

Обоснование допустимого дополнительного теплового износа изоляции трехфазного асинхронного электродвигателя в послепусковой период

С. А. Квитка, А. Ю. Вовк, Д. Н. Нестерчук, А. А. Стребков

Таврический государственный агротехнологический университет, г. Мелитополь, Украина

Corresponding author. E-mail: sergei.kvitka1965@gmail.com, aleksvovk020405@gmail.com, dina-nesterchuk@ukr.net sashko@yandex.ru

Paper received 23.01.18; Revised 28.01.18; Accepted for publication 29.01.18.

Аннотация. Исследован тепловой переходный процесс при пуске асинхронных электродвигателей, а также процесс теплового износа изоляции в послепусковой период. На основании проведенных исследований получены выражения для определения дополнительного теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период и обоснована величина допустимого дополнительного теплового износа на один аварийный пусковой режим. Полученные результаты могут быть использованы для разработки устройств функционального диагностирования электродвигателей и защиты их от аварийных пусковых режимов.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, тепловой износ, изоляция, диагностирование, послепусковой период.

Введение. Пусковые режимы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором сопровождаются высокими пусковыми токами, что приводит к значительному нагреву обмоток статора и ускорению теплового износа их изоляции. Если же электродвигатель запускается в условиях пониженного напряжения, то в этом случае время пуска существенно увеличивается, а в некоторых случаях двигатель может вообще не запуститься, что приведёт к значительному расходу его ресурса или выходу двигателя из строя.

Нередки и пуски электродвигателей под нагрузкой, что тоже негативно сказывается на состоянии их изоляции. Расчет дополнительного теплового износа изоляции в послепусковой период в зависимости от уровня питающего напряжения и загрузки рабочей машины позволяет определить лишь его количественный показатель, поэтому актуальной задачей для обеспечения ресурсосбережения при пусках электродвигателей является обоснование величины допустимого дополнительного теплового износа изоляции асинхронных электродвигателей в послепусковой период.

Краткий обзор публикаций по теме. Анализ работ в этом направлении показал, что вопросу исследования износа изоляции посвящено немало публикаций, однако при этом совместно не учитывается уровень питающего напряжения и коэффициент загрузки электродвигателя [1].

Для уменьшения теплового износа изоляции предложены варианты снижения потерь в электродвигателе путем модернизации его конструкции [2], а также метод минимизации расхода его ресурса [3]. Но при этом остаются не до конца исследованными закономерности теплового износа изоляции при пуске электродвигателей с отклонением от номинального режима, в частности – при разном уровне питающего напряжения. В [4, 5] проведены исследования расхода ресурса изоляции, учитывая как уровень напряжения, так и коэффициент загрузки двигателя, однако отсутствует обоснование допустимой величины дополнительного теплового износа изоляции на один пусковой режим.

Цель. Поэтому целью статьи является обоснование допустимого значения дополнительного теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования является тепловой переходный процесс при пуске асинхронного электродвигателя, работающего в паре с рабочей машиной. Результаты, представленные в

статье, получены на основании аналитических исследований.

Результаты и их обсуждение. Тепловой переходный процесс при пуске асинхронного электродвигателя весьма скоротечен, поэтому с достаточной степенью точности можно принять, что он протекает адиабатически [5].

Составим уравнение теплового баланса статорной обмотки электродвигателя:

$$Cdt = P_0(1 + \alpha\tau)dt, (1)$$

где C – теплоемкость обмотки Дж/°С; P_0 – потери активной мощности при температуре окружающей среды, Вт; α – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, 1/°С; τ – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С; t – текущее время, с.

Приведем уравнение (1) к следующему виду:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, (2)$$

$$\text{где } T_n = \frac{C}{\alpha P_0}, (3)$$

Решение уравнения (2) даст выражение текущего превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды:

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{\text{нач}} \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha}, (4)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ – начальное превышение температуры обмотки, °С.

Потери активной мощности в обмотке при температуре окружающей среды:

$$P_0 = 3r_0 I_n^2, (5)$$

где r_0 – активное сопротивление одной фазы обмотки при температуре окружающей среды, Ом; I_n – действующее значение пускового электрического тока, А.

Подставив (5) в (3), получим выражение постоянной времени нагрева обмотки статора при пуске электродвигателя:

$$T_n = \frac{C}{3\alpha r_0 I_n^2}, (6)$$

В [6] был исследован электромеханический переходный процесс при пуске асинхронного электродвигателя и получены зависимости времени его разгона в функции загрузки и уровня питающего напряжения на трех основных участках: от нуля до минимальной угловой скорости, от минимальной угловой скорости до критической и от критической угловой скорости до номинальной.

Таким образом, зная время разгона электродвигателя на каждом участке, можно найти максимальное превышение температуры в конце каждого участка:

$$\tau_{mi} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{нач.i}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 I_{нi}^2 t_i}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (7)$$

где τ_{mi} – максимальное превышение температуры обмотки статора в конце любого участка разгона, °C; t_i – время разгона, с; i – номер участка.

В соответствии с [6] величину $I_{нi}^2 t_i$ обозначим буквой Π_i и будем считать импульсом квадрата пускового тока на каждом участке разгона:

$$\Pi_i = I_{нi}^2 t_i, \quad (8)$$

Тогда (7) можно переписать так:

$$\tau_{mi} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{нач.i}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_i}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (9)$$

Представим графически импульс квадрата пускового тока на первом участке разгона (рис. 1). Введем обозначения: $I_{н0}$ и $I_{н1}$ – действующие значения пускового тока в начале и конце первого участка разгона, t_1 – время разгона электродвигателя на первом участке.

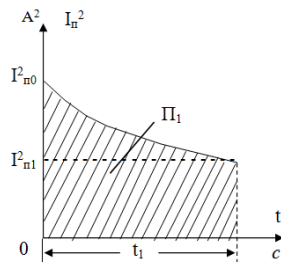


Рис. 1. Графическое изображение импульса квадрата пускового тока на первом участке разгона

Как видно из рис. 1, заштрихованная область соответствует импульсу квадрата пускового тока на первом участке. С определенной степенью точности можем принять, что она имеет форму трапеции. В этом случае импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на первом участке запишется так:

$$\Pi_1 = \int_0^{t_1} I_{н1}^2 dt \approx \frac{I_{н0}^2 + I_{н1}^2}{2} t_1, \quad (10)$$

а максимальное превышение температуры обмотки статора на этом же участке запишется так:

$$\tau_{m1} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_0\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (11)$$

Аналогично можем записать выражения максимального превышения температуры обмотки статора и импульса квадрата пускового тока на каждом из участков:

$$\tau_{m2} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{m1}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_2}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (12)$$

$$\Pi_2 = \frac{I_{н1}^2 + I_{н2}^2}{2} t_2, \quad (13)$$

$$\tau_{m3} = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_{m2}\right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_3}{c}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (14)$$

$$\Pi_3 = \frac{I_{н2}^2 + I_{н3}^2}{2} t_3, \quad (15)$$

Учитывая скоротечность процесса нагрева обмотки, принимаем, что она достигает максимального превышения температуры в момент времени $t=0$. В послепусковой период охлаждения обмотки скорость изменения температуры будет небольшой в соответствии с кривой охлаждения:

$$\tau = \tau_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_m e^{-\frac{t}{T}}, \quad (16)$$

Поэтому можно сделать вывод, что основной тепловой износ изоляционной конструкции в результате пускового режима происходит в послепусковой период. Скорость теплового износа изоляции находим так:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{\frac{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_n\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_m e^{-\frac{t}{T}} + \theta_{cp} + 273}\right)}{n}}, \quad (17)$$

где ε – текущая скорость теплового износа изоляции, бч/ч; ε_n – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч; B – параметр, характеризующий класс изоляции, К; T – постоянная времени нагрева электродвигателя, с; θ – абсолютная номинальная температура изоляции, К; θ_{cp} – температура окружающей среды, °C.

Дополнительный тепловой износ изоляции в послепусковой период происходит на протяжении пяти постоянных времени нагрева и может быть найден так:

$$E_{доп} = \int_0^{5T} \varepsilon dt - 5T\varepsilon_n, \quad (18)$$

Как видим, дополнительный тепловой износ изоляции зависит от его скорости, которая, в свою очередь, является функцией превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды и зависит от времени разгона электродвигателя, на которое влияют уровень питающего напряжения и коэффициент загрузки рабочей машины.

Это может быть использовано при разработке устройств диагностирования пусковых режимов асинхронных электродвигателей, однако для этого необходимо обоснование допустимого значения дополнительного теплового износа изоляции в послепусковой период. Найдем его из расчета на один аварийный пусковой режим, используя [7].

Запланированный тепловой износ изоляции в течение года работы электродвигателя определяем так:

$$E_{г.н} = \frac{T_n}{T_p}, \quad (19)$$

где T_n – базовый срок службы изоляции асинхронного электродвигателя, бч; T_p – расчетный срок службы электродвигателя (рассчитанный заводом-изготовителем), лет.

Фактический тепловой износ изоляции за год работы электродвигателя чаще всего меньше допустимого и зависит от загрузки:

$$E_{г.ф} = N \cdot \varepsilon_{ср.ф}, \quad (20)$$

где N – количество часов работы электродвигателя в году, ч; $\varepsilon_{ср.ф}$ – эквивалентная среднегодовая скорость теплового износа изоляции, бч/ч.

$$\varepsilon_{ср.ф} = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_{ф} + \theta_{ср.ф} + 273}\right)}, \quad (21)$$

где $\tau_{ф}$ – эквивалентное среднегодовое превышение температуры обмотки электродвигателя за время работы, °C; $\theta_{ср.ф}$ – эквивалентная среднегодовая температура окружающей среды, °C.

В свою очередь, эквивалентное среднегодовое превышение температуры определяется так:

$$\tau_{ф} = \tau_n \frac{a + k_{ф}^2}{a + 1}, \quad (22)$$

где a – коэффициент потерь в электродвигателе; $k_{ф}$ – эквивалентный среднегодовой коэффициент загрузки электродвигателя.

Таким образом, допустимый дополнительный износ изоляции обмотки электродвигателя в течение года будет равен:

$$\Delta E_{г} = E_{г.н} - E_{г.ф}, \quad (23)$$

В течение года работы электродвигателя происходит n аварийных пусковых режимов, с учетом чего может быть определен допустимый дополнительный износ изоляции на одну тепловую перегрузку:

$$E_{доп} = \frac{\Delta E_{г}}{n}, \quad (24)$$

где n – вероятное количество аварийных пусков в течение года.

Так как электродвигатель может работать в различных номинальных режимах, то выражение (24) примет вид:

$$E_{\text{доп}} = \frac{\Delta E_{\text{г}}}{k_p \cdot n}, \quad (25)$$

где k_p – коэффициент, учитывающий номинальный режим работы электродвигателя.

После подстановки (19) – (23) в (25) получаем:

$$E_{\text{доп}} = \frac{1}{k_p \cdot n} \left(\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{п}}} - N \cdot \varepsilon_{\text{н}} e^{\left(\frac{1}{\theta_{\text{н}}} - \frac{1}{\frac{a+k_{\text{ф}}^2}{a+1} + \theta_{\text{ср.ф}} + 273} \right)} \right), \quad (26)$$

Зависимость допустимого дополнительного теплового износа изоляции электродвигателя АИР100S2У3 на один аварийный пусковой режим в течение года, рассчитанная по указанным выражениям, представлена на рис.2.

Согласно статистическим данным, вероятное количество аварийных пусков электродвигателя в течение года составляет от 50 до 100. Таким образом, значение допустимого дополнительного теплового износа изоляции электродвигателя на один аварийный пусковой режим составляет:

$$E_{\text{доп}} = 2 \dots 4 \text{ бч.}$$

Полученное значение допустимого дополнительного теплового износа изоляции может быть использовано при выборе уставки предполагаемого устройства защи-

ты от аварийного пускового режима асинхронного электродвигателя.

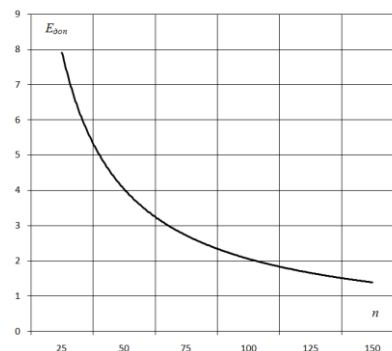


Рис. 2. Зависимость допустимого дополнительного теплового износа изоляции электродвигателя АИР100S2У3 на один аварийный пусковой режим в течение года

Выводы. В результате проведенных исследований были получены выражения для определения дополнительного теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период, а также обосновано его допустимое значение на один аварийный пусковой режим, что может быть использовано при разработке устройств функционального диагностирования электродвигателей и их защиты от аварийных пусковых режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчаров С.В. Ресурсоэнергосберегающие эксплуатационные режимы силового электрооборудования / С. В. Овчаров // Аграр Медиа Груп, 2012. – 293 с.
2. Hung N. T. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses [Text]/N.T.Hung, N.C.Thien, T.P.Nguyen, V.S.Le, D.A. Tuan/Lecture Notes in Electrical Engineering.-2014.-P.497-507.
3. Grouni S. Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control [Text] / S. Grouni, R. Ibtouen, M. Kidouche, O. Touhami // International Journal of Systems Control. – 2010. – Vol. 1, № 4. – P. 163–169.
4. Овчаров С. В. Аналитическое исследование расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период [Текст] / С. В. Овчаров, О. А. Стребков // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Вип. 12. Т. 2 – Мелітополь, ТДАТУ, 2012. – С. 73–80.
5. Овчаров С. В. Дополнительный тепловой износ изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период [Текст] / С. В. Овчаров, О. А. Стребков // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Вип. 13. Т. 2 – Мелітополь, ТДАТУ, 2013. – С. 172–177.
6. Вовк О. Ю. Розробка пристрою, який забезпечує ресурсозберігаючий пуск асинхронних електродвигунів при зниженій напрузі [Текст] / О. Ю. Вовк, С. О. Квітка, Д. М. Нестерчук, О. А. Стребков, О. В. Ковальов // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2017. – Т. 1, N 1(33). – С. 37–44.
7. Овчаров, В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В. В. Овчаров. – Киев: УСХА, 1990. – 168 с.

REFERENCES

1. Ovcharov S. Resources and energy saving operating modes of power electrical equipment / S. Ovcharov // Agrar Media Group, 2012. – 293 p.
2. Hung N. T. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses [Text] / N. T. Hung, N. C. Thien, T. P. Nguyen, V. S. Le, D. A. Tuan // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2014. – P. 497–507.
3. Grouni S. Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control [Text] / S. Grouni, R. Ibtouen, M. Kidouche, O. Touhami // International Journal of Systems Control. – 2010. – Vol. 1, № 4. – P. 163–169.
4. Ovcharov S. Analytical investigation of resource isolation expense of asynchronous motor in afterstarting period [Text] / S. Ovcharov, O. Strebkov // Praci Tavria State Agrotechnological University. – N 12, Vol. 2. – Melitopol, TSATU, 2013.-P. 73-80.
5. Ovcharov S. The additional heat expense of resource isolation of asynchronous motor in afterstarting period [Text] / S. Ovcharov, O. Strebkov // Praci Tavria State Agrotechnological University. – N 13, Vol. 2. – Melitopol, TSATU, 2013. – P. 172-177.
6. Vovk O. Development of a device providing resource-saving start-up of induction motors under reduced voltage [Text] / O. Vovk, S. Kvitka, D. Nesterchuk, O. Strebkov, O. Kovalyov // Technology audit and production reserves. – 2017. – T. 1, N 1(33). – P. 37–44.
7. Ovcharov, V. V. (1990). Operational modes and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production. Kyiv: Publ. USH, 168.

Method of determining heat additional wear of isolation of three-phase induction motor in the post launch period

S. Kvitka, A. Vovk, D. Nesterchuk, A. Strebkov

Abstract. The thermal transition process at the start-up of asynchronous electric motors, and process heat insulation degradation in post launch period. On the basis of the conducted research, the obtained expressions to define additional thermal insulation degradation induction motor in the post launch period is justified and allowable additional thermal wear for one emergency start-up mode. The obtained results can be used for development of devices for functional diagnostics of electric motors and protect them from emergency starting mode.

Keywords: induction motor, thermal wear, insulation, diagnostics, afterstarting period.