

УДК 621.313.33

П.Ф. Буданов, А.А. Сытин, Ю.А. Ясинский

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ВЫБОР И РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МЕЖДУВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*В статье рассмотрены известные методики выбора и расчета параметров профилактических испытаний изоляции обмоток электродвигателей. Доказана принципиальная возможность использовать известные методики для выбора и расчета параметров профилактических испытаний изоляции обмоток силовых трансформаторов. Показано, что известные методики имеют серьезные недостатки, а именно: в них не учитывается влияние эксплуатационных нагрузок на электрическую прочность изоляции. Предложена новая методика выбора параметров профилактических испытаний, которая учитывает действие основных эксплуатационных механических, тепловых, электрических нагрузок на изоляцию обмоток. Особенностью предлагаемой методики является применение основных характеристик изоляции, которые предлагается строить по данным испытаний образцов новой изоляции и данным эксплуатации трансформаторов.*

**Ключевые слова:** междувитковая изоляция трансформаторов, профилактические испытания, методика выбора параметров испытаний.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Эффективность профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток силовых трансформаторов в основном зависит от выбора и расчета параметров этих испытаний.

Публикаций непосредственно по выбору и расчету параметров профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток силовых трансформаторов до настоящего времени не имеется. Известны методики выбора параметров профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток электродвигателей, которые достаточно подробно изложены в работах [2 – 4].

В работе [1] доказано, что при импульсных воздействиях на обмотки высоковольтных электродвигателей и трансформаторов распределение напряжений в них описывается одинаковыми математическими выражениями.

Это обстоятельство позволяет использовать данные, полученные в работах [2 – 4] по импульсным процессам в обмотках электродвигателей, для разработки методики выбора параметров профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток силовых трансформаторов.

Наиболее полно выбор параметров профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток электродвигателей с использованием высокочастотного импульсного испытательного напряжения  $U_{вч}$  выполнен в [4].

В работе [5] подробно рассмотрен метод выбора параметров с учетом схемы испытаний, обоснованной в [3] и получившей широкое распространение в производственной практике.

Распределение высокочастотного напряжения  $U_{вч}$  в обмотке трансформатора, как и в обмотке электродвигателя, зависит от величин распределенных и сосредоточенных параметров обмотки [1].

Рассмотренные в работах [2 – 4] параметры профилактических испытаний изоляции обмоток электродвигателей позволяют оценить только распределение вдоль обмотки импульсного испытательного напряжения. Учесть влияние эксплуатационных механических, тепловых, электрических нагрузок на электрическую прочность изоляции при этом не представляется возможным, что является основным недостатком существующих методов профилактических испытаний междувитковой изоляции обмоток электродвигателей.

**Целью статьи** является разработка методики выбора параметров профилактических испытаний изоляции обмоток трансформаторов с учетом основных эксплуатационных нагрузок и их влияния на электрическую прочность изоляции.

### Основной материал

#### 1. Выбор и расчет величин распределенных и сосредоточенных параметров обмотки силового трансформатора.

Аналогично данным работы [3, рис. 4] для обмотки трансформатора принимаются следующие распределенные параметры и их обозначения:  $C_p$  – емкость элемента обмотки на корпус;  $L_p$  – индуктивность элемента;  $C_{пр}$  – продольная емкость элемента;  $r_p$  – сопротивление элемента, эквивалентное потерям в меди;  $R_p$  – сопротивление элемента, эквивалентное потерям в стали при высоких частотах.

Распределенные параметры обмотки трансформатора можно с достаточной для профилактиче-

ских испытаний точно определить по ее сосредоточенным параметрам: ёмкости обмотки на корпус  $C_c$ , индуктивности обмотки  $L_c$ , активного сопротивления обмотки постоянному току  $r_c$ , сопротивления обмотки, эквивалентного потерям в стали  $R_c$ , используя при этом несложные расчеты и экспериментальные данные.

Для получения необходимых экспериментальных данных достаточно снять характеристики холостого хода  $U_{xx} = f(t)$  и короткого замыкания  $i_{кз} = f(t)$  обмотки, как это показано в работе [5, рис. 3], и по этим данным могут быть рассчитаны распределенные и сосредоточенные параметры обмотки трансформатора, кроме сосредоточенной индуктивности обмотки  $L_c$ , величина которой определяется по номинальным данным трансформатора:

$$L_c = \frac{k_{ст}}{\omega_{вч}} \sqrt{\left(\frac{U_H}{I_H \sqrt{3}}\right)^2 - r_{обм}^2}, \quad (1)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение;  $I_H$  – номинальный ток;  $r_{обм}$  – нормированное значение сопротивления обмотки постоянному току (определяется по расчетному формуляру);  $k_{ст}$  – коэффициент, учитывающий процессы в стали;  $\omega_{вч}$  – частота колебаний напряжения  $U_{вч}$ .

Рекомендуемое выражение (1) не требует определения и использования многих геометрических параметров обмотки. Величины сопротивлений  $r_c$  и  $R_c$  определяются соответственно по характеристикам холостого хода и короткого замыкания [5]:

$$r_c = \frac{L_c}{\tau_{кз}} - (R_r - R_{ш}), \quad (2)$$

$$R_c = \frac{2L_c \ln(A_1/A_2)}{T_{xx}}, \quad (3)$$

где  $\tau_{кз}$  – постоянная времени в режиме короткого замыкания обмотки (определяется по характеристике короткого замыкания);  $R_r$  – разрядное сопротивление генератора импульсов  $U_0$ ;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта при измерениях тока короткого замыкания;  $A_1, A_2$  – амплитуды 1-го и 2-го колебаний напряжения холостого хода  $U_{xx}$ ;  $T_{xx}$  – период колебаний напряжения  $U_{xx}$ .

Зная  $T_{xx}$ , можно определить величину параметра  $C_c$  [5]:

$$C_c = \frac{T_{xx}}{4\pi^2 L_c}. \quad (4)$$

Величины параметров  $r_p, C_p, R_p$  можно определить по формулам, предложенным в [3, 5]:

$$r_p = r_c / n; \quad C_p = C_c / n; \quad R_p = R_c \cdot n, \quad (5)$$

где  $n$  – число секций обмотки, учтенных в схеме замещения [3, рис. 4].

С достаточной степенью точности величину параметра  $L_p$  можно определить из выражения [5]:

$$L_p = \frac{L_c}{mk_p + n}, \quad (6)$$

где  $m$  – удвоенное число электромагнитных связей в обмотке (подсчитывается по конкретной схеме обмотки электродвигателя);  $k_p$  – коэффициент связи между звеньями схемы замещения.

Коэффициент  $k_p$  можно определить из выражения [5]:

$$k_p = (0,7 \dots 0,8) \cdot (\gamma_1 / \gamma), \quad (7)$$

где  $\gamma$  – число эффективных проводников в катушке фазы обмотки;  $\gamma_1$  – число эффективных проводников в катушке, связанных с другими звеньями.

Числовые значения  $\gamma$  и  $\gamma_1$  определяются по конкретной схеме обмотки трансформатора.

С помощью выражений (1) – (7) выбираются основные параметры испытательной схемы с учетом необходимой степени равномерности распределения импульсного испытательного напряжения по виткам обмотки.

## 2. Расчет величины испытательного напряжения и длительности испытания изоляции.

Для учета влияния основных эксплуатационных нагрузок на электрическую прочность изоляции обмоток трансформаторов при проведении профилактических испытаний дополнительно к выбираемым распределенным и сосредоточенным параметрам целесообразно добавить выбор таких параметров, как величина испытательного напряжения и длительность испытаний.

Эти параметры можно определить по двум основным характеристикам изоляции: “кривой срока службы” и кривой зависимости пробивного напряжения от времени и величины приложенного напряжения, описанных в работе [2]. С достаточной для профилактических испытаний межвитковой изоляции обмоток трансформаторов точно обе эти характеристики могут быть построены по данным контрольных испытаний образцов новой изоляции, которые выполняются разработчиками [2], и данным эксплуатации трансформаторов с использованием следующих выражений (8) – (10):

$$\lg T_{сл} = \lg C_c - (U/B_e) \lg e; \quad (8)$$

$$U_{пр} = U_{пр.о.} - B_e \ln T_{сл}, \quad (9)$$

$$k_{xi} = i \cdot t_{исп} \exp(-U_{пр.0}/B_e) \sum_{i=1}^T \exp(-U_{исп.i}/B_e), \quad (10)$$

где  $T_{сл}$  – срок службы изоляции, лет;  $C_c$  – коэффициент, зависящий от конструкции изоляции;  $U$  – приложенное напряжение, кВ;  $B_e$  – скорость спада пробивного напряжения, кВ/ч;  $U_{пр}$  – текущее значение пробивного напряжения, кВ;  $U_{пр.о.}$  – начальное значение пробивного напряжения, кВ;  $k_{xi}$  – коэффициент, характеризующий часть от полного срока изоляции, соответствующего длительности приложения испытательного напряжения  $t_{исп}$  при  $i$ -м ис-

пытании;  $U_{исп.i}$  – величина испытательного напряжения при  $i$ -м испытании.

Из выражения (10) следует, что вероятность пробоя изоляции в процессе проведения ее профилактических испытаний возрастает линейно с увеличением времени испытания  $t_{исп}$  и экспоненциально с ростом величины испытательного напряжения  $U_{исп.i}$ . Следовательно, для увеличения эффективности испытаний, которая будет повышаться в случае, если возрастет вероятность пробоя изоляции в процессе испытаний (а не в условиях эксплуатации трансформаторов), надо увеличивать суммарное время профилактических испытаний.

По результатам профилактических испытаний можно определить вероятную величину пробивного напряжения в зависимости от текущих значений величины приложенного напряжения  $U$  и времени его действия  $t$ :

$$U_{пр} = U_{пр.0} (U_{пр.0} / U)^{-t/T_{сл}}. \quad (11)$$

Выражение (11) имеет смысл, если  $t_0 \leq t$  и  $U \leq U_{пр.0}$ . В момент, когда  $U = U_{пр.0}$ , наступит пробой изоляции. Каждому значению напряжения  $U$  соответствует определенный срок службы  $T_{сл}$ .

Для выбора числа профилактических испытаний и периода времени между испытаниями исходной информацией являются: величина испытательного напряжения  $U_{исп.i}$ , время испытания  $t_{исп}$ , максимальный интервал времени между первым и последним (планируемым) испытанием  $T_{макс}$ , где пробивное напряжение будет меньше испытательного.

Для определения промежутка времени  $T_{макс}$  будем исходить из предпосылки, что между соседними испытаниями не должно происходить аварийного пробоя изоляции. Тогда:

$$\Delta U_{пр} = U_{пр}(T_1) - U_{пр}(T_2) = U_{исп1} - U_{пр.мин}, \quad (12)$$

где  $\Delta U_{пр}$  – снижение пробивного напряжения между соседними испытаниями;  $T_1, T_2$  – соответственно периоды времени, которые соответствуют начальному и конечному испытанию;  $U_{исп1}$  – величина испытательного напряжения при первом профилактическом испытании;  $U_{пр.мин}$  – минимальная электрическая прочность изоляции.

Для использования выражения (12) необходимо учитывать следующие условия:

- между первым и последним профилактическими испытаниями изоляция постоянно находится под воздействием рабочего напряжения;
- чрезмерные по величине внутренние перенапряжения на электрооборудование в этот период не воздействуют.

В момент времени  $T_1$  максимальное значение испытательного напряжения  $U_{исп}$  определится следующим образом:

$$U_{исп.макс} = U_{пр.0} (U_{пр.0} / U_{ф})^{-T_1/T_{сл.н}}. \quad (13)$$

В момент времени  $T_2$  минимальное пробивное напряжение изоляции  $U_{пр.мин}$  определится по выражению:

$$U_{исп.мин} = U_{пр.0} (U_{пр.0} / U_{ф})^{-T_2/T_{сл.н}}. \quad (14)$$

Прологарифмировав выражения (13) и (14), определим период времени  $T_{макс}$ :

$$T_{макс} = \frac{\ln(U_{исп.макс} / U_{пр.мин}) \cdot \exp\left[\frac{(U_{пр.0} - U_{ф})}{B_e}\right]}{\ln(U_{пр.0} - U_{ф})}. \quad (15)$$

В выражение (15) входят все основные исходные данные, правильный выбор и задание которых гарантируют с вероятностью 0,95 отсутствие аварийных пробоев изоляции электрооборудования в течение времени  $T_{макс}$  между начальным и конечным профилактическими испытаниями.

Как видно из выражений (8) – (10), “кривую срока службы” можно построить в полулогарифмических координатах в виде прямой, которая проходит через две точки. Первую точку этой характеристики можно определить по статистическим данным об аварийности изоляции электрооборудования (при действии рабочего фазного напряжения  $U_{ф}$  срок службы изоляции имеет нормированное значение  $T_{сл.н}$ ).

Вторую точку “кривой срока службы” изоляции можно получить, используя экспериментальные данные по электрической прочности новой изоляции, которые в том или ином виде имеются для каждого типа электрооборудования (при одномоментных испытаниях может быть получено значение максимума испытательного напряжения  $U_{исп.макс}$ , либо может быть известна величина пробивного напряжения  $U_{пр.0}$  в момент ввода изоляции в эксплуатацию).

Координаты двух точек для построения “кривой срока службы” изоляции будут следующие:

- первая точка –  $U_{исп.макс}, \ln t_{исп}$ ;
- вторая точка –  $U_{пр.0}, \ln t_{пр}$ .

## Выводы

1. Разработана методика выбора параметров профилактических испытаний изоляции обмоток трансформаторов с учетом действия основных эксплуатационных нагрузок.

2. Предложена формула для определения вероятной величины пробивного напряжения в зависимости от текущего значения приложенного напряжения и времени его действия.

3. Для выбора числа профилактических испытаний и периода времени между испытаниями используются: величина испытательного напряжения  $U_{исп.i}$ , время испытания  $t_{исп}$ , максимальный интервал времени между первым и последним (планируемым)

испытанием  $T_{\max}$ , где пробивное напряжение будет меньше испытательного.

4. В полученное выражение (9) входят все основные исходные данные, правильные выбор и задание которых гарантируют с вероятностью 0,95 отсутствие аварийных пробоев изоляции электрооборудования в течение времени  $T_{\max}$  между начальным и конечным профилактическими испытаниями.

### Список литературы

1. Геллер Б. Волновые процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1980. – 485 с.
2. Козырев Н.А. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1967. – 264 с.
3. Пустоваров В.Е. Особенности воздействия импульсных напряжений на обмотки электродвигателей при

профилактических испытаниях их изоляции / В.Е. Пустоваров, Ю.А. Ясинский, Т.А. Писаренко, В.Н. Новосад // Системы обработки информации: Сборник науч. работ. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 10. – С. 87-90.

4. Ясинский Ю.А. Повышение надежности изоляции высоковольтных электродвигателей на предприятиях ЦБП / Ю.А. Ясинский, Б.И. Панышин. – Бумажная промышленность. – 1983. – № 11. – С. 29-30.

5. Пустоваров В.Е. Методика выбора параметров профилактических испытаний изоляции электрооборудования с учетом эксплуатационных воздействий / В.Е. Пустоваров, Ю.А. Ясинский, Т.А. Писаренко // Системы обработки информации: Сборник науч. работ. – Х.: ХВУ, 2004. – Вып. 9. – С. 97-100.

Поступила в редколлегию 18.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Гриб, НТУ "ХПИ", Харьков.

### ВИБІР І РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ ПРОФІЛАКТИЧНИХ ПРОБУВАНЬ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

П.Ф. Буданов, О.А. Ситін, Ю.О. Ясинський

У статті розглянуті відомі методики вибору й розрахунку параметрів профілактичних випробувань ізоляції обмоток електродвигунів. Доведено принципову можливість використовувати відомі методики для вибору й розрахунку параметрів профілактичних випробувань ізоляції обмоток силових трансформаторів. Показано, що відомі методики мають серйозні недоліки, а саме: у них не враховується вплив експлуатаційних навантажень на електричну міцність ізоляції. Запропонована нова методика вибору параметрів профілактичних випробувань, що враховує дію основних експлуатаційних механічних, теплових, електричних навантажень на ізоляцію обмоток. Особливістю запропонованої методики є застосування основних характеристик ізоляції, які пропонується будувати за даними випробувань зразків нової ізоляції й даним експлуатації трансформаторів.

**Ключові слова:** міжвиткова ізоляція трансформаторів, профілактичні випробування, методика вибору параметрів випробувань.

### A CHOICE OF PARAMETERS OF PREVENTIVE TESTING OF TRANSFORMERS INSULATION

P.F. Budanov, A.O. Sytin, Y.A. Yasinsky

A choice technique of parameters in preventive testing of winding insulation for power transformers, which allows an action of the basic operational loads on insulation has suggested. The main characteristic property of this technique is based on using fundamental insulation performances, which is proposed to make by the new insulation data testing samples and by data using transformers.

**Keywords:** inter-turn isolation of transformers, prophylactic tests, method of choice of parameters of tests.