Коробцов А.А., *аспирант;*
Леонов А.П., *канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»;*
Похолков Ю.П., *д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация и технология высшего профессионального образования»;*
Солдатенко Е.Ю., *магистрант;*
Томский политехнический университет;
Кочетков И.А., *главный технолог, ЗАО «Сибкабель»*

УДК 621.313.048

Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением

В последнее годы широко внедряется частотный способ плавного регулирования электроприводов, построенных на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Данный способ основан на использовании преобразователей частоты (ПЧ). Силовая часть такого ПЧ состоит из регулируемого выпрямителя, фильтра и автономного инвертора на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В промежуточном контуре (шине постоянного тока) привода происходит преобразование синусоидального напряжения питания в постоянный ток. Для генерации выходного напряжения, соответствующего техническим характеристикам двигателя и требуемой величине тока, используется полупроводниковый ключ. Как показывает опыт эксплуатации [1], имеется ряд недостатков, вызванных особенностями применения системы частотного управления.

Современные полупроводниковые ключи, используемые в регулируемых электроприводах, отличаются исключительно высокой скоростью перехода из открытого состояния в закрытое, что проявляется в резких скачках напряжения до 10 кВ/мкс. В результате на обмотку поступают импульсы прямоугольной формы с высоким значением перенапряжения, что вызывает протекание в обмотке волновых процессов. Отраженные волны, складываясь с питающим напряжением и ЭДС в обмотке статора, вызывают перенапряжения в изоляции статора, которые воздействуют на изоляцию статорной обмотки. Величины перенапряжений, действуя с частотой до 10^4 1/с, могут в 10 раз превышать значение питающего напряжения. Таким образом, при работе от ПЧ изоляция двигателя испытывает воздействие намного более высокого напряжения, чем при работе от источника синусоидального напряжения такой же амплитуды и частоты. Это приводит к возникновению коронных разрядов в изоляции обмотки в процессе регулирования (изменения частоты) электрического привода [2].

Как следствие, происходит быстрое старение изоляции, что сказывается на снижении надежности и срока службы электрической машины. Особенно опасны подобные перенапряжения для межвитковой изоляции обмоток, как наиболее слабого элемента всей системы изоляции. Используемые до настоящего времени обмоточные провода для низковольтных обмоток выпускались без учета стойкости к подобным перенапряжениям, так как величины рабочих напряжений при эксплуатации асинхронных двигателей были значительно меньше напряжения начала образования электрических разрядов в изоляции.

Таким образом, использование новых систем частотного управления электроприводами привело к изменению уровня электрических эксплуатационных нагрузок. В свою очередь это является причиной ускоренного электрического износа изоляции с последующим пробоем [3, 4]. Кроме того, обозначился ряд вопросов, связанных с разработкой, испытанием и применением короностойких систем изоляции, решение которых позволит обеспечить необходимый уровень надежности в процессе эксплуатации. В этом плане особенно важно определение способности эмалевой изоляции провода, как основного элемента, обеспечивающего надежность витковой изоляции, выдерживать повышенные электрические нагрузки.

К сожалению, в настоящее время в отечественной печати недостаточно данных об опыте применения обмоточных проводов в системах с частотным управлением.

Для изучения стойкости изоляции эмалированных проводов к действию коронных (поверхностных) разрядов были использованы провода марок ПЭТД2-К-180, ПЭТ-155, ПЭТД-180, ПЭТВ-2, ПЭЭА-155 диаметром 0,92÷1,02 мм. Испытания проводились на заземленных образцах провода, помещенных

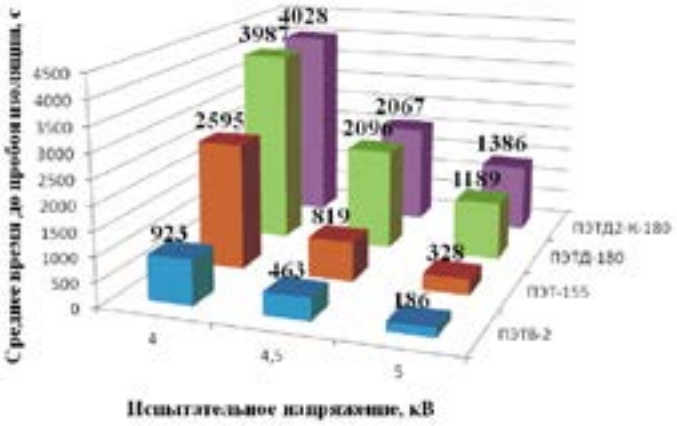

Рис. 1. *Среднее время до пробоя эмалированных проводов. Провод в состоянии поставки; испытания в стальной дроби*

в стальную дробь [5]. Испытуемая часть образца провода составляла 125 мм. На дробь подавалось испытательное напряжение 4–5 кВ промышленной частоты. Нижний уровень напряжения гарантирует начало ионизационных процессов и появление поверхностных разрядов в пространстве между образцом провода и дробью, верхний – недостаточен для пробоя неповрежденной, бездефектной изоляции. Испытания проводились при комнатной температуре. Образцы провода выдерживались под напряжением до пробоя, за результат принято среднее время до пробоя изоляции 10 образцов. Результаты испытаний приведены на рис. 1.

Полученные результаты наглядно демонстрируют различную степень стойкости эмалированных проводов ряда марок к электрическим коронным (поверхностным) разрядам (в порядке убывания): ПЭТД2-К-180, ПЭТД-180, ПЭТ-155, ПЭТВ-2. Наибольшее и близкое по величине среднее время до пробоя в дроби показали провода класса нагревостойкости H–марки ПЭТД2-К-180 и ПЭТД-180.

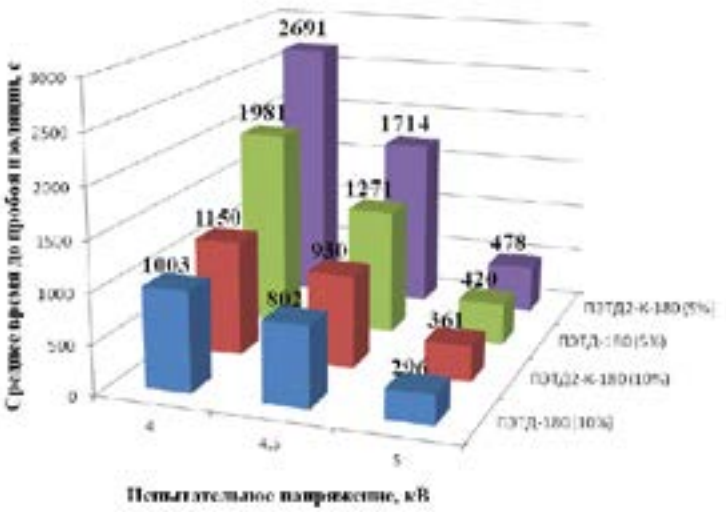

Рис. 2. *Среднее время до пробоя эмалированных проводов после растяжения; испытания в стальной дроби*

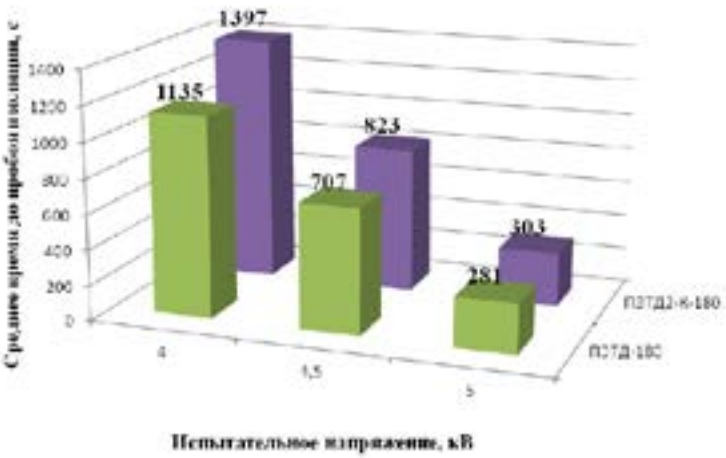

Рис. 3. *Среднее время до пробоя эмалированных проводов после навивания на металлический стержень, равный двойному диаметру провода; испытания в стальной дроби*

Рис. 4. *Блок-схема высокочастотной испытательной установки*

Дополнительно указанные провода были испытаны после растяжения на 5, 10 % и навивания на металлический стержень. Образцы провода сматывались с катушки без изгибов и деформации и перед удлинением были выпрямлены без растяжения. При растяжении на эмалевой изоляции не было отмечено трещин и других дефектов. Для растяжения образцов применялась разрывная машина. Отрезок провода наматывался в несколько витков на специальное крепление в зажимах разрывной машины, после чего растягивался до необходимой величины. Результаты представлены на рис. 2–3.

При испытаниях в стальной дроби наибольшей стойкостью к поверхностным разрядам из ряда испытанных обмоточных проводов обладают провода марок ПЭТД-180 и ПЭТД2-К-180 (рис. 2). В состоянии поставки величина среднего времени до пробоя эмалевой изоляции указанных образцов практически сопоставима.

Некоторая разница стойкости эмалевой изоляции к поверхностным разрядам отмечена после механических нагрузок (растяжение, навивание на металлический стержень). Результаты показали (рис. 2 и 3), что при растяжении на 5, 10 % и навивании среднее время до пробоя изоляции провода марки ПЭТД-180 уменьшается на 53, 72 и 72 % соответственно. Свойства провода марки ПЭТД2-К-180 при тех же условиях ухудшаются на 42, 66 и 67 % соответственно. Таким образом, провод марки ПЭТД2-К-180 по сравнению с проводом марки ПЭТД-180 сохраняет свои свойства на несколько более высоком уровне.

В то же время различие значений среднего времени до пробоя у изоляции проводов марок ПЭТД2-К-180 и ПЭТД-180 незначительно и составляет не более 10 % при всех уровнях испытательного напряжения. Можно предположить, что условия испытаний не полностью имитируют условия работы реальных обмоток с частотным управлением. В связи с этим было проведено дополнительное определение короностойкости на стандартных скрутках с использованием специального высокочастотного стенда [6].

Испытуемые скрутки помещались в термошкаф, нагревались до температуры класса нагревостойкости, после чего подавалось напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В, частоты 400 Гц с частотой квантования напряжения 5 кГц с крутизной нарастания переднего фронта 4 мкс [7]. При испытаниях хорошо было видно синее свечение короны по поверхности скрутки. Подобные условия адекватно воспроизводят уровень воздействующих на обмоточные проводах нагрузок при частотном управлении.

Общая схема проведения высокочастотных испытаний приведена на рис. 4. Результаты испытаний сведены в таблицу.

Таблица

Короностойкость скруток эмалированных проводов при высокочастотных испытаниях

Марка провода	Среднее время до пробоя, сек.
ПЭТД2-К-180	7140
ПЭТД-180	2337
ПЭТ-155	2985
ПЭЭА-155	684

Из таблицы видно, что при рабочей температуре наибольшей короностойкостью обладает провод марки ПЭТД2-К-180. Это позволяет рекомендовать его применение в обмотках электрических машин в случае реализации системы частотного управления как обладающего наибольшей стойкостью к коронным разрядам. Рассмотренные провода класса нагревостойкости F, как и провод марки ПЭТД-180, значительно уступают ему по величине среднего времени до пробоя.

Выводы

1. Окончательное определение способности эмалевой изоляции провода длительно эксплуатироваться в условиях частотного управления возможно после испытаний высокочастотными электрическими импульсами. В этом случае на образец воздействует комплекс нагрузок, соответствующий условиям эксплуатации: температура, электрические перенапряжения, коронные разряды.

2. В случае применения системы частотного управления обязательным условием сохранения должного уровня надежности является использование короностойких электроизоляционных материалов и, прежде всего, обмоточных проводов (например провод марки ПЭТД2-К-180).

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.C. Stone*, *M. Culbert*, *B.A. Lloyd*. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives / Cement industry technical conference record, 2009.
2. *J.M. Martinez*, *H. Amaris*, *J. Sanz*. «Frequency domain modeling of random wound motor windings for insulation stress analysis // Electrical Engineering. – 2006. – № 88.
3. *Bogh D.*, *Coffee J.*, *Stone G.*, *Custodio J.* Partial discharge inception testing on low voltage motors // Industry Applications, IEEE Transactions on. – 2006. – Jan.–Feb. – P. 148–154.
4. *Fenger M.*, *Campbell S.R.*, *Pedersen J.* Motor winding problems caused by inverter drives // Industry Applications Magazine, IEEE. – 2003. – July–Aug. – P. 22–31.
5. *Ю.П. Похолков*, *А.П. Леонов*, *А.А. Коробцов*. Изоляция обмоток низковольтных асинхронных двигателей в условиях применения системы частотного управления // Электричество. – 2012. – № 6.
6. Pulse width modulation simulator for testing insulating materials // USA Patent № 6051980.
7. Короностойкий обмоточный провод // Патент РФ № 80267 от 14.08.2008 г.

ПОДПИСКА В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ!

НА II ПОЛУГОДИЕ 2013 года

Уважаемые читатели!

Оформить подписку на журнал «Кабели и провода» очень просто. В любом отделении связи на территории России принимается подписка по каталогу агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс». Вам необходимо только вписать Ваши имя, фамилию и адрес доставки в купон, вырезать его и оплатить подписку по цене, указанной в этом каталоге.

Министерство связи РФ

АБОНЕМЕНТ на ~~газету~~ журнал 79943 (индекс издания)

Кабели и провода

(наименование издания) Количество комплектов:

на 2013 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда (почтовый индекс) (адрес)

Кому (фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

ПВ место литер

на ~~газету~~ журнал 79943 (индекс издания)

Кабели и провода

(наименование издания)

Стоимость: подписки _____ руб. переадресовки _____ руб. Количество комплектов:

на 2013 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда (почтовый индекс) (адрес)

Кому (фамилия, инициалы)

ПОДПИСКА ПО КАТАЛОГАМ «РОСПЕЧАТЬ» И «УРАЛ-ПРЕСС»