

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.17

ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СТЕРЖНЕЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Т.В. Победа, В.В. Мирошников

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля, г. Луганск, 91034, кв. Молодежный, 20-а, тел. (0642) 41-71-20, e-mail: prilad@snu.edu.ua, pobeda-tatyana@rambler.ru

Дана порівнювальна характеристика методів та засобів контролю стержнів короткозамкнених роторів асинхронних двигунів. Запропонований метод, який дозволяє контролювати цілісність стержней без механічної обробки ротору.

Ключові слова: асинхронний двигун, ротор короткозамкнутий, стержень, метод контролю, дефект.

Дана сравнительная характеристика методов и способов контроля стержней короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей. Предложен метод, позволяющий контролировать целостность стержней без механической обработки ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ротор короткозамкнутый, стержень, метод контроля, дефект.

Comparative description of methods and control methods of shortcircuited rotor bars of asynchronous engines is given. A method, allowing to control integrity of bars without tooling of rotor, is offered.

Keywords: asynchronous engine, a rotor is shortcircuited, bar, control method, defect.

В разные годы заводами Украины выпускалось 0,7-3 млн. штук электродвигателей в год. Доля асинхронных двигателей (АД) в количественном соотношении от всего парка электродвигателей в народном хозяйстве составляет 90% [1]. Благодаря простоте конструкции и надежности в эксплуатации они широко применяются во всех отраслях промышленности – угольной, энергетической, нефте- и газоперерабатывающей, судостроении, машиностроении и т.д. Кроме того, АД используется в качестве регулируемого электропривода, а общее потребление АД электроэнергии достигает 40% от всей вырабатываемой в стране.

Работа промышленных предприятий в значительной степени зависит от надежности электродвигателей. Эффективность работы АД во многом зависит от качества их изготовления, условий эксплуатации и технического состояния его основных конструктивных элементов, которые непосредственно участвуют в процессе преобразования энергии. Качество литой обмотки ротора определяет долговечность, надежность электродвигателя и его эксплуатационные характеристики.

Причинами отказов АД являются низкое качество изготовления (30-35%), нарушение условий эксплуатации (35-50%), несоответствие конструктивного исполнения условиям эксплуатации (15-35%), износ и старение (10-12%) [1]. По данным ВНИПТИЭМ порядка 20% установленных на промышленных предприятиях АД преждевременно выходят из строя. Как видно из этих цифр, большая доля повреждений происходит из-за нарушений технологических процессов изготовления.

Для заливки короткозамкнутых роторов на электромашиностроительных заводах применяется литье под давлением, литье в кокиль, литье в вибрирующую форму, центробежный способ заливки. Наиболее производительным способом является заливка на машинах литья под давлением, таким способом изготавливают порядка 70-95% короткозамкнутых роторов АД [3].

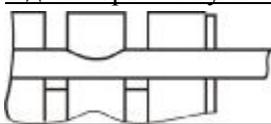
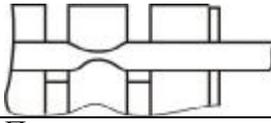
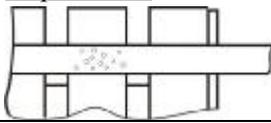
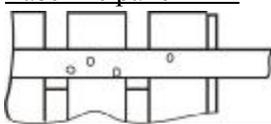
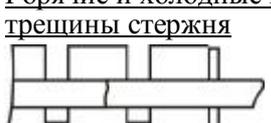
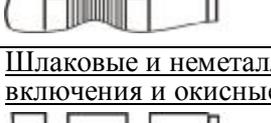
Из-за конструктивных и технологических особенностей, а также широкого диапазона форм и размеров пазов литой обмотки ротора АД трудно обеспечить ее бездефектное производство. Брак может быть допущен на любом этапе изготовления – начиная от

штамповки листов ротора и до заливки формы металлом. Самые распространенные дефекты стержней короткозамкнутых обмоток роторов и причины их возникновения представлены в табл. 1. Наиболее опасными и трудно диагностируемыми дефектами обмотки ротора являются обрывы, трещины и утоньшения стержней в пазовой части. Большое количество дефектов не обнаруживаются даже при контрольно-приемочных испытаниях и дают о себе знать в период приработки (первые 8-10

месяцев работы).

На данный момент контроль стержней короткозамкнутого ротора производится после шлифовки ротора или после полной сборки двигателя. Сборочные операции забирают много времени и трудозатраты повышаются. Поэтому производить контроль после сборки двигателя экономически невыгодно. Тем не менее, целый ряд методов и способов контроля стержней ротора подразумевают наличие статорной обмотки.

Таблица 1 – Технологические дефекты стержней короткозамкнутых роторов

Вид дефекта	Причины его возникновения
<p><u>Одностороннее утоньшение</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая температура металла и нагрева пакета при заливке. 2. Наличие в металле смазки из прессформы и наполнительного стакана.
<p><u>Двухстороннее утоньшение</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. При нагреве пакета ротора выше 550°C на поверхности листов образовывается окалина.
<p><u>Пористость</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая температура металла при заливке. 2. Очень быстрый впрыск металла в форму. 3. Недостаточное удельное давление прессования. 4. Неправильно подобранное сечение питателей.
<p><u>Газовые раковины</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Взаимодействия атмосферы печи, содержащей влагу, кислород, азот, углеводороды, и жидкого алюминия. 2. Перегретый металл.
<p><u>Горячие и холодные поперечные трещины стержня</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Усадка стержней при остывании металла 2. Недостаточное давление в конце процесса заливки. 3. Заливка слишком горячим металлом. 4. Неравномерное охлаждение отливки. 5. Сильная спрессовка пакета.
<p><u>Обрыв стержня</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкая температура металла при заливке и температура нагрева пакета. 2. Окисная пленка. 3. Усадка стержней при остывании металла. 4. Сильная спрессовка пакета.
<p><u>Недолив</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Некачественная шихтовка пакета. 2. Смещение одного или нескольких листов пакета ротора. 3. Некоторые листы ротора имеют непробитые пазы.
<p><u>Шлаковые и неметаллические включения и окисные пленки</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Реакция расплавленного металла с материалами тиглей и футеровкой печи. 2. Попадание смазки из прессформы и наполнительного стакана в расплав. 3. Реакция расплавленного алюминия с CO, CO₂, SO₂, N, которые присутствуют в атмосфере печи.

Таким образом, наиболее перспективным является контроль качества заливки стержней ротора непосредственно после заливки, когда ротор еще не прошел шлифовку и не вскрылся паз. Процедура контроля затруднена выступающими краями пластин ротора, которые ограничивают доступ к стержням и снижают чувствительность контроля. Для контроля целостности беличьей клетки необходимо определить метод контроля, который бы давал возможность обнаруживать дефектный стержень, точное место расположения дефекта, определять критичность утоньшения стержня ротора и легко поддавался механизации.

Способы и приборы, предназначенные для контроля целостности стержней ротора в пазовой части [2] можно разбить на три группы (рис. 1).

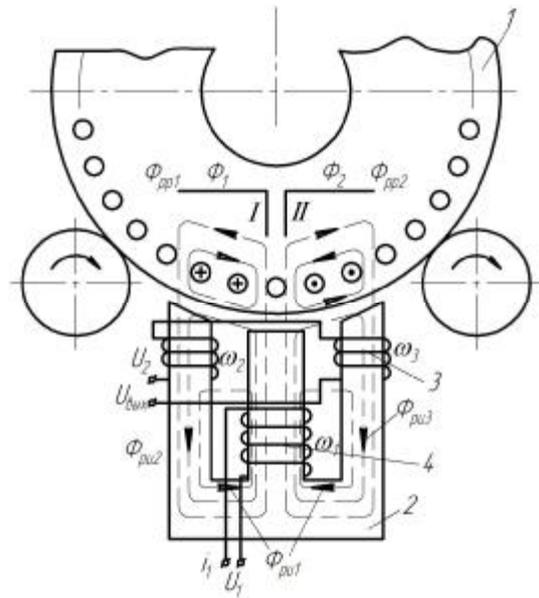


Рисунок 1 – Условия и способы контроля стержней ротора

Электромагнитный метод контроля позволяет выявлять дефекты стержней без предварительной обработки ротора, т. е. без вскрытия паза. На рис. 2. представлена простейшая схема контроля, обладающая, тем не менее, высокой чувствительностью, так как используется дифференциальная схема включения измерительных обмоток. Обмотка возбуждения, располагаемая на среднем стержне Ш-образной магнитной системы, питается током промышленной частоты. Следовательно, обмотка возбуждения и измерительные обмотки имеют большое число витков, что неизбежно приводит к большим геометрическим размерам магнитной системы. Это делает невозможным контроль малых роторов и не позволяет идентифицировать дефект типа утоньшения стержня.

Аналогичным по характеристикам является трансформаторный преобразователь (рис. 3), первичная обмотка которого питается

напряжением сети [2, 4]. Наводимый трансформаторным преобразователем ток в целом стержне соответствует режиму короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора, а при обрыве стержня трансформаторный преобразователь переходит в режим холостого хода. Эти режимы регистрируются с помощью амперметра, включенного в первичную обмотку трансформаторного преобразователя.



1 – контролируемый ротор; 2 – Ш-образный магнитопровод; 3 – измерительная обмотка; 4 – обмотка возбуждения

Рисунок 2 - Электромагнитная установка для контроля стержней ротора

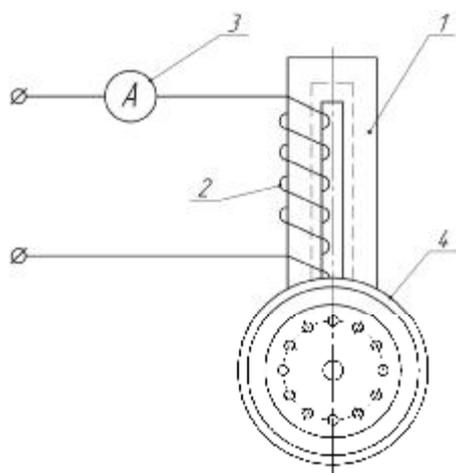
Данный преобразователь обеспечивает выявление только разрыва стержней, при этом в процессе контроля захватывается сразу несколько стержней.

Хорошие результаты при контроле стержней ротора после обработки, т.е. когда убрана перемычка, закрывающая паз, показал индукционный метод. С помощью электромагнита в стержне ротора наводится переменное электромагнитное поле. Вторичное поле вихревых токов стержня фиксируется индукционным преобразователем с сердечником.

Данная система контроля является самой эффективной, однако ее существенным недостатком является то, что необходимо предварительно обработать поверхность ротора, что опять таки связано с определенными трудозатратами.

Известный своей высокой чувствительностью магнитопорошковый метод

контроля, который в силу неровности поверхности ротора не может быть непосредственно использован. Для его применения требуется гладкая поверхность, поэтому ротор оборачивают неферромагнитным материалом, в частности картоном, и уже эту поверхность посыпают порошком, предварительно подав на стержни ротора ток 200-500 А. Этот метод более пригоден для лабораторных исследований, поэтому не нашел применения в промышленном производстве АД.



1 – разомкнутый магнитопровод;
2 – намагничивающая обмотка; 3 – амперметр;
4 – объект контроля

Рисунок 3 – Трансформаторный преобразователь для контроля роторов

Известны другие методы контроля, их проведение требует полной обработки и сборки ротора, что приводит к дополнительным трудозатратам и потере металла при выявлении дефекта в роторе. Например, после запрессовки вала и установки статора проводится контроль, где информационным параметром является определенный гармонический спектр сигнала. По амплитуде пульсаций делают вывод о виде дефекта.

В настоящее время для механизмов роторного типа развивается такое направление, как вибродиагностика. Источниками диагностической информации, характеризующими текущее техническое состояние механизмов, являются сигналы вибрации. Все виды дефектов изменяют характеристики вибропараметра. Так в [6] по колебаниям момента и скорости вращения электродвигателя, по повышению пульсаций токов ротора и статора судят о наличии обрыва обмотки стержня ротора. Однако по условиям

технологии производства детали и узлы электродвигателей изготавливают с определенными допусками по размерам. Этот факт влияет на шумовые характеристики АД. Поэтому достоверно судить о техническом состоянии электродвигателя по виброхарактеристикам нельзя. Если даже по уровню вибрации и можно установить наличие обрыва стержня, то определить паз, в котором располагается поврежденный стержень невозможно и для полноты исследования необходимо применение дополнительных средств контроля. На данный момент нет точной и однозначной методики взаимосвязи между дефектом конструкции и уровнем вибрации, нет конкретных признаков разделения этих дефектов.

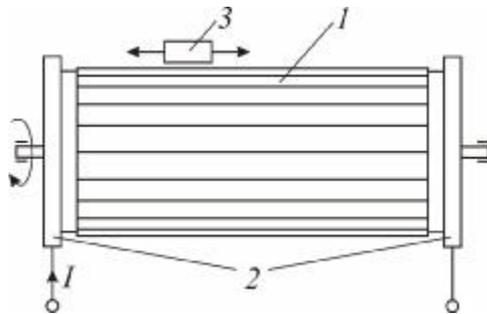
Таким образом, несмотря на многолетнее производство АД и множество методов контроля стержней ротора, действительно эффективного метода, отвечающего современным условиям производства, нет.

В общем виде основные требования к контролю короткозамкнутого ротора можно сформулировать следующим образом: контролируется необработанный ротор непосредственно после заливки; в процессе контроля выявляются дефекты типа обрыва, трещин, утоньшения стержня; определяется место расположения дефекта; автоматизируется процесс контроля. Исходя из выше перечисленных требований, для их обеспечения необходима разработка высокочувствительного преобразователя малых размеров, способного контролировать каждый отдельный стержень. Для повышения достоверности контроля необходимо отстраиваться от вредно влияющих факторов, создаваемых необработанной поверхностью ротора.

В свете изложенной проблематики предложена комбинированная схема контроля, которая сочетает в себе два наиболее чувствительных метода – феррозондовый и вихрековый. Причем феррозондовый метод ранее не применялся для контроля качества заливки короткозамкнутых роторов.

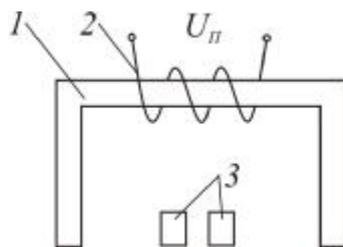
Основным препятствием к выявлению дефектных стержней короткозамкнутого ротора является перемычка, закрывающая паз, которая служит экраном. Для того, чтобы компенсировать магнитные свойства перемычки и регистрировать магнитное поле, создаваемое стержнем беличьей клетки, к короткозамкнутым кольцам ротора подводится постоянный ток. В зависимости от формы и размера стержня короткозамкнутого ротора (рис. 4) величина этого тока составляет 5-10 А. Протекающий по

стержням ток создает постоянное магнитное поле, достаточное для насыщения перемишки над пазом. Переменное поле подмагничивания, которое служит для выявления дефектов стержней, создает обмотка намагничивания П-образной электромагнитной системы (рис. 5).



1 – контролируемый ротор;
2 – короткозамкнутые кольца;
3 – электромагнитная система

Рисунок 4 – Схема контроля



1 – магнитопровод; 2 – обмотка намагничивания; 3 – феррозонды

Рисунок 5 – Электромагнитная система

В процессе контроля электромагнитная система с блоком феррозондов, находясь над поверхностью ротора на расстоянии 1,5 – 2 мм, производит сканирование стержней беличьей клетки. Переменное магнитное поле наводит в стержнях ротора вихревые токи, которые регистрируются феррозондовыми датчиками. Изменяя частоту поля подмагничивания от 50 Гц до 5 кГц, можно варьировать глубиной проникновения вихревых токов. Это дает возможность выявлять не только нарушения сплошности стержней беличьей клетки, но и уменьшение их поперечного сечения. Использование постоянного магнитного поля позволяет отстроиться от влияния экранирующих свойств перемишки.

Чувствительности феррозонда 1-3 А/м достаточно для регистрации создаваемых стержнем полей на расстоянии 3-5 мм над поверхностью ротора.

Для реализации такого способа контроля разработана схема дефектоскопа [7]. В дефектоскопе используются два феррозонда, каждый из которых работает в режиме полемера, а совместно они образуют градиентометрический режим работы. Для достижения максимальной чувствительности по переменному полю феррозонды охвачены обратной связью по постоянному полю, тем самым компенсируется влияние постоянного поля рассеяния поверхности ротора. Учитывая, что поверхность необработанного ротора резко неоднородная (ступенчатая), величина постоянного поля рассеяния по длине ротора постоянно и быстро меняется, поэтому чувствительность феррозонда так же будет меняться в процессе сканирования поверхности ротора. Изменение чувствительности феррозонда создает предпосылки к пропуску дефектов стержней ротора, особенно дефектов типа утоньшения стержня. Поэтому целесообразней использовать датчики, на чувствительность которых не будет влиять постоянное магнитное поле.

В качестве такого датчика предлагается использовать вихретоковый преобразователь. Для повышения его чувствительности рекомендуется использовать преобразователь с ферромагнитным сердечником, который подмагничивается постоянным магнитом [8]. Выходные обмотки преобразователя включены по дифференциальной схеме, что обеспечивает достаточно высокую стабильность и помехоустойчивость. Обмотка возбуждения преобразователя питается от стабилизированного источника переменного тока. Выходной сигнал преобразователя обрабатывается амплитудно-фазовым методом, при этом амплитудный канал используется для отстройки от мешающего фактора, каким является переменный зазор под преобразователем. Экспериментальные исследования показали, что с помощью вихретокового преобразователя выявляются все виды дефектов в одноклеточном роторе.

ВЫВОДЫ

Наиболее перспективными преобразователями для контроля ротора являются феррозонд и вихретоковый преобразователь. Использование этих преобразователей обеспечивает полный контроль как одноклеточных, так и двухклеточных роторов. Для повышения производительности контроля эти преобразователи можно набирать в многоэлементные матрицы. На базе этих преобразователей легко строится

автоматическая система контроля, обеспечивающая требуемую достоверность результатов контроля.

1. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с. 2. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования / Таран В.П. – К.: Техніка, 1983. – 200 с. 3. Любецкий Д.Г. Литые обмотки роторов асинхронных электродвигателей / Любецкий Д.Г., Макаров Л.С., Урецкий И.З. – М., Энергия, 1969. – 168 с. 4. Волохов С.А. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев, А.В. Кильдишев // *Электротехника*. – 1998. – №2. – С. 13-15. 5. Уманцев Р.Б. Конструкции и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей / Р.Б. Уманцев – М.: Энергия, 1976. – 80 с. 6. Калинов А.П. Исследование работы асинхронных двигателей при повреждении обмоток ротора / А.П. Калинов, Ж.И. Ухань, Ю.А. Топчиенко // *Збірник матеріалів IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів:*

*«Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» м. Кременчук, 2008 р. – Кременчук – 2008. – С. 73-74. 7. Победа Т.В. Электромагнитный контроль стержней короткозамкнутых роторов / Т.В. Победа, В.В. Мирошников, С.Н. Швец // «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: *Материалы Семнадцатой международной конференции, г. Ялта, 5-9 октября 2009 г. – Ялта – Киев – 2009. – С. 99-100. 8. V.V. Miroshnikov. The electromagnetic converter for work in a constant and variable magnetic field / V.V. Miroshnikov, T.V. Pobeda, E.P. Kostyukova // “Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science”: *Proceedings of the international conference TCSET’2008, Lviv-Slavsko, February 19-23, 2008 – Lviv – 2008. – P. 209-212.***

Поступила в редакцію 29.01.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Яковенко В.В.