УДК 621.313.333.2 **DOI 10.33042/2522-1809-2021-6-166-39-43**

М.С. Сорокін, В.В. Гузенко

Державний біотехнологічний університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

У статті проведено аналіз методу визначення ресурсу асинхронного двигуна за рахунок застосування нечіткої логіки, пояснена структура розробленої системи нечіткої логіки і результати експериментів по визначенню ресурсу асинхронного двигуна.

Ключові слова: *асинхронний двигун, моделювання, нечітка логіка, ізоляція, залишковий ресурс, діагностика.*

Постановка проблеми

Асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором розраховані на термін служби до 19 років без ремонту за умови їх правильної експлуатації [1, 2].

Під правильною експлуатацією АД приймається його робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в його паспортних даних.

На ізоляцію електричних машин впливає ряд несприятливих факторів: підвищений нагрів, що перевищує допустимі для даного класу ізоляції межі, підвищена вологість аж до безпосереднього впливу води і вологи, наявність хімічно агресивного середовища (аміак, органічні добрива і т д.), значні механічні дії (вібрації, ударні впливи), комутаційні впливи, значні коливання напруги в мережі, технологічні перевантаження, порушення охолодження, нестабільні кліматичні умови, наявність пилу, абразивних частинок в повітрі [3, 4].

Як показують дослідження крім несприятливих факторів експлуатації АД в агропромисловому комплексі необхідно відзначити повну і часткову відсутність діагностичної апаратури, ремонтної бази, недостатній рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу, порушення правил технічної експлуатації, а також відсутність планово-попереджувального ремонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показують дослідження, що інколи спостерігаються руйнування полімерної ізоляції, різко скорочується термін служби обладнання, знижується надійності експлуатації.

Вихід з ладу АД призводить до важких аварій і великого матеріального збитку, пов’язаного з простоєм технологічного обладнання, усуненням наслідків аварій і ремонтом що вийшов з ладу електродвигуна [1].

Отже, ефективний контроль показників якості АД в процесі виробництва і після їх виготовлення, вчасне їх діагностування в процесі експлуатації і засноване на цих результатах управління якістю виготовлення електродвигунів, є актуальними завданнями.

На підставі відомих даних про наявні на сьогоднішній день методи діагностики ізоляції АД можна зробити висновок про те, що не існує методу, за допомогою якого можна однозначно визначити залишковий ресурс електродвигуна [5].

Прилади, що використовуються для вимірювання різних параметрів електродвигуна, засновані на різних принципах дії і мають вихідні дані, представлені як в цифровій формі, з різною розмірністю, так і в нечітких термах (високий (в), низький (н), середній (с), нижче середнього (нс), вище середнього (нд)) [7].

Інтерпретація таких даних з метою оцінки залишкового ресурсу АД проблематична без використання понять нечіткої логіки.

Формулювання мети статті

Провести аналіз методу визначення ресурсу асинхронного двигуна за рахунок застосування нечіткої логіки, з поясненням структури розробленої системи нечіткої логіки і результатами експериментів по визначенню ресурсу асинхронного двигуна.

Виклад основного матеріалу

З огляду на вищесказане, авторами статі розроблений метод визначення остаточного ресурсу АД за допомогою нечіткої логіки в програмному середовищі MatLab Fuzzy Logic Toolbox.

При розробці згаданого методу виявилась необхідність вирішення наступних завдань:

- аналіз стану розробок і методів визначення

© Сорокін М.С., Гузенко В.В.

залишкового ресурсу АД;

- виявлення особливостей експлуатації АД в сільському господарстві та їх вплив на фізико-механічні властивості ізоляції;
- складання сукупності вимірюваних діагностичних параметрів, за якими можна судити про залишковий ресурс АД;
- обґрунтування вибору факторів які впливають;
- вибір приладів для вимірювання факторів, що впливають і їх одиниць виміру;
- визначення діапазонів вимірювань параметрів для оцінки залишкового ресурсу АД;
- розробка структури системи нечіткої логіки в програмному середовищі MatlabFuzzyLogicToolbox для визначення залишкового ресурсу АД;
- розробка m-файлу conc.m для управління fis-файлами і для роботи всієї системи нечіткої логіки в цілому;
- представлення та аналіз результатів модельних експериментів по визначенню залишкового ресурсу АД.

Ієрархічна структура системи нечіткої логіки для визначення залишкового ресурсу АД деревовидного типу представлена на рисунку 1.

У такій системі вхідний вектор діагностичних ознак:

$$x = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\} \quad (1)$$

де n – число ознак (факторів).

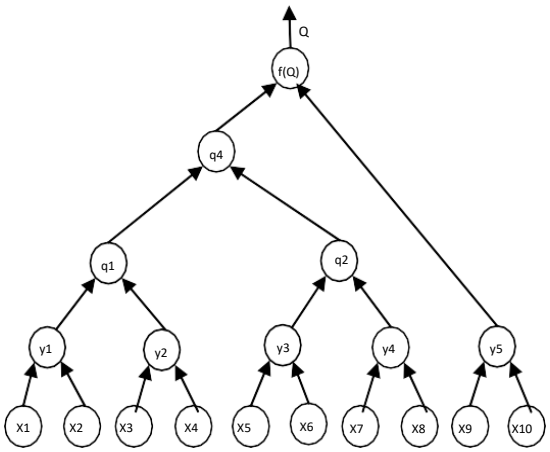

Рис. 1. Ієрархічна структурна схема нечіткого логічного виводу для остаточного ресурсу АД: x1 –x9 – вхідні діагностичні фактори системи, y, q– проміжні параметри, Q –вихід системи

У таблиці 1 більш детально описані впливові фактори до рисунку 1.

Таблиця 1

Сукупність впливових факторів до рисунку 1

Позначення фактора	Описання фактору
x1	Зміна величини струму холостого ходу АД
x2	Зміна величини повітряного зазору АД
x3	Зміна величини опору ізоляції двигуна
x4	Зміна коефіцієнту потужності АД
x5	Зміна величини опору обмоток АД при постійному струмі
x6	Зміна коефіцієнту абсорбції ізоляції обмотки статора
x7	Зміна коефіцієнта поляризації ізоляції обмотки статора
x8	Остаточний ресурс електродвигуна, який визначається способом акустичної діагностики ізоляції статора АД.
x9	Температура статора АД
x10	Оцінка стану підшипників
y1, y2, y3, y4,y5,q1,q2,q4	Укрупнені впливові фактори
Q	Корінь дерева – залишковий ресурс А

Розроблена система діагностики базується на понятті нечіткої множини Ã, на універсальній множині U = {u1, u2, ..., uk}, яке записується у вигляді [3]:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^{k} \mu_A(u_i)/u_i \quad (2)$$

У зв'язку з тим, що діагностичні ознаки носять випадковий характер, в системі використовуються модифіковані функції, засновані на Гаусовій функції залежності [8]:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right) \quad (3)$$

де: u – абсциса, b – координата максимуму, c – коефіцієнт концентрації.

Наприклад, функція ознаки для коефіцієнта поляризації ізоляції показані на рисунку 3.

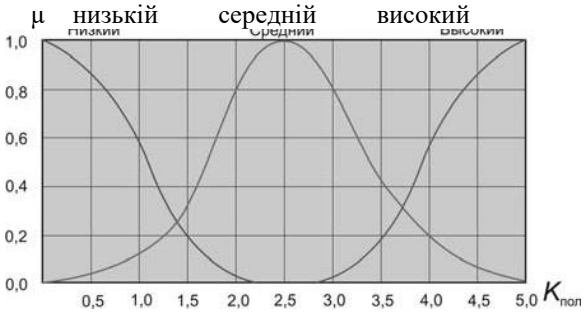

Рис. 2. Функції належності для коефіцієнту поляризації: $K_{пол}$ – коефіцієнт поляризації, μ – степінь (функція) належності

У загальному вигляді правила логічного висновку (база правил, рисунок 2) виглядають так:

R_1: *ЯКЩО* x_1 *Є* $\mu(u)_{11}$ … *ТА* …x_n *Є* $\mu(u)_{1n}$,*ТО* y *Є* B_1

...

R_2: *ЯКЩО* x_1 *Є* $\mu(u)_{21}$ … *ТА* … x_n *Є* $\mu(u)_{2n}$, *ТО* y *Є* B_2

R_m: *ЯКЩО* x_1 *Є* $\mu(u)_{m1}$ … *ТА* … x_n *Є* $\mu(u)_{mn}$, *ТО* y *Є* B_m,

де x_k, k=1..n – вхідні змінні; y, B_i, i=1…m– вихідні змінні;$\mu(u)_{ik}$– задані нечіткі множини з функціями належності [4].

Дефаззіфікація проводилась по методу центра тяжіння:

$$\frac{\sum_{i=1}^{k} u_i \mu_A(u_i)}{\sum_{i=1}^{k} \mu_A(u_i)} \qquad (4)$$

Нечітка модель складається з керуючого m-файлу (conc.m) та 9-ти систем нечіткого висновку: q_y1.fis, q_y2.fis, q_y3.fis, q_y4.fis, q_y5.fis, q_q1.fis, q_q2.fis, q_q4.fis, Q.fis.

Кожна система нечіткого висновку має по 2 вхідних фактора, які впливають на остаточний ресурс АД [9,10].

Так як значення вхідних факторів змінюються в різних межах, то необхідно використовувати додатковий m-файл – нормалізатор.

Нормалізатор представляє собою програму, лістинг, який представлений на рисунку 3.

Пуск змісту файлу у командній строчці Matlab показує результат роботи системи нечікої логіки при мінімальних, максимальних і середніх значеннях контролюючих параметрів.

У каталозі представлені системи нечіткого виводу з розширенням .fis та m-файли. Наприклад, система нечіткого висновку q_y1.fis має 2 вхідних фактора: x_1 – величину струму холостого ходу АД та x_2 – вимір величини повітряного зазору АД.

Основним з М-файлів є файл conc.m, який керує роботою всієї СІС-теми (здійснює ієрархічний висновок по логічному дереву).

У зв'язку з тим, що вихідна інформація розподілена, як правило, за випадковим законом, для лінгвістичної оцінки кожного чинника нами використано 5 термів модифікації стандартної функції розподілу gaussmf – qgaussmf, яка дозволяє використовувати як чіткі, так і нечіткі вхідні величини.

Для цього в каталозі створюваної системи нечіткої логіки повинні бути присутніми файли qgaussmf, evalfis_vv і qual_inp_gauss.

Для запуску змодельованої системи нечіткої логіки в режимі максимальних значень факторів в командному рядку Matlab вводять наступні дані (перше значення в ньому вибрано низьким – 'н' – з урахуванням того, що величина струму холостого ходу АД повинна приймати інверсне значення для досягнення максимуму значення Q-кореня логічного дерева-залишкового ресурсу АД).

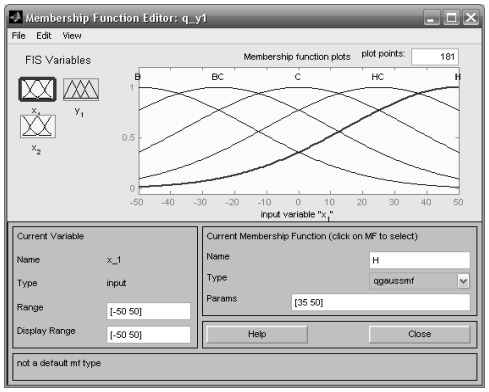

Рис. 3. Нечітка база знань типу Mamdani (для q_y1)

Введення рядка завершують командою «Enter». При цьому в командному вікні Matlab отримують значення всіх укрупнених впливаючих факторів y1, y2, y3, y4, y5, q1, q2, q4 і максимальний результат обчислення залишкового ресурсу Q (в роках) АД за допомогою системи нечіткої логіки, так як всім іншим вхідним факторам присвоєно нечіткий терм "високе". За показниками надійності згідно ГОСТ 183-74 середній термін служби АД складає 20 000–50 000 год в залежності від типу двигуна, умов експлуатації та технічного обслуговування, з ймовірністю безвідмовної роботи не менше 0,9 за 10000 год.

Значення Q=20 років отримано при обліку того, що розглянутий асинхронний електродвигун щодня працював не більше 7 годин на добу при нормальних умовах експлуатації.

Аналогічним чином отримують значення Q для режиму мінімальних, середніх і довільних значень вхідних факторів. Значення Q для режиму максимальних, мінімальних і середніх значень вхідних факторів використовуються для калібрування системи нечіткої логіки, а значення Q для режиму довільних значень вхідних факторів – для визначення залишкового ресурсу асинхронного електродвигуна (в роках).

Таблиця 2

Діапазони вимірювань вхідних факторів для оцінки залишкового ресурсу АД

Фактори, які визначають залишковий ресурс АД	Діапазони вимірів вхідних параметрів
Температура обмотки статора АД	від 60 ºС до 180 ºС
Вимірювання величини повітряного зазору між статором та ротором АД	Значення повітряного зазору: низьке, середнє, високе
Вимірювання величини опору ізоляції двигуна	від 1кОм до 0,38 МОм
Вимірювання коефіцієнту потужності АД	Значення cosφ: низьке, середнє, високе
Вимірювання величини опору обмоток АД при постійному струму	від 1 кОм до 5 кОм
Залишковий ресурс електродвигуна, визначений методом акустичної діагностики ізоляції статора АД	Значення залишкового ресурсу: низький, средній, високий
Вимірювання величини струму холостого ходу АД	від 1А до 475 А
Оцінка стану підшипників качіння	Стан підшипників: погане,среднє, задовільне
Якість ізоляції по показнику коефіцієнта поляризації	Ізоляція: погана, гарна та найякісна
Якість ізоляції по показнику коефіцієнта абсорбції	Ізоляція: погана, гарна та найякісна

Для того щоб система нечіткої логіки працювала правильно і достовірно оцінювала впливаючих факторів, необхідно знати в яких діапазонах (таблиця 2) змінюються вхідні фактори для оцінки залишкового ресурсу АД

Висновки

За отриманим значенням залишкового ресурсу за допомогою пакету FuzzyLogic програми Matlab можна зробити висновок про те, що залишковий термін служби становить близько 11 років (при обліку того, що даний АД працював не більше 7 годин на добу і в нормальних умовах експлуатації). Отримане значення залишкового ресурсу за допомогою пакету FuzzyLogic програми Matlab при найгірших (за умовами експлуатації) значеннях контрольованих факторів склало 0 років. При середніх значеннях контрольованих факторів воно склало 10 років. При найкращих (за умовами експлуатації) значеннях контрольованих факторів воно склало 20 років.

Література

1. *Беспалов В.Я. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода. – М. : МЭИ (ТУ), 2005.*
2. *Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения: материалы лекций / О.Д. Гольдберг. – М. : Знание, 1976. – 57 с.*
3. *Агеев П.Е. Эксплуатация технического оборудования ферм и комплексов / П.Е. Агеев, В.И. Квашенников и др.; под ред. С.В. Мельникова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1986. – 81–110.*
4. *Петрушин В.С. Регулировочные характеристики асинхронного электродвигателя в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянство потокосцеплений // Електротехніка і електромеханіка, – 2002. – №2. – С. 53–55.*
5. *Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С.Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.*
6. *Індерович С.Р. Частотний спосіб регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна // Проблеми механізації та електрифікації АПК : матер. II Всеукр. наук.-техн. Інтернет-конф. студентів та магістрантів за підсумками наук. досліджень 2014 року. – Мелітополь : ТДАТУ, 2015. – Вип. II. – С. 95–97.*
7. *Колесник В.Е. Огляд та оцінка умов експлуатації асинхронних двигунів в АПК // Проблеми механізації та електрифікації АПК : матер. II Всеукр. наук.-техн. Інтернет-конф. студентів та магістрантів за підсумками наук. досліджень 2014 року. – Мелітополь : ТДАТУ, 2015. – Вип. II. – С. 216–217.*
8. *Гузенко В.В. Забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами // Проблеми механізації та електрифікації АПК : матер. III Всеукр. наук.-техн. Інтернет-конф. студентів та магістрантів за підсумками наукових досліджень 2015 року. – Мелітополь : ТДАТУ, 2016. – Вип.III. – С. 249–251.*
9. *Гузенко В.В. Аналіз пристроїв для переробки кормосумішей грубих кормів та оцінка їх використання в однофазній мережі при векторно-алгоритмічній комутації // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – 2014. – Вип. 153: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – С. 142–143.*
10. *Молотков О.О. Огляд та оцінка умов експлуатації асинхронних двигунів в АПК // Проблеми механізації та електрифікації АПК : матер. II Всеукр. наук.-техн.*

Інтернет-конф. студентів та магістрантів за підсумками наук. досліджень 2014 року. – Мелітополь : ТДАТУ, 2015. – Вип. II. – С. 200–203.

References

1. Bespalov, V.Ya. (2005). Prospects for the creation of domestic electric motors of a new generation for a frequency-controlled electric drive. Moscow, Nedra, 198.
2. Goldberg, O.D. (1976). Reliability of electric machines for general industrial and household purposes: materials of lectures. Moscow, Znanie, 57.
3. Ageev, P.E., Kvashennikov, V.I. (1986). The Operation of technical equipment of farms and complexes. Moscow, Science and Technics, 81–110.
4. Petrushin, V.S. (2002). Adjusting characteristics of the asynchronous electric motor in the frequency electric drive with control laws ensuring the constancy of the flow couplings. Electrical engineering and electrical engineering, 2, 53–55.
5. Shtuba, S.D. (2007). Design of fuzzy systems of Mediummatlab. Moskow, Hotline-Telecom, 288.
6. Inderovich, S.R. (2015). Frequency method for controlling the speed of the asynchronous engine. Proceedings of the II All-Ukrainian scientific and technical Internet conference of students and undergraduates on the basis of scientific researches of 2014 Problems of mechanization and electrification of agroindustrial complex, Melitopol, 95–97.
7. Kolesnik, V.E. (2015). Review and evaluation of operating conditions of asynchronous motors in the APC. Proceedings of the II All-Ukrainian scientific and technical Internet conference of students and undergraduate students on the results of scientific researches of 2014 Problems of mechanization and electrification of agroindustrial complex. Melitopol, 216–217.
8. Guzenko, V.V. (2015). Provision of functional diagnostics of energy efficiency of electromechanical systems with asynchronous motors. Proceedings of the III All-Ukrainian scientific and technical Internet conference of students and undergraduate students on the basis of scientific researches of 2015 Problems of mechanization and electrification of agroindustrial complex. Melitopol, 249–251.
9. Guzenko, V.V. (2014). Analysis of devices for the processing of fodder corn fats and evaluation of their use in a single-phase network under vector-algorithmic switching. Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture. Problems of energy supply and energy saving in the agro industrial complex of Ukraine, 153, 142–143.
10. Molotkov, O.O. (2015). Review and evaluation of operating conditions of asynchronous motors in the APC. Proceedings of the Ukrainian scientific and technical Internet conference of students and undergraduate students on the results of scientific researches of 2014 Problems of mechanization and electrification of agroindustrial complex. Melitopol, 200–203.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.П. Кунденко, Державний біотехнологічний університет, Україна.

Автор: СОРОКІН Максим Сергійович
канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем (АЕМС)
Державний біотехнологічний університет
E-mail – sorokin.ekt@btu.kharkov.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7524-7687

Автор: ГУЗЕНКО Віталій Вікторович
канд. техн. наук, асистент каф. автоматизованих електромеханічних систем (АЕМС)
Державний біотехнологічний університет
E-mail – hnaghv@btu.kharkov.ua
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8171-9487

APPLICATION OF A FUZZY LOGIC SYSTEM TO DETERMINE THE RESOURCE OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

M. Sorokin, V. Huzenko
State Biotechnological University, Ukraine

The article analyzes the method for determining the resource of an asynchronous motor through the use of fuzzy logic, explains the structure of the developed Fuzzy Logic System and the results of experiments on determining the resource of an asynchronous motor. The problems that are necessary to solve unambiguously determine the remaining resource of an asynchronous motor are formulated. In this paper, the developed fuzzy logic system will allow us to reasonably determine the residual life of an asynchronous motor based on the results of measuring the no-load current, air gap, insulation resistance, power factor, winding resistance at direct current, stator winding insulation absorption coefficient, stator winding insulation polarization coefficient, insulation modulus, stator temperature and bearing condition assessment. The results obtained during their implementation will help prevent failure of the asynchronous motor and reduce material damage associated with downtime of technological equipment, elimination of the consequences of accidents and repair of the failed electric motor itself. A method for determining the remaining resource of an asynchronous motor is developed using a fuzzy logic system in the Matlab software environment and the FuzzyLogic package. A fuzzy logic system is developed for determining the remaining resource of an asynchronous motor. A detailed study of the results of computer modeling is carried out , which indicate that the fuzzy logic system for determining the remaining resource of an asynchronous motor functions properly and is ready for operation. A fuzzy logic system normalizer is developed for determining the remaining resource of an asynchronous motor. The launch of the file content in the Matlab command line is analyzed in detail, which showed the result of the entire system of non-clear logic at minimum, maximum and average values of control parameters.

Keywords: *asynchronous motor, modeling, fuzzy logic, isolation, residual resource, diagnostics.*