

Е.А. Сорока, Е.Б. Ковалев, Ю.Н. Папазов

## МЕТОДЫ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ПОДСТАНЦИЙ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

*Анализ методов тепловых испытаний и исследований взрывозащищенных трансформаторов и КТП. Принципиальная возможность повышения их точности в связи с растущими требованиями к качеству экспериментальных данных.*

**Постановка проблемы.** Тепловые ограничения играют решающую роль при эксплуатации современных электрических машин различного назначения, так как их нагрев является причиной многообразных термохимических, термофизических и термомеханических явлений, которые могут угрожать жизнеспособности изделия. Отсюда вытекает необходимость в достоверной и подробной информации о его тепловом состоянии при различных режимах работы. Вопрос стоит особенно остро для высокоиспользуемых взрывозащищенных и сухих трансформаторов (с естественным воздушным охлаждением) и комплектных трансформаторных подстанций (КТП), активная часть которых работает в крайне напряженном тепловом режиме, а тепловые перенапряжения возрастают с повышением номинальной мощности (1000, 1250, 1600 кВ·А) [1, 2].

Текущие измерения температуры в эксплуатационных режимах с целью предупреждения аварийных ситуаций выполняются только для масляных трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и выше [3] для контроля температуры верхних слоев масла устанавливают термометрические сигнализаторы типа ТСМ-100. В рудничных трансформаторах и КТП, устанавливаемых в подземных выработках угольных шахт, опасных по газу (метану) и пыли, температурных измерений не производят, а тепловое состояние изделий определяется в лабораторных условиях при проведении тепловых испытаний по [4]. Этот стандарт устанавливает требования к методам испытаний на нагрев и к измерению превышений температуры, которые являются основными параметрами, нормируемыми в [5, 6].

Тепловые испытания взрывозащищенных трансформаторов и КТП проводятся различными методами в зависимости от их номинальной мощности, что связано с техническими возможностями испытательного стенда и приводит к различным методикам расчета среднего превышения температуры обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения ( $\Theta_{ВНср}$ ,  $\Theta_{ННср}$ ) [1,2]. В связи с этим целесообразно проанализировать результаты тепловых испытаний КТП в зависимости от метода их проведения.

**Анализ исследований и публикаций.** Подробную информацию о температурном поле трансформатора можно получить теоретическим путем на основе уравнения теплопроводности ( $q = -\lambda \text{grad}\Theta$ ). Корректная математическая модель обеспечивает довольно полную картину теплового поля, если имеются достоверные сведения о распределении потерь, свойствах материалов и потоках охлаждающих агентов. Однако обычная для практики неопределенность таких данных заставляет сомневаться в соответствии расчетной температуры истинному значению по крайней мере до тех пор, пока теоретические результаты не будут подтверждены надежными экспериментами.

К важнейшим тепловым параметрам, определяющим состояние трансформатора, относятся:

- а) температурные поля отдельных его частей

$$T_i = f_i(x_i, y_i, z_i),$$

$$T_j = f_j(x_j, y_j, z_j),$$

.....

$$T_n = f_n(x_n, y_n, z_n);$$

- б) средняя температура этих частей  $T_{icp}, T_{jcp}, \dots, T_{ncp}$ .

Из температурных полей выделяются максимальные значения температуры  $T_{i \max}, T_{j \max}, \dots, T_{n \max}$ , которые являются основными параметрами теплового состояния, определяющими допустимость перегрузок. Средняя температура (превышение температуры) является нормируемым параметром. При этом предполагаются определенные соотношения между  $T_{i \max}$  и  $T_{icp}$ , которые делают нормируемый параметр  $T_{icp}$  достаточным критерием.

Получение экспериментальной информации (опытных результатов тепловых испытаний) требует присутствия в конструкции трансформатора средств измерения температуры. Для определения температурных полей взрывозащищенных трансформаторов и КТП такими средствами являются термоэлектрические термометры медь-константановые (ТМК), получившие благодаря своей технологичности наибольшее распространение при тепловых испытаниях и исследованиях электрических машин [7]. Их устанавливают при подготовке объекта к испытаниям в элементах активной части трансформатора, на оболочках активной части и распределительных устройствах ВН и НН. Установленные блоки ТМК составляют тепловую измерительную схему, сложность которой зависит от необходимого объема испытаний, то есть необходимой степени изучения тепловых полей. Практика проведения измерительных операций при тепловых испытаниях раз-

личных как по конструкции, так и по мощности образцов рудничных трансформаторов и КТП показала свою надежность и достоверность, особенно при применении высокоточной измерительной техники как, например, цифровых вольтметров В7-23 или В7-27.

Такие испытания позволяют при соответствующей технической подготовке (с соблюдением правил техники безопасности) определять температурное поле любого элемента КТП, в том числе наиболее высокопотенциальных частей трансформатора – обмоток ВН, что было подтверждено экспериментальными измерениями температуры с помощью установки типа УАЗТ-50, разработанной отделом трансформаторов УкрНИИВЭ (ВНИИВЭ) совместно с ОАО «Донецкий энергозавод».

Вторым важным аспектом тепловых испытаний трансформаторов и КТП является определение средней температуры (превышения температуры  $\Theta$ ) обмоток ВН и НН косвенным методом по изменению сопротивления обмоток постоянному току по [8]. Следует отметить, что метод сопротивления с применением мостовых схем измерения (мостовая установка типа У-303;  $R_x = 10^{-6} \dots 10^6$  Ом) средней температуры является наиболее точным (в сравнении с методом «вольтметр-амперметр»). При этом для медных обмоток действительна зависимость [7]:

$$T_{об.м} = (R_o / R_x - 1)(235 + T_x) + T_x, \quad (1)$$

где  $T_{об.м}$  и  $R_o$  – искомая температура обмотки в рабочем состоянии и соответствующее ей сопротивление.

Измерения сопротивления обмотки «в холодном состоянии» ( $R_x$ ) проводят для установления взаимного соответствия величин  $T_x$  и  $R_x$ . Они играют роль базового измерения для последующего определения  $T_{об.м}$ .

Вышеизложенная методика тепловых испытаний является основной для типоразмеров всей серии трансформаторных подстанций КТПВ мощностью от 100 до 1250 кВ·А по [6].

**Цель статьи.** Анализ зависимости расчетного и экспериментального определения полного превышения температуры элементов активной части трансформатора от метода испытаний на нагрев.

**Результаты исследований.** Согласно [9, 10] тепловые испытания взрывозащищенных трансформаторов и КТП входят в программу периодических испытаний (один раз в три года на одном образце трансформатора и КТП каждого типоразмера), необходимых для проверки соответствия изделий требованиям указанных стандартов и соответствующих технических условий [7,11]. Если учесть, что значения превышений температуры ( $\Theta_{ВНср}$ ,  $\Theta_{ННср}$ ,  $\Theta_{НН max}$ ) являются характеристиками трансформатора, гарантированными изготовителем и подтвержденными испытаниями

при заданных номинальных значениях электрических параметров, то становится очевидным повышенная важность таких испытаний.

Из теории трансформатора известно, что мощность, потребляемая им при номинальной нагрузке  $P'$ , всегда больше отдаваемой мощности  $P$  на значение потерь холостого хода (ХХ)  $P_o$  и короткого замыкания (КЗ)  $P_k$ :

$$P = P' - (P_o + P_k).$$

Эти потери выделяются в виде тепла в обмотках, магнитопроводе и других частях конструкции, нагревая их до определенной температуры, от которой зависит степень старения изоляционной системы, являющейся основным гарантом надежности и долговечности трансформатора. Отсюда вытекает важнейший аспект необходимых условий проведения тепловых испытаний, заключающийся в том, что проводить их следует при номинальных условиях по нагреву согласно п.5.1.4 [4], то есть при номинальных потерях ХХ и КЗ с последующим определением превышения температуры элементов активной части – обмоток НН, ВН и магнитной системы – при установившемся тепловом состоянии ( $\Theta_{тр} = \text{const}$ ).

Испытания трансформаторов и КТП на нагрев по программе приемосдаточных и периодических испытаний проводят, как правило, на заводе-изготовителе. Их результаты сравнивают с действующими нормами, после чего делается вывод о степени работоспособности испытанного образца.

Ситуация изменяется, если возникает необходимость определения теплового состояния трансформаторов и КТП новых серий, т.е. опытных образцов вновь разрабатываемой продукции рудничного трансформаторостроения. Здесь, также как и в периодических испытаниях серийной продукции, определяется превышение температуры обмоток и магнитопровода ( $\Theta_{НН, ВН}; \Theta_{маг}$ ). Однако результаты одноразового испытания на нагрев и показания ограниченного числа ТМК не способны создать полноценного представления о термических качествах и фактической тепловой мощности трансформатора новой конструкции. В подобных случаях требуется более тщательное изучение температурного поля объекта, основанное на показаниях многочисленных ТМК, дополняющих штатную систему теплового контроля [2].

В задачи таких испытаний входит опытное определение зависимости температуры различных частей трансформатора от нагрузки, условий охлаждения активной части и некоторых других параметров ( $\Theta_{НН, ВН} = f(P)$ ;  $\Theta_{НН} = f(H)$ , где  $H$  – высота обмотки) [1]. В этом случае тепловые испытания приобретают значение исследовательских, в ходе которых мы не только изучаем количественные характеристики процесса передачи тепла, но нередко уточняем свои представления о механизме теплообмена в трансформаторе [12]. Подобное исследование тесно связано с перспективой развития конструкций и имеет целью их совершенствование.

В связи с вышеизложенным, при проведении предварительных испытаний опытных образцов трансформаторов и КТП [1,2] особое значение приобретает выбор метода испытаний на нагрев по [4], который зависит от расчетной мощности испытуемого объекта и, в отдельных случаях, от схемы и группы соединения его обмоток. Принципиально приемлемыми являются методы непосредственной и взаимной нагрузки по следующей основной причине: при тепловых испытаниях выполняются номинальные условия по нагреву согласно 5.1.4 [4], при которых потери в трансформаторе равны сумме потерь КЗ и ХХ ( $\Sigma P = P_k + P_o$ ). Как при первом, так и при втором методе испытаний на нагрев устанавливают номинальный режим работы трансформатора, при котором длительно (до установившегося теплового состояния) поддерживают потери ХХ и потери КЗ при напряжении  $U_{1 ном} = const$  и силе тока  $I_{2 ном} = const$ .

Достоверность результатов испытаний по этим методам достаточно высока, так как потери в процессе преобразования электрической энергии в трансформаторе выделяются в виде тепла в обмотках, магнитопроводе и в других частях его конструкции одновременно. Она зависит только от точности измерительных средств и их правильного применения на каждом этапе эксперимента.

Следует указать на основные технические особенности данных методов тепловых испытаний. Метод непосредственной нагрузки:

- а) необходимость наличия соответствующих нагрузочных сопротивлений;
- б) непроизводительный расход электроэнергии при  $S_{mp} > 25$  кВ·А (поэтому в заводских условиях этот метод применяют только для маломощных трансформаторов).

Метод взаимной нагрузки:

- а) применим для трансформаторов любой мощности с любой системой охлаждения;
- б) требует дополнительно установки двух трансформаторов (вспомогательного и вольтодобавочного) и наличия больших размеров испытательного поля.

Метод КЗ по [4] для взрывозащищенных «сухих» трансформаторов типа ТСВ неприменим, так как их магнитная система в этом случае практически останется холодной, отбирая часть теплоты обмотки НН, в то время как в условиях нормальной работы магнитная система увеличивает нагрев этой обмотки.

При внедрении в производство новой серии КТП были проведены [1] тепловые исследовательские испытания опытных образцов типа КТПВ-630/6 и КТПВ-1000/6 методом взаимной нагрузки на специализированном испытательном стенде по «Рабочей методике государственных испытаний на нагрев» согласно [4]. Получены необходимые для сравнения с действующими нормами значения тепловых параметров КТП, а также зависимо-

сти как максимальных, так и средних значений превышения температуры обмоток НН и ВН от нагрузки, отображающие характер тепловых процессов в «сухом» трансформаторе этих КТП в различных режимах нагревания активной части:  $\Theta_{НН \max} = f(P/P_{ном})$ ;  $\Theta_{НН, ВН, магн} = f(P/P_{ном})$ .

В [2] изложены результаты исследовательских испытаний опытного образца КТПВ-1250/6, осуществленных методом условной нагрузки в двух отдельных тепловых режимах в последовательности и по методике, установленной для испытаний на нагрев «сухих» трансформаторов по [4] – в режиме ХХ и в режиме КЗ (таблица 1).

Таблица 1

Режим нагревания продолжительный	Превышение температуры обмоток и магнитной системы по сопротивлению, °С		
	обмотка НН	обмотка ВН	Магнитопровод (верхнее ярмо)
Холостого хода ( $U_{ВН}=6000$ В)	34,6	29,5	120,5
Короткого замыкания ( $P_{ном}=1250$ кВ·А)	122,3	140,4	89,2

Принципиальное отличие данного метода от вышеуказанных заключается в методике определения тепловых параметров КТП ( $\Delta\Theta_{НН,ВН,ср}$  и  $\Delta\Theta_{НН,макс}$ ). Значения полных превышений температуры определяются путем приведения результатов измерения (таблица 1) к номинальным условиям в соответствии с приложением Ж [4] по формулам:

$$\Delta\Theta_{обм} = \Delta\Theta''_{обм} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\Theta'_{обм}}{\Delta\Theta''_{обм}} \right)^{1,25} \right]^{0,8}, \quad (1)$$

$$\Delta\Theta_{обм}^{max} = \Delta\Theta''_{обм} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\Theta'_{обм}^{max}}{\Delta\Theta''_{обм}^{max}} \right)^{1,25} \right]^{0,8}, \quad (2)$$

$$\Delta\Theta_{маг} = \Delta\Theta'_{маг} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\Theta''_{маг}}{\Delta\Theta'_{маг}} \right)^{1,25} \right]^{0,7}, \quad (3)$$

где  $\Delta\Theta'_{обм}$  – превышение температуры обмотки в режиме ХХ;

$\Delta\Theta''_{обм}$  – превышение температуры обмотки в режиме КЗ;

$\Delta\Theta'_{обм}^{max}$  – максимальное превышение температуры обмотки в режиме ХХ;

$\Delta\Theta''_{обм}^{max}$  – максимальное превышение температуры обмотки в режиме КЗ;

$\Delta\Theta'_{\text{маг}}$  – превышение максимальной температуры магнитопровода в режиме ХХ;

$\Delta\Theta''_{\text{маг}}$  – превышение максимальной температуры магнитопровода в режиме КЗ.

Таким образом, нормируемые тепловые параметры взрывозащищенных трансформаторов и КТП определяются по разным методикам в зависимости от метода испытаний на нагрев. При условии единства методических приемов, базирующихся на применении идентичных измерительных средств, можно говорить о достоверности расчетных значений  $\Theta_{\text{НН}}$ ,  $\Theta_{\text{ВН}}$  и  $\Theta_{\text{НН max}}$  в аспекте наличия определенной погрешности при сравнении данных по (1)-(3) с данными испытаний по двум вышеуказанным методам. Очевидно, что оценить эту погрешность можно только экспериментально при тепловых испытаниях КТПВ-1250/6 методом непосредственной или взаимной нагрузки, что по техническим причинам в настоящее время не представляется возможным.

#### **Выводы:**

1. Актуальность вопросов тепловых испытаний взрывозащищенных трансформаторов и КТП обусловлена развитием рудничного трансформаторостроения, выдвигающим растущие требования к качеству опытных образцов, подготовленных к производству.

2. Тепловые испытания взрывозащищенных трансформаторов и КТП повышенной мощности (1000, 1250, 1600 кВ·А) наиболее предпочтительно проводить по методу взаимной нагрузки, для чего необходимо доукомплектовать стенд взаимной нагрузки лабораторной базы вспомогательным трансформатором (активной частью) мощностью 1250 кВ·А.

3. Для уточнения экспериментально-расчетных данных теплового состояния КТПВ-1250/6 и ТВКП-1000/6 можно рекомендовать проведение тепловых испытаний методом взаимной нагрузки с последующим сравнением данных по методу условной нагрузки.

#### Список литературы

1. Сорока Е.А. Особенности нагревания активной части взрывобезопасной трансформаторной подстанции мощностью 1000 кВ·А в различных режимах / Е.Н.Сорока, Е.В.Золотарев // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр УкрНИИВЭ. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – С. 38 – 49.

2. Тепловые исследования активной части трансформаторной подстанции типа КТПВ-1250/6-1,2 в различных условиях нагрева и охлаждения / В.М. Грушко, Е.В. Золотарев, Е.А. Сорока, И.Я. Чернов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006. –С. 64-73.

3. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677-85 (СТ СЭВ 1102-78).- [Введен с 1986-07-01].- М.: Изд-во стандартов, 1986.-51с.
4. Трансформатори силові. Допустимі перевищення температури та методи випробування на нагрівання: ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98).- [Чинний від 2000-07-01]. -К.:Держстандарт України, 2000.-45с.
5. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация: ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84).- [Введен с 1995-01-01].- К.:Госстандарт Украины, 1996.-8с.
6. Подстанции комплектные трансформаторные взрывобезопасные типа КТПВ: технические условия ТУУ 31.1-00217159-034-2002.-25 с.
7. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин / Э.И.Гуревич. – Л.: Энергия, 1987. – 294 с.
8. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний: ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ1070-78).- [Введен с 1990-01-01].-М.:Изд-во стандартов, 1989.-33с.
9. Трансформаторы рудничные силовые взрывобезопасные. Общие технические условия: ГОСТ 15542-79).- [Введен с 1982-01-01].-М.: Изд-во стандартов, 1988.-12с.
10. Подстанции рудничные комплектные трансформаторные взрывобезопасные передвижные. Общие технические условия: ГОСТ 16837-79 (СТ СЭВ 1133-78, СТ СЭВ 1381-78).- [Введен с 1986-12-01].-М.: Изд-во стандартов, 1979.-12с.
11. Трансформаторы типа 2ТСВ: технические условия ТУ У 31.1-00217159-087:2006.-35с.
12. Анализ и аспекты совершенствования систем охлаждения взрывозащищенных трансформаторов и подстанций / Сорока Е.А., Чернов И.Я., Грушко В.М., Доронкин В.В., Руденко Т.В. // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч.тр УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – С. 49-70.