

## АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Исследовано тепловое состояние и термическая стойкость изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором методом эквивалентной тепловой схемы в функции от скольжения при разных способах управления. Разработанная математическая модель позволит оптимально по мощности использовать крановые двигатели, рассчитанные для повторно-кратковременного режима, для работы в продолжительном режиме.*

*Досліджено тепловий стан та термічна стійкість ізоляції асинхронного двигуна з фазним ротором методом еквівалентної теплової схеми у функції від ковзання при різних способах керування. Розроблена математична модель дозволить оптимально по потужності використовувати кранові двигуни, розраховані для повторно-короткочасного режиму, для роботи в тривалому режимі.*

*Thermal condition and thermal stability asynchronous motor with phase rotor isolation with help equivalent thermal circuit method how function of slip for different type of control drives system are investigated. Real mathematical model solved optimal power characteristic for crane asynchronous motor purpose in recursive short - time mode for continuous running duty are permitted.*

В настоящее время в конвейерных системах используются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Многие из конвейеров имеют недостаточно жесткую кинематическую цепь, содержащую упругие механические звенья, что влияет на выбор типа электродвигателя и системы управления из-за необходимости демпфирования механических колебаний при пуско-тормозных режимах работы. При этом не обеспечивается плавность переходных процессов – ограничение ускорения и рывка с целью исключения раскачивания или пробуксовки механизма и снижения динамических усилий при наличии упругих связей. Конвейер относится к механизмам непрерывного действия с постоянной распределенной нагрузкой. Режим работы АД в таком механизме – продолжительный (S1). Применение АД с фазным ротором в конвейерных системах обеспечивает плавный пуск при разгоне и торможении конвейера, а также регулировку скорости привода без снижения статического момента на валу. АД с фазным ротором в основном используются в крановых механизмах, работающих только в повторно – кратковременном режиме. Они обеспечивают жесткую механическую характеристику при широком регулировании в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора и имеют высокие пусковые и максимальные моменты. В связи с достаточно большим распространением крановых АД с фазным ротором, которые имеют значительный удельный вес во всем классе АД с фазным ротором, а также учитывая перечисленные выше требования к электроприводу конвейерных механизмов, возникла задача оценки возможности применения крановых АД с фазным ротором к конвейерным системам с целью повышения их производительности.

Для решения поставленной задачи и обеспечения эксплуатационной надежности АД необходимо оценить термическую стойкость изоляции при различных способах управления электроприводов.

Рассмотрим такие наиболее известные типы управления для АД с фазным ротором, как асинхронно-вентильный каскад (АВК), импульсно-ключевое управление (ИР), а также резисторно-ступенчатое управление (PCY). Для исследования стационарных и нестационарных тепловых режимов АД наиболее предпочтительными являются методы, основанные на применении метода эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [3-6]. Общий вид уравнения теплового баланса для i-го узла ЭТС (конструктивного элемента АД) [3]

$$\frac{d\Theta_i}{dt} = \sum_{k=1}^m \alpha_{ik} \Theta_k + W_i, \quad (1)$$

где

$$\alpha_{ik} = \frac{\lambda_{ik}}{c_i}, \quad W_i = \frac{P_i}{c_i}.$$

Элементы изоляции активной зоны статора и ротора значительно различаются по своим теплофизическим свойствам и, следовательно, имеют различную термическую стойкость. Поэтому для определения теплового ресурса и срока службы каждого из них для кранового АД типа МТФ-111-6 была разработана расширенная ЭТС содержащая 45 узлов (элементов) с более детальной дискретизацией изоляции АД [2]. При определении тепловых проводимостей элементов ЭТС учитывалось изменение скорости турбулентного течения воздуха внутри АД, вызванное изменением скорости вращения ротора, путем пересчета условий теплосъема [4]. Расчет тепловых переходных процессов выполнен методом Рунге-Кутты системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка,

которые описывают ЭТС и составлены на основе метода узловых потенциалов [2].

Эквивалентность тепловых состояний двигателя в повторно-кратковременном режиме S3 и в продолжительном режиме S1 определялась по методу эквивалентных греющих потерь [1,6]

$$\Delta P_{\Sigma(s1)} = \frac{\Delta P_{\Sigma(пв)} t_p + A}{t_p + \beta t_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – эквивалентные суммы греющих потерь в обмотках;  $t_p$ ,  $t_0$  – продолжительность работы и паузы;  $\beta$  – коэффициент ухудшения охлаждения обмоток статора и ротора за время паузы;  $A$  – эквивалентное количество тепла, выделяющееся в обмотках статора и ротора за время переходных процессов.

Условие эквивалентности тепловых состояний двигателя выполняется для основного номинального режима S3-40% при  $P_n=3,5\text{кВт}$ ,  $M_{S3-40\%} = M_n$ , а для режима S1 при  $P=2,4\text{кВт}$ ,  $M_{S1}=0,62M_{S3-40\%}$ .

На рис.1 приведены результаты расчета для наиболее термически нагруженного элемента АД, а именно лобовой части обмотки статора, в виде зависимостей превышения максимальной температуры  $\Theta^*_{\max}$  при разных значениях рабочего скольжения  $s$  для режимов работы S1 и S3-40% при управлении АВК, ИР и РСУ.

Согласно рис.1 в режиме S1 с ростом рабочего скольжения  $s$  имеет место значительное превышение температуры  $\Theta^*_{\max}$  при ИР и АВК (кривые 1 и 2) относительно РСУ (кривая 3). Это вызвано тем, что при управлении АВК и ИР в обмотках статора и ротора АД протекают несинусоидальные токи, вызывающие дополнительный их перегрев. Характер поведения кривых 1 и 2 отражает характер изменения тока в обмотках статора и ротора при ИР и АВК. При этом, в диапазоне рабочих скольжений  $s = 0,3-0,8$  при управлении АВК АД подвержен большей термической нагрузке, чем при ИР.

Значения превышения температуры  $\Theta^*_{\max}$  для режимов S1 и S3-40% при АВК (кривые 2 и 5 соответственно) и при ИР (кривые 1и 4) практически совпадают. Однако, при РСУ с ростом рабочего скольжения  $s$  температура  $\Theta^*_{\max}$  (кривая 3) в режиме S1 значительно превышает температуру  $\Theta_{\max}$  в режиме S3-40% (кривая 6). Это вызвано ухудшением условий охлаждения и изменением интенсивности тепловых процессов.

После выполнения условия эквивалентности тепловых состояний АД в режимах S3-40% и S1 оценивался срок службы изоляции, определяемый в соответствии с [5],

$$T^* = \frac{T_{\Theta}}{T_{\Theta_n}} = e^{-\frac{\Theta - \Theta_n}{\Delta\Theta}}, \quad (3)$$

где  $T_{\Theta}$  – срок службы изоляции при повышенной температуре  $\Theta$  °С, лет;  $T_{\Theta_n}$  – базовый срок службы

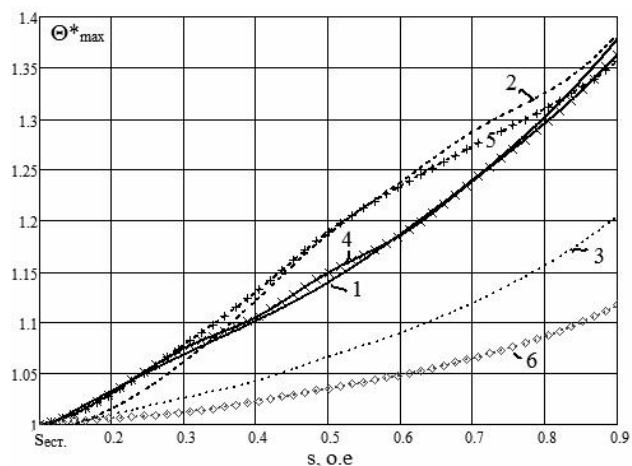


Рис. 1. Максимальное превышение температуры лобовой части обмотки статора в виде функции  $\Theta^*_{\max}(s)$  для режима S1: 1 – ИР; 2 – АВК; 3 – РСУ; для S3-40%: 4 – ИР; 5 – АВК; 6 – РСУ

изоляция, (согласно [5] 6 лет);  $\Delta\Theta$  – постоянная величина, зависящая от класса нагревостойкости изоляции.

В повторно – кратковременных режимах температура обмоток является функцией времени  $\Theta(t)$ . Поэтому при определении использованного ресурса оперируют средней температурой изоляции  $\Theta_{cp}$

$$\Theta_{cp} = \frac{1}{t_u} \cdot \int_0^{t_u} \Theta(t) dt \quad (4)$$

При этом срок службы изоляции  $T_{\Theta_{cp}}$  при средней температуре  $\Theta_{cp}$  за время цикла  $t_u$  при квазиустановившемся тепловом состоянии находится с помощью соотношения (3).

На рис.2 приведены зависимости ресурса межфазной изоляции обмотки статора для режимов S1 и S3-40% при разных значениях рабочего скольжения  $s$ . При этом, ресурс изоляции  $T^*=1$  соответствует базовому сроку службы изоляции  $T_{\Theta_n}$  в продолжительном режиме работы с соответствующей для него номинальной нагрузкой ( $M_{S1} = 0,62M_{S3-40\%}$ ). Согласно зависимостям, приведенных на рис.2, при работе АД на естественной характеристике срок службы межфазной изоляции обмотки статора для режима S3-40% относительно S1 превышает в 2,2 раза. При работе АД на искусственной характеристике, например на скорости  $n = 100$  об/мин ( $s = 0,9$ ), для режима S1 ресурс изоляции снижается в 2,5 раза (кривая 3) при РСУ и в 5 раз снижается при ИР и АВК (соответственно кривые 1 и 2). Для режима S3-40% ресурс изоляции при РСУ превышает базовый в 1,5 раза (кривая 6), а при ИР и АВК снижается в 1,42 раза (кривые 4 и 5).

Для обеспечения ресурса межфазной изоляции обмотки статора на уровне  $D^* = 1$  при работе АД на скольжении  $s = 0,9$  необходимо снизить нагрузочный момент в режиме S1: для РСУ до  $M = 0,49M_{S3-40\%}$ , для АВК до  $M = 0,44M_{S3-40\%}$ , для ИР до  $M = 0,37M_{S3-40\%}$ . В режиме S3-40% нагрузочный момент при АВК и ИР необходимо уменьшить до значения  $M = 0,94M_{S3-40\%}$ .

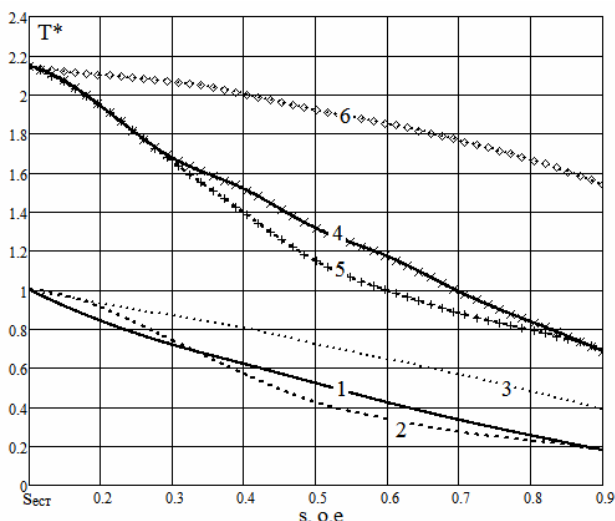


Рис.2. Ресурс межфазной изоляции обмотки статора в виде функции  $D^*(s)$  для режима S1: 1 – ИР; 2 – АВК; 3 – РСУ; для S3-40 %: 4 – ИР; 5 – АВК; 6 – РСУ

В результате проведенного анализа выявлено, что при эксплуатации кранового АД с фазным ротором в повторно-кратковременном режиме S3 и в продолжительном S1 применение АВК и ИР хоть и обеспечивает, по сравнению с РСУ, лучшую плавность переходных процессов, но при этих способах управления изоляция более подвержена термической нагрузке, что приводит к снижению эксплуатационной надежности АД. При этом в диапазоне средних скольжений при АВК АД подвержен большей термической нагрузке, чем при ИР. Снижение нагрузочного момента обеспечивает поддержание ресурса изоляции АД на уровне  $D^*=1$  для рассмотренных способов управления в подсинхронном диапазоне частоты вращения ротора.

#### Список использованной литературы

1. Бурковский А.Н. Расчет полезной мощности взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в повторно-кратковременных режимах работы / А.Н. Бурковский, Л.Ф. Снопик // Электротехнич. промышлен. Электр. машины. – 1978. – № 3(85). – С.8-10.
2. Коцур И.М. К расчету тепловых режимов работы кранового асинхронного двигателя / И.М.Коцур, А.Р.Лучко, М.И.Коцур // Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии: Материалы науч. техн. конф. Севастополь 21-26 апреля 2008. – Севастополь: 2008. – С. 110-111.
3. Сипайлов Г.А. Тепловые гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан – М.: Высш. Шк., 1989. – 240 с.

4. Счастливый Г.Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей / Г.Г. Счастливый – К.: Наук. думка, 1966. – 196 с.

5. Фёдоров М.М. Повышение эксплуатационного ресурса электрических машин на основе контроля теплового старения изоляционных материалов / М.М. Фёдоров // Современные технологии ресурсоэнергосбережения. Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – К.: – 1997. – Вып.2. – Кн. 3. – С. 77-79.

6. Шуйский В.П. Расчет электрических машин/ В.П.Шуйский – Л.: Энергия, 1968. – 732 с.

Получено 06.07.2011



Андрюченко Петр Дмитриевич,  
д-р техн. наук, зам. председателя  
правления  
ОАО «НИИ Преобразователь»,  
69041 г. Запорожье,  
ул. Кремлевская,63,а  
р/т 061-280-06-31



Коцур Игорь Михайлович,  
канд. техн. наук, доцент каф.  
«Электрические машины»  
Запорожск. нац. техн. ун-та,  
69063 г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64,  
р/т 061-769-84-11



Коцур Михаил Игоревич,  
аспирант каф. «Электроснабжение  
промышленных предприятий»  
Запорожск. нац. техн. ун-та,  
69063 г. Запорожье,  
ул. Жуковского, 64,  
р/т 061-769-84-11