

УДК 631.242.1.0723:006.354

## МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В РАБОЧИХ РЕЖИМАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

**В.А. Дайнеко,**

*зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**Ж.Г. Юрковец,**

*аспирант каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ*

*В статье рассмотрена проблема повышения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей путем их диагностики в рабочем режиме. Представлена классификация существующих методов по диагностическим признакам, регистрируемым параметрам, средствам контроля, и проведен их сравнительный анализ. Определены перспективные методы диагностики общепромышленных асинхронных двигателей малой и средней мощности.*

*Ключевые слова: асинхронные двигатели, тестовая и функциональная диагностика, методы и средства диагностики, дефект, первичные преобразователи, датчики, анализ спектра тока статора, тепловизионный контроль.*

*The article considers the problem of improving the operational reliability of asynchronous motors by diagnosing them in the operating mode. The classification of existing methods according to diagnostic signs, registered parameters, control means is presented, and their comparative analysis is carried out. The promising methods of diagnostics of general industrial asynchronous motors of low and medium power are determined.*

*Key words: asynchronous motors, test and functional diagnostics, diagnostic methods and tools, defect, primary converters, sensors, current spectrum analysis, thermal imaging control.*

### Введение

Основная задача энергетической службы хозяйства – выполнение требований технической эксплуатации энерго- и электрооборудования, в том числе электроприводов технологических машин.

Большинство приводных электродвигателей в сельском хозяйстве – асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором. Распространенные технические средства управления асинхронными электроприводами, устройства контроля и защиты не обеспечивают надежную работу технологического оборудования и отключают привод, когда наступает аварийный режим, а изоляция обмоток электродвигателя перегрета, или уже повреждена. Чаще всего повреждаются обмотки статора. Основные виды повреждений – разрушение межвитковой изоляции, приводящее к замыканию между витками и обмотками, к замыканию обмоток на корпус. [1; 2].

Существующая система эксплуатации и ремонта электроприводов, основанная на профилактических мероприятиях и регламентных работах, не учитывает фактическое состояние оборудования. Проблему повышения эксплуатационной надежности электроприводов можно решить при условии непрерывной диагностики электродвигателя в рабочих режимах, что позволит предупредить развитие повреждений за счет своевременного фиксирования аварийных отклонений его параметров.

Анализ существующих и перспективных методов контроля параметров электродвигателей в рабочих режимах необходим для определения закономерностей развития повреждений и формулирования технических требований к разрабатываемым средствам контроля параметров изоляции и загрузки электродвигателя.

### Основная часть

Электродвигатели в сельском хозяйстве работают в условиях агрессивной окружающей среды, при низком качестве питающего напряжения. Средний срок службы асинхронного электродвигателя (АД) в сельском хозяйстве не превышает 3 года [1], причем до 90 % отказов происходит из-за повреждения обмоток статора. На изоляцию обмоток действуют: химически активная среда, увлажнение, тепловые воздействия при перегрузке АД, вибрации. Процессам старения изоляции способствуют импульсные коммутационные и атмосферные перенапряжения [2]. Другими причинами отказов и повреждений АД являются неполнофазные режимы, износ подшипников, повреждения в короткозамкнутых обмотках ротора, неравномерный воздушный зазор между ротором и магнитопроводом статора.

Известны многочисленные методы диагностики АД, применяемых как в статических, так и в рабочих режимах, но проблема остается актуальной по ряду

причин [1; 2; 9; 13]. Необходим универсальный и простой в практическом применении метод непрерывного контроля технического состояния электродвигателей, позволяющий снизить ущерб от повреждений за счет раннего обнаружения и прогнозирования дефектов различного характера.

Известен ряд методов диагностики асинхронных электродвигателей, основанных на оценке различных параметров электродвигателей, цепей их питания и механической части электроприводов:

1. *Вибродиагностикой* [3] оценивают состояние подшипников, обнаруживают эксцентриситет ротора и дефекты его обмоток. Вибрационный метод позволяет регистрировать и анализировать акустические колебания рабочей машины и электродвигателя, преобразованные в электрический сигнал пьезоэлектрическими, оптическими или индукционными преобразователями. Преимущества метода – возможность изменения и анализа виброперемещений, виброскоростей и виброускорений в различных точках агрегата и электродвигателя. Необходимость установки многочисленных виброакустических датчиков, сложность интерпретации результатов измерений делают этот метод дорогим и трудоемким.

2. *Измерением и анализом внешнего магнитного поля электродвигателя (ЭД), магнитного потока в зазоре* [5] можно оценивать эксцентриситет ротора, состояние подшипников, обнаруживать межвитковые замыкания обмоток статора. Метод распространен при диагностике электрических машин с номинальным напряжением 3-6 кВ, обеспечивает высокую точность измерений при использовании датчиков Холла. Недостатки метода заключаются в малой чувствительности для низковольтных двигателей, особенно при регистрации внешних магнитных полей, и требуется установка датчиков магнитного поля, что возможно только при ремонте или изготовлении ЭД.

3. *Методом тепловизионного контроля* [6] определяют неисправности подшипников, состояние силовых вводов, обмоток статора. При помощи тепловизоров контролируется излучение в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (0,9-14 мкм) в заданной области термограммы. Преимущества метода заключаются в том, что измерения проводятся на работающем ЭД дистанционно. Не требуется установка датчиков, обеспечивается мониторинг оборудования путем сравнения термограмм, полученных на различных режимах при исправном оборудовании. Однако данный метод непригоден для контроля внутренних повреждений изоляции машины и требуется специальное программное обеспечение для интерпретации результатов измерений, инерционность тепловых процессов в ЭД.

4. *Методом анализа электрического тока, напряжения и мощности диагностируют* [9] неисправности ЭД и приводного оборудования, такие как дисбаланс, несоосность, дефекты подшипников, а также повреждения изоляции. Для непрерывного контроля параметров питающего напряжения, загрузки электродвигателя используется интегрированная система контроля, которая отслеживает несимметрию

и гармонический состав токов и напряжений. Преимущество метода – одновременный контроль токов и напряжений в трех фазах ЭД и непрерывная регистрация параметров. Недостатки метода заключаются в том, что для получения информации о гармоническом составе токов и напряжений требуется применение устройств и программного обеспечения, способных проводить Фурье-анализ результатов измерений и их интерпретацию для определения видов повреждений.

Наиболее сложной технической задачей является диагностика состояния изоляции обмоток в рабочем режиме ЭД [8], особенно обнаружение дефектов межвитковой изоляции [4]. Для электродвигателей с номинальным напряжением 3-6 кВ применяется метод частичных разрядов [10-12], основанный на регистрации обратимых частичных разрядов, которые при рабочем или близком к нему напряжении наиболее достоверно характеризуют состояние обмотки как предпробойное. В качестве недостатков необходимо отметить, что воздействие в десятки киловольт может привести к повреждению межвитковой изоляции. Регистрация частичных разрядов в низковольтных ЭД возможна в увлажненной изоляции, поэтому при одновременном текущем контроле степени увлажненности изоляции по коэффициенту абсорбции можно обнаруживать частичные разряды и при амплитуде импульсов напряжения в изоляции на уровне 400-500 В. Например, такие импульсы возникают при работе ЭД от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.

Перспективным направлением представляется разработка технических средств контроля состояния и диагностики электрических машин, основанных на сигнатурном анализе электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя (ГОСТ ISO 20958-2015) [9]. Под анализируемым электрическим сигналом понимают электрическое напряжение на клеммах электродвигателя или ток в его проводах. Изменения в таких сигналах могут быть вызваны как неисправностями в АД, так и неисправностями в электроприводе, поэтому сигнатурный анализ электрических сигналов двигателя распространяется на оценку технического состояния приводного оборудования.

Если электродвигатель питается от сети через преобразователь напряжения и частоты, следует отделять неисправности преобразователя и электродвигателя. При анализе тока статора необходимо, чтобы напряжение и частота на выходе преобразователя не изменялись в момент измерений.

Контроль тока в трех фазных проводах статора, линейных напряжений питания и потребляемой из сети мощности в установившемся режиме, а также при пуске АД позволяет на ранней стадии выявлять повреждения в обмотках статора и ротора.

Анализ спектра тока статора позволяет обнаруживать обрывы и трещины стержней ротора, повышенный эксцентриситет воздушного зазора, повреждения подшипников, межвитковые замыкания в обмотке статора, неисправности привода. Сигнатурный анализ тока выполняется при номинальной нагрузке в

реальном масштабе времени. В качестве измерительных преобразователей тока могут использоваться трансформаторы тока и датчики тока на эффекте Холла, токоизмерительные шунты, подключаемые через изолированные усилители к контроллеру обработки информации [7].

Дефекты клетки ротора приводят к появлению характерных частотных составляющих в сигнале тока статора. Эти составляющие определяются анализатором спектра с высоким разрешением по частоте. При обрыве стержня ротора возникают колебания вращающего момента ротора на удвоенной частоте скольжения  $2sf_1$  и соответствующие колебания частоты вращения ротора. Боковые частоты в токе статора определяются выражением:

$$f_{sb} = (1 + 2s)f_1 \quad (1)$$

Следует учитывать, что боковые частоты изменяются в пределах 0,3-3 Гц при частоте питания 50 Гц, причем амплитуда этих составляющих в 100-1000 раз меньше амплитуды тока на частоте питания. Регистрация таких сигналов возможна высокочувствительными детекторами, цифровой обработкой сигналов, применением и специализированного программного обеспечения.

Эксцентриситет воздушного зазора может быть обнаружен по характерным частотным составляющим в спектре тока по выражению:

$$f_{ec} = f_1 \left( R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws} \right) \pm f_1 \left( \frac{1-s}{p} \right), \quad (2)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети, Гц;

$R_s$  – число стержней ротора;

$\eta_{ws}$  – нечетное целое число: 1, 3, ...;

$s$  – скольжение АД;

$p$  – число пар полюсов.

Межвитковые замыкания в обмотке статора приводят к появлению составляющих тока  $f_{st}$  на частотах, вычисляемых по формуле:

$$f_{st} = f_1 \left[ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right], \quad (3)$$

где  $f_1$  – частота питающей сети, Гц;

$n$  – нечетное целое число (1, 3, ...);

$k$  – нечетное целое число (1, 3, ...);

$p$  – число пар полюсов;

$s$  – скольжение.

Анализ спектра тока статора позволяет также обнаружить дефекты подшипников и другие механические дефекты в электродвигателе и приводном оборудовании [14].

Анализ с использованием вектора Парка, который представляет собой используемый для упрощения анализа математический инструмент, позволяет описывать три фазные переменные в двух ортогональных плоскостях [9]. Его используют для выявления таких неисправностей трехфазных асинхронных двигателей, как эксцентриситет воздушного зазора, межвитковые дефекты в обмотке статора, несоосность механических соединений, обрыв в обмотке фазного ротора и дефекты стержней и колец короткозамкнутого ротора [15-18]. Применение расширенного метода вектора Парка повышает достоверность диагностирования, выполняемо-

го в реальном масштабе времени [9]. Его используют для двигателей с питанием непосредственно от сети или через инвертор для обнаружения как одиночных неисправностей, так и их сочетаний.

Для того чтобы разделить неисправности двигателя и неисправности приводного оборудования, создающего переменную нагрузку, применяют представление вектора Парка  $i_D, i_Q$ , который строится на основе токов  $i_A, i_B, i_C$  в трех фазах электродвигателя и вычисляется по формулам:

$$i_D = \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) i_A - (1 - \sqrt{6}) i_B - \left( \frac{1}{\sqrt{6}} \right) i_C, \quad (4)$$

$$i_Q = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) i_B - \left( \frac{1}{\sqrt{6}} \right) i_C. \quad (5)$$

При симметричных токах в фазах АД компоненты вектора Парка имеют вид и вычисляются по формулам:

$$i_D = \left( \frac{\sqrt{6}}{2} \right) i_M \sin \omega t, \quad (6)$$

$$i_Q = \left( \frac{\sqrt{6}}{2} \right) i_M \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (7)$$

где  $i_M$  – максимальное значение тока в каждой фазе, А;

$\omega$  – угловая частота, рад/с;

$t$  – время, с.

Конец вектора Парка для двигателя с симметричными фазами описывает окружность с центром в начале координат. В аномальных условиях работы двигателя, кривая, описываемая вектором Парка, отличается от идеальной окружности.

Анализ с применением вектора Парка заключается в выделении в описываемой концом вектора траектории (годографе) диагностических признаков, соответствующих различным неисправностям. Например, повреждения в обмотке статора приводят к эллиптической форме годографа, а степень эллиптичности пропорциональна степени развития повреждения.

В расширенном методе вектора Парка выполняют спектральный анализ переменной составляющей модуля вектора Парка  $M$ , определяемого по формуле:

$$M = \sqrt{i_D^2 + i_Q^2}. \quad (8)$$

Расширенный метод объединяет в себе простоту анализа с использованием вектора Парка и возможности более детальных исследований, предоставляемые спектральным анализом, т.к. в векторе Парка содержится информация о токах всех фаз двигателя. Расширенный метод вектора позволяет обнаруживать сразу нескольких неисправностей двигателя [9].

Вначале получают эталонный спектр, соответствующий нормальному техническому состоянию двигателя. При появлении новых составляющих в спектре судят о наличии той или иной неисправности.

Перспективным представляется импульсный метод диагностики обмоток электродвигателей, основанный на зондировании его обмоток прямоугольными импульсами [12]. На обмотку подается прямоугольный зондирующий импульс низкого уровня с одновременным осциллографированием. Сравнение осциллограмм для исправных обмоток с полученными

ми при последующих измерениях позволяет определять характер повреждений, прежде всего в межвитковой изоляции. Перспективный метод, основанный на использовании наносекундных зондирующих импульсов, предложен в работе [13].

Основываясь на проведенном литературном обзоре, можно сформулировать требования, которым должен соответствовать современный метод диагностирования электродвигателей. Это достоверность и точность выявления неисправностей и повреждений электродвигателя; возможность обнаружения всех или значительной части электрических и механических повреждений электродвигателя и связанных с ним механических устройств; проведение диагностических измерений дистанционно; низкая трудоемкость диагностических работ (измерений); возможность проведения аналитической обработки полученных результатов измерений за короткое время, с применением вычислительных и программных средств.

### Заключение

1. Анализ существующих методов диагностики электродвигателей позволяет оценить перспективу их применения в производственных условиях.

2. Основные требования, предъявляемые к современным методам диагностирования электродвигателей, это возможность непрерывного контроля основных кинематических и электрических параметров в рабочем режиме; дистанционная передача данных и оперативная обработка результатов вычислительным устройством.

3. Основные контролируемые параметры – мгновенные и среднеквадратичные значения токов и напряжений электродвигателя, их спектральный состав.

4. При обосновании метода необходимы этапы моделирования и эксперимента.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомов, А.И. Диагностика асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / А.И. Пахомов. – Краснодар, 2008. – 241 с.: ил.

2. Пахомов, А.И. Эксплуатационная надежность асинхронных двигателей / А.И. Пахомов, И.А. Переверзев, А.Ф. Кроневальд // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 3. – С. 24-25.

3. Афанасьев, Д.О. Методы и проблемы вибродиагностики асинхронных двигателей / Д.О. Афанасьев, Л.Г. Сидельников, А.М. Седунин. – Пермь: Пермский государственный технический университет; ООО «Тест Сервис», 2013. – 20 с.

4. Пахомов, А.И. Диагностика межвитковой изоляции электродвигателей / А.И. Пахомов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 6. – С. 21-23.

5. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего магнитного поля / А.Ю. Алексеенко [и др.] // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006. – №2. – С. 9-13.

6. Горбунов, К.В. О тепловизионном контроле электрооборудования / К.В. Горбунов, Ю.С. Попрыкин, А.В. Соловьев // Энергетик. – 2012. – № 2. – С. 2.

7. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50-52.

8. Воробьев, Н.П. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2011. – № 2/2. – С. 261-269.

9. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: ГОСТ ISO 20958-2015: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 12.11.15; введ. 11.01.16. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

10. Емельянов, А.И. Методы тестирования частичных разрядов при мониторинге электрооборудования среднего и высокого напряжения / А.И. Емельянов // Главный энергетик. – 2016. – № 11. – С. 14-22.

11. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов: ГОСТ 20074-83: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 15 апреля 1983 г., № 1961; введ. 01.07.84. – Москва: Ордена «Знак Почета» Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.

12. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов: МЭК 60270:2000: утвержден и введен в действие приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2012 г. № 1183-ст: введ. 01.01.2014. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 26 с.

13. Thomson, W.T. A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – Past, Present and Future/ W.T. Thomson // Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – Gijon, Spain. – 1999. – P. 3-18.

14. ISO 13379 (all parts). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques. – 2012. – P. 33.

15. Cardoso, A.J.M. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors by Park's vector approach/ A.J.M. Cardoso, S.M.A. Cruz, D.S.B. Fonseca // IEEE Trans. Energ. Convers. – 1999. – Vol. 14. – P. 595-598.

16. Cardoso, A.J.M. Computer-aided detection of air-gap eccentricity in operating three-phase induction motors by Paris's vector approach / A.J.M. Cardoso, E.S. Saraiva // IEEE Trans. Ind. A. – 1993. – Vol. 29. – P. 897-901.

17. Cruz, S.M.A. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach / S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso // Electric Machines and Power Systems. – 2000. – Vol. 28. – P. 289-299.

18. Cruz, S.M.A. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach / S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso // IEEE Trans. Ind. A. – 2001. – Vol. 37. – P. 1227-1233.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 05.07.2021