

## К ВОПРОСУ СКРЫТИЯ ПРОПИТКОЙ ДЕФЕКТОВ В МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЧРП

*А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

Критерием отказа низковольтных обмоток является наличие сквозного повреждения в изоляции - дефекта. Особенно опасны дефекты в эмалевой изоляции, т.к. их наличие существенно влияет на надежность межвитковой изоляции. Сквозные повреждения могут существовать в обмоточных проводах в состоянии поставки, возникать при изготовлении обмоток (проколы, порезы, сдиры и т.п.) и образоваться в процессе старения изоляции (трещины, отслаивания, продавливания). При всех прочих равных условиях вероятность отказа будет тем выше, чем больше число повреждений. Поскольку окончательное формирование электроизоляционных свойств изоляции обмоток происходит после пропитки и отверждения пропиточного состава, важно обеспечить полноекрытие таких сквозных дефектов пропиточным составом.

Исследование скрытия дефектов при пропитке выявило: «залечиваемость» сквозных повреждений зависит от вида (точечные, кольцевые, протяженные) и их расположения в реальной обмотке [1]. Наиболее опасными считаются те повреждения, которые лежат на смежных, плотно касающихся витках обмотки. В этом случае вероятно возникновение короткого замыкания, связанного с действием искровых разрядов во время коммутаций.

Внедрение частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП), построенных на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) существенно изменило характер старения межвитковой изоляции низковольтной обмотки. Считается, что основным фактором, ухудшающим свойства низковольтной изоляции, является температура. Ужесточение уровня электрических перенапряжений в обмотке, обусловленное действием ШИМ, привело к преобладанию электротеплового характера старения изоляции. В связи с этим возникает вопрос: насколько эффективно будет «залечивание» сквозных повреждений в межвитковой изоляции при пропитке в новых условиях эксплуатации?

Испытания проводились на образцах, представляющих стандартные скрутки из короностойкого провода ПЭТД 2К-180. Испытывались образцы в следующих состояниях: бездефектные скрутки; с искусственно нанесенными дефектом на одном витке и с дефектами на соседних витках. Были нанесены дефекты 2 типов: в виде кольцевых порезов эмалевой изоляции до жилы провода и протяженные (удаление изоляции на протяжении 1 мм). В случае дефектов на обоих витках расстояние между ними составляло 0, 10 и 20мм. Скрутки пропитывались короностойким лаком КО-916К методом погружения. Образцы были испытаны на высокочастотном лабораторном стенде, имитирующем электрические нагрузки от ШИМ. Результаты определения среднего времени до пробоя приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты определения среднего времени до пробоя образцов при испытаниях ВЧ-модулированным сигналом

Тип дефекта	Расстояние между дефектами, мм	Среднее время до пробоя, секунд
Без дефекта	-	12 900
«Кольцевой - Кольцевой»	0	1294
	10	3936
	20	3643
«Протяженный - Протяженный»	0	225
	10	1035
	20	1850
«Кольцевой» на одном витке	-	2409
«Кольцевой на одном витке (непроеданный)»	-	2373

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) Наличие сквозных дефектов в эмалевой изоляции, даже на одном витке, ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя.

Традиционно считалось: отказы изоляции низковольтных обмоток электрооборудования, как правило, возможны только при существовании сквозных повреждений. Наиболее опасными являются совпадающие повреждения, лежащие на смежных плотно касающихся витках (рис. 1, а).

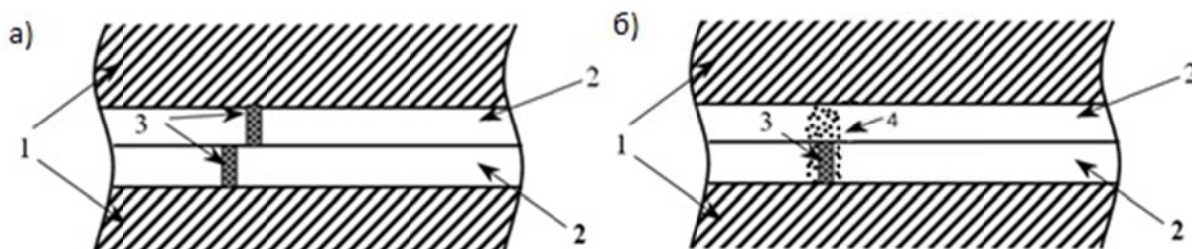


Рис. 1. Физическая модель отказа элемента низковольтной межвитковой изоляции (а – в обычных условиях, б – в обмотке ЧРП): 1 – токопроводящая жила; 2 – эмалевая изоляция; 3 – сквозное повреждение эмали; 4 – появление коронных разрядов в месте дефекта и пробой изоляции.

Наличие дефекта на одном витке повреждения не приводит к резкому снижению пробивного напряжения, так как на соседнем витке изоляция остаётся неповрежденной. Пробивное напряжение снизится до уровня пробивного напряжения воздуха лишь при сквозном повреждении двух слоев изоляции близком совпадении дефектов на соседних витках. Тем самым, если дефект был на одном витке в межвитковой изоляции, это не влияло на преждевременный отказ изоляции.

При эксплуатации двигателя в составе ЧРП стал преобладать электротепловой характер старения под действием перенапряжений, вызванных

работой ШИМ. В связи с этим, в местах сквозных дефектов между соседними витками стало возможно возникновение коронных разрядов, приводящих к ускоренному разрушению неповрежденной эмалевой изоляции на втором витке (рис.1, б). Как показали результаты, пробой происходит в месте дефекта практически на всех образцах.

2) При действии эксплуатационных нагрузок, характерных для ШИМ, пропитка может не обеспечить необходимое скрытие сквозных дефектов в эмалевой изоляции. Практически во всех случаях среднее время до пробоя бездефектных образцов в несколько раз больше, по сравнению с образцами на которые нанесен хотя бы один дефект (не смотря на двухкратную пропитку образцов короностойким пропиточным лаком). Эти результаты характерны для всех типов дефектов для любых расстояний, в том числе и для образцов с дефектом на одном витке.

3) Отказ элемента витковой изоляции низковольтной обмотки ЧРП возможен на расстоянии между дефектами, превышающим предельное для обычных условий эксплуатации (без применения частотного управления).

Как известно, величина пробивного напряжения для низковольтной однослойной изоляции подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $U_d$  и  $\sigma_d$ . При наличии сквозных дефектов происходит пробой воздушного промежутка, напряжение пробоя которого также подчиняется нормальному закону. С учетом физической модели отказа элемента витковой изоляции [1], максимально возможная величина воздушного промежутка, который следует учитывать, как место для развития короткого замыкания:

$$Z_{max}=d_{из}+(0,3\div 0,4), \text{ мм},$$

где,  $d_{из}$  – толщина изоляции проводов, мм.

Как показывает опыт, с учетом конструктивных параметров обмотки, величин рабочих напряжений и перенапряжений, величина  $Z_{max}$  для низковольтных обмоток двигателей общепромышленного применения, как правило, не превышает нескольких миллиметров.

Результаты испытаний на макетных образцах показали, что перекрытие между дефектами возможно при расстоянии в несколько раз превышающее максимально возможное. Коронные разряды вызывают перекрытия по всему проводу, что способствует образованию короткого замыкания между соседними витками даже при значительной удаленности дефектов друг от друга. При обычных условиях это невозможно, т.к. величины прикладываемых напряжений и перенапряжений не достигнут необходимой величины.

В завершении следует отметить: для обеспечения требуемого уровня надежности межвитковой изоляции обмоток ЧРП следует применять только короностойкие провода, дефектность которых должна быть стремиться к нулю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ16. 0.800.821-88 Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1 кВт до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные метода определения.