стану буде близькість їх результуючого відгуку при дії різних обумовлюючих чинників [1, 2].

Тож, враховуючи сказане, є очевидною необхідність розробки ефективної концепції побудови систем автоматизованого контролю та діагностування обертових електричних машин в умовах обмеженої інформативності діагностуючих ознак, що дозволяла б забезпечити високу ефективність роботи системи за умов наведених вище обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією з головних тенденцій розвитку сучасної науки є збільшення питомої ваги систем, що можуть бути віднесені до класу систем з виключною складністю [3, 4]. Головною особливістю систем цього класу є наявність великої кількості зв'язків та (або) факторів впливу, класичний математичний опис яких є неможливим або недоцільним внаслідок суттєвого зростання складності моделі, що робить її непридатною для практичного використання [4, 5]. Типовою задачею такого типу, що має значний практичний інтерес та пов'язана з необхідністю аналізу та формування логічного висновку у системі, яка відноситься до систем виключної складності, є задача діагностування обертових електричних машин [6].

Аналіз літературних джерел та попереднього світового досвіду у сфері побудови систем автоматизованого контролю та діагностування обертових електричних машин [1, 7-9] дозволяє здійснити систематизацію опосередкованих ознак технічного стану, що можуть бути використані при побудові таких систем. Класифікація останніх наведена на рис. 1.



Рис. 1. Фізичні величини, що використовуються при діагностування обертових електричних машин

Зазначені ознаки мають високу інформативність та при застосування їх оптимальних комбінацій та проміжної інформаційної обробки теоретично забезпечують можливість з високою вірогідністю встановлювати не лише факт наявності того чи іншого дефекту, а й потенційно виявляти місце його локалізації та прогнозувати час його розвитку [1, 5, 6, 9].

Постановка завдання

Оскільки побудова чіткої математичної моделі механічних, електромагнітних та термічних зв'язків обертової електричної машини є практично не можливою, електричну машину доцільно розглядати як «чорну скриньку». Тобто моделювати не її структуру, а зовнішнє функціонування [6]. Тому для вирішення поставленої проблеми останню доцільно розділити на підзадачу формулювання критерію вибору оптимальної комбінації вхідних інформаційних ознак та підзадачу розробки структури ШНМ, що являлася б ключовим елементом прийняття логічного висновку про імовірність наявності дефекту.

Розробка критерію вибору діагностичних ознак

До головних якісних характеристик ознак, що доцільно застосовувати у системі діагностування електричних машин, можна віднести [3, 4]:

- інформативність;
- вираженість;
- селективність;
- складність алгоритму отримання (розрахунку).

При цьому найбільш важливим показником, що має пріоритетно враховуватися при виборі вхідних параметрів системи діагностування є саме інформативність, яка математично може бути описаною як умовна ентропія:

$$H\left(\frac{K}{X}\right) = -\sum_x p(x) \sum_k P\left(\frac{k}{x}\right) \log P\left(\frac{k}{x}\right), \tag{1}$$

де X – досліджуваний параметр (фізична величин); K – множина можливих досліджуваних станів електричної машини (у тому числі і дефектних); x – можливі значення (діапазони значень) досліджуваного параметру; k – можливі досліджувані стани (у тому числі і дефектні) електричної машини.

Про те, варто відзначити, що вибір оптимального поєднання діагностичних ознак не може розглядатися з точки зору суперпозиції, оскільки кожна із них характеризуватиметься неоднаковою селективністю та вираженістю відносно дефектів різного типу [1, 10, 11]. Враховуючи це, очевидно є необхідність формування оптимального набору діагностичних ознак з урахуванням їх індивідуальних особливостей, найбільш вірогідних режимів роботи електричної машини та можливих дефектів.

Аналіз існуючих методів, придатних для вирішення поставленої задачі вибору оптимальної сукупності інформаційних ознак, дозволив провести їх систематизацію, що наведена на рис. 2

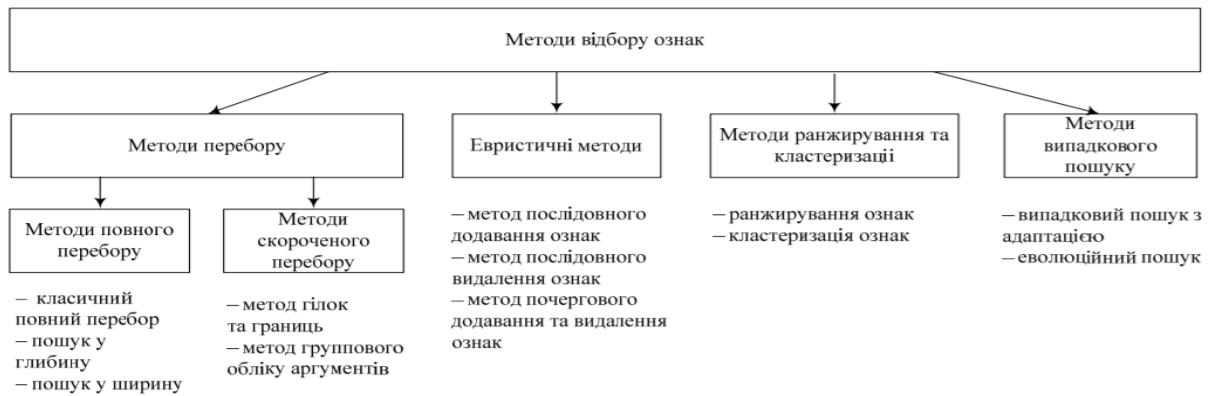


Рис. 2. Систематизація методів, придатних для відбору оптимальної сукупності інформаційних параметрів системи діагностування оборотних електричних машин

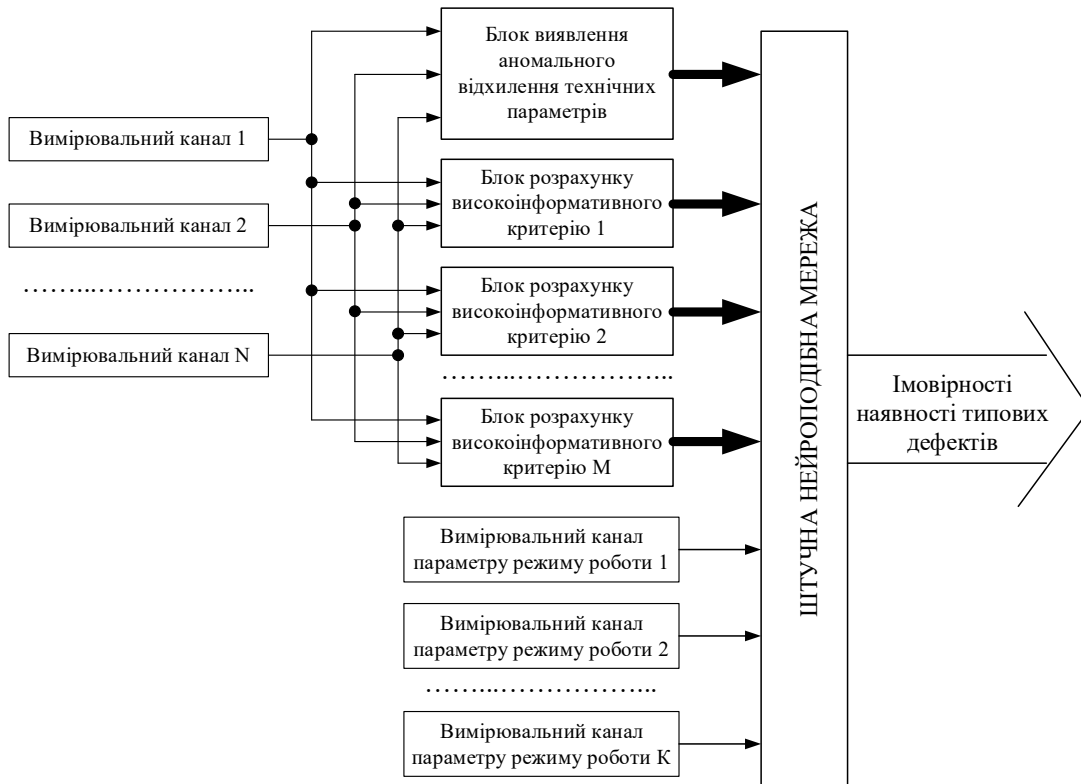


Рис. 3. Структурна схема системи діагностування

Серед наведених на рис. 2 методів особливий інтерес викликає метод еволюційного пошуку. Він являє собою еволюційний алгоритм, що на кожній ітерації працює з підмножиною потенційних розв'язків. Кожен кандидат на оптимальний розв'язок представлений хромосоמוю – бітовим рядком з k елементів, де k – загальна кількість усіх можливих ознак, що описують об'єкт. Якщо ознака береться до розгляду в

поточному розв'язку-кандидаті, то відповідний біт хромосоми встановлюється рівним 1. Перевагою еволюційного пошуку є те, що він має можливості для виходу з локальних оптимумів і пристосований для знаходження нових рішень за рахунок об'єднання кращих рішень, отриманих на різних ітераціях. Такий пошук, дозволяє на кожній ітерації працювати із множиною потенційних розв'язків одночасно, що дозволяє більш повною мірою охопити простір пошуку, близький до оптимального, за відносно короткий час [3,4].

Розробка концепції побудови системи діагностування

Оскільки діагностування неминуче передбачає необхідності прийняття логічних висновків, є очевидним, що досліджувана система є класичним прикладом задачі формування логічного висновку в системах виключної складності за допомогою нейроподібної мережі. Тож, алгоритм вирішення цієї задачі та структура запропонованої нейроподібної мережі може розглядатися як окремо узятий унікальний випадок, що має значну практичну цінність, оскільки може бути адаптованим для вирішення задач подібного типу.

Як було сказано вище, побудова таких систем передбачає попередній вибір переліку інформативних ознак, що необхідно подавати у якості вхідних сигналів ШНМ. Ці дані надходять до підсистеми поточного моніторингу, звідки, після попередньої обробки, передаються у підсистему діагностування. Тож, структура системи діагностування може мати вигляд, наведений на рис. 3.

При цьому структура самої ШНМ може бути реалізована так, як показано на рис. 4.

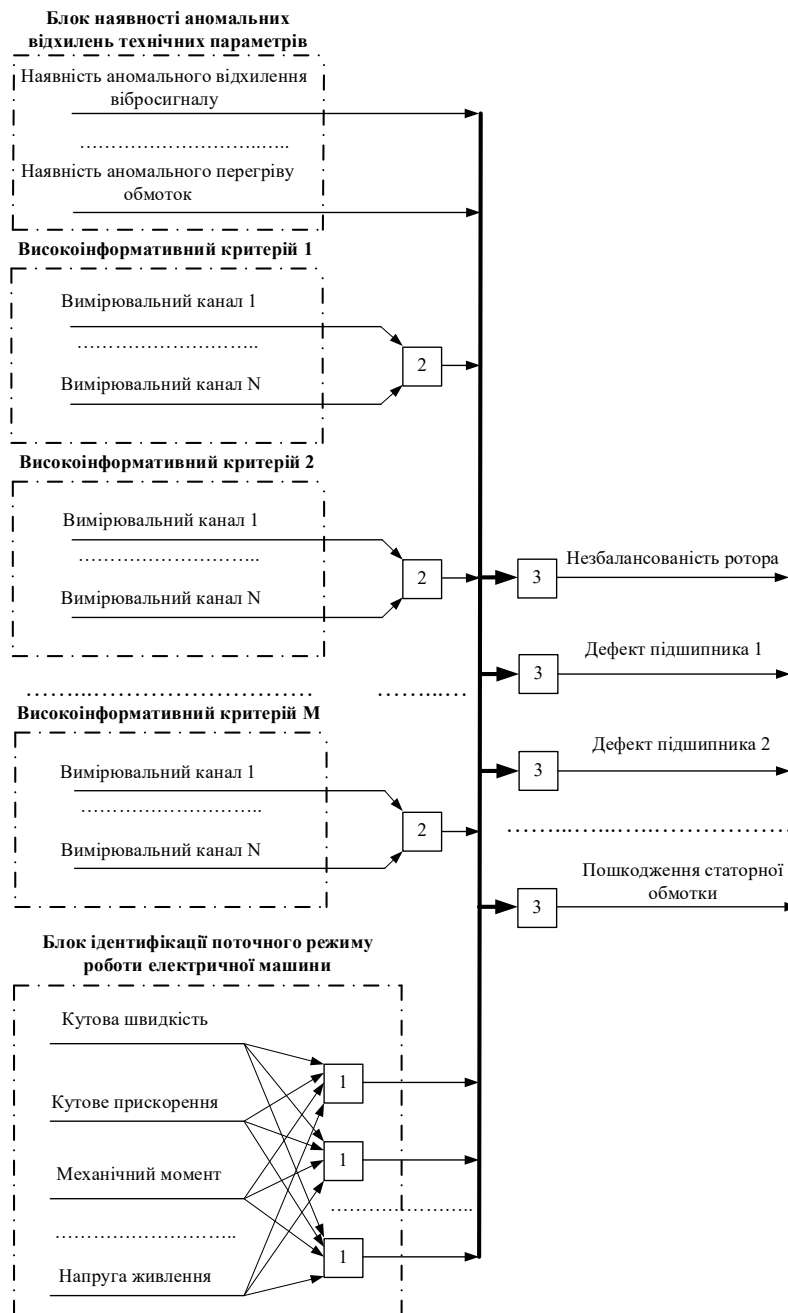


Рис. 4. Структура запропонованої ШНМ

Відокремлений шар ШНМ (нейрони якого позначені квадратиками із цифрою 1 та формують підсистему вибору поточного режиму роботи) містить K нейронів. Кожен нейрон цього шару отримує інформацію про поточні параметри електричної машини, призначені для ідентифікації режиму роботи останньої. На виході кожного із зазначених нейронів формується імовірнісна характеристика роботи машини у визначеному режимі, такому як: розгін, зупинка, накид навантаження, скид навантаження, холостий хід тощо.

Функції перетворення кожного із нейронів запропонованої ШНМ формуються у результаті передексплуатаційного навчання на основі статистичної інформації про особливості роботи електричних машин досліджуваного класу. Особливістю структури ШНМ, наведеної на рис. 4 є можливість автономного навчання підсистеми вибору поточного режиму роботи, що підвищує її адаптивність та ефективність.

Перший шар нейронів основної ШНМ (позначений цифрою 2) містить M нейрон, кожен з яких отримує узагальнену критеріальну інформацію від вимірювальних каналів, призначених для формування окремо взятого високоінформативного критерію, значення якого разом з інформацією про поточний режим роботи електричної машини поступають на нейрони другого шару ШНМ (позначені цифрою 3). Окрім цього на входи нейронів другого шару подаються сигнали з «Блоку наявності аномальних відхилень технічних параметрів». Головною задачею зазначеного блоку є відслідковування таких технічних параметрів, як: перевищення віброприскорення, перегрів обмоток тощо (залежно від результатів вибору оптимальної сукупності інформаційних параметрів системи діагностування, методика якої описана вище).

Спрацювання нейронів другого шару відбувається лише тоді, коли хоча б один із сигналів «Блоку наявності аномальних відхилень технічних параметрів» перевищуватиме встановлене нормоване значення. В цьому випадку функція активації нейронів другого шару може бути представленою, як:

$$\phi(a_i) = \text{sign}(a_i - a_0, \Delta\tau) \cdot \sum_{j=1}^M \psi(p_j), \quad (2)$$

де $\Delta\tau$ – часова затримка на вимикання, a_i – поточне значення параметру, що поступає на відповідний нейрон; a_0 – порогове значення параметру; p_j – скорегований j -й інформативний критерій; $\psi(p_j)$ – функція впливу скорегованого j -го інформативного критерію; $\text{sing}(a_i - a_0, \Delta\tau)$ – релейна функція з затримкою на вмикання.

Слід відзначити, що логічний висновок такої системи, сформований нейронами другого шару, носитиме імовірнісний характер. Перевищення певного встановленого значення імовірності для кожного з обраних найбільш імовірних дефектів формує логічний висновок про підозру на його наявність.

Приклад реалізації системи діагностування

Загальний принцип побудови таких систем варто здійснювати на основі модульного підходу до нарощування кількості вимірювальних каналів з можливістю відносно легкої модернізації шляхом підключення додаткових пристроїв та зміни програмного алгоритму роботи систем. Крім цього є очевидною необхідність застосування дворівневої апаратної системи обробки вхідної інформації (результатів вимірювання). Зокрема, перший рівень доцільно реалізувати у вигляді дискретних числових перетворювачів (мікроконтролерів), що здійснюватимуть формування пакетів вимірювальної інформації у придатному для подальшої обробки вигляді. Залежно від кількості вимірювальних каналів, складності вимірювальних алгоритмів та доступної апаратної продуктивності на першому рівні може застосовуватися один або декілька числових перетворювачів [12].

Другий апаратний рівень доцільно представити у вигляді високопродуктивного сервера, що здійснюватиме попередню обробку пакетів вхідних даних та, за потреби, розрахунків на їх основі високоінформативних критеріїв, що характеризують технічний стан електричної машини. З метою збільшення швидкості роботи алгоритму та враховуючи значну кількість інформації, що має передаватися від блоку попередньої обробки до ШНМ, зазначені алгоритмічні операції доцільно виконувати у межах одного апаратного рівня [12].

У найпростішому випадку, при побудові системи діагностування одиначної електричної машини структура такої системи може мати вигляд, наведений на рис. 5.

Пристрій працює наступним чином.

n віброперетворювачів 11-1 n здійснюють перетворення рівня віброприскорення, у n ключових вузлах агрегату, в рівень постійної напруги, значення якої підсилюється до значення, придатного для роботи системи у n масштабуючих підсилювачах 61-6 n . n смугових фільтрів 81-8 n відфільтровують вищі гармоніки вхідного сигналу, що не досліджуються в процесі віброконтролю, пропускаючи на вихід лише ті гармонічні складові, за якими проводиться контроль вібраційного стану електричної машини. Сигнал з виходів n смугових фільтрів 81-8 n надходять на входи n елементів аналогової пам'яті 91-9 n відповідно, де запам'ятовують у момент надходження з виходу формувача 7 одиничного сигналу, що відповідає повороту ротора електричної машини на визначений кут α . Цей же сигнал логічної одиниці з виходу формувача 7 поступає на перший вхід першого порту мікроконтролера 13 та служить сигналом початку операції вимірювального перетворення віброприскорення. Після цього на другому виході першого порту мікроконтролера 13 формується адресний сигнал, що відповідає першому інформаційному входу аналогового мультиплектора 11, що призводить до встановлення сигналу з його першого входу на його виході. Тоді на першому виході першого порту мікроконтролера 13 формується сигнал запуску аналого-

цифрового перетворення, що поступає на другий вхід цифро-аналогового перетворювача 12, на перший вхід якого поступає сигнал з виходу аналогового мультиплексора 11, результат цифро-аналогового перетворення зчитується з виходу цифро-аналогового перетворювача 12 через перший вхід другого порту мікроконтролера 13 при приході на вхід другого порту мікроконтролера 13 сигналу закінчення вимірального перетворення. Після цього на другому виході першого порту мікроконтролера 13

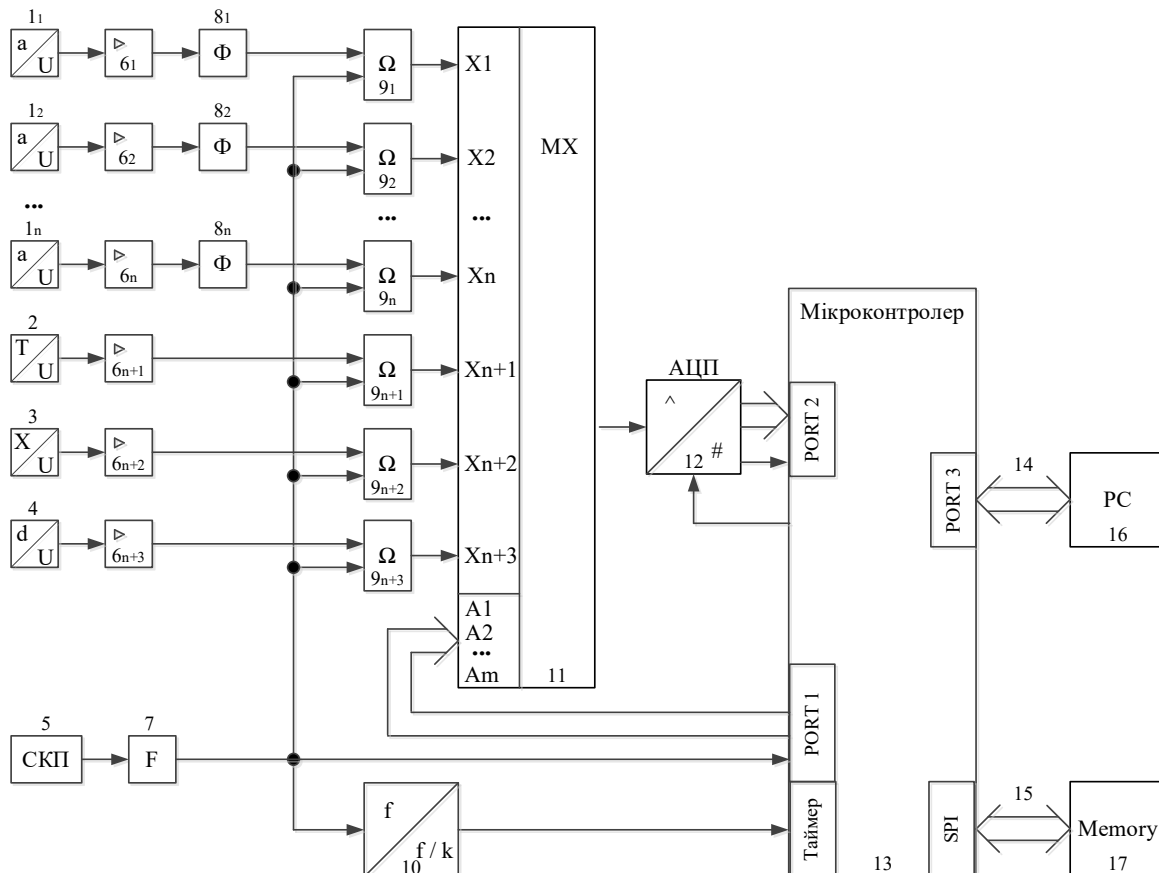


Рис. 5. Структурна схема однієї з найпростіших систем діагування обертової електричної машини

формується адреса наступного інформаційного входу аналогового мультиплексора 11. Решта операцій повторюється циклічно, доки не буде отримано цифрове значення сигналу на усіх входах аналогового мультиплексора 11, що відповідають рівням віброприскорення у всіх ключових точках агрегату, значенню температури поточної полюсної обмотки, поточному значенню осьового зміщення ротора та величини повітряного зазору між ротором та статором. Після завершення цих операцій вимірвальна система переходить у режим очікування наступного одиничного імпульсу з виходу формувача 7, а після його отримання операції повторюються циклічно.

На виході сенсора кутового положення 5 формується сигнал при повороті ротора електричної машини на заданий кут α , який поступає на вхід формувача 7. У формувачі 7 цей сигнал перетворюється у сигнал логічної одиниці та поступає, окрім других входів елементів аналогової пам'яті $81-8n+3$ та першого входу першого порту мікроконтролера 13, на вхід подільника частоти 10, на виході якого, при надходженні на його вхід k -го імпульсу, що відповідає коефіцієнту ділення частоти, формується сигнал логічної одиниці, який поступає на вхід таймера мікроконтролера 13, де служить сигналом запису поточного числа, відрахованого таймером мікроконтролера 13. При повороті ротора електричної машини на кут 360 градусів (повний оберт) на виході сенсора кутового положення 5 формується сигнал подовженої тривалості що у формувачі перетворюється на подовжений сигнал логічної одиниці, який слугує для мікроконтролера 13 маркером початку нового обороту ротора, що використовується для перевірки правильності роботи подільника частоти 10.

На виході безконтактний датчик температури 2 формується сигнал постійної напруги, що пропорційний температурі поточної полюсною обмотки ротора. Даний сигнал з виходу безконтактного датчика температури 2 надходить на вхід $n+1$ -го масштабуючого підсилювача 6, де підсилюється до рівня, придатного для подальшої цифрової обробки. З виходу $n+1$ -го масштабуючого підсилювача 6 підсилений сигнал надходить на перший вхід $n+1$ -го елементу аналогової пам'яті 9, де запам'ятовується при надходженні на його другий вхід керуючого сигналу з виходу формувача 7.

На виході безконтактний датчик осьового зміщення ротора 3 формується сигнал постійної напруги, що пропорційний поточному осьовому зміщенню ротора. Даний сигнал з виходу безконтактний датчик осьового зміщення ротора 3 надходить на вхід $n+2$ -го масштабуючого підсилювача 6, де підсилюється до рівня, придатного для подальшої цифрової обробки. З виходу $n+2$ -го масштабуючого підсилювача 6

підсилений сигнал надходить на перший вхід $n+2$ -го елемента аналогової пам'яті 9, де запам'ятовується при надходженні на його другий вхід керуючого сигналу з виходу формувача 7.

На виході безконтактного датчика повітряного зазору між ротором та статором 4 формується сигнал постійної напруги, що пропорційний поточному осьовому зміщенню ротора. Даний сигнал з виходу датчика повітряного зазору між ротором та статором 4 надходить на вхід $n+3$ -го масштабуючого підсилювача 6, де підсилюється до рівня, придатного для подальшої цифрової обробки. З виходу $n+3$ -го масштабуючого підсилювача 6 підсилений сигнал надходить на перший вхід $n+3$ -го елемента аналогової пам'яті 9, де запам'ятовується при надходженні на його другий вхід керуючого сигналу з виходу формувача 7.

Виміряні значення віброприскорення у всіх ключових точках електричної машини, температури поточної полюсної обмотки ротора, поточного осьового зміщення ротора, повітряного зазору між ротором та статором, а також числовий код, відрахований таймером за час повороту ротора електричної машини на кут α передається через перший 14 та другий 16 пристрій перетворення інтерфейсу та лінію зв'язку на сервер 17. Додатково на сервер 17 поступає вимірювальна інформація від штатних сенсорів струму на напору. На сервері 17 здійснюється попередня обробка первинної вимірювальної інформації, прийняття рішення про наявність/відсутність дефектів, а також індикація результатів операцій контролю та діагностування.

Зовнішня пам'ять 15 застосовується для проміжного зберігання отриманих числових значень, пропорційних виміряним величинам, та, при потребі, програмного коду роботи мікроконтролера 13.

Робота підсистеми діагностування.

У нейроподібній мережі 19 на основі сигналів на її входах приймається рішення про імовірність наявності дефекту у кожному із вузлів m електричної машини. Інформація про отриманий нейроподібною мережею 19 висновок через її вихід подається на пристрій візуалізації 20, де відбувається її виведення у зручній для оператора формі.

При потребі наведена на рис. 5 система може бути доповненою додатковими вимірювальними каналами, що підключатимуться блочно а існуючі вимірювальні канали можуть бути замінені. У випадку застосування мікроконтролерів (числових перетворювачів) не достатньої обчислювальної потужності, як уже зазначалося, доцільним є використання декількох числових перетворювачів першого апаратного рівня обробки на один гідроагрегат.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Обґрунтовано доцільність вибору типу вхідної інформації систем діагностування на основі методу еволюційного пошуку. Показано, що зазначений метод дозволяє більш повною мірою охопити простір пошуку, ніж, наприклад, градієнтні методи оптимізації, та отримати розв'язок, близький до оптимального, за відносно короткий час (малу кількість ітерацій).
2. Запропоновано концепцію та типову структурну схему системи діагностування обертових електричних машин на основі модифікованої нестандартної ШНМ та структуру самої ШНМ, що враховує при діагностуванні поточний режим роботи електричної машини та характеризується високою адаптивністю до об'єкта діагностування. Наведено приклад її апаратної реалізації.

Література

1. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів: навчальний посібник / О.П. Чорний [та ін.] – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2019 – 122 с.
2. Особливості побудови системи моніторингу технічного стану та діагностування гідроагрегатів: монографія / В.В. Кухарчук [та ін.] – Вінниця: ВНТУ, 2019 – 91 с.
3. Системний аналіз інформаційних процесів: навчальний посібник / В.М. Варенко – Київ: Університет «Україна», 2013 – 203 с.
4. Прокопенко Т.О. Теорія систем і системний аналіз: навчальний посібник / Т.О. Прокопенко – Черкаси: ЧДТУ, 2019 – 139 с.
5. Моніторинг, діагностування, та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів: монографія / В. В. Кухарчук [та ін.] – Вінниця: ВНТУ, 2014 – 168 с.
6. Дискретні вейвлет-перетворення в діагностуванні гідроагрегатів: монографія / В.В. Кухарчук [та ін.] – Вінниця: ВНТУ, 2019 – 118 с.
7. Kuksova V.I. Approaches to increasing the efficiency of systems of technical diagnostics / V. I. Kuksova // Procedia Structural Integrity – 2019 – № 20 – P. 98-102. DOI: 10.1016/j.prostr.2019. 12.122
8. Howard W.P. Electrical Motor Diagnostics. 2nd Edition / W.P. Howard – USA: Success by Design, 2014 – 432 p.
9. Счастливый Г.Г. Фізичні процеси в роторах енергетичних і електричних машин і способи підвищення їхньої надійності / Г.Г. Счастливый, О.І. Титко, В.Л. Ахременко, Ю.М. Васильовський // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Збірник наукових праць – 2010 – Вип 26 – С. 105-113.
10. Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана / С. Арсеньев [и др.] – Москва: Регулярная и хаотическая динамика, 2016 – 308 с.

11. Rao S.S. *Vibration of continuous systems* / S.S. Rao – New York, USA: Jon Wiley & Sons, 2007 – 720 p.
12. Граняк В.Ф. Система автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / В.Ф. Граняк // *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: матеріали IV Міжнародної конференції, 29-31 жовтня 2019 р.* / М-во освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2019 – С. 92-93.

References

1. Monitorynh i diahnostryka elektromekhanichnykh ob'ektiv: navchalnyi posibnyk / O.P. Chorny [et al.] – Kremenchuh: ChP Shcherbatiykh A.V., 2019 – 122 p.
2. Osoblyvosti pobudovy systemy monitorynhu tekhnichnoho stanu ta diahnostuvannya hidroahrehativ: monohrafiia / V.V. Kukharchuk [et al.] – Vinnytsia: VNTU, 2019 – 91 p.
3. Systemnyi analiz informatsiinykh protsesiv: navchalnyi posibnyk / V.M. Varenko – Kyiv: Universytet «Ukraina», 2013 – 203 p.
4. Prokopenko T.O. Teoriia system i systemnyi analiz: navchalnyi posibnyk / T.O. Prokopenko – Cherkasy: ChDTU, 2019 – 139 p.
5. Monitorynh, diahnostuvannya, ta prohnozuvannya vibratsiinoho stanu hidroahrehativ: monohrafiia / V. V. Kukharchuk [et al.] – Vinnytsia: VNTU, 2014 – 168 p.
6. Dyskretni veivlet-peretvorennia v diahnostuvanni hidroahrehativ: monohrafiia / V.V. Kukharchuk [et al.] – Vinnytsia: VNTU, 2019 – 118 p.
7. Kuksova V.I. Approaches to increasing the efficiency of systems of technical diagnostics / V. I. Kuksova // *Procedia Structural Integrity* – 2019 – № 20 – P. 98-102. DOI: 10.1016/j.prostr.2019. 12.122
8. Howard W.P. *Electrical Motor Diagnostics. 2nd Edition* / W.P. Howard – USA: Success by Design, 2014 – 432 p.
9. Schastlivyi H.H. Fizychni protsesy v rotorakh enerhetychnykh i elektrychnykh mashyn i sposoby pidvyshchennia yikhnoi nadiinosti / H.H. Schastlivyi, O.I. Tytko, V.L. Akhremenko, Yu.M. Vaskovskiy // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy: Zbirnyk naukovykh prats* – 2010 – Vol 26 – P. 105-113.
10. Teoriya mezomasshtabnoj turbulentsii. Vihri atmosfery i okeana / S. Arsenev [et al.] – Moscow: Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika, 2016 – 308 p.
11. Rao S.S. *Vibration of continuous systems* / S.S. Rao – New York, USA: Jon Wiley & Sons, 2007 – 720 p.
12. Hraniak V.F. Systema avtomatyzovanoho diahnostuvannya i prohnozuvannya rozvytku defektiv hidroahrehativ / V.F. Hraniak // *Measurement and control in technical systems: presiding IV International conference, 29-31 october 2019 y.* / Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2019 – P. 92-93.

Рецензія/Peer review : 05.07.2022 р.

Надрукована/Printed :02.08.2022 р.