

УДК 621.313.33

DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-115-125

ПЕРІОДИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

Вовк О. Ю., к.т.н.

ORCID: 0000-0003-0154-6972

Квітка С. О., к.т.н.

ORCID: 0000-0001-9234-9274

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: etem@tsatu.edu.ua

Постановка проблеми. Найбільш розповсюджене силове електрообладнання, яке застосовується для приводу різноманітних машин і механізмів – це асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. Кількість асинхронних електроприводів досягає 95 % від усіх електроприводів [1, 2]. Крім того, на них приходиться споживання близько половини електроенергії у промисловому і аграрному виробництві [3, 4]. Чимале застосування асинхронні двигуни отримали через високу конструкційну надійність. Проте в експлуатації на підприємствах України щорічно спостерігаються відмови близько 20 – 25 % встановлених електродвигунів (хоча при іспитах на надійність за цей час відмовляє 2 – 3 %) [5, 6]. Зазначене обумовлює незаплановані матеріальні витрати, які спричинені непередбаченими зупинками технологічних ліній та ремонтами асинхронних двигунів. Тому на сьогодні не існує остаточного розв'язання народногосподарської проблеми підвищення надійності в експлуатації асинхронних електродвигунів, яка виникла, в тому числі, й з причини недостатньої якості експлуатації цих електродвигунів на підприємствах, а саме – відсутності необхідної інформації щодо їх стану.

Аналіз останніх досліджень. Методи періодичного контролю функціонального стану асинхронних електродвигунів, що існують на сьогодні, можна класифікувати наступним чином. Методи першої групи спрямовані на контроль технічного стану виключно одного з вузлів електродвигуна (найчастіше – обмотки статора або підшипників). Методи другої групи передбачають контроль технічного стану електродвигуна за якимось узагальненим параметром (наприклад, силою струму, який споживає електродвигун, або ковзанням). Методи третьої групи передбачають проведення

послідовного функціонального аналізу технічного стану вузлів електродвигуна [7 – 9].

Аналіз зазначених методів показав такі недоліки щодо їх застосування: значну вартість технічної реалізації методів; частковий контроль технічного стану електродвигуна; значні витрати часу на діагностування через спрямування тільки на пошук пошкоджених вузлів.

Формулювання цілей статті. Отже, складовою частиною розв'язання вказаної народногосподарської проблеми є покращення якості експлуатації асинхронних електродвигунів шляхом вчасного раціонального контролю, що дасть змогу керувати станом цих двигунів і обумовить збільшення імовірності їх безвідмовної роботи протягом регламентованого строку служби при експлуатації. Тому розробка методу періодичного контролю функціонального стану асинхронних електродвигунів, який забезпечить ґрунтовну оцінку їх поточного стану, а також полегшить технічну реалізацію діагностування в порівнянні з наявною, є актуальним завданням.

Основна частина. Розглянемо асинхронний електродвигун як електромеханічний перетворювач енергії. При перетворенні електричної енергії у механічну в елементах його конструкції відбуваються втрати активної потужності, які обумовлені різними фізичними явищами. Причому кожен вид втрат локалізований в певних ділянках об'єму асинхронного двигуна: електричні втрати в обмотці статора – в провідниках обмотки статора; електричні втрати в обмотці ротора – в провідниках обмотки ротора; втрати в магнітопроводі – переважно в осерді статора; механічні втрати – в основному в підшипниках; додаткові втрати мають місце практично у всіх елементах електродвигуна (як в статорі, так і в роторі). Значення цих втрат може збільшуватись внаслідок або зміни режиму роботи електродвигуна, або внаслідок виникнення несправності у певному вузлі електродвигуна (замикань в обмотці, зношення підшипників, підгорянь контактів, замикань у магнітопроводі, тощо) [10 – 14]. Тому втрати активної потужності у вузлах асинхронних електродвигунів є діагностичними параметрами технічного стану тих вузлів електродвигуна, де вони локалізовані. Узагальненим діагностичним параметром, який характеризує технічний стан електродвигуна в цілому, є його коефіцієнт корисної дії (рис.1).



Рис. 1. Діагностичні параметри асинхронного електродвигуна

Поточні значення втрат активної потужності у вузлах асинхронного електродвигуна та коефіцієнта корисної дії можна визначати тільки у процесі його навантаження. При реальному навантаженні електродвигуна, тобто під час приведення ним у дію певної робочої машини, виконувати це дуже складно, тому розглянемо процес штучного навантаження асинхронного електродвигуна, під яким будемо розуміти послідовність виконання певних операцій, спрямованих на здійснення навантаження електродвигуна у різні способи та визначення коефіцієнта корисної дії електродвигуна при номінальній потужності на його валу та номінальній напрузі на затискачах. Його можна здійснювати різними методами (рис.2) [15].

Аналіз вказаних методів показав, що усі вони мають певні переваги та недоліки, але найбільш простим у технічній реалізації є метод розділення втрат потужності внаслідок того, що він не потребує додаткової електричної машини для навантаження асинхронного електродвигуна. Тому його можна застосовувати у якості діагностичних впливів на асинхронні електродвигуни. Проте вказаний метод має певні недоліки: необхідність застосування регулятора напруги; необхідність загальмовування ротора в досліді короткого замикання; необхідність графічної побудови залежностей холостого ходу.



Рис. 2. Методи здійснення процесу штучного навантаження асинхронного електродвигуна

Щоб уникнути перших двох недоліків в досліді короткого замикання пропонується з'єднати обмотки статора асинхронного електродвигуна за схемою відкритого трикутника (рис.1.3).

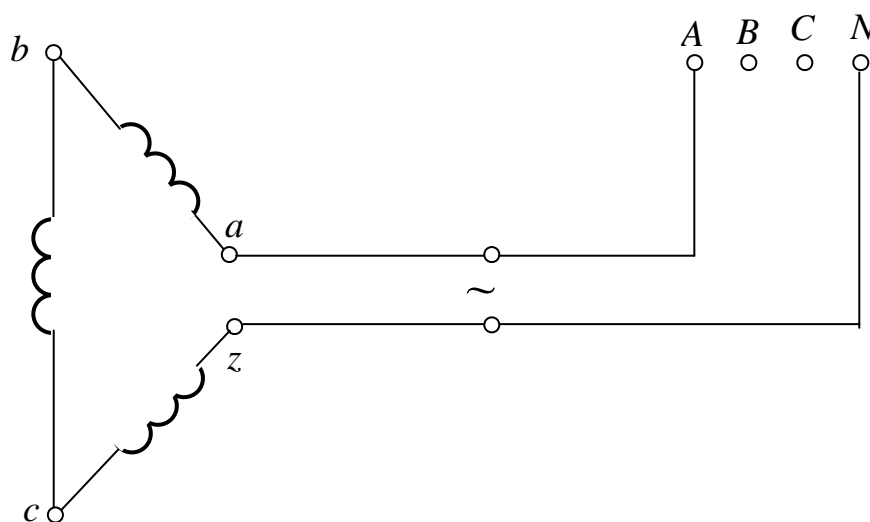


Рис. 3. Схема з'єднання обмоток статора асинхронного електродвигуна відкритим трикутником

Внаслідок такого з'єднання обмоток опори асинхронного електродвигуна збільшуються в 3 рази [16], що дозволяє проводити дослід короткого замикання при номінальній напрузі. За таких умов сила струму в обмотках статора приблизно в 2 рази перевищує номінальне значення, що дозволяє у тепловому відношенні витримати асинхронному електродвигуну нетривалий температурний вплив під час проведення дослідів короткого замикання. Тому за таких умов проведення дослідів короткого замикання регулятор напруги не потрібен.

Крім того, при з'єднанні обмотки статора відкритим трикутником і подачі на неї фазної напруги в обмотці буде протікати синусоїдний струм, який буде призводити до утворення в електродвигуні пульсуючого магнітного поля. Тому ротор буде нерухомий і загальмовувати його не має потреби.

В досліді короткого замикання у коло включаються вольтметр, амперметр та ватметр і вимірюються значення таких величин: U_k – напруга на затискачах електродвигуна в досліді короткого замикання, B ; I_k – сила струму у обмотці статора електродвигуна в досліді короткого замикання, A ; P_k – активна потужність, яку споживає електродвигун в досліді короткого замикання, $Вт$. Після дослідів вимірюється r_{1k} – активний опір фази обмотки статора, $Ом$.

За результатами вимірювань визначаються:

- електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta P_{e1} = 3 \cdot r_{1k} \cdot I_k^2 \cdot \left(\frac{I_n}{I_k} \right)^2, \quad (1)$$

де I_n – номінальний фазний струм електродвигуна (вказаний у паспортних даних), A ;

- електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_{e2} = P_k - \Delta P_{e1} - \Delta P_{me} \cdot \left(\frac{U_k}{3 \cdot U_n} \right)^2, \quad (2)$$

де ΔP_{me} – втрати в магнітопроводі електродвигуна при номінальній напрузі (визначаються з дослідів холостого ходу), $Вт$;

U_n – номінальна фазна напруга електродвигуна, B .

Дослід холостого ходу проводиться стандартно, в коло включаються вольтметр, амперметр та ватметр і вимірюються

значення таких величин: $U_{x.n}$ – напруга на затискачах електродвигуна в досліді холостого ходу (яка дорівнює номінальній напрузі), B ; $I_{x.n}$ – сила струму у обмотці статора електродвигуна в досліді холостого ходу при номінальній напрузі, A ; $P_{x.n}$ – активна потужність, яку споживає електродвигун в досліді холостого ходу при номінальній напрузі, $Вт$. Після досліду вимірюється r_{1x} – активний опір фази обмотки статора, $Ом$.

За результатами вимірювань визначається коефіцієнт потужності електродвигуна:

$$\cos \varphi_{x.n} = \frac{P_{x.n}}{3 \cdot U_{x.n} \cdot I_{x.n}}. \quad (3)$$

Крім того, за результатами досліду необхідно виконувати розділення втрат активної потужності в елементах конструкції електродвигуна, на втрати у магнітопроводі та механічні втрати. Для цього дослід холостого ходу потрібно проводити при декількох значеннях прикладеної напруги (як мінімум, при двох значеннях). З метою відмови від регулятора напруги в досліді холостого ходу були отримані емпіричні вирази для розрахунку коефіцієнту потужності, струму та втрат холостого ходу асинхронного електродвигуна у межах від номінальної напруги і нижче. Вирази дозволяють розраховувати значення вказаних величин з похибкою не більше 1 % за результатами досліду холостого ходу, який проведений при номінальній напрузі. Вони мають наступний вигляд:

$$\cos \varphi_x = \frac{\cos \varphi_{x.n}}{(k_u)^{(1 + \cos \varphi_{x.n})}}, \quad (4)$$

де k_u – кратність напруги на затискачах електродвигуна (дорівнює відношенню поточного значення до номінального);

$$I_x = I_{x.n} \cdot (k_u)^a, \quad (5)$$

$$a = 1 + k_u + (k_u)^{\frac{k_u}{\cos \varphi_x}} - (\cos \varphi_x)^{(1 - \cos \varphi_{x.n})}, \quad (6)$$

$$P_x = 3 \cdot k_u \cdot U_{x.n} \cdot I_x \cdot \cos \varphi_x. \quad (7)$$

За вказаними вище виразами здійснюють розрахунок тільки для однієї зниженої напруги ($k_u = 0,7$), визначаючи наступне: I_x – силу струму в обмотці статора в досліді холостого ходу при зниженій напрузі, A ; та P_x – активну потужність, яку споживає електродвигун в досліді холостого ходу при зниженій напрузі, $Вт$.

На підставі вимірювань та розрахунків визначають:

- механічні втрати:

$$\Delta P_{мх} = \frac{P_x - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_x^2 - 0,49 \cdot (P_{x.н} - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_{x.н}^2)}{0,51}, \quad (8)$$

- втрати в магнітопроводі:

$$\Delta P_{мг} = P_{x.н} - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_{x.н}^2 - \Delta P_{мх}. \quad (9)$$

За отриманими результатами у дослідях короткого замикання і холостого ходу визначають наступне:

- поточне значення сумарних втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальній потужності на валу P_n і номінальній напрузі на затискачах U_n :

$$\Delta P = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{мх} + 0,005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}, \quad (10)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна (вказана у паспортних даних), $Вт$;

η_n – номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна (вказаний у паспортних даних);

- поточне значення коефіцієнта корисної дії асинхронного електродвигуна:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P}. \quad (11)$$

Висновок про поточний функціональний стан асинхронного електродвигуна робиться на підставі порівняння отриманого значення коефіцієнта корисної дії з допустимим:

$$\eta_{\text{дон}} = \eta_n - 0,15 \cdot (1 - \eta_n). \quad (12)$$

Якщо поточне значення коефіцієнта корисної дії перевищує допустиме, то асинхронний електродвигун повинен бути виведений в ремонт.

Висновки. Таким чином, у роботі запропоновано метод періодичного контролю функціонального стану асинхронних електродвигунів на базі дослідів холостого ходу та короткого замикання, однократно проведених при номінальній напрузі. Він ґрунтується на порівнянні поточного значення коефіцієнту корисної дії електродвигуна з допустимим і дозволяє із достатньою для практики точністю визначати можливість подальшого застосування асинхронних електродвигунів для приводу певних робочих машин.

Список використаних джерел:

1. Овчаров С. В. Ресурсоенергосберегающие эксплуатационные режимы силового электрооборудования. Київ: Аграр Медіа Груп, 2012. 293 с.

2. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Квітка О. С. Експлуатаційний контроль функціонального стану осердя та механічної системи асинхронних електродвигунів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С. 85–93.

3. Закладной А. Н., Закладной О. А. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей. *Енергетика та електрифікація*. 2004. № 4. С. 63–67.

4. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Безменнікова Л. М. Метод періодичного діагностування асинхронних електродвигунів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 10, т. 4. С. 39-46.

5. Овчаров В. В., Вовк О. Ю. Теоретичні передумови комплексного діагностування асинхронних електродвигунів. *Праці Таврійського державної агротехнічної академії*. Мелітополь, 2001. Вип. 1, т. 21. С. 4-6.

6. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Безменнікова Л. М. Періодичне діагностування механічної частини робочої машини з асинхронним електроприводом в експлуатації. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2012. Вип. 12, т. 2. С. 54–58.

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

8. Вовк О. Ю., Квітка С. О. Технологія періодичного контролю роботоздатності асинхронних електродвигунів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелітополь, 2011. Вип. 11, т. 3. С. 80–88.

9. Вовк О. Ю. Періодичне діагностування асинхронних електродвигунів в експлуатації. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії.* Мелітополь, 2005. Вип. 32. С. 74–85.

10. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелітополь, 2017. Вип. 7, т. 1. С. 126-134.

11. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Безменнікова Л. М. Обґрунтування параметрів функціонального стану асинхронних електродвигунів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелітополь, 2008. Вип. 8, т. 9. С. 129-137.

12. Чупейкина Н. Н., Удодова Э. О. Виды отказов асинхронных двигателей, их признаки, причины и методы устранения. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* Москва, 2006. № 3, т. 17. С. 50–92.

13. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Квітка О. С. Розрахункове визначення втрат активної потужності в асинхронних електродвигунах за паспортними даними. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки.* Харків, 2017. Вип. 186: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 80-82.

14. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Теплова модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних режимах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки.* Харків, 2015. Вип. 164: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 118-120.

15. Коварский Е. М., Янко Ю. И. Испытание электрических машин. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

16. Вовк О. Ю. Аналіз параметрів схеми заміщення асинхронного електродвигуна з фазним ротором при з'єднанні обмоток статора відкритим трикутником. *Праці Таврійської*

державної агротехнічної академії. Мелітополь, 2006. Вип. 45. С. 15-24.

**ПЕРІОДИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ
АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ
ПОКАЗНИКАМИ**

Вовк О. Ю., Квітка С. О.

Анотація

У роботі розглядається контроль функціонального стану асинхронних електродвигунів, як одна зі складових його експлуатації. Показано, що асинхронні електродвигуни отримали значне розповсюдження для приводу різноманітних машин і механізмів завдяки високій конструкційній надійності, проте їх експлуатаційна надійність поки що знаходиться на недостатньому рівні внаслідок впливів, які не можливо врахувати при проектуванні. Тому на практиці порівняно часто відбуваються відмови зазначених електродвигунів, що обумовлює необхідність постійного контролю їх функціонального стану з метою виявлення на ранніх стадіях ушкоджень, що дозволяє запобігати значних матеріальних витрат на їх ремонт та в результаті раптової зупинки технологічних ліній. Аналіз існуючих методів періодичного контролю функціонального стану асинхронних електродвигунів виявив їх недосконалість, що ускладнює їх застосування при виробничій експлуатації. Це обумовило розробку методу, який має нескладну технічну реалізацію та дозволяє із достатньою для практики точністю визначати можливість подальшого застосування асинхронних електродвигунів для приводу певних робочих машин. В основу метода покладені дослідження холостого ходу і короткого замикання електродвигунів, які проводяться при одному значенні живлячої напруги та не потребують пристрою для загальмовування ротора. У якості діагностичного параметру обґрунтовано застосування коефіцієнта корисної дії асинхронного електродвигуна, який запропоновано визначати за розробленою методикою за результатами вказаних дослідів і порівнювати з допустимим значенням.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, функціональний стан, періодичний контроль, діагностичний параметр, дослід холостого ходу, дослід короткого замикання, коефіцієнт корисної дії.

**ПЕРИОДИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ
ПОКАЗАТЕЛЯМ**

Вовк А. Ю., Квитка С. А.

Аннотация

В работе рассматривается контроль функционального состояния асинхронных электродвигателей, как одна из составляющих его эксплуатации. Показано, что асинхронные электродвигатели получили широкое распространение для привода различных машин и механизмов благодаря высокой конструкционной надежности, однако их эксплуатационная надежность пока находится на недостаточном уровне вследствие воздействий, которые невозможно учесть при проектировании. Поэтому на практике сравнительно часто происходят отказы указанных электродвигателей, что обуславливает необходимость постоянного контроля их функционального состояния с целью

выявления на ранних стадиях возникших повреждений, что позволяет предотвращать значительные материальные затраты на их ремонт и в результате внезапной остановки технологических линий. Анализ существующих методов периодического контроля функционального состояния асинхронных электродвигателей выявил их несовершенство, что затрудняет их применение при производственной эксплуатации. Это обусловило разработку метода, который имеет несложную техническую реализацию и позволяет с достаточной для практики точностью определять возможность дальнейшего применения асинхронных электродвигателей для привода определенных рабочих машин. В основу метода положены опыты холостого хода и короткого замыкания электродвигателей, которые проводятся при одном значении питающего напряжения и не требуют устройства затормаживания ротора. В качестве диагностического параметра обосновано применение коэффициента полезного действия асинхронного электродвигателя, который предлагается определять по разработанной методике на основании результатов указанных опытов и сравнивать с допустимым значением.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, функциональное состояние, периодический контроль, диагностический параметр, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания, коэффициент полезного действия.

PERIODIC CONTROL OF FUNCTIONAL STATE OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS BY ENERGY INDICATORS

O.Vovk, S.Kvitka

Summary

The paper considers the control of the functional state of asynchronous electric motors, as one of the components of its operation. It is shown that asynchronous electric motors are widely used to drive various machines and mechanisms due to their high structural reliability, but their operational reliability is still at an insufficient level due to influences that cannot be taken into account when designing. Therefore, in practice, failures of the indicated electric motors occur relatively often, which necessitates constant monitoring of their functional state in order to identify damage that has arisen in the early stages, which makes it possible to prevent significant material costs for their repair and as a result of a sudden stop of technological lines. Analysis of the existing methods for periodic monitoring of the functional state of asynchronous electric motors revealed their imperfection, which makes it difficult to use them in industrial operation. This led to the development of a method that has a simple technical implementation and allows, with sufficient accuracy for practice, to determine the possibility of further use of asynchronous electric motors to drive certain working machines. The method is based on the experiments of open circuit and short circuit of the electric motor, which are carried out at one value of the supply voltage and do not require a rotor braking device. As a diagnostic parameter, the use of the efficiency of an asynchronous electric motor is justified, which is proposed to be determined according to the developed methodology based on the results of these experiments and compared with the permissible value.

Key words: asynchronous electric motor, functional state, periodic monitoring, diagnostic parameter, no-load experience, short circuit experience, efficiency.