

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333.2

© Кривоносов В.Е.¹, Василенко С.В.²

ДИАГНОСТИКА И ЗАЩИТА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

На промышленных предприятиях асинхронные двигатели работают в условиях повышенной запыленности окружающей среды. Как следствие, на обмотки попадает пыль и влага. В результате образуются проводящие мостики на лобовых частях обмотки. На основе проведенного анализа и экспериментального моделирования разработан способ раннего выявления запыления и увлажнения обмотки.

Ключевые слова: запыление, увлажнение, токопроводящие мостики, обмотка, поверхностное сопротивление, старение изоляции.

Кривоносов В.Е., Василенко С.В. Диагностика і захист ізоляції обмоток асинхронних двигунів, що працюють в агресивних середовищах. На промислових підприємствах асинхронні двигуни працюють в умовах підвищеної запиленості навколишнього середовища. Як наслідок, на обмотки потрапляє пил і волога. В результаті утворюються провідні містки на лобових частинах обмотки. На основі проведеного аналізу та експериментального моделювання розроблено спосіб раннього виявлення запилюванню і зволоження обмотки.

Ключові слова: запилення, зволоження, струмопровідні містки, обмотка, поверхневий опір, старіння ізоляції.

V.E. Krivonosov, S.V. Vasilenko. Diagnostics and protection of the winding insulation of asynchronous motors operating in aggressive environments. Asynchronous motors work under drastic dusty conditions at industrial enterprises. As a consequence dust and moisture work into the winding. The location where the winding gets out of the groove is subject to dynamic forces, it resulting in microcracks. As a result, conducting bridges are formed on the frontal end of the winding. The amount of current flowing through the dust layer depends on the material and its thickness. Studies of this issue have not been conducted in modern literature. The task of timely detection and diagnosis of the natural aging of insulation, its becoming dusty and wet is relevant. As a result of physical phenomena simulation the relationship curves of the surface resistance dependence on different materials and thicknesses of the dust layers have been obtained. An expression that makes it possible to define the current flowing through the layer of dust has been derived. The effect of moisture on the insulation resistance and the dust material has been defined. The corresponding curves have been obtained. The change in rate of surface conductance that makes it possible to diagnose the covering of the insulation surface with non-conductive dust has been defined. Based on the analysis and experimental modeling a method of timely detection of the winding becoming dusty and moist has been developed. This method is implemented in a device consisting of a low voltage source, an insulation resistance measuring unit, a surface state sensor, a signalling and switching unit, a microprocessor unit and a power supply unit.

Keywords: dust, moisture, conductive bridges, winding, surface resistance, insulation aging.

¹ канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, yaht-verf@mail.ru

² инженер, ООО «Сателлит», г. Мариуполь, vasilenkosergey1983@gmail.com

Постановка проблеми. Около 80% аварий асинхронных двигателей (АД) связаны с повреждением изоляции обмоток статора [1, 2]. Оборудование горно-добывающего, металлургического и химического комплексов работает в условиях повышенной запыленности, влажности и с различными графиками нагрузки. Наряду с естественным старением изоляции наблюдается ускоренный износ изоляции, обусловленный воздействием окружающей среды.

Динамические воздействия в лобовых частях обмотки образуют местные дефекты и микротрещины [3, 4]. Проводящая, непроводящая пыль, попавшие внутрь машины, и увлажнения создают токопроводящие мостики, сопротивление которых зависит от материала пыли, покрывающей изоляцию, и толщины слоя.

Наличие на поверхности изоляции микротрещин в совокупности с запылением и увлажнением приводит к возникновению поверхностного тока, протекание которого приводит к локальным перегревам изоляции. Колебания температуры и влажности окружающей среды способствуют увлажнению изоляции обмоток АД. В момент пуска АД наличие увлажненной пыли на поверхности изоляции увеличивает поверхностный ток в несколько раз. Интенсивное испарение влаги с поверхности изоляции приводит к разрастанию существующих микротрещин и образованию новых.

В настоящее время вопрос причин снижения срока службы АД при совместном влиянии запыления и увлажнения поверхности изоляции становится актуальным. Ответы на поставленный вопрос позволяют разработать способ и устройство своевременного выявления и диагностирования естественного старения изоляции, увлажнения изоляции (с последующей ее защитой от дальнейшего воздействия влаги), допустимое запыление изоляции как проводящей, так и непроводящей пылью, со своевременной сигнализацией о предельно-допустимом запылении.

Анализ последних исследований и публикаций. Литературные исследования показали, что поставленная задача изучена недостаточно. Результаты известных работ [5, 6] направлены на выявление и устранение одного из дефектов в изоляции. Так, в [6] разработан способ выявления увлажнением чистой обмотки статора во время технологических пауз, и определен момент сушки обмотки. В [7] с помощью высокочастотного сигнала определяется место повреждения в изоляции обмотки статора после выхода АД из строя. Недостатком этих способов является невозможность определить наличие запыления обмоток и предупредить локальный перегрев и возникновение проводящих мостиков. Непосредственное влияние запыления обмотки проводящей и непроводящей пылью [8] показало, что наличие на поверхности статорной обмотки слоя угольной пыли толщиной 0,9 мм приводит к повышению её нагрева примерно на 10°C, что снижает срок службы изоляции в 2 раза.

Естественное старение изоляции и совместное воздействие агрессивной среды снижают срока службы изоляции в 10–15 раз. Практика эксплуатации АД в промышленности показала, что, например, на насосных станциях средний срок службы АД составляет 1-2 года, в металлургических цехах – 3-4 года, угольных площадках – 2,7-3,5 лет при регламентированном сроке службы до 20 лет.

Целью настоящей работы является исследование снижения срока службы изоляции при совместном воздействии на изоляцию проводящей и непроводящей пыли при её увлажнении, разработка метода диагностирования и защиты АД.

Изложение основного материала. Сопротивление изоляции не бесконечно, при наличии фазного напряжения в диэлектрике изоляции обмотки АД протекает ток утечки $I_{уз}$. Этот ток складывается из емкостного тока I_c , обусловленного емкостью самой изоляции, и активной составляющей тока утечки I_{ym} , возникающий при появлении проводящих включений в изоляции (в виде пузырьков газа, влаги и т.п.).

Ток утечки I_{ym} , проходящий через изоляцию обмоток при установившемся процессе электропроводности, определяет истинное значение сопротивления изоляции. На практике это время принимают равным 1 мин в предположении, что все поляризационные процессы закончились. Поэтому в установившемся режиме работы АД принимается ток изоляции $I_{уз}$, равный сквозному току утечки I_{ym} .

Изоляция лобовой части обмотки, особенно в месте выхода её из паза, имеет отчетливо выявленные дефекты. Для анализа величины поверхностного тока выделим на прямолинейном участке лобовой части обмотки две точки (рис. 1), характеризующие два различных режима работы и, соответственно, имеющие различные значения сопротивления изоляции. Примем

значение сопротивления изоляции первой точки, которая подвергается лишь естественному старению, за базовую. Скорость снижения сопротивления изоляции в точке 2 выше, чем скорость снижения сопротивления изоляции в точке 1, вследствие динамического воздействия пусков и повышенной запыленности в местах примыкания обмотки к сердечнику статора.

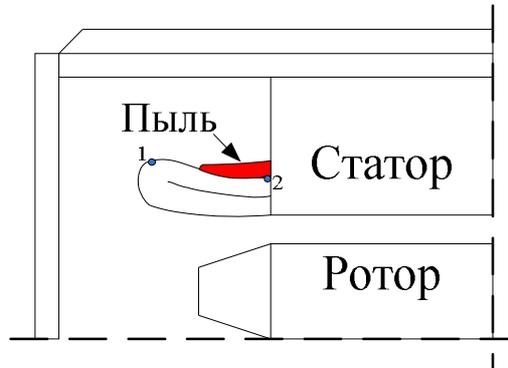


Рис. 1 – Исследуемые точки на лобовой части обмотки статора

Токи утечек в точках 1 и 2 равны

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \quad (1)$$

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из2}}, \quad (2)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение; $U_{1,2}$ – напряжение на поверхности изоляции в точках 1 и 2; $Z_{из1,2}$ – сопротивление изоляции в точках 1 и 2.

При новой изоляции токи I_{ym1} и I_{ym2} равны, равны и напряжения в этих точках, поверхностный ток $I_{пов}$ отсутствует. Длительная эксплуатация АД приведет к тому, что сопротивления изоляции в точках 1 и 2 не будут равны.

Выразим сопротивление в точке 2 через базовое сопротивление точки 1:

$$Z_{из2} = Z_{из1} - \Delta Z, \quad (3)$$

где ΔZ – значение снижения сопротивления изоляции.

Появление ΔZ обусловлено ухудшением диэлектрических свойств изоляции в точке 2 в результате тепловых перегрузок, динамических усилий, появления микротрещин, запыления, повышенной температуры окружающей среды, увлажнения и т.д.

Токи утечки (1) и (2) представляются в виде:

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \quad (4)$$

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из1} - \Delta Z}. \quad (5)$$

Напряжения на поверхности изоляции в этих точках:

$$U_1 = U_{\phi} - I_{ym1} \cdot Z_{из1}, \quad (6)$$

$$U_2 = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z), \quad (7)$$

$$\Delta U_{12} = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z) - U_{\phi} + I_{ym1} \cdot Z_{из1} = I_{ym1} \cdot \Delta Z. \quad (8)$$

Наличие проводящей пыли и увлажненной непроводящей (в моменты пуска) на обмотке, приводит к появлению поверхностного тока:

$$I_{пов} = \frac{\Delta U_{12}}{R_{пов}}, \quad (9)$$

где $R_{пов}$ – сопротивление пыли на поверхности обмотки.

Величина $R_{пов}$, пропорциональная удельному сопротивлению пыли, зависит от толщины слоя пыли на обмотке, длины покрытия пылью изоляции, состоянием поверхностной изоляции (продольные трещины, расслаивание и т.д.), а также наличием влаги. Поверхностное сопротивление рассчитывается по выражению:

$$R_{пов} = \rho_{пыли} \rho_{вл} \rho_{возд} \frac{l}{s}, \quad (10)$$

где $\rho_{пыли}$ – удельное сопротивление пыли; $\rho_{вл}$ – удельное сопротивление влаги; $\rho_{возд}$ – удельное сопротивление воздуха; l – длина участка, покрытого пылью; s – площадь сечения пыли лежащей на обмотке.

Величина поверхностного сопротивления $R_{пов}$ изменяется от 0 до ∞ .

При моделировании физических явлений использовали датчик поверхностной проводимости. Датчик представляет собой парные-параллельные электроды, расположенные на текстолитовой пластинке. На рис. 2 приведены кривые зависимости поверхностного сопротивления $R_{пов}$ при различных материалах пыли и толщин слоя h при неизменной площади покрытия.

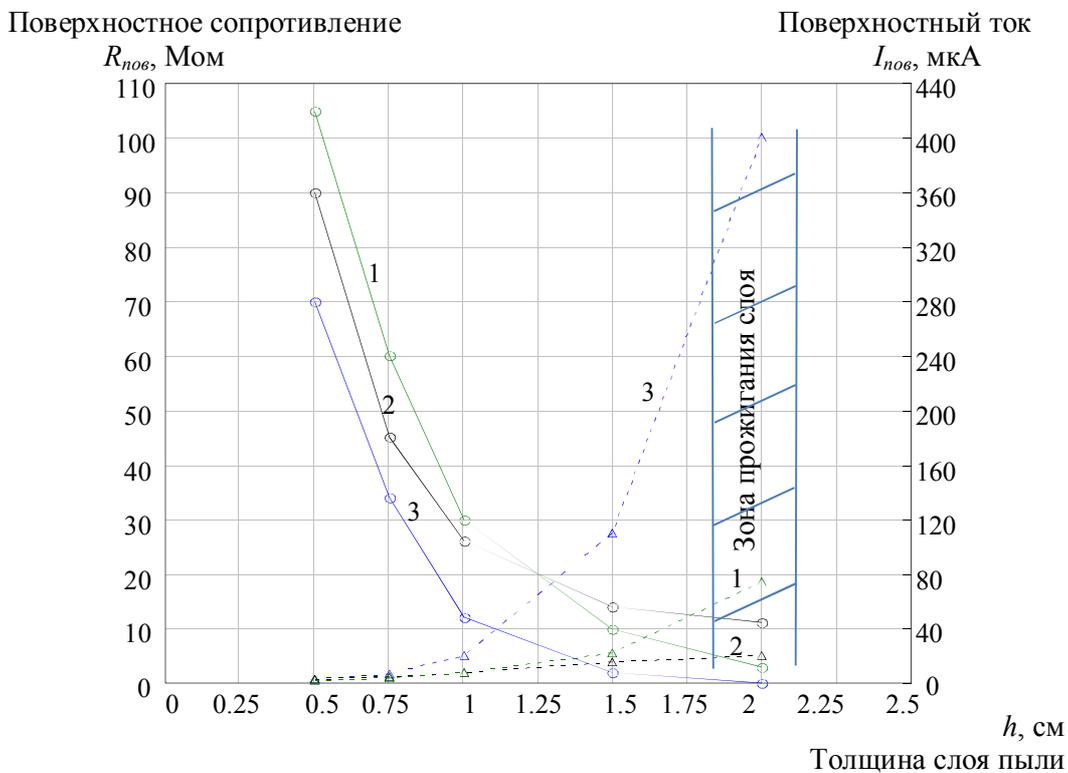


Рис. 2 – Графики зависимости величины сопротивления $R_{пов}$ и тока $I_{пов}$ для различных видов пыли и толщин h слоя: кривая 1 – окалина и производственная пыль; кривая 2 – строительная пыль; кривая 3 – графитовая пыль

Из рассмотрения графиков следует, что сопротивление материала $R_{пов}$, состоящего из окалины (30 %) и производственной пыли (70%) (кривая 1), снижается с 105 МОм при слое в 0,5 см до 3 МОм при слое в 2 см, для строительной пыли (кривая 2) сопротивление $R_{пов}$ снижается с 90 МОм до 11 МОм при увеличении слоя от 0,5 см до 2 см. Графитная пыль (кривая 3) сопротивление снижается с 70 МОм при слое 0,5 см до 0,1 МОм при слое в 2 см. Величина поверхностного тока $I_{пов}$ (кривая 1) при увеличении слоя пыли от 0,5 до 2 см увеличилась в 37 раз и составила 74 мкА. Для строительной пыли величина поверхностного $I_{пов}$ (кривая 2) при увеличении слоя от 0,5 до 2 см возросла в 8 раз и составила 20 мкА. Поверхностный ток графитовой пыли $I_{пов}$ увеличился в 127 раз и составил 440 мкА при увеличении слоя пыли с 0,5 до 2

см. В целом, можно заключить, что с увеличением слоя пыли на поверхности изоляции сопротивление $R_{пов}$ снижается, что приводит к росту тока $I_{пов}$.

Исследования влияния увлажнения на изменение поверхностного сопротивления $R_{пов}$ при толщине слоя пыли 1 см приведены для указанных выше смесей. Увлажнение пыли в процессе работы АД может происходить только во время технологических пауз, когда есть колебания температуры окружающей среды и влажности. Увлажнение обмотки изоляции, покрытой пылью, произведено искусственным орошением. На рис.3 приведена кривая, характеризующая изменение сопротивления чистой изоляции при её увлажнении и последующей сушке для АД типа 4A112M4УЗ.

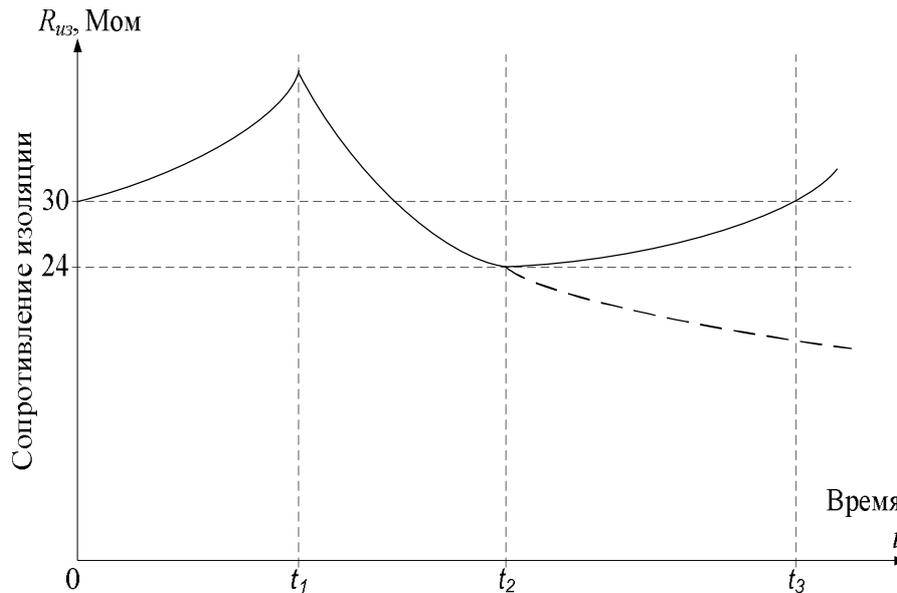


Рис. 3 – Изменение сопротивления изоляции $R_{изз}$ при увлажнении и последующей сушке

В начальный момент после отключения двигателя произведен замер сопротивления изоляции при температуре АД 75°C , для АД 4A112M4УЗ $R_{изз} = 30 \text{ МОм}$. На участке $0 - t_1$ (40 минут) происходит остывание изоляции до температуры окружающей среды, сопротивление изоляции $R_{изз}$ увеличилось до 75 МОм . В момент времени t_1 начинается искусственное увлажнение изоляции, в результате её сопротивление начинает снижаться. При достижении значения сопротивления $R_{изз.н} = 0,8 * R_{изз}$ подключается низковольтный источник питания (70 В) на одну из обмоток. На участке $t_2 - t_3$ идет сушка изоляции. Скорость нагрева составляет $1^{\circ}\text{C}/\text{час}$. В течение 1,5 часа сопротивление изоляции приходит в норму. В момент времени t_3 , сопротивление $R_{изз}$ достигло значения уставки – $R_{изз.н}$, отключается устройство подогрева. На протяжении всей технологической паузы процесс повторяется циклически.

Графики изменения величины поверхностного сопротивления $R_{пов}$ изоляции, покрытой пылью различной толщины, при её увлажнении и последующим нагревом приведены на рис. 4.

Диагностировать запыление поверхности изоляции непроводящей пылью позволяют скоростные характеристики изменения поверхностной проводимости при нагреве изоляции.

Скорость изменения поверхностной проводимости:

$$\frac{dR_{пов}}{dt} = d\rho_{вл} \cdot \rho_{пыли} \cdot \rho_{возд} \frac{l}{s} \quad (11)$$

В табл. 1 приведены скоростные значения для исследованных видов пыли при интенсивности нагрева $1^{\circ}\text{C}/\text{час}$.

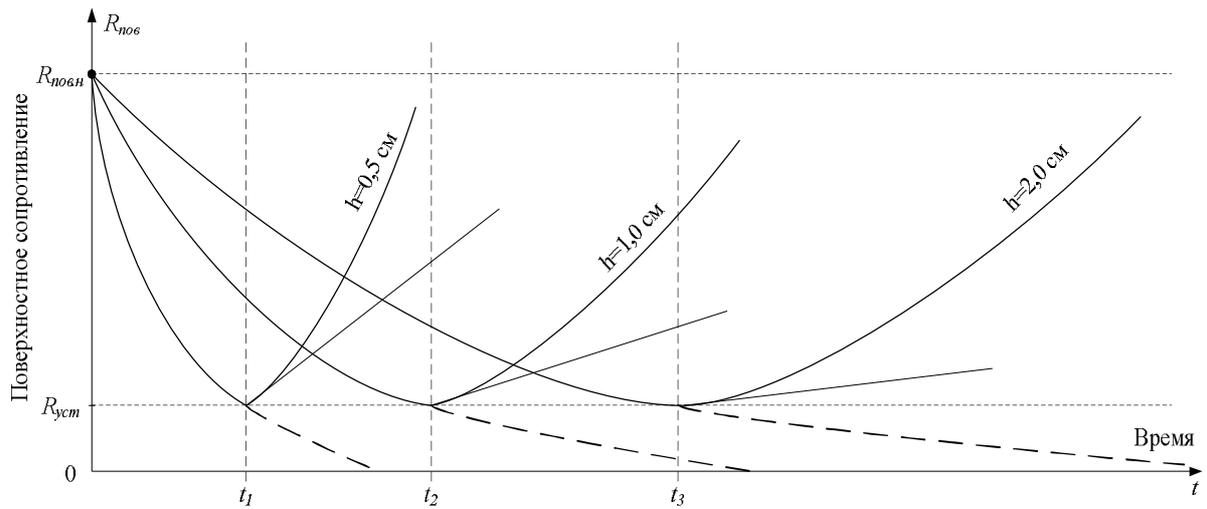


Рис. 4 – Графіки змінення поверхнового опору $R_{пов}$ при зволоженні і нагріві

Таблиця 1

Скорість змінення $R_{пов}$ (МОм/мін)

	$h = 0,5$ см	$h = 1,0$ см	$h = 2,0$ см
Графіт (провідяча)	1,1	0,4	0,07
Окалина і пил (провідяча)	1,3	0,5	0,1
Строительная пил (непровідяча)	0,5	0,08	0,01

Полученные результаты позволили разработать диагностическую карту состояния изоляции обмоток АД, за «1» принимаем состоявшееся событие, за «0» – несостоявшееся (табл. 2).

Таблиця 2

Диагностическая карта состояния изоляции обмотки АД

№ п/п	Вид дефекта	$R_{из.н}$ при $t_{обм} = 70^{\circ}C$ ($R_{из.н} > 0,5$ МОм)	$R_{из} = 0,9 R_{из.н}$	$R_{пов}$	$\frac{dR_{пов}}{dt}$	Выводы
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
Двигатель работает – включен в сеть						
1	Запыление обмотки проводящей пылью	0	0	1	0	Сигнализация о запылении проводящей пылью
Двигатель отключен от сети – технологическая пауза						
1	Естественное старение изоляции	1	0	0	0	АД – исправен
2	Запыление проводящей пылью с увлажнением	0	1	1	0	АД включается сушка изоляции, сигнализация
3	Увлажнение изоляции	1	0	1	0	Сигнализация о запылении

Продолжение таблицы 2

4	Увлажнение с запылением обмотки пылью	1	1	0	0	Включение сушки обмотки
5	Увлажнение с запылением непроводящей пылью	1	1	1	0	Сигнализация о запылении и включение сушки
6	Запыление проводящей и непроводящей пылью с увлажнением	1	1	1	1	Сигнализация и сушка АД

На основании вышеизложенного материала разработан способ и устройство выявления дефектов изоляции и их распознавание для АД, работающих в агрессивных средах [9]. На рис. 5 приведена блок-схема устройства, реализующего указанный способ.

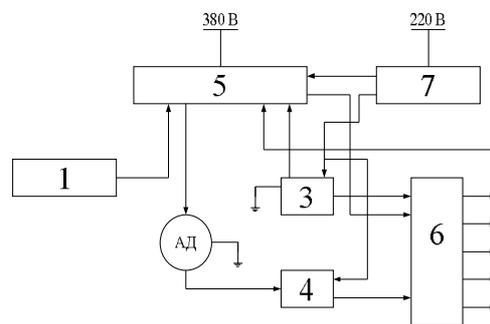


Рис. 5 – Блок-схема устройства

Устройство содержит источник низкого напряжения 1, асинхронный двигатель АД, блок измерения сопротивления изоляции 3, датчик поверхностного состояния 4, блок коммутации и сигнализации 5, микропроцессорный блок 6 и блок питания 7.

Работа устройства основана на циклическом измерении сопротивления изоляции после остановки АД и сравнении с двумя пороговыми значениями. Измерение поверхностной проводимости производится постоянно. Первыми пороговыми значениями являются значения сопротивления и проводимости изоляции, измеренные в момент остановки АД. Второе пороговое значение является предельно допустимой величиной как сопротивления, так и проводимости изоляции, при превышении которого судят о необратимых дефектах изоляции и наличии загрязнения поверхности изоляции проводящей пылью. В процессе нагрева обмоток определяют скорость изменения поверхностной проводимости изоляции и сравнивают её с заданной. По изменению их значений судят об увлажнении изоляции, запылении её поверхности непроводящей либо проводящей пылью.

Выводы

1. Значение разности потенциалов на поверхности обмоток АД зависит от степени неоднородности диэлектрика и неравномерного износа изоляции по длине проводника.
2. Наличие загрязнения поверхности изоляции обмотки статора проводящей или непроводящей пылью вызывает локальные перегрев изоляции в местах максимального скопления пыли, локальное превышение температуры может быть выше допустимой температуры на 8–10°C, что снижает срок службы АД в 2–2,5 раза.
3. Допустимая толщина слоя пыли, по условию дополнительного нагрева изоляции, не должна превышать 1 см для АД мощностью до 35 кВт, 2 см для АД мощностью до 75 кВт, 3 см для АД мощностью 100 кВт и выше.
4. Воздействие влаги на запыленную изоляцию обмоток приводит к снижению сопротивления изоляции, при пуске увеличивает величину токов, протекающих по поверхности изоляции, в 2–3 раза.
5. Измерения скорости поверхностной проводимости позволяет диагностировать допустимую

толщину запыления поверхности изоляции непроводящей пылью.

Список использованных источников

1. Ермолин Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
2. Слоним Н.М. Испытания асинхронных двигателей / Н.М. Слоним. – М. : Энергия, 1980. – 88 с.
3. Назарычев А.Н. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей : учебно-практическое пособие / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев, А.И. Таджикибаев. – М. : Инфра-Инженерия, 2006. – 928 с.
4. Шишкин В.С. Монтаж, наладка и ремонт главных циркуляционных насосов энергоблоков РБМК-1000 и РБМК-1500 / В.С. Шишкин. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 207 с.
5. Пат. 1372506 РФ, МПК⁴ H 02 K 15/12. Способ защиты изоляции обмоток от увлажнения / И.В. Жежеленко, А.М. Липский, В.Е. Кривоносов. – № 4092435; заявл. 12.05.86; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.
6. Пат. 1125707 РФ, МПК⁵ H 02 K 3/30. Способ выявления дефектов в изоляции низковольтных обмоток электрических машин / Э.А. Мазин. – № 3629744; заявл. 29.07.83; опубл. 23.11.84, Бюл. № 43.
7. Pat. EP 2287625 A1, Int. Cl. G 01 R 31/34. Device and method for detecting defects within the insulation of an insulated conducto / Glenn Behrmann. – № 09157841.7; filed 13.08.09; pub. date 23.02.11.
8. Надежность асинхронных электродвигателей / В.Б. Ванеев, В.Д. Главный, В.А. Гостищев, Л.И. Сердюк. – М. : Наука, 1964. – 524 с.
9. Пат. 101849 Україна, МПК G 01 R 31/34. Спосіб виявлення і розпізнавання дефектів ізоляції електродвигунів, які працюють в агресивних середовищах, і пристрій для його реалізації / В.Є. Кривоносов. – № a201104406; заявл. 11.04.11; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.

Bibliography:

1. Ermolin N.P. Reliability of electrical machines / N.P. Ermolin, I.P. Zherikhin. – L. : Energiya, 1976. – 248 p. (Rus.)
2. Slonim N.M. Testing asynchronous motors / N.M. Slonim. – M. : Energiya, 1980. – 88 p. (Rus.)
3. Nazarychev A.N. Reference engineer commissioning, technology improvement and operation of power plants and networks : training and practical guide / A.N. Nazarychev, D.A. Andreev, A.I. Tadzhibaev. – M. : Infra-Inzheneriya, 2006. – 928 p. (Rus.)
4. Shishkin V.S. Installation, commissioning and maintenance of the main circulation pumps power units RBMK-1000 and RBMK-1500 / V.S. Shishkin. – M. : Energoatomizdat, 1992. – 207 p.
5. Pat. 1372506 SU, Int. Cl. H 02 K 15/12. A method for protecting the winding insulation from moisture / I.V. Zhezhenko, A.M. Lipsky, V.E. Krivonosov. – № 4092435; filed 12.05.86; pub. date 07.02.88, Bul. № 5. (Rus.)
6. Pat. 1125707 SU, Int. Cl. H 02 K 3/30. A method of detecting defects in the insulation of low-voltage windings of electric machines / E.A. Mazin. – № 3629744; filed 29.07.83; pub. date 23.11.84, Bul. № 43. (Rus.)
7. Pat. EP 2287625 A1, Int. Cl. G 01 R 31/34. Device and method for detecting defects within the insulation of an insulated conducto / Glenn Behrmann. – № 09157841.7; filed 13.08.09; pub. date 23.02.11.
8. Reliability asynchronous motors / V.B. Benaiah, V.D. Chief, V.A. Gostishchev, L.I. Serdyuk. – M. : Nauka, 1964. – 524 p. (Rus.)
9. Pat. 101849 UA, Int. Cl. G 01 R 31/34. Method of detection and recognition of insulation defects motors that operate in harsh environments and device for its implementation / V.E. Krivonosov. – № a201104406; filed 11.04.11; pub. date 13.05.13, Bul. № 9. (Ukr.)

Рецензент: И.В. Жежеленко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 19.10.2015