

## К ВЫБОРУ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ МОНОЛИТ-2 СТАТОРНЫХ ОБМОТОК КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДО ПРОПИТКИ

П. Л. ЛЫСЕНКО, В. Г. СЯКОВ, Г. Г. ШАЛИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов  
и общей электротехники)

В процессе производства витковая изоляция подвергается многочисленным механическим воздействиям, часто травмирующим изоляцию. Во время эксплуатации витковая изоляция испытывает длительные термомеханические нагрузки, на нее действуют перенапряжения, в десятки раз превосходящие рабочее напряжение.

Правильный выбор испытательных напряжений способствует выявлению дефектов в изоляции во время изготовления и своевременному их устранению, повышению эксплуатационной надежности.

Для крупных электрических машин, разрабатываемых НИИ и выпускаемых заводом «Сибэлектротяжмаш», на рабочие напряжения от 380 до 10000 в приняты в зависимости от номинальных напряжений и мощностей три конструкции витковой изоляции.

1. Провод ПСД, усиленный стеклослюдинитовой лентой толщиной 0,09 мм вполнахлеста, или провод ПЭТВСД.

2. Провод ПСД, усиленный стеклослюдинитовой лентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста.

3. Провод ПСД, усиленный стеклослюдинитовой лентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста и стеклолентой толщиной 0,1 мм вполнахлеста.

В качестве образцов для испытания витковой изоляции по варианту № 1 были выбраны катушки статорной обмотки высоковольтного электродвигателя АЗ-290 (290 квт, 6 кв) и вариант 2 и 3 — низковольтного электродвигателя АЗ-290 (290 квт, 660 в).

По варианту № 1 эффективный виток содержал один элементарный проводник, что свойственно высоковольтным машинам мощностью до 1000 квт, и по вариантам 2 и 3 — 6 элементарных проводников, что характерно для низковольтных машин и высоковольтных мощностью свыше 1000 квт.

Катушки изготавливались по принятой технологии для статорных обмоток с изоляцией монолит-2. Особенностью техпроцесса является наложение витковой и корпусной изоляций катушек сухими стеклослюдинитовыми лентами с последующей пропиткой катушек после их укладки в сердечник статора эпоксидным компаундом вакуумно-нагнетательным способом.

После намотки лодочек, их опрессовки, растяжки и рихтовки и проведения укладочных работ определялась кратковременная электрическая прочность витковой изоляции. Для испытаний катушки в середине пазовых частей разрезались на две равные части. Каждая полука-

тушка включала полностью одностороннюю лобовую часть, что очень важно, так как повреждение витковой изоляции при ее изготовлении вероятней всего в лобовых частях. Концы в местах разреза разводились в стороны. Во избежание влияния соседнего пробоя на величину пробивного напряжения на испытываемую пару проводников напряжение подавалось через виток.

Испытания проводились как напряжением промышленной частоты, так и импульсным напряжением, для чего использовалась высоковольтная установка 2К8 (аналогичная установке 2К7 в [1]).

На рис. 1 показаны интегральные кривые пробивных напряжений витковой изоляции (выполненной из изоляции провода ПСД, одного

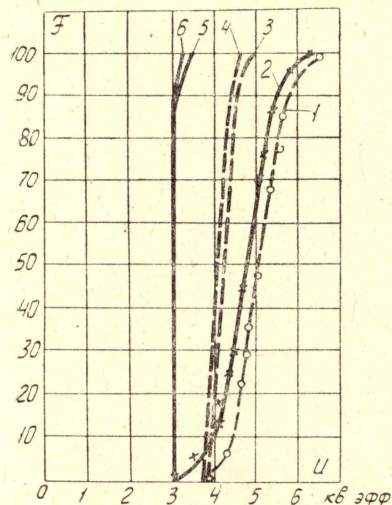


Рис. 1. Кривые 1, 2 — выравнивающие интегральные кривые пробивных напряжений витковой изоляции образцов (длина электрода 950 мм) после растяжки, рихтовки и опрессовки (1) и после укладки в железо статора (2). Кривые 3, 4, 5, 6 — рассчитанные кривые пробивных напряжений витковой изоляции катушек машин мощностью от 2500 до 5000 квт:  $U = 6$  квт,  $m = 20,8$  (3),  $U = 10$  квт,  $m = 26,4$  (4) статорных обмоток тех же машин на соответствующие напряжения:  $m = 1010$  (5),  $m = 1270$  (6)

электрическая прочность витковой изоляции катушек и в целом статорных обмоток машин имеет достаточно высокий уровень. Это относится и к минимальным значениям, в основном характеризующим работоспособность изоляции. Математическая обработка данных испытаний позволила обосновать выбор испытательных напряжений витковой изоляции.

Основная цель профилактических испытаний состоит в том, чтобы отбраковать ослабленные места изоляции до ее пропитки и тем самым исключить случаи витковых замыканий обмоток после пропитки и запечки изоляции.

Наиболее целесообразно проверку витковой изоляции высоким напряжением проводить после изготовления катушки неизолированной

слоя стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,13 мм и стеклоленты толщиной 0,1 мм вполнахлеста) образцов, катушек и статорных обмоток.

Пересчет кривых 3, 4, 5, 6 проводился с помощью функции распределения вероятностей наименьшего члена вариационного ряда (выборки) [2]:

$$F_{mi} = 1 - [1 - F_u]^m,$$

где

$F_u$  — вероятность распределения пробивных напряжений единичных образцов;

$F_{mi}$  — вероятность распределения пробивных напряжений изделий (катушки, статорной обмотки);

коэффициент  $m$  находится как отношение поверхности изоляции витков всей катушки (статорной обмотки) к поверхности изоляции образца.

Для катушек номенклатуры машин завода «Сибэлектротяжмаш» коэффициент  $m$  колеблется от 21 до 40, для статорных обмоток машин — от 1000 до 1900. Распределение напряжения по виткам катушки принималось равномерным. Аналогично были обработаны результаты испытания других видов витковой изоляции.

Данные обработки пробивных напряжений (табл. 1) показывают, что

Таблица 1

Конструкция витковой изоляции	Пробивные напряжения витковой изоляции													
	образцов после растяжки, рихтовки и опрессовки								для катушек после растяжки, рихтовки и опрессовки				статорных обмоток после укладки	
	$U$ переме н. кв. амп				импульсн. напр				$U_{\text{пер}}$		$U_{\text{имп}}$		$U_{\text{пер}}$	$U_{\text{имп}}$
	$U_{50\%}$	$S^*$	$\vartheta^*$	$U_{1\%}$	$U_{50\%}$	$S$	$\vartheta$	$U_{1\%}$	$U_{50\%}$	$U_{1\%}$	$U_{50\%}$	$U_{1\%}$	$U_{50;1\%}$	$U_{50;1\%}$
ПЭТВСД . . . . .	5,3	1,2	0,23	2,0	8,1	1,6	0,19	3,5	2,8	1,8	5,0	3,5	1,6	3,5
ПСД+ст. слюд. лента т. 0,09 мм . . . . .					4,6	0,56	0,13	3,25			3,5	3,0		
ПСД+ст. слюд. лента т. 0,13 мм . . . . .	4,7	0,7	0,15	3,0	8,0	0,97	0,12	5,7	3,3	2,7	6,25	5,25	2,4	4,3
ПСД+ст. слюд. лента т. 0,13 мм+ст. лента т. 0,1 мм . . . . .	5,1	0,48	0,09	3,7	8,4	0,62	0,07	6,7	4,2	3,7	7,3	6,7	3,1	3,0

\*  $S$  — среднее квадратическое отклонение,  $\vartheta$  — коэффициент вариации.

(перед наложением корпусной изоляции) и после укладки катушек в сердечник статора до соединения катушечных перемычек.

В принятых конструкциях витковой изоляции (табл. 2) расстояние между медью проводников соседних витков составляет 0,6; 0,8 и 1,2 мм.

Возьмем крайний случай. Изоляция между витками имеет сквозное повреждение типа трещин, проколов, разрушения изоляции при сохранении расстояний между витками.

Воспользовавшись зависимостью разрядного напряжения в воздухе по поверхности сухой изоляции [3], можно определить пробивные напряжения. Их значения занесены в табл. 2 (столбцы 3, 4) и составляют 1,3; 1,7 и 2 кв.

Сравнение пробивных напряжений сквозных повреждений и минимальных значений электрической прочности витковой изоляции показывает, что в выборках отсутствуют подобные дефекты витковой изоляции.

Естественно желание отбраковывать сквозные повреждения, но, как видно из табл. 2 (столбцы 8, 9), для этого потребовалось бы испытательное напряжение на катушку в зависимости от числа витков (табл. 2, столбец 7) до 36 кв. На такие напряжения трудно создать испытательные установки, да и в этом нет необходимости.

При выборе испытательных напряжений, очевидно, надо исходить из следующих основных положений: испытательные напряжения должны отбраковывать катушки с грубыми дефектами, способными вызвать междувитковые замыкания в эксплуатации, и должны быть приняты меры, чтобы при испытании витковой изоляции не повредить корпусную.

Исходя из первого требования, витковая изоляция после пропитки и запечки должна иметь электрическую прочность, обеспечивающую надежную работу изоляции, и быть выше эксплуатационных перенапряжений.

Щели, пустоты и другие дефекты в изоляции заполняются во время пропитки эпоксидным компаундом, который имеет достаточно высокий уровень электрической прочности после полимеризации.

Примем худший случай, когда происходит сближение проводников на малые расстояния и изоляция между ними имеет сквозное повреждение. В этом случае электрическая прочность витковой изоляции будет определяться толщиной слоя эпоксидного компаунда, заполнившего сквозное повреждение. Можно найти наименьшее расстояние  $\delta$  между витками, которое еще может обеспечить за счет слоя компаунда необходимую электрическую прочность.

Значения  $\delta$  можно определить по выражению

$$\delta \leq \frac{k U_n}{\sqrt{2} E_k} (\text{мм}),$$

где

$k$  — коэффициент, определяющий кратность минимальной электрической прочности витковой изоляции по отношению к перенапряжениям. По аналогии с корпусной изоляцией с некоторым запасом можно принять  $k=2,5$ .

$U_n$  — перенапряжения витковой изоляции (кв/виток) подсчитываются по [5]

$$U_n = 0,122 U_n I_n (\text{кв ампл}),$$

где

$U_n$  — линейное напряжение машины, кв;

$I_n$  — длина пазовой части катушки, м;

$E_k$  — минимальное значение электрической прочности эпоксидного компаунда. Ее можно принять равной 20 кв/мм.

Таблица 2

Конструкция витковой изоляции	Толщина витковой изоляции	Напряжение пробоя воздушного промежутка, кв		Мощность машины от _____ до _____ квт	Номиналь- ные напря- жения кв	Число витков в катушке от _____ до _____ шт	Напряжение на катуш- ку для пробоя воз- душного промежутка между витками от _____ до _____, кв		Минимально допусти- мый воздушный зазор между витками и его пробивное напряжение		Рекоменд. испытатель- ные напряжения (в/в)	
		эфф	амп				эфф	амп	$\delta$	$U_{\delta}$	до налож. корпусной изоляции амп	после ук- ладки ка- тушек в статор амп
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ПЭТВСД или ПСД+ст. слюд. лента 0,09 мм	0,6	1,3	1,8	320—800 315—1000	до 1 6 10	4÷2 11—17	5—2,6 14—22	7—3,6 19—31	0,045 0,07	560 670	1000	750
ПСД+ст. слюд. лента 0,13 мм	0,8	1,7	2,4	1000— 2500	6 10	5—9 8—15	8,5—15 13,5—25	12—22 19—36	0,06 0,11	635 850	1250	1000
ПСД+ст. слюд. лента 0,13 мм+стеклолента 0,1 мм	1,2	2	2,8	2500— 6300 "	6 10	2—4 3—7	4—8 6—14	5,6—11 8—20	0,09 0,16	780 1500	1500	1250

Зная  $\delta$  (используя зависимость разрядного напряжения по сухой изоляции), можно определить напряжение  $U_{\delta}$ , необходимое для выявления сквозного повреждения глубиной  $\delta$  непропитанной витковой изоляции, шунтирующегося воздушной прослойкой.

К аналогичным результатам можно прийти, если рассмотреть случай, когда за счет механических воздействий происходит утоньшение изоляции между витками до величины  $\delta$ , при этом с некоторым приближением можно принять минимальную электрическую прочность изоляции равной  $E_k$ , пробивные напряжения непропитанной изоляции в тонких слоях равной  $U_{\delta}$ .

В табл. 2 (столбцы 10, 11) приведены значения  $\delta$  и  $U_{\delta}$ . Здесь же (12, 13) даны рекомендуемые значения испытательных напряжений витковой изоляции катушек статорных обмоток крупных электрических машин серии АД-2 и ВАО мощностью до 6300 кВт, напряжением до 10 кВ.

Испытательные напряжения выбраны не менее значений  $U_{\delta}$  с учетом технических возможностей установок и приборов для испытания витковой изоляции.

Испытание витковой изоляции отдельных катушек (до наложения корпусной изоляции) не вызывает особых затруднений. Источником высокого напряжения может служить высокочастотная установка, генерирующая затухающие колебания высокой частоты [4]. Установка проста, удобна. На ней можно получать испытательное напряжение до 1500—2000 в/в независимо от числа витков в испытываемой катушке. Как было исследовано, распределение напряжения по виткам катушки практически равномерно. Испытание витковой изоляции во время укладочных работ можно проводить с помощью установки 2К8 и других приборов, чаще называемых «искателями витковых замыканий». Для того, чтобы не повредить корпусную изоляцию при проведении испытаний витковой изоляции, необходимо сердечник статора с испытываемыми катушками изолировать от земли.

Представляет интерес величина коэффициента импульса  $K_U$ . Его значения подсчитывались по отношению:

$$K_U = \frac{U \text{ импульсное}}{U \text{ переменное амплитудное}},$$

где  $U_{\text{имп}}$  — пробивное напряжение от установки 2К8. Для принятых конструкций витковой изоляции  $K_U$  можно принять равным единице.

В заключение следует сказать, что проведенная работа позволила повысить нормы испытательных напряжений витковой изоляции против действующих норм (750 в/в для катушек и 500 в/в для статорных обмоток) и тем самым сделать их более эффективными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. З. Г. Каганов, Н. В. Крутов. Установки для профилактических испытаний витковой изоляции электродвигателей высокого напряжения с предварительным зарядом обмотки. Сб. «Испытания витковой изоляции электрических машин». М., 1959.
2. Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. Курс теории вероятностей и математической статистики. М., «Наука», 1969.
3. З. Г. Каганов, Н. В. Крутов. Вопросы профилактики витковой изоляции электродвигателей. Сб. «Изоляция электрических машин». М, ГЭИ, 1958.
4. Н. В. Смирнов. Контроль и испытания обмоток электрических машин и аппаратов. М., Госэнергоиздат, 1959.
5. В. Н. Королев. Испытания изоляции машин высокого напряжения. «Электротехника», 1964, № 12.