

КОНТРОЛЬ ЗАДАННОЙ НАДЕЖНОСТИ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

О. П. МУРАВЛЕВ, А. Д. НЕМЦЕВ, Ю. П. ПОХОЛКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Надежность электрических машин определяется в основном надежностью обмоток, которая в значительной степени зависит от правильной организации контроля в процессе их изготовления. Контроль изоляции обмоток в процессе изготовления производится на различных этапах. Если корпусная и междуфазная изоляция проверяется на пробой высоким напряжением и выявление слабых мест происходит удовлетворительно, то совсем другое положение с витковой изоляцией. При эксплуатации перенапряжения на фазе в десять и более раз превышают номинальное напряжение, а при изготовлении витковая изоляция проверяется очень низким напряжением. Испытательное напряжение витковой изоляции в готовой машине составляет $1,3 U_F$ на фазу, что не является достаточным для выявления слабых мест.

Исследования, проведенные Томским политехническим институтом совместно с СКБЭМ, показывают, что для выявления скрытых дефектов витковой изоляции необходимо на фазу подавать испытательное напряжение величиной $0,4 n_K (kV_{max})$, где n_K — число катушек в фазе [1]. Испытаниям подвергаются непропитанные статорные обмотки.

Цель настоящей работы — дать методику расчета контрольных границ допустимого уровня брака витковой изоляции при испытании высоким напряжением по заданной надежности витковой изоляции $R_{в\text{ зад}}$ в период приработки.

Контроль надежности $R_{в\text{ зад}}$ целесообразно проводить с помощью контрольных карт по среднему значению доли брака $\overline{Q_{бр}}$. При построении контрольной карты основной задачей является расчет контрольных границ допустимого уровня брака $Q_{бр-в}$ и $Q_{бр-н}$. Они зависят от характеристик производственного процесса, а также от объема выборки n . Контрольные границы для контрольной карты по среднему значению доли брака $\overline{Q_{бр}}$ рассчитываются по выражению [2]:

$$Q_{бр-в.н.} = \overline{Q_{бр}} \pm 3 \sqrt{\frac{\overline{Q_{бр}}(1 - \overline{Q_{бр}})}{n}} \quad (1)$$

Знак «минус» относится к нижней контрольной границе $\overline{Q_{бр-н}}$, знак «плюс» — к верхней границе $Q_{бр-в}$. Если $\overline{Q_{бр-н}}$ является отрицательным, то принимается $Q_{бр-н} = 0$. После нанесения границ на диаграмму получается контрольная карта (рис. 1). По оси абсцисс прямоугольной системы координат откладываются номера выборок по n статоров в различные моменты времени 1, 2, 3..., а по оси ординат, проградуированной от 0 до $Q_{бр-в}$, — рассчитываемые доли брака обмоток. Выход точки за пре-

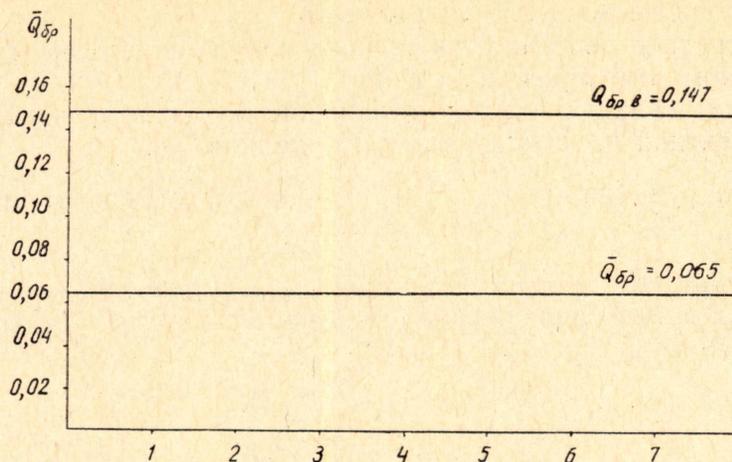


Рис. 1. Контрольная карта для $R_{в\text{ зад}}=0,85$, $n=100$

делу верхней контрольной границы $Q_{бр.в}$ указывает на то, что увеличивается доля брака и, следовательно, уменьшается $R_{в\text{ зад}}$. Наоборот, нарушение нижней контрольной границы $Q_{бр.н}$ указывает на повышение качества и влечет за собой увеличение надежности. Объем контролируемой партии определяется количеством изготовленных статоров, например, за смену, декаду, месяц.

На контрольной карте прямая с ординатой $Q = \overline{Q_{бр}}$ определяется величиной заданной надежности витковой изоляции $R_{в\text{ зад}}$. Рассмотрим определение $\overline{Q_{бр}}$ по заданному значению $R_{в\text{ зад}}$. Согласно [4] оценка надежности витковой изоляции выпных обмоток в зависимости от числа включений двигателя ν осуществляется по выражению

$$R_{в\text{ в}} = [1 - q(U_{св})]^N, \quad (2)$$

где N — число элементарных участков пар проводников в обмотке двигателя,

$qU_{св}$ — дефектность провода при максимально возможном перенапряжении $U_{св}$ в эксплуатации.

$$U_{св} = \frac{U_{фн.в}}{n_c}, \text{ кв.} \quad (3)$$

n_c — число последовательно соединенных секций в фазе,
 $U_{фн.в}$ — амплитудное значение фазного напряжения с учетом коммутационных перенапряжений за ν включений двигателя.

$$U_{фн.в} = \frac{\ln \nu + 0,7}{2,25}, \text{ кв,} \quad (4)$$

ν — число включений двигателя за расчетный период времени.
 Величина $qU_{св}$ определяется по выражению

$$q(U_{св}) = p^2 \lambda \int_0^{U_{св}} F\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right) e^{-\lambda U} \left(1 - \frac{U}{U_{св}}\right) dU, \quad (5)$$

где

p — вероятность повреждения элементарного участка изоляции провода;

λ — параметр показательного закона распределения пробивного напряжения между двумя поврежденными проводниками;

- U — текущее значение напряжения, *кв*;
 U_2 — среднее значение пробивного напряжения дефектной изоляции пары проводников, *кв*;
 σ_2 — среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения дефектной изоляции пары проводников, *кв*.

Значение функции $F\left(\frac{U - U_2}{\sigma_2}\right)$ определяется по таблице приложения 4[4].

Таким образом, зная надежность $R_{в\text{ зад}}$, рассчитанную на перенапряжение $U_{св}$, можно определить дефектность $q(U_{св})$ по (2), которое при малых значениях $q(U_{св})$ имеет вид

$$R_{в'} = 1 - N \cdot q(U_{св}), \quad (6)$$

тогда

$$q(U_{св}) = \frac{1 - R_{в\text{ зад}}}{N}. \quad (7)$$

Зная величину подинтегральной функции выражения (5) и λ , можно определить p , величина которой будет постоянна для любого испытательного напряжения, заданной величины $R_{в\text{ зад}}$ и конкретной машины. Теперь, зная p , λ и значение подинтегральной функции, найденное для верхнего предела интегрирования $U_{св}$, величина которого определяется по (3) при известном испытательном напряжении $0,4n_k$ *кв* на фазу, можно определить $q(0,4n_k)$. По найденному значению $q(0,4n_k)$ рассчитываем по (6) $R'_{в}$. Среднее значение брака при контроле витковой изоляции высоким напряжением

$$\bar{Q}_{бр} = 1 - R'_{в}. \quad (8)$$

По этому значению $\bar{Q}_{бр}$ рассчитываются контрольные границы по (1) для контрольной карты. Так как при испытании витковой изоляции высоким напряжением отсеиваются статоры, изоляция которых пробилась бы перенапряжением $0,4n_k^{кв\text{ max}}$, встречающимся в эксплуатации, то надежность статоров, прошедших контрольные испытания этим напряжением, будет равна

$$R''_{в} = \frac{R_{в\text{ зад}}}{1 - \bar{Q}_{бр}}, \quad (9)$$

Надежность выпущенных статоров $R''_{в}$ получалась выше заданной $R_{в\text{ зад}}$. Чтобы после контроля высоким напряжением получить заданную надежность, при расчете надо брать не заданную величину надежности $R_{в\text{ зад}}$, а расчетную

$$R_{в*} = K' \cdot R_{в\text{ зад}}. \quad (10)$$

Ориентировочные значения коэффициентов K' в зависимости от $R_{в\text{ зад}}$ для испытательного напряжения $2,5\sqrt{2}$ *кв* приведены в табл. 1.

Таблица 1

| | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_{в\text{ зад}}$ | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
| K' | 0,782 | 0,821 | 0,920 | 0,945 | 0,955 | 0,967 | 0,981 | 0,994 |

Таким образом, определив величину $\bar{Q}_{бр}$ по заданной надежности, строим контрольную карту с границами $Q_{бр-в}$ и $Q_{бр-н}$. Если при контроле точки находятся внутри контрольных границ, то при выпуске асинхронных двигателей гарантируется заданная надежность витковой изоляции $R_{в\text{ зад}}$. Если точки выходят за верхнюю границу $Q_{бр-в}$, то нужно искать причины, вызывающие ухудшение технологического процесса изготов-

ления обмоток. Пример построения контрольной карты для двигателя А02-32-4.

Исходные данные:

$$R_{в\text{ зад}}=0,85; t_{расч}=5000 \text{ час}; f_{вкл}=30 \text{ 1/час}; \\ l_{обр}=60 \text{ мм}; r_{исп}=1,527 \text{ мм}; \bar{E}'_в=1,99 \text{ кв/мм}; \\ E_n=42,42 \text{ кв/мм} [4].$$

Промежуточные значения, необходимые для расчета $q(0,4n_k)$, рассчитаны по соответствующим формулам [4] и приведены ниже:

$$\bar{U}_1=0,656 \text{ кв}; \bar{U}_2=1,18 \text{ кв}; \sigma_1=0,372 \text{ кв}; \\ \sigma_2=0,525 \text{ кв}; N=1,53 \cdot 10^6; \lambda=0,295 \text{ 1/кв}; \\ v=150000; U_{ф.пн.в}=5,64 \text{ кв}; U_{св}=0,94 \text{ кв}; \\ U'_{св}=0,589 \text{ кв};$$

Вероятность пробоя «элементарного участка» изоляции пары проводников, имевшего повреждение до пропитки, за время 5000 час.

$$q(U_{св}) = \frac{1 - R_{в}^*}{N} = \frac{1 - 0,85 \cdot 0,945}{1,53 \cdot 10^6} = 0,129 \cdot 10^{-6}.$$

Вероятность повреждения «элементарного участка» изоляции провода

$$p^2 = \frac{q(U_{св})}{\lambda \int_0^{U_{св}} F\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right) e^{-\lambda U} \left(1 - \frac{U}{U_{св}}\right) dU} = \frac{0,129 \cdot 10^{-6}}{0,295 \cdot 0,0265} = 16,5 \cdot 10^{-6}.$$

По (5) определяем $q(U'_{св})$, подставляя в верхний предел интегрирования $U'_{св}=0,589 \text{ кв}$.

$$q(U'_{св}) = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,295 \cdot 0,00945 = 0,046 \cdot 10^{-6}$$

Значение подынтегральной функции $f(U)dU=0,00945$. По найденному значению $q(U'_{св})$ по (6) рассчитываем $R'_в$

$$R'_в = 1 - 1,53 \cdot 10^6 \cdot 0,046 \cdot 10^{-6} = 0,9296.$$

Среднее значение брака при контроле витковой изоляции высоким напряжением определяем по (8)

$$Q_{бр} = 1 - 0,9296 = 0,0704.$$

Расчет контрольных границ для контрольной карты производим по (1). Значение верхней контрольной границы $Q_{бр.в}$ для различных заданных значений $R_{в\text{ зад}}$ и объемов выборок n представлены в табл. 2. В табл. 3 приведены значения $Q_{бр}$ для различных значений $R_{в\text{ зад}}$. Надежность статоров, прошедших контрольные испытания высоким напряжением, определяем по (9) с учетом (10).

$$R_{в}'' = \frac{R_{в}'}{1 - Q_{бр}} = \frac{0,85 \cdot 0,945}{1 - 0,0704} = 0,865.$$

Заключение

Предложен способ контроля заданной надежности витковой изоляции $R_{в\text{ зад}}$ в период приработки с помощью контрольных карт, параметры которых определяются непосредственно, исходя из заданного значения надежности.

Таблица 2

| n | R _{взад} | | | | | | | |
|------|-------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|
| | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
| 50 | 0,3183 | 0,2619 | 0,2094 | 0,179 | 0,1398 | 0,0981 | 0,0726 | 0,0378 |
| 100 | 0,2724 | 0,2196 | 0,1731 | 0,147 | 0,1125 | 0,0774 | 0,0564 | 0,02832 |
| 200 | 0,2143 | 0,1896 | 0,1473 | 0,125 | 0,0936 | 0,0627 | 0,04482 | 0,02172 |
| 500 | 0,1855 | 0,1529 | 0,1251 | 0,105 | 0,07629 | 0,0499 | 0,03462 | 0,0158 |
| 1000 | 0,17095 | 0,1494 | 0,11325 | 0,0946 | 0,06798 | 0,0328 | 0,0295 | 0,01287 |

Таблица 3

| R _{взад} | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
|-------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\bar{Q}_{бр}$ | 0,136 | 0,017 | 0,0855 | 0,0654 | 0,0474 | 0,0276 | 0,0171 | 0,0057 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Похолков. Влияние обмоточно-изолировочных работ и качества изоляции на надежность обмоток электрических машин. Кандидатская диссертация, ТПИ, Томск, 1966.
2. Р. Шторм. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. «Мир», 1970.
3. Д. Коуден. Статистические методы контроля качества. Физматгиз, 1961.
4. Двигатели трехфазные асинхронные общего применения мощностью от 0,12 до 100 квт. Расчет надежности всыпных обмоток. Р.Т.М. Томск, 1970.