

Е.А. Сорока, Э.Г. Куренный

КОСВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК СУХИХ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Экспериментально-расчетный метод определения превышения температуры обмоток высшего и низшего напряжения сухих взрывозащищенных трансформаторов – основной сборочной единицы передвижных подстанций.

К л ю ч е в ы е с л о в а: активная часть, обмотки, подстанция, превышение температуры, трансформатор, метод испытания.

Експериментально-розрахунковий метод визначення перевищення температури обмоток вищої та нижчої напруги сухих вибухозахищених трансформаторів – основної складальної одиниці пересувних підстанцій.

К л ю ч о в і с л о в а: активна частина, обмотки, підстанція, перевищення температури, трансформатор, метод випробування.

Постановка проблемы. Превышение температуры обмоток трансформаторов сухих взрывозащищённых (ТСВ) комплектных передвижных подстанций (КТП) является основным параметром, определяющим тепловое состояние изделий и нормируемым в [1] и ГОСТ 8865-93.

Среднее и максимальное превышение температуры обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения ($\Theta_{ВН_{cp}}$, $\Theta_{НН_{cp}}$, $\Theta_{НН_{max}}$) определяют в результате тепловых испытаний, которые являются одной из важнейших составляющих государственных испытаний согласно ГОСТ 15542-79 и ГОСТ 16837-79 и входят в программу периодических и типовых испытаний. Требования ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98) регламентируют проводить испытания ТСВ и КТП на нагрев различными методами (непосредственной нагрузки, взаимной нагрузки, условной нагрузки) в зависимости от их номинальной мощности, что связано с техническими возможностями испытательного стенда лаборатории и в итоге приводит к различным методикам расчёта основных тепловых параметров ТСВ.

Поэтому актуальна разработка метода расчёта превышения температуры обмоток, отличного от метода расчёта при проведении испытаний по принципиально аналогичному методу условной нагрузки по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98).

Анализ исследований и публикаций. Тепловые испытания и исследования ТСВ и КТП опытных и серийных образцов на протяжении послед-

них 20-ти лет в ГП «УкрНИИВЭ» проводятся методом взаимной нагрузки и методом условной нагрузки по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98), отличия между которыми и достоинства каждого из них достаточно полно изложены в [2].

При испытаниях на нагрев опытных образцов КТП серии КТПВ мощностью 630 и 1000 кВ·А был применён метод взаимной нагрузки [3] (один из искусственных методов испытания, воспроизводящих номинальные условия работы ТСВ), а полное превышение температуры обмоток определялось по формуле:

$$\Theta_{HH, BH} = \frac{R_o - R_{хол}}{R_{хол}} \cdot (K + T_{хол}) + T_{хол} - T_{окр}, \quad (1)$$

где R_o – сопротивление обмоток в момент отключения КТП, Ом;

$R_{хол}$ – то же в холодном состоянии, Ом;

$T_{хол}$ – температура при измерении $R_{хол}$, °С;

$T_{окр}$ – то же при измерении R_o , °С;

K – коэффициент, равный 235 для обмоток из меди.

При испытании аналогичных образцов КТП типа КТПВ-1250/6, ТВКП-1000/6 и ТВПШ-630/6 использован метод условной нагрузки по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98), при котором превышение температуры также определено по (1), но для каждого из самостоятельно проведенных режимов при номинальных потерях короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ).

Результатом двух отдельных испытаний является косвенное определение $\Theta_{HH, BH}$ по формулам:

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

$$\Theta_{обм}^{max} = \Theta''_{обм} \left[1 + \left(\frac{\Theta'^{max}_{обм}}{\Theta''^{max}_{обм}} \right)^{1,25} \right]^{0,8}, \quad (3)$$

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

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

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

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

Таким образом, вышеизложенная методика косвенного определения превышений температуры обмоток ТСВ основана на принципе наложения частичных превышений.

Теоретическое обоснование применимости метода наложения при тепловых испытаниях и исследованиях электрических машин и трансформаторов впервые дано чл.-корр. АН СССР Л.Р. Нейманом [4].

Цель статьи. Разработка косвенного метода определения полного превышения температуры обмоток ТСВ взрывозащищённых КТП на основе расчёта корректирующих коэффициентов теплообмена в элементах их активной части.

Результаты исследований. Испытания на нагрев ТСВ рекомендуемыми ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98) методами (непосредственная нагрузка, взаимная нагрузка) связаны с затратой значительного количества электроэнергии и применением дополнительного дорогостоящего оборудования, в том числе и нестандартизированного, что в ряде случаев является причиной, исключающей проведение таких испытаний. В то же время известен другой метод, состоящий из 2-х отдельных тепловых режимов: испытания при КЗ и испытания при ХХ [5]. После каждого режима измеряют среднее превышение температуры обмоток и на основе этих данных определяют его эквивалентное значение, соответствующее непосредственной нагрузке ТСВ.

Превышение температуры обмоток при нагреве потерями ХХ для получения общего значения не просто суммируется с превышением температуры обмоток при нагреве потерями КЗ; сумма корректируется коэффициентом, который изменяется с температурой. Это объясняется тем, что при повышении температуры обмотки влияние потока тепла сердечника ТСВ уменьшаются.

Опыт зарубежных исследований сухих трансформаторов общего назначения показывает, что если умножить значение превышения температуры обмотки ВН при ХХ на коэффициент 0,6, а обмотки НН – на 0,8 и затем суммировать с превышением температуры при КЗ, то полученное в результате полное превышение температуры обмотки хорошо согласуется со значениями, определенными в номинальном режиме непосредственной нагрузки [5]. Для рудничных ТСВ указанные коэффициенты будут, естественно, иметь другое значение.

С целью определения корректирующих коэффициентов теплообмена для разрабатываемого метода испытаний в соответствии с программой были проведены экспериментальные тепловые исследования на типопредставителе серии сухих взрывозащищённых КТП – ТСВП-400/6. Испытания проведены в следующих режимах:

1. Режимы нагрева потерями ХХ.
2. Режимы нагрева потерями КЗ при следующих значениях силы тока нагрузки:

а) $I = 1,2 I_{ном}$;

б) $I = I_{ном}$;

в) $I = 0,8 I_{ном}$;

г) $I = 0,6 I_{ном}$.

3. Режимы непосредственной нагрузки при $U = U_{ном}$ и следующих значениях силы тока нагрузки:

а) $I = I_{ном}$;

б) $I = 0,8 I_{ном}$;

в) $I = 0,6 I_{ном}$.

Нагрев КТП осуществлялся до установившегося значения температуры и контролировался по показаниям датчиков ТМК, заложенных в характерные точки конструкции исследуемого объекта. Среднее превышение температуры обмоток ВН и НН определены по (1) с помощью установки типа У-303.

По результатам исследований (таблицы 1, 2) установлены экспериментальные зависимости превышения температуры:

а) среднего обмоток ВН и НН при различных потерях ХХ (рисунок 1);

б) среднего и максимального обмоток ВН и НН в режиме КЗ от кратности тока нагрузки (рисунок 2);

в) среднего и максимального обмоток ВН и НН от мощности непосредственной нагрузки ТСВ-400 (рисунок 3).

Таблица 1

№ п/п	Режим нагрузки		Превышение температуры обмоток, °С (по сопротивлению)	
			ВН	НН
1	Холостой ход	$0,9 \cdot P_{XX ном} = 1962$ Вт	24,5	41,5
		$P_{XX ном} = 2180$ Вт	28,7	46,9
		$1,15 \cdot P_{XX ном} = 2507$ Вт	31,5	52,5
2	Короткое замыкание при силе тока, соответствующей мощности, кВ·А	240	35,6	36,2
		320	52	57,3
		400	82,8	90
		480	124,3	126,7

Таблица 2

№ п/п	Режим непосредственной нагрузки при мощности, кВА	Превышение температуры обмоток, °С (по сопротивлению)	
		ВН	НН
1	240	45,1	62,5
2	320	57	74,2
3	400	118,9	131,4

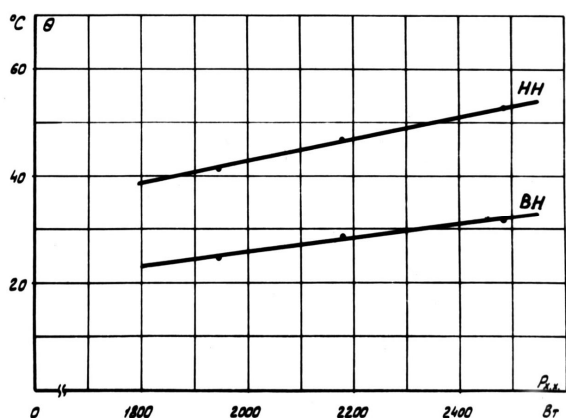


Рисунок 1 – Превышение температуры обмоток ТСВП-400/6 в зависимости от потерь холостого хода

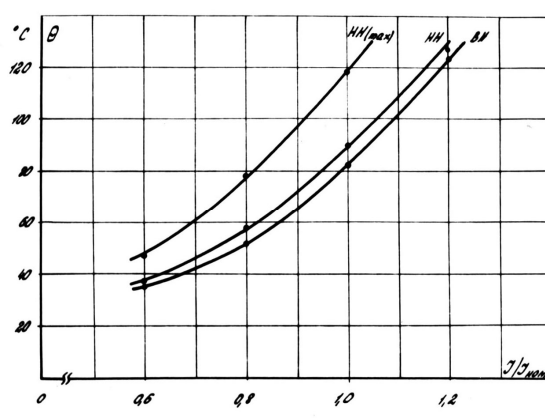


Рисунок 2 – Превышение температуры обмоток ТСВП-400/6 в зависимости от силы тока короткого замыкания

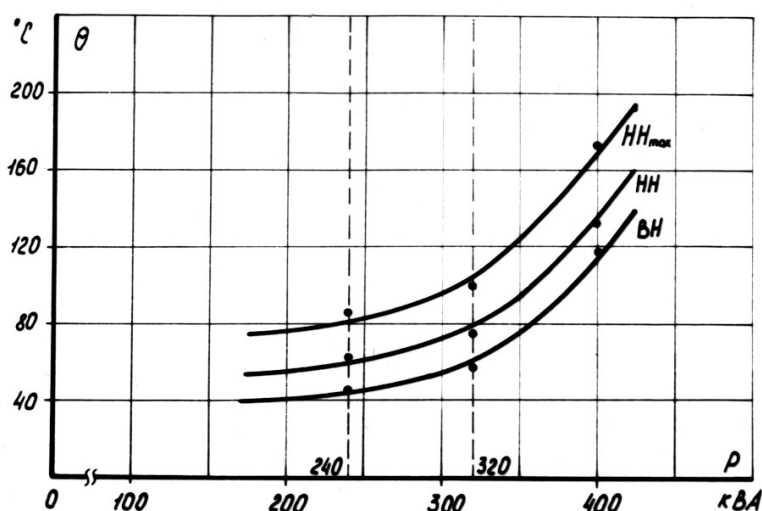


Рисунок 3 – Превышение температуры обмоток ТСВП-400/6 в зависимости от мощности нагрузки

По экспериментальным зависимостям (рисунки 1, 2, 3) определены расчетные данные (таблица 3), позволившие по соответствующим уравнениям [5] определить корректирующие коэффициенты теплообмена для каждой из обмоток НН и ВН в отдельности:

$$\Theta_{НН\text{ ср}} = \Theta_{НН\text{ кз}} + \Theta_{НН\text{ хх}} \cdot K_{НН}, \quad (4)$$

$$\Theta_{ВН\text{ ср}} = \Theta_{ВН\text{ кз}} + \Theta_{ВН\text{ хх}} \cdot K_{ВН}, \quad (5)$$

где $\Theta_{НН\text{ ср}}$, $\Theta_{ВН\text{ ср}}$ – эквивалентное превышение средней температуры обмоток НН и ВН, соответствующее режиму непосредственной нагрузки, °С;

$\Theta_{НН\text{ кз}}$, $\Theta_{ВН\text{ кз}}$ – превышение средней температуры обмоток НН и ВН при нагреве в режиме КЗ, °С;

$\Theta_{НН\text{ хх}}$, $\Theta_{ВН\text{ хх}}$ – превышение средней температуры обмоток НН и ВН при нагреве в режиме ХХ, °С;

$K_{НН}$, $K_{ВН}$ – эмпирические корректирующие коэффициенты теплообмена, зависящие от режима нагрузки, температуры обмоток и конструкции трансформатора.

Таблица 3

№ п/п	Режим непосредственной нагрузки	Превышение температуры обмоток, °С (по сопротив- лению)		$K_{ВН}$	$K_{НН}$	Максимальное превышение температуры обмотки НН, °С	$K_{НН\ макс}$
		ВН	НН				
1	$P = 0,8 P_{ном} = 320$ кВ·А, $I_2 = 268$ А	60	78	0,28	0,44	104	0,575
2	$P = 0,9 P_{ном} = 360$ кВ·А, $I_2 = 302$ А	80	101	0,52	0,63	133	0,78
3	$P = P_{ном} = 400$ кВ·А, $I_2 = 335$ А	113	135,5	1,05	0,97	169	1,07
4	$P = 1,1 P_{ном} = 440$ кВ·А, $I_2 = 369$ А	156	182	1,9	1,57	210	1,46
5	$P = 1,2 P_{ном} = 480$ кВ·А, $I_2 = 402$ А	210	234	3,0	2,22	260	2,03

Максимальное превышение температуры определяется аналогично:

$$\Theta_{НН\ макс} = \Theta_{НН\ КЗ}^{макс} + \Theta_{НН\ ХХ}^{макс} \cdot K_{НН\ макс}; \quad (6)$$

$$\Theta_{ВН\ макс} = \Theta_{ВН\ КЗ}^{макс} + \Theta_{ВН\ ХХ}^{макс} \cdot K_{ВН\ макс}; \quad (7)$$

где $\Theta_{НН\ макс}$, $\Theta_{ВН\ макс}$ – эквивалентное максимальное превышение температуры обмоток НН и ВН, соответствующее режиму непосредственной нагрузки, °С;

$\Theta_{НН\ КЗ}^{макс}$, $\Theta_{ВН\ КЗ}^{макс}$ – максимальное превышение температуры обмоток НН и ВН при нагреве в режиме КЗ, °С;

$\Theta_{НН\ ХХ}^{макс}$, $\Theta_{ВН\ ХХ}^{макс}$ – максимальное превышение температуры обмоток НН и ВН в режиме ХХ, °С;

$K_{НН\ макс}$, $K_{ВН\ макс}$ – корректирующие коэффициенты теплообмена.

Эмпирические значения коэффициентов из уравнений (4) – (7) вычислены для пяти значений непосредственной нагрузки (таблица 3), исходя из среднего превышения температуры обмоток ВН и НН и максимального – обмотки НН.

С целью определения зависимости полученных коэффициентов от среднего и максимального превышения температуры, а также от силы тока нагрузки, т.е. от температуры обмоток ВН и НН, построены следующие зависимости:

$$K_{ВН}, K_{НН} = f(I/I_{ном}),$$

$$K_{НН\max} = f(I/I_{ном}),$$

$$K_{ВН}, K_{НН} = f(\Theta_{ср}),$$

$$K_{НН\max} = f(\Theta_{\max}),$$

(рисунок 4);
 (рисунок 5);
 (рисунок 6);
 (рисунок 7).

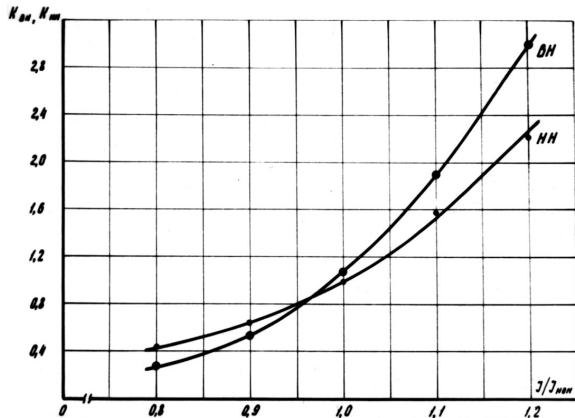


Рисунок 4 – Зависимость эмпирических коэффициентов $K_{ВН}$, $K_{НН}$ от силы тока нагрузки

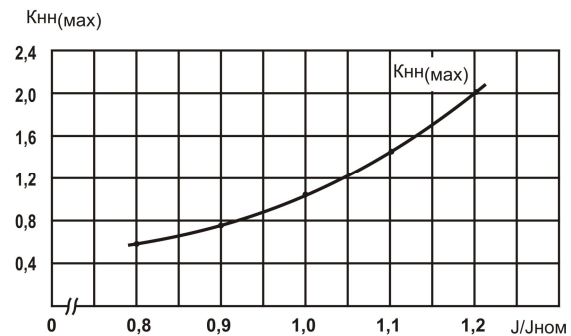


Рисунок 5 – Зависимость эмпирического коэффициента $K_{НН\max}$ от силы тока нагрузки

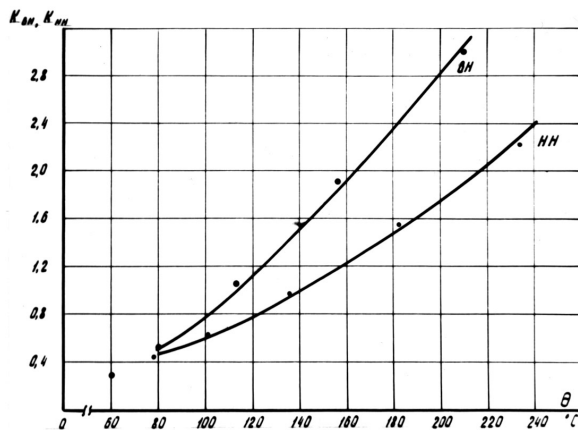


Рисунок 6 – Зависимость эмпирических коэффициентов $K_{ВН}$, $K_{НН}$ от среднего превышения температуры обмоток

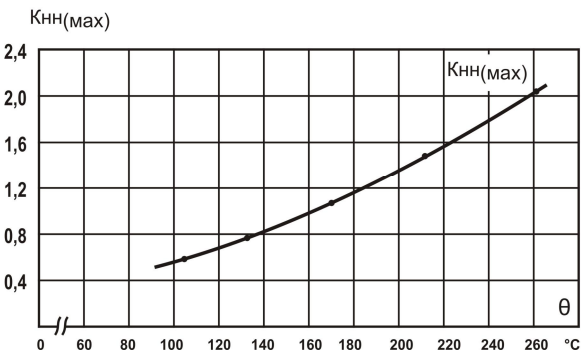


Рисунок 7 – Зависимость эмпирического коэффициента $K_{НН\max}$ от среднего превышения температуры обмотки НН

Таким образом, используя полученные зависимости и соответствующие формулы (4) – (7), можно косвенным путем определять среднее превышение температуры обмоток ВН и НН, а также $\Theta_{НН\max}$ для любого значения непосредственной нагрузки.

Точность разработанного метода можно оценить сравнением с методом условной нагрузки по ДСТУ3645-97 (ГОСТ 3484.2-98) по значениям превышения температуры обмоток КТПВ-1250/6, определенным по (2) и (3), с данными по (4) и (5):

- а) по ДСТУ3645-97 – $\Theta_{HH\text{ ср}} = 146,8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $\Theta_{BH\text{ ср}} = 166\text{ }^{\circ}\text{C}$;
б) по данному методу – $\Theta_{HH\text{ ср}} = 143\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $\Theta_{BH\text{ ср}} = 172,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Разность значений составляет – $\Delta\Theta_{HH} = 2,6\text{ }\%$ и $\Delta\Theta_{BH} = 3,9\text{ }\%$.

Выводы:

1. Разработан метод тепловых испытаний ТСВ и КТП, основанного на принципе суммирования частичных превышений температуры, каждое из которых зависит нелинейно от одного определенного вида потерь мощности в ТСВ, практическая ценность которого заключается в обеспечении экономии электроэнергии, а также в том, что он позволяет проводить испытания ТСВ и КТП с напряжением НН, равным 1,2 и 3,3 кВ, без применения специального нестандартного оборудования.

2. По итогам данных исследований в настоящее время разрабатывается нормативный документ «Методика испытаний на нагрев взрывозащищенных трансформаторов и трансформаторных подстанций в режимах короткого замыкания и холостого хода».

Список литературы

1. Подстанции комплектные трансформаторные взрывобезопасные типа КТПВ: технические условия ТУ У 31.1-00217159-034-2002. – 25с.

2. Сорока Е.А. Методы тепловых испытаний взрывозащищенных трансформаторов и подстанций и достоверность их результатов/ Е.А. Сорока, Е.Б. Ковалёв, Ю.Н. Папазов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2010. – С. 78-85.

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

4. Нейман Л.Р. О применении принципа наложения при тепловых эксплуатационных испытаниях и тепловых расчётах электрических машин и трансформаторов / Л.Р. Нейман // Труды ЛПИ. – Л., 1956. –№ 1.– С. 39-45.

5. Электрические машины и аппараты. Экспресс-информация. – М.: ВИНТИ, 1992. –№ 6.– 22с.