



УДК 621.313.333.004.58

ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОСЕРДЯ ТА МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Вовк О.Ю., к.т.н.,
Квітка С.О., к.т.н.,
Квітка О.С.

*Таврійський державний агротехнологічний університет
Філія м. Миколаєва Центрального округу ПАТ «Миколаївобленерго»
Тел. (0619) 42-32-63*

Анотація – Робота присвячена обґрунтуванню способу проведення дослідів холостого ходу асинхронного електродвигуна в експлуатації та методиці опрацювання отриманих у ньому результатів з метою визначення функціонального стану осердя та механічної системи асинхронних електродвигунів при періодичному контролі.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, експлуатаційний контроль, функціональний стан, дослід холостого ходу, втрати потужності, осердя, механічна система.

Постановка проблеми. Сучасний електропривод, що реалізує процеси електромеханічного перетворення енергії, в основному базується на використанні у якості приводних пристроїв асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором і є конструктивно не складним [1]. При експлуатації вказаних електродвигунів виникають відхилення його параметрів від номінальних значень, які викликані технологічними похибками виготовлення електродвигунів, неправильними режимами експлуатації або роботи, зношенням під час експлуатації [2]. Тому експлуатація даного класу двигунів в даний час пов'язана з багатьма проблемами. Одна з яких – це їх невисока експлуатаційна надійність внаслідок щорічного виходу з ладу та ремонту близько 30 % зазначених електродвигунів, час напрацювання на відмову становить 0,5 ... 1,5 роки [3].

У процесі експлуатації асинхронних електродвигунів, встановлених у господарствах агропромислового комплексу, відмови відбуваються головним чином за такими причинами: ушкодження обмотки статора (приблизно 80 % відмов); ушкодження підшипників (приблизно 15 % відмов); ушкодження інших елементів (приблизно 5 %) [4].



У той же час асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що відмовили внаслідок ушкоджень обмотки статора, мають ослаблення перетину стрижнів обмотки ротора (близько 27 %); повітряний зазор, що перевищує своє номінальне значення (близько 68 % двигунів); зношені підшипники (близько 69 % двигунів) і т.д. [5, 6]. На підставі цих даних можна зробити висновок, що ушкодження обмотки статора спричиняють не тільки несправності в самій обмотці, але й несправності в інших елементах конструкції електродвигуна, а саме – у механічній системі та осерді.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі методи послідовного тестового функціонального аналізу засновано на послідовному визначенні показників роботоздатності основних вузлів асинхронного електродвигуна (обмоток статора і ротора, магнітопроводу і підшипників). По відхиленню поточних значень обраних показників від припустимих значень визначають несправний вузол електродвигуна. Найчастіше контроль починають з обмотки статора, як вузла двигуна, що найбільш пошкоджується, і закінчують магнітопроводом. Тому перед тим, як визначити несправність у осерді електродвигуна, необхідно виконати значну кількість операцій щодо контролю інших вузлів асинхронного електродвигуна, а це призводить до нераціонального використання обладнання і часу, який відведено для діагностування електродвигуна. Крім цього, для діагностування можуть застосовуватись різноманітні методи вібродіагностики або спектрального аналізу, головним недоліком яких є вартість їхньої технічної реалізації [7, 8].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Згідно [9] більшість несправностей окремих вузлів електродвигуна супроводжуються підвищенням виділенням тепла в несправному вузлі в порівнянні з номінальним станом: виткові або міжфазні замикання в обмотці статора призводять до збільшення її нагрівання; руйнування міжлистової ізоляції осердя статора призводить до його підвищеного нагрівання; обрив стрижня обмотки ротора призводить до зростання її нагрівання; руйнування сепаратора, кульок або роликів у підшипниках кочення призводить до збільшення сили тертя й, як наслідок, до зростання нагрівання підшипників і т.д. Таким чином, погіршення функціонального стану осердя та механічної системи асинхронного електродвигуна проявляється у вигляді збільшення втрат активної потужності відповідно у магнітопроводі та у механічній системі.

Для контролю зазначених втрат потужності пропонується застосовувати дослід холостого ходу. Але проведення вказаного дослідження в експлуатаційних умовах занадто складне через те, що потребує наявності регулятора напруги. Тому в роботі поставлене завдання обґрунтувати спосіб проведення дослідження холостого ходу в експлуатаційних

умовах та параметри періодичного контролю функціонального стану осердя та механічної системи асинхронного електродвигуна.

Основна частина. Розглянемо спосіб проведення досліду холостого ходу, у якому в якості регулятора напруги використовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, що має регульоване навантаження на валу (наприклад, електродвигун приводу відцентрового вентилятора).

Проаналізуємо електричне коло, що складається з двох послідовно з'єднаних електродвигунів, один з яких працює без навантаження, а інший – з регульованим навантаженням на валу. Розглянемо одну фазу кола, замінивши фази електродвигунів Г-подібними схемами заміщення (рис.1).

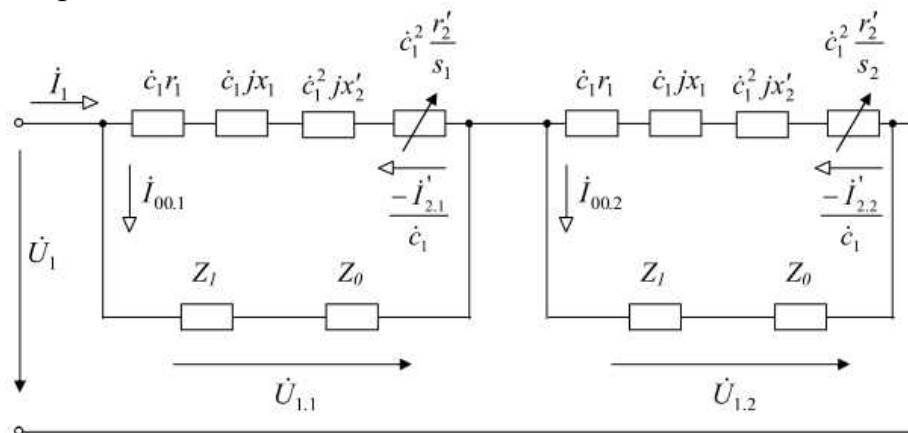


Рис. 1. Г-подібна схема заміщення однієї фази кола, що складається з двох послідовно з'єднаних асинхронних електродвигунів

Прийmemo наступні припущення: електродвигуни однакові, параметри схеми заміщення постійні. В якості регулятора напруги застосовано перший електродвигун (індекс «1»), а другий електродвигун (індекс «2») – такий, що діагностується.

Напруга на затискачах кола (рис.1) дорівнює

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1.1} + \dot{U}_{1.2} = \dot{I}_1 Z_{1.1} + \dot{I}_1 Z_{1.2}, \quad (1)$$

де \dot{U}_1 – напруга на затискачах кола, В;

$\dot{U}_{1.1}$ – напруга на затискачах електродвигуна, що застосовано у якості регулятора напруги, В;

$\dot{U}_{1.2}$ – напруга на затискачах електродвигуна, що діагностується, В;

\dot{I}_1 – сила струму в колі, А;

$Z_{1.1}$ – повний опір електродвигуна, що застосовано у якості регулятора напруги, Ом;



$Z_{1,2}$ – повний опір електродвигуна, що діагностується, Ом.

Сила струму в колі дорівнює

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1,1} + Z_{1,2}}. \quad (2)$$

Напруга на затискачах асинхронного електродвигуна, що діагностується, дорівнює

$$\dot{U}_{1,2} = I_1 \cdot Z_{1,2} = \frac{\dot{U}_1 \cdot Z_{1,2}}{Z_{1,1} + Z_{1,2}} = \frac{\dot{U}_1}{\frac{Z_{1,1}}{Z_{1,2}} + 1}. \quad (3)$$

Повні опори асинхронних електродвигунів дорівнюють:

$$Z_{1,1} = \frac{\left(\dot{c}_1 r_1 + \dot{c}_1 j x_1 + \dot{c}_1^2 j x_2 + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_1} \right) \cdot (Z_1 + Z_0)}{\dot{c}_1 r_1 + \dot{c}_1 j x_1 + \dot{c}_1^2 j x_2 + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_1} + Z_1 + Z_0}; \quad (4)$$

$$Z_{1,2} = \frac{\left(\dot{c}_1 r_1 + \dot{c}_1 j x_1 + \dot{c}_1^2 j x_2 + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_2} \right) \cdot (Z_1 + Z_0)}{\dot{c}_1 r_1 + \dot{c}_1 j x_1 + \dot{c}_1^2 j x_2 + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_2} + Z_1 + Z_0}. \quad (5)$$

Уведемо наступні позначення:

$$Z'' = \dot{c}_1 r_1 + \dot{c}_1 j x_1 + \dot{c}_1^2 j x_2; \quad (6)$$

$$Z'_0 = Z_1 + Z_0. \quad (7)$$

В підсумку отримаємо:

$$Z_{1,1} = \frac{\left(Z'' + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_1} \right) \cdot Z'_0}{Z'' + \dot{c}_1^2 r_2' \frac{1}{s_1} + Z'_0}; \quad (8)$$



$$Z_{1.2} = \frac{\left(Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_2} \right) \cdot Z'_0}{Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_2} + Z'_0}. \quad (9)$$

Ковзання s_2 другого електродвигуна, який постійно працює на холостому ході, при зміні напруги практично не змінюється. Тому повний опір схеми заміщення фази другого електродвигуна можна вважати за будь-якої напруги величиною постійною, тобто

$$Z_{1.2} = \frac{\left(Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_2} \right) \cdot Z'_0}{Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_2} + Z'_0} = const. \quad (10)$$

Тоді сила струму в колі буде визначатись параметрами схеми заміщення і ковзанням s_1 першого електродвигуна, яке буде залежати від навантаження на його валу

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\frac{\left(Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_1} \right) \cdot Z'_0}{Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 \frac{1}{s_1} + Z'_0} + Z_{1.2}}. \quad (11)$$

Перетворимо (11) до вигляду

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\frac{(s_1 Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2) \cdot Z'_0}{s_1 Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2 + s_1 Z'_0} + Z_{1.2}}. \quad (12)$$

Аналіз рівняння (12) показує, що перша складова знаменника дробу, яка являє собою комплекс повного опору схеми заміщення фази першого електродвигуна, тобто

$$Z_{1.1} = \frac{Z'_0 \cdot (s_1 Z''_{II} + \dot{c}_1^2 r'_2)}{s_1 \cdot (Z''_{II} + Z'_0) + \dot{c}_1^2 r'_2}, \quad (13)$$

залежить від ковзання s_1 . При збільшенні ковзання комплекс повного опору зменшується, тому що знаменник у (13) при зростанні s_1 збільшується більше, ніж чисельник. Тому струм \dot{I}_1 зростає і збільшується напруга $\dot{U}_{1.2}$.



Таким чином, регулюючи ковзання s_1 першого асинхронного електродвигуна, можна змінювати напругу на затискачах другого електродвигуна, який працює на холостому ході, тобто проводити дослід холостого ходу цього двигуна.

Визначимо можливий діапазон регулювання напруги у досліді холостого ходу на затискачах електродвигуна, що діагностується. Для цього дослідимо рівняння (3). Перепишемо його у наступному виді

$$\dot{U}_{1.2} = \frac{\dot{U}_1}{1 + m \cdot e^{j\psi}}, \quad (14)$$

де m – відношення модулів комплексів повних опорів $Z_{1.1}$ і $Z_{1.2}$;

ψ – різниця між кутами зсуву фаз електродвигунів.

Для приблизної оцінки діапазону регулювання напруги приймемо, що $\psi = 0$. Якщо електродвигуни мають однакову потужність, то при зміні s_1 значення $m \leq 1$. Тоді отримуємо наступний діапазон регулювання напруги на затискачах асинхронного електродвигуна, що діагностується

$$0,5 \cdot \dot{U}_1 \leq \dot{U}_{1.2} < \dot{U}_1. \quad (15)$$

Значення напруги U_1 приймається рівним номінальному значенню. У випадку, якщо потужність електродвигуна, що діагностується, менша за потужність електродвигуна – регулятора напруги, то діапазон регулювання напруги буде звужений.

За результатами досліді холостого ходу при номінальній напрузі необхідно визначити втрати в магнітопроводі ($\Delta P_{мг.н}$) і механічні втрати ($\Delta P_{мх.н}$). Сума цих втрат дорівнює різниці між потужністю, споживаною електродвигуном у досліді холостого ходу, і втратами активної потужності у обмотці статора у цьому досліді.

Уведемо позначення

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{мг} + \Delta P_{мх}. \quad (16)$$

Розглянемо залежність $\Delta P_{const} = f(U_1^2)$. Вона являє собою пряму лінію [6], яка розташована на площині у правій верхній чверті прямокутної системи координат (рис.2). У цій системі координат по вісі абсцис відкладають U_1^2 , а по вісі ординат – ΔP_{const} .

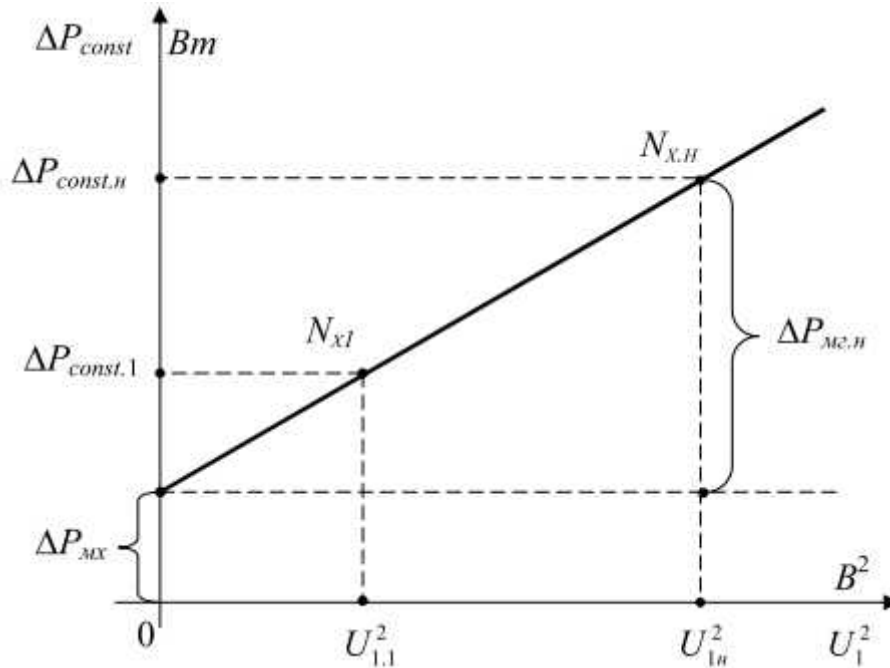


Рис. 2. Загальний вигляд залежності $\Delta P_{const} = f(U_1^2)$ для асинхронного електродвигуна

За результатами дослідження холостого ходу маємо координати точки $N_{x,H}$ ($U_{1H}^2; \Delta P_{const,H}$), які визначені при номінальній напрузі U_{1H} , і координати точки N_x ($U_{1,1}^2; \Delta P_{const,1}$), які визначені при зниженій напрузі $U_{1,1}$. Через ці точки проходить пряма $\Delta P_{const} = f(U_1^2)$, яка описується наступним рівнянням

$$\frac{U_1^2 - U_{1,1}^2}{U_{1H}^2 - U_{1,1}^2} = \frac{\Delta P_{const} - \Delta P_{const,1}}{\Delta P_{const,H} - \Delta P_{const,1}}, \quad (17)$$

де U_1^2 – поточне значення квадрата напруги на затискачах електродвигуна, B^2 ;
 ΔP_{const} – поточне значення суми страт в магнітопроводі та механічних втрат в електродвигуні, Bm .

Перетворимо (17) до вигляду

$$(\Delta P_{const,H} - \Delta P_{const,1}) \cdot U_1^2 + (U_{1,1}^2 - U_{1H}^2) \cdot \Delta P_{const} + U_{1H}^2 \cdot \Delta P_{const,1} - U_{1,1}^2 \cdot \Delta P_{const,H} = 0. \quad (18)$$

Для визначення $\Delta P_{mx,H}$ необхідно знайти координати точки перетину прямої (18) з віссю ординат, тобто з прямою, яка задана рівнянням $U_1^2 = 0$. Ця точка буде мати абсцису $U_1^2 = 0$, а ординату



$\Delta P_{const} = \Delta P_{mx.n}$. Тоді механічні втрати в електродвигуні будуть дорівнювати

$$\Delta P_{mx.n} = \frac{U_{1n}^2 \cdot \Delta P_{const.1} - U_{1.1}^2 \cdot \Delta P_{const.n}}{U_{1n}^2 - U_{1.1}^2}. \quad (19)$$

У свою чергу, втрати в магнітопроводі при номінальній напрузі будуть дорівнювати

$$\Delta P_{mg.n} = \Delta P_{const.n} - \Delta P_{mx.n}. \quad (20)$$

Для визначення функціонального стану магнітопроводу дослід холостого ходу необхідно проводити протягом експлуатації за одних і тих же умов запропонованим способом та порівнювати між собою втрати в магнітопроводі, значення яких отримано при базовому діагностуванні на початку експлуатації, з поточним значенням. У випадку їх збільшення магнітопровід буде мати неномінальний функціональний стан (тобто у ньому з'явилися певні несправності, які встановлюються при детальному діагностуванні). Аналогічним чином необхідно поступати і для визначення функціонального стану механічної частини.

Висновок. Таким чином, запропонований спосіб проведення дослідів холостого ходу за допомогою електродвигуна з регульованим навантаженням на валу та методика опрацювання отриманих у ньому результатів дозволяють здійснювати експлуатаційний контроль функціонального стану осердя і механічної системи асинхронного електродвигуна.

Список використаних джерел.

1. Кузнецов В.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / В.В. Кузнецов, А.В. Николенко // Восточноевропейский журнал передовых технологий – 2015. – №1/8(73). – С.37–42.
2. Сафин Н.Р. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3(57). С.34–39.
3. Закладной А.Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной // Энергетика та електрифікація. – 2004. – № 4. – С.63–67.
4. Зюзев А.М. Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме / А.М. Зюзев, В.П. Метельков //



Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т.326, № 4. – С.146–153.

5. *Русан В.И.* Диагностика электрооборудования / *В.И. Русан.* – Минск: БГАТУ, 2010. – 220 с.

6. *Таран В.П.* Диагностирование электрооборудования / *В.П. Таран.* – К.: Техніка, 1983. – 200с.

7. *Сидельников Л.Г.* Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / *Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев* // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С.127–137.

8. *Вахромеев О.С.* Современные методы диагностики электро-механических систем / *О.С. Вахромеев, Р.Т. Каримов, А.И. Надеев* // Вестник АГТУ. – 2006. – № 2(31). – С.51–55.

9. *Гемке Р.Г.* Неисправности электрических машин / Под ред. *Р.Б. Уманцева / Р.Г. Гемке.* – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336с.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНИКА И МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Вовк А.Ю., Квитка С.А., Квитка А.С.

Аннотация – работа посвящена обоснованию способа проведения исследования холостого хода асинхронного двигателя во время эксплуатации и методики обработки полученных результатов с целью определения функционального состояния сердечника и механической системы асинхронных электродвигателей при периодическом контроле.

OPERATIONAL CONTROL FUNCTIONAL STATUS AND MECHANICAL SYSTEMS CORE ASYNCHRONOUS MOTORS

O. Vovk, S. Kvitka, O. Kvitka

Summary

The activity is dedicated to substantiation method of experiment induction motor idling operation and methods of processing it received the results to determine the functional state of the core and the mechanical system of induction motors with periodic controls