

УДК 621.313.333.2

## Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей

В. Е. Кривонос<sup>1)</sup>, С. В. Василенко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Республика Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2015  
Belarusian National Technical University, 2015

**Реферат.** Большое количество асинхронных двигателей работает в запыленной среде. На предприятиях горно-металлургического комплекса на лобовой части изоляции двигателей мощностью до 55 кВт наблюдается слой пыли до 3 см. Следствием этого могут быть локальный перегрев лобовых частей обмоток асинхронных двигателей и преждевременный выход их из строя. Вопрос влияния запыления обмотки на срок службы двигателя изучен очень мало. В современной литературе освещаются в основном экспериментальные исследования. Целью работы являлось получение зависимости дополнительного нагрева обмотки от толщины слоя пыли на ее лобовой части. Обмотка асинхронного двигателя рассматривалась как однородное тело. Тепловой режим асинхронного двигателя принимали как установившийся, ввиду того что время запыления изоляции обмоток значительно больше, чем постоянная времени нагрева двигателя. Полученное выражение позволяет по изменению температуры определить уровень запыления обмотки. Зависимость имеет линейный характер. Тип, размер и мощность двигателя не влияют на локальный перегрев изоляции, так как различие между температурами обмоток при их запыленности для асинхронных двигателей разной мощности не превышает 10 %. Разработано устройство, позволяющее контролировать уровень пыли на обмотке и сигнализировать о необходимости проведения профилактических мероприятий по ее очистке. Принцип работы устройства основан на сравнении результатов измерений двух датчиков температуры, установленных на лобовой части обмотки: один – в верхней части, другой – в нижней. По разнице показаний можно судить о слое пыли, осевшем на лобовой части обмотки. По результатам исследований получен патент на изобретение.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, запыленность, повышенная температура, слой пыли, обмотка, датчик температуры

**Для цитирования:** Кривонос, В. Е. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / В. Е. Кривонос, С. В. Василенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 35–40

---

### Адрес для переписки

Кривонос Валерий Егорович  
Приазовский государственный технический университет  
просп. Metallurgov, 54,  
87500, г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина  
Тел.: +380 97 821-73-25  
yhtverf@mail.ru

### Address for correspondence

Krivososov Valeriy E.  
Priazov State Technical University  
Metallurgov prosp., 54,  
87500, Mariupol, Donetsk obl., Ukraine  
Tel.: +380 97 821-73-25  
yhtverf@mail.ru

---

## Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding

V. E. Krivososov<sup>1)</sup>, S. V. Vasilenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Priazov State Technical University (Mariupol, Republic of Ukraine)

**Abstract.** Large quantity of asynchronous motors work in heavily dusted environments. On the end-winding insulation of the motors to 55 kW operating in the mining and smelting enterprise

there is a 3 cm dust layer, which may lead to the asynchronous motor end-winding local overheat and consequent early breakdown. Contemporary literature allocates insufficient consideration to the issue of studying the impact the winding dust pollution has on the motor lifespan; for the most part they are experimental researches. The article investigates and establishes correlation relationship between the additional winding heating and the end-winding dust layer thickness. The investigation considers the induction motor winding to be a homogeneous solid and assumes the motor thermal conditions steady inasmuch as the winding insulation dust-cover forming time is much greater than the motor-heating time constant. The obtained expression permits determining the winding dust level by temperature variations; the dependence has linear character. Neither the motor type, size, nor the capacity do affect the local insulation overheating since the temperature difference between the windings being dust laden does not exceed 10 % for asynchronous motors of various capacity. The authors develop an appliance that enables the winding dustiness level monitoring and signals of necessity for the preventive cleaning measures implementation. The appliance operation principle is based on measuring results comparison of the two temperature-sensing devices mounted on the end-winding: one – in the upper part, and the other – in the bottom. The differential in the sensors reading-out allows estimating the dust layer sedimentation on the end-winding. A patent of invention has been issued on the investigation results.

**Keywords:** induction motor, dust, high temperature, dust layer, winding, temperature sensor

**For citation:** Krivonosov V. E., & Vasilenko S. V. Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 35–40 (in Russian)

Безаварийная работа асинхронных двигателей (АД) на промышленных предприятиях – важный фактор, влияющий на их производительность. В подавляющем большинстве случаев (85–90 %) отказы АД связаны с повреждением изоляции обмоток [1, 2].

АД, установленные на предприятиях горно-добывающей, металлургической, химической и других отраслей промышленности, часто работают в условиях агрессивной среды и повышенной запыленности. Вместе с охлаждающим воздухом мелкодисперсная пыль, характерная для коксохимических, металлургических и других видов производств, проникает внутрь АД. Запыленность вентиляционных каналов и лобовых частей обмоток статора ухудшает охлаждение двигателя, что приводит к дополнительному росту температуры изоляции обмоток АД.

Надежность работы АД в подавляющем большинстве случаев зависит от надежности изоляции его обмоток [3, 4]. Длительность работы изоляции на 90 % зависит от соблюдения теплового режима АД. Локальный перегрев изоляции участков обмотки АД, работающих в условиях запыленности, приводит к снижению срока эксплуатации изоляции всей обмотки. Своевременное выявление предельно допустимого запыления обмотки позволяет производить технический осмотр по факту возникновения его необходимости и не допускать ускоренного теплового старения изоляции. В современных экономических условиях многие предприятия вынуждены в целях экономии снижать объемы ремонтно-профилактических работ, поэтому своевременное удаление пыли с поверхности изоляции обмоток статора делает поставленную задачу актуальной.

От 40 до 60 % пробоев изоляции на корпус вызваны повреждением изоляции в лобовой части обмотки [5]. Из них, по данным электромеханических и электроремонтных цехов предприятий черной металлургии, от 60 до 80 % локальных пробоев изоляции связаны с ее перегревом в месте при замыкания лобовой части обмотки к сердечнику. Выход из строя обмотки

статора вызван совместным действием динамических усилий и локальным перегревом изоляции от загрязнения пылью. Мониторинг покрытия изоляции лобовых частей обмотки АД пылью в цехах комбинатов «Азовсталь» и имени Ильича показал в местах пробоя изоляции на корпус статора наличие мелкодисперсной пыли толщиной 3 см для АД мощностью до 55 кВт и более 5 см – для двигателей мощностью 100 кВт.

В современной литературе вопрос влияния запыленности обмоток практически не затронут. Изучение влияния толщины пыли на дополнительный нагрев обмоток носит в основном экспериментальный характер. Практические исследования [6] показали, что наличие на поверхности статорной обмотки слоя угольной пыли толщиной 0,9 мм приводит к повышению ее нагрева примерно на 10 °С.

Определение толщины слоя пыли на поверхности изоляции, при котором температура обмотки превысит допустимое значение для соответствующего класса изоляции не более чем на 5 °С, являлось предметом исследования авторов статьи. Время запыления изоляции обмоток АД – значительно большая величина, чем постоянная времени нагрева АД. Рассмотрим превышение температуры изоляции под слоем пыли в установившемся тепловом режиме АД.

Обмотку статора АД принимали как однородное тело, контактируемое с окружающей средой. На основании [7] уравнение теплового баланса имеет вид

$$\Delta P dt = k_{то} s_{п} \Delta \Theta dt + cm d\Theta, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности в АД;  $k_{то}$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности АД;  $s_{п}$  – площадь поверхности охлаждения;  $\Delta \Theta$  – разность температур между обмоткой АД и окружающим воздухом;  $m$  – масса обмотки;  $c$  – теплоемкость меди.

Для установившегося режима уравнение (1) принимает вид

$$\Delta P = k_{то} s_{п} (\Theta_{об} - \Theta_{о.с}), \quad (2)$$

где  $\Theta_{об}$  – температура обмотки;  $\Theta_{о.с}$  – температура окружающей среды.

Ослабление теплового потока  $q$  от изоляции обмотки статора до охлаждающего воздуха через плоско-параллельные стенки пыли определяли на основании [8, 9] из выражения

$$q = -\alpha \frac{d\Theta}{dx}, \quad (3)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности пыли, осевшей на обмотке;  $\Theta$  – температура изменения потока вдоль оси  $x$ .

На основании уравнения теплового баланса, приведенного в (2), и формулы (3) получено выражение для определения толщины слоя пыли из условия допустимого нагрева АД

$$h = \frac{\alpha(\Theta_{yc2} - \Theta_{yc1})}{\frac{\Delta P}{s_n} - \Theta_{yc1} k_{ro}}, \quad (4)$$

где  $\Theta_{yc1}$  – температура изоляции, непокрытой пылью;  $\Theta_{yc2}$  – то же под слоем пыли толщиной  $h$ .

Полученное выражение позволит определить толщину слоя пыли, при которой температура обмоток АД повысится на величину, равную  $(\Theta_{yc2} - \Theta_{yc1})$ , и может быть применено в системах диагностики и прогнозирования работы АД.

Разработаны способ и устройство тепловой защиты обмоток АД, которые работают в запыленной среде [10]. Схема устройства представлена на рис. 1.

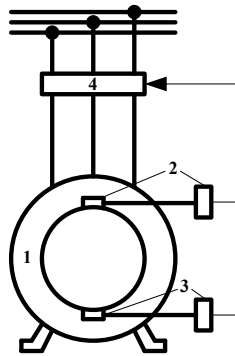


Рис. 1. Лабораторная модель устройства по определению уровня запыления обмоток статора: 1 – обмотка статора АД; 2 – датчик температуры DS18B20 и его преобразователь, который измеряет температуру верхней лобовой части обмотки статора; 3 – датчик температуры DS18B20 и его преобразователь, измеряющий температуру нижней лобовой части обмотки статора; 4 – блок коммутации и сигнализации

Fig. 1. Laboratory model of the device for detecting the dust level of stator winding:

- 1 – stator winding of AM (asynchronous motor);
- 2 – temperature sender DS18B20 and its converter measuring the temperature in the upper end-part of the stator winding;
- 3 – temperature sender DS18B20 and its converter measuring the temperature in the bottom end-part of the stator winding;
- 4 – switching and alarm block

На лобовую часть обмотки статора устанавливают два датчика температуры DS18B20, которые одновременно измеряют температуру верхней и диаметрально противоположной – нижней – частей обмотки. Каждый датчик имеет свой преобразователь, обрабатывающий сигналы и отправляющий их на блок коммутации и сигнализации. В этом блоке происходит сравнение полученных данных, и по их разнице делается вывод об уровне запыления обмотки. Устройство защищает АД от тепловой перегрузки, определяет ее причину, отделяя запыление от токовых перегрузок и витковых замыканий, своевременно оповещает о необходимости проведения профилактических работ по очищению обмоток от пыли, что повышает надежность и увеличивает срок эксплуатации и безаварийной работы АД.

Результаты моделирования для двигателей мощностью до 55 кВт при различных значениях теплопроводности материалов приведены на рис. 2.

Анализ графиков на рис. 2 позволил сделать следующие выводы:

- чем меньше коэффициент теплопроводности материала, осевшего на поверхности обмоток, тем выше температура обмоток под этим слоем. Например, при слое пыли, равном 1,5 см (рис. 2с), температура обмоток при  $\lambda = 0,75$  Вт/(м·С) составляет 127 °С, а при  $\lambda = 0,2$  Вт/(м·С) она равна 146 °С;

- локальное превышение температуры изоляции обмотки на 8–10 °С при толщине запыления обмоток 1,0–1,5 см снижает срок эксплуатации АД в два раза, зависит непосредственно от толщины слоя пыли и ее теплопроводности;

- тип, размер и мощности АД не влияют на локальный перегрев изоляции, так как различие между температурами обмоток при их запыленности для АД различной мощности не превышает 10 %.

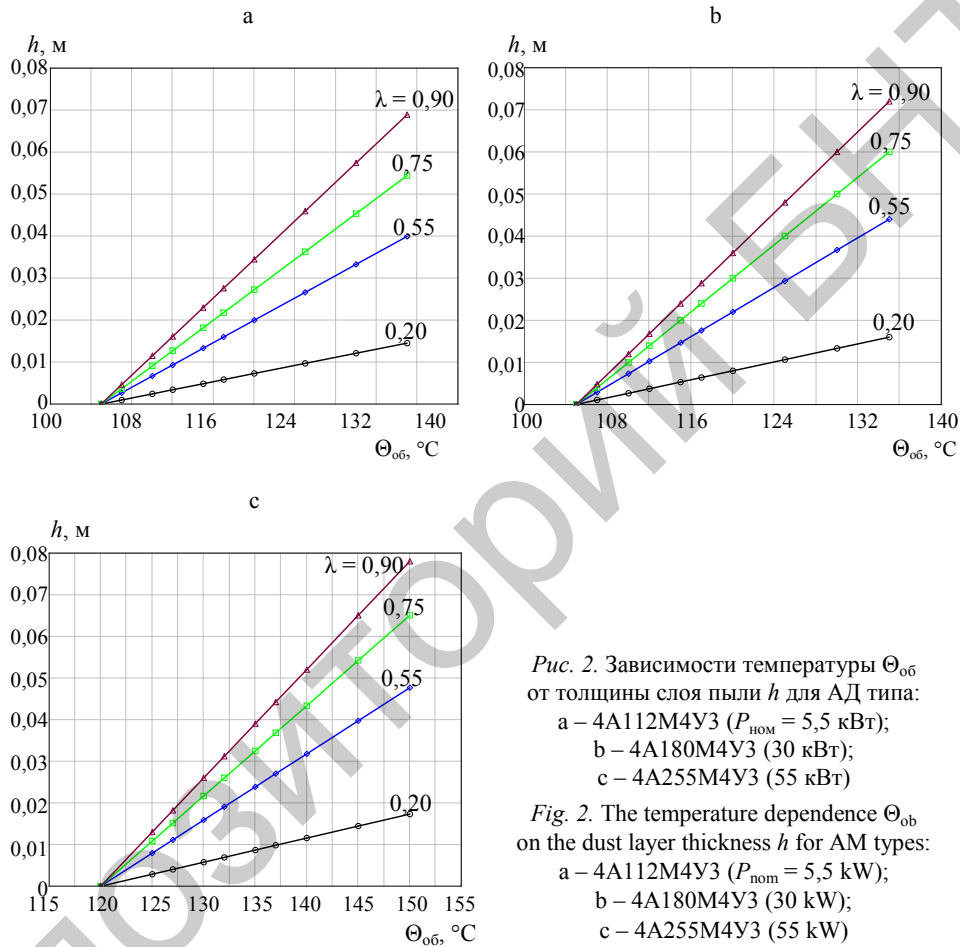


Рис. 2. Зависимости температуры  $\Theta_{об}$  от толщины слоя пыли  $h$  для АД типа:

a – 4A112M4Y3 ( $P_{ном} = 5,5$  кВт);

b – 4A180M4Y3 (30 кВт);

c – 4A255M4Y3 (55 кВт)

Fig. 2. The temperature dependence  $\Theta_{об}$  on the dust layer thickness  $h$  for AM types:

a – 4A112M4Y3 ( $P_{ном} = 5,5$  kW);

b – 4A180M4Y3 (30 kW);

c – 4A255M4Y3 (55 kW)

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что длительная работа асинхронных двигателей в условиях запыленности на многих промышленных производствах приводит к образованию на поверхности лобовых частей обмотки слоя пыли толщиной 3 см и более. Температура изоляции обмотки статора превышает допустимую на 9–19 °С.

2. Полученная математическая зависимость между дополнительным нагревом изоляции при локальном запылении позволила разработать способ и устройство своевременного выявления предельно допустимого температурного перегрева изоляции.

3. Для АД в диапазоне мощностей от 5,5 до 50,0 кВт с 10%-й погрешностью превышение температуры обмотки статора при слое пыли 1 см с теплопроводностью  $\lambda = 0,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  составит  $3 \text{ °C}$ , с  $\lambda = 0,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  оно равно  $5 \text{ °C}$ , с  $\lambda = 0,55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  превышение  $8 \text{ °C}$ , а с  $\lambda = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  оно будет  $19 \text{ °C}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

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. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. М.: Высш. шк., 1985. 232 с.
4. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
5. Яманов, С. А. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции / С. А. Яманов, Л. В. Яманова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
6. Надежность асинхронных электродвигателей / В. Б. Ванев, [и др.]. М.: Наука, 1964. 524 с.
7. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. М.: Энергия, 1984. 240 с.
8. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. М.: Энергия, 1977. 344 с.
9. Филиппов, И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. Л.: Энергия, 1974. 383 с.
10. Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запыленому середовищі: пат. 107898 Україна: Н02Р 5/04, Н02К 15/12, Н02Н 5/10, G01К 13/08 / В. Е. Кривоносов, І. В. Жежеленко, О. В. Московець, С. В. Василенко; заявл. 26.02.2014; опубл. 25.02.2015.

Поступила 30.04.2015 Подписана в печать 19.06.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

## REFERENCES

1. Ermolin N. P., & Zherikhin I. P. (1976) *Reliability of Electrical Machines*. Leningrad, Energia. 248 p. (in Russian).
2. Slonim N. M. (1980) *Testing Asynchronous Motors*. Moscow, Energia. 88 p. (in Russian).
3. Kotelenets N. F., & Kuznetsov N. L. (1985) *Testing and Reliability of Electrical Machines*, Moscow, Vysshaya shkola. 232 p. (in Russian).
4. Vorobyov V. E., & Kucher V. Ya. (2004) *Forecasting the Life Time of Electric Machines*. St. Petersburg, SZTU. 56 p. (in Russian).
5. Yamanov S. A., & Yamanova L. V. (1990) *Aging, Durability and Reliability of the Electrical Insulation*. Moscow, Energoatomizdat. 176 p. (in Russian).
6. Vaneev V. B., Glavny V. D., Gostishchev V. A., & Serdyuk, L. I. (1964) *Reliability of Induction Motors*. Moscow, Nauka. 524 p. (in Russian).
7. Syromyatnikov I. A. (1984) *Modes of Operation of Asynchronous and Synchronous Motors*. Moscow, Energia. 240 p. (in Russian).
8. Mikheev M. A., & Mikheeva I. M. (1977) *Fundamentals of Heat Transfer*. Moscow, Energia. 344 p. (in Russian).
9. Filippov I. F. (1974) *Fundamentals of heat Transfer in Electrical Machines*. Leningrad, Energia. 383 p. (in Russian).
10. Krivonosov V. E., Zhezhelenko I. V., Moskovets O. V., & Vasilenko S. V. (2015) *Method of Control and Thermal Protection of Windings of Electrical Machines Working in a Dusty Environment*. Patent Ukraine Number 107898 (in Ukrainian).