

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Количественная оценка надежности всыпных обмоток асинхронных электродвигателей показала, что основное внимание при разработке мер по повышению надежности следует обращать на витковую изоляцию [1].

Анализ причин пробоя витковой изоляции может быть проведен с помощью математической модели надежности витковой изоляции [2].

$$R_B = [1 - q'(U_K) - q''(U_K)]^{Na}, \quad (1)$$

где  $R_B$  — надежность витковой изоляции;

$q'(U_K)$  — вероятность пробоя пары проводников длиной  $\frac{l}{a}$ , имевших до пропитки повреждения типа оголений;

$q''(U_K)$  — вероятность пробоя пары проводников длиной  $\frac{l}{a}$ , не имевших до пропитки подобных повреждений;

$a$  — число поврежденных образцов длиной  $l$ ;

$U_K$  — напряжение, приходящееся на отдельную катушку обмотки с учетом появления коммутационных перенапряжений.

Вероятности  $q'(U_K)$  и  $q''(U_K)$  связаны с конструкцией обмоток, качеством изоляционных материалов и пропитывающего состава.

$$q'(U_K) = \frac{a}{n} \left[ F\left(-\frac{\bar{U}}{\sigma}\right) \right]^2 \lambda \int_0^{U_K} e^{-\lambda U} \left(1 - \frac{U}{U_K}\right)^2 dU, \quad (2)$$

$$q''(U_K) = \frac{a}{n} \exp[\lambda(2\bar{U} + \lambda\sigma^2)] \lambda \int_0^{U_K} e^{-\lambda U} F\left(\frac{U - 2\bar{U} - 2\lambda\sigma^2}{\sqrt{2}\sigma}\right) \left(1 - \frac{U}{U_K}\right)^2 dU. \quad (3)$$

$n$  — число элементарных участков на длине образца  $e$ ;

$\bar{U}$  — среднее значение пробивного напряжения образцов провода (по испытаниям в дроби);

$\sigma$  — среднеквадратическое значение пробивного напряжения;

$\lambda$  — параметр показательного закона;

$$\lambda = \frac{1}{E_n \cdot X_n}, \quad (4)$$

где

$E_n$  — электрическая прочность изоляционного промежутка между двумя проводниками;

$x_n$  — среднее расстояние между проводниками в пазу.

Выражения 1, 2, 3 позволяют установить, что на надежность всыпной обмотки оказывают влияние следующие основные факторы:

1. Качество проводов и пропитывающего состава ( $\bar{U}$ ,  $\sigma$ ,  $E_n$ ).

2. Коэффициент заполнения паза и количество проводников в обмотке машины ( $X_n$ ,  $N$ ).

3. Уровень коммутационных перенапряжений и количество отдельных катушек в фазе ( $U_k$ ).

4. Уровень технологии изготовления обмотки ( $a$ ).

Целью настоящей работы является анализ тех резервов повышения надежности, которые могут быть использованы на производстве без изменения конструкции машины.

Изучение разброса качества поставляемых эмальпроводов, колебаний уровня технологии показало, что ответственность за появление брака в обмотках машин лежит как на заводе — поставщике эмальпроводов, так и на заводе — изготовителе электродвигателей.

На рис. 1 представлена зависимость дефектности провода ПЭТВ —  $f$  — 35 диаметром 1,08 мм, испытанного после укладки обмотки ( $q_{\text{вых}}$ ) от его дефектности определенной в состоянии поставки ( $q_{\text{вх}}$ ). Испытания проводились по методике, изложенной в [3]. За дефектность в данном случае была принята вероятность того, что образец провода длиной 125 мм будет пробит напряжением  $U \leq 1$  кв.

$$q = \frac{m}{n'}, \quad \text{где} \quad (5)$$

$m$  — число образцов, пробитых напряжением  $U \leq 1$  кв;

$n'$  — число испытанных образцов.

Зависимость  $q_{\text{вых}} = f(q_{\text{вх}})$  была установлена на основании испытаний 22 партий провода с объемом выборки 200 образцов в каждой партии.

Существование такой зависимости подтверждается оценкой корреляционного отношения  $\eta$ .

$$\eta = 0,756 \pm 0,06$$

Первая область кривой  $q_{\text{вых}} = f(q_{\text{вх}})$  ( $0 < q_{\text{вх}} < 0,1$ ) указывает на то, что качество витковой изоляции обмоток целиком зависит от уровня технологического процесса изготовления обмотки и практически не зависит от качества поступающего провода. При  $q_{\text{вх}} > 0,1$  (вторая область), на качество витковой изоляции обмоток начинает сказываться дефектность поступающего провода.

Анализ качества, поступающего на завод эмальпровода показал, что примерно 30—40% его имеет  $q_{\text{вх}} > 0,1$ , что снижает среднее значение  $q_{\text{вых}}$  и, следовательно, надежность витковой изоляции  $R_v$ . В связи с этим следует считать целесообразным организацию входного контроля провода.

Предварительные расчеты, проведенные на примере данных партий провода, показывают, что отбраковка провода с  $q_{\text{вх}} > 0,1$  позволит уменьшить  $q_{\text{вых}}$  на 20% и повысить надежность машины АО2—31/4 с 0,838 до 0,896. Отбракованный провод может быть использован при изготовлении обмоток машины другого типа, с более благоприятными конструктивными данными (коэффициентом заполнения паза, меньшим количеством проводников в секции, большим количеством секций в фазе и т. п.), либо для трансформаторов, где рядовая намотка исключает появление пары проводников с большей разностью потенциалов.

Другим резервом по повышению надежности витковой изоляции обмоток является повышение уровня контроля витковой изоляции [4].

Существующие методы контроля витковой изоляции обмоток асинхронных электродвигателей (аппаратура СМ-1, СМ-2) предполагают главным образом фиксирование металлических замыканий между витками, а не выявление слабых мест в витковой изоляции. В настоящее

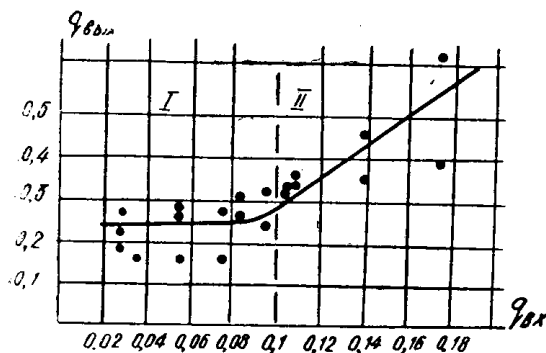


Рис. 1.

время на заводе Сибэлектромотор проходит испытания предложенная нами установка роторного типа, предназначенная для испытания витковой изоляции высоким напряжением повышенной частоты.

В основу метода положен принцип индуктирования высокого напряжения в обмотке статора.

Низкое напряжение повышенной частоты 1000 гц вырабатывается высокочастотным генератором и подается на трехфазную обмотку ротора, вставленного в статор. При этом обмотка ротора соединена в звезду, а обмотка статора разомкнута. Таким образом, схема представляет собой трансформатор с тремя вторичными обмотками. Если в изоляции нет дефектов, то нагрузка во всех фазах роторной обмотки симметрична. Появление виткового замыкания в одной из фаз статорной обмотки равносильно включению дополнительной вторичной обмотки трансформатора, работающей в режиме короткого замыкания. Это приводит к несимметрии токов роторной цепи и позволяет фиксировать витковое замыкание.

Одной из задач при повышении уровня контроля витковой изоляции является установление оптимального испытательного напряжения. Для этого нами была снята зависимость брака витковой изоляции от напряжения в одной фазе обмотки.

В табл. 1 приведены результаты испытаний. На каждом напряжении проверено 60 статоров.

Таблица 1

в на фазу	55	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Процент брака	0,06	0,09	0,09	0,09	7,5	10,5	10,8	11,1

Процент брака практически начинает возрастать только при напряжении 1700—1800 в. Это объясняется тем, что пробивное напряжение воздушного промежутка между двумя дефектными проводниками имеет определенный минимум; при нормальном давлении оно не может быть меньше, чем  $400 \div 450$  в [5]. В нашем случае, когда обмотка имеет 4 секции, максимально возможное напряжение, действующее между двумя проводниками в секции, равно  $0,25 U_{\phi}$ .

Существование вероятности девятикратных перенапряжений (амплитудное значение фазного напряжения составляет при этом 2488 вольт) также подтверждает целесообразность повышения уровня испытатель-

ного напряжения для витковой изоляции. Для сравнения эффективности существующего и предложенного методов контроля витковой изоляции

Таблица 2

Вид операции	Вероятность появления	
	амплитуды $9 U_{\phi}$	длительности 1000 мксек
Включение	0,005	0,04
Отключение	0	0
Реверс	0,025	0,15

были проведены ускоренные испытания машин на срок службы и надежность. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Метод контроля витковой изоляции	Доля брака в период приработки	Средний срок службы при 105°C (часы)	Число испытанных машин
Аппарат СМ-1	0,07	18500	100
Предлагаемый метод	0	более 40000	72

Эти результаты показывают, что выявление скрытого брака на испытаниях уменьшает интенсивность отказов не только в период приработки, но и в период физического износа изоляции обмоток.

Следовательно, даже незначительные дефекты, не выявленные на испытаниях, постепенно развиваются в эксплуатации и приводят к отказу быстрее, чем дефекты, образующиеся при старении изоляции в процессе работы машины.

Таким образом, дефекты в секции начали появляться при напряжении

$U_{\text{секц}} = 0,25 U_{\phi} = 0,25 \times 1700 = 425$  вольт, что соответствует теоретическим представлениям. При напряжении ниже 1700 в на фазу в обмотке могут быть выявлены только металлические замыкания.

В общем случае повышение испытательного напряжения ведет к повышению доли брака, однако относительное увеличение брака при напряжениях выше 2500 в. на фазу значительно уменьшается. Это связано с окончанием выявления основной массы дефектов. Таким образом, данные эксперимента, а также учет условий эксплуатации позволяет считать, что для насыщенных обмоток уровень испытательного напряжения на фазу должен быть не меньше, чем  $(0,4-0,45) n$  кв, где  $n$  — число отдельных секций в фазе.

С целью установления уровня коммутационных перенапряжений нами были проведены осциллографические исследования амплитуды и длительности перенапряжений при включениях, отключениях и реверсах двигателя в режиме холостого хода. В табл. 2 сведены результаты исследований, проведенных на двигателе АО2 — 31/4. Вероятности амплитуд, длительностей перенапряжений определялись по аналогии с [5], причем число осциллограмм для каждой операции было равно 200.

## Выводы

1. Установлена корреляционная зависимость между дефектностью эмали проводов в состоянии поставки и после укладки обмотки.
2. Установлено, что для повышения надежности всыпных обмоток асинхронных электродвигателей целесообразно организовать статистический входной контроль изоляции проводов в состоянии поставки.
3. Определены вероятности амплитуд и длительности коммутационных перенапряжений в обмотке асинхронного электродвигателя АО2 — 31/4.
4. Предложен метод контроля витковой изоляции повышенным напряжением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Похолков. Влияние обмоточно-изолированных работ и качества изоляции на надежность обмоток электрических машин. Диссертация, Томск, 1966.
  2. А. С. Гитман, Ю. П. Похолков, Э. К. Стрельбицкий. Математическая модель надежности витковой изоляции всыпных обмоток электрических машин. Изв. ТПИ, т. 172, 1967.
  3. О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, Э. К. Стрельбицкий. Влияние обмоточно-изолированных работ на пробивное напряжение изоляционных материалов. Электромеханика, № 1, 1966.
  4. Ю. П. Похолков, Э. К. Стрельбицкий. Влияние уровня контроля витковой изоляции на надежность всыпных обмоток асинхронных электродвигателей. Изв. ТПИ, т. 172, 1967.
  5. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков (Область сильных полей). Физматгиз, 1958.
-