

В.Н. Радкевич,  
к.т.н., доцент

А.В. Мильто,  
студент

А.В. Супрунюк,  
студент

Белорусский национальный технический университет

# ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

УДК 621.311.16

## Аннотация

В статье проанализированы показатели качества трансформаторов наиболее распространенных типов, производимых в Беларуси и Российской Федерации и применяемых на промышленных предприятиях. С использованием стандарта HD428 произведена оценка энергоэффективности рассмотренных в работе распределительных трансформаторов.

## Abstract

The article analyzes quality indicators of the most common types of transformers produced in Belarus and the Russian Federation and used in industrial enterprises. Using the HD428 standard, the energy efficiency of the distribution transformers is evaluated.

При проектировании новых и реконструкции действующих систем электропитания (СЭС) средних и крупных промышленных предприятий производится выбор силовых трансформаторов, от которых питаются электроприемники на напряжении до 1 кВ. В данной работе рассматриваются показатели качества силовых распределительных трансформаторов, учет которых может быть полезным при их выборе.

Согласно [1] распределительным называется трехфазный трансформатор номинальной мощностью  $S_{ном} \leq 2500$  кВ·А или однофазный, имеющий  $S_{ном} \leq 833$  кВ·А классов напряжения до 35 кВ включительно. В зависимости от мощности распределительные трансформаторы подразделяются на следующие габариты: I –  $S_{ном} = 25-100$  кВ·А; II –  $S_{ном} = 160-630$  кВ·А; III –  $S_{ном} = 1000-2500$  кВ·А.

Таблица 1. Характеристика силовых трехфазных трансформаторов напряжением (6–10)/0,4 кВ

Тип	Номинальная мощность, кВ·А	Особенности конструктивного исполнения
ТНЭЗ	630; 1000; 1600	Защищенный герметичный трансформатор с обмотками из меди, у которого в качестве изолирующего и охлаждающего диэлектрика применяется негорючая и экологически чистая жидкость <i>Midel 7131</i> .
ТНЭЗ А	630; 1000; 1600	То же, но с обмотками, выполненными из алюминия.
ТМГ	630; 1000	Герметичный маслонаполненный трансформатор с гофрированным баком и обмотками из алюминия.
ТМГ11	630; 1000; 1600	То же, но с меньшими потерями холостого хода.
ТМГ12	630; 1000	То же, но с меньшими потерями КЗ по сравнению с ТМГ11.
ТМГ15	630; 1000	То же, но меньшими потерями холостого хода по сравнению с ТМГ12.
ТМГ21	630; 1000	Герметичный маслонаполненный трансформатор с гофрированным баком и обмотками из алюминия. Вторичная обмотка выполнена из алюминиевой фольги с бумажной изоляцией.
ТМЗ	630; 1000; 1600	Маслонаполненный герметичный защищенный трансформатор. В баке под небольшим избыточным давлением имеется азотная подушка.
ТМ	630; 1000; 1600	Маслонаполненный трансформатор с открытыми изоляторами и расширителем для масла.

Как правило, в системах электроснабжения производственных объектов применяются распределительные трансформаторы габарита III напряжением (6–10)/0,4 кВ, имеющие естественное масляно-воздушное охлаждение типа ONAN. При обосновании могут использоваться сухие трансформаторы, а также с негорючим жидким диэлектриком.

В соответствии с [2] типоразмеры трансформаторов должны соответствовать действующим стандартам [3, 4]. Отметим, что согласно [5] номинальная мощность  $S_{ном} = 1250$  кВ·А должна применяться для специальных трехфазных трансформаторов и трансформаторов, предназначенных на экспорт. На промышленных предприятиях в большинстве случаев применяются трансформаторы мощностью  $S_{ном} = 1000$  и  $1600$  кВ·А, обеспечивающие лучшие соотношения между затратами на электрические сети напряжением 6–10 кВ и 0,4 кВ.

Трансформаторы с номинальной мощностью 2500 кВ·А в цехах промышленных предприятий применяются редко из-за больших массогабаритных показателей, сложности выбора автоматического выключателя в цепи трансформатора, значительных затрат на питающие сети напряжением до 1 кВ.

Трансформаторы мощностью до 630 кВ·А могут использоваться при малой плотности нагрузок, в частности, на мелких и средних объектах, на периферийных участках крупных предприятий, для административных зданий и т.п.

На рынке электротехнических изделий изготовителями и дилерами предлагаются трансформаторы разных типов, изготавливаемые в странах СНГ. Выпускаются маслонаполненные трансформаторы широко распространенных типов (ТМ, ТМЗ, ТМГ, ТМГ11), а также трансформаторы с использованием инновационных технических решений (ТМГ12, ТМГ15, ТНЭЗ, ТНЭЗ А, ТМГ21). Общая характеристика распределительных трансформаторов, применяемых в ЭЭС производственных объектов, приведена в таблице 1.

В каталогах и паспортах трансформаторов приводятся их технические характеристики, анализируя которые, можно ориентировочно оценить качество того или иного трансформатора. Однако в них указываются не все характеристики, предусмотренные системой показателей качества для силовых трансформаторов в соответствии с ГОСТ 4.316-85 [6]. Показатели качества распределительных трансформаторов, представляющие определенный интерес для потребителей электротехнических изделий, приведены в таблице 2.

В работе использована техническая документация трансформаторов Минского электротехнического завода и некоторых предприятий Российской Федерации. Данные трансформаторов других производи-

**Таблица 2. Показатели качества силовых трехфазных трансформаторов напряжением (6–10)/0,4 кВ**

№	Наименование показателя	Ед. измерения	Обозначение	Соответствие нормативному документу
<b>1</b> Квалификационные показатели				
1.1	Номинальная мощность	кВ·А	$S_{ном}$	ГОСТ 16110-82 ГОСТ 9680-77
1.2	Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения	кВ	$U_{вном}$	ГОСТ 16110-82
1.3	Номинальное напряжение обмотки низшего напряжения	кВ	$U_{нном}$	ГОСТ 16110-82
1.4	Схема и группа соединения обмоток	-	$\Delta/Y0-11$ $Y/Y0-0$	ГОСТ 11677-85
1.5	Номинальная частота	Гц	$f$	ГОСТ 16110-82
1.6	Способ и диапазон регулирования напряжения	-	-	ГОСТ 16110-82
1.7	Вид климатического исполнения	-	У, ХЛ	ГОСТ 15150-69
1.9	Степень защиты	-	IP	ГОСТ 24687-81
<b>2</b> Показатели функциональной и технической эффективности				
2.1	Испытательное напряжение промышленной частоты	кВ	$U_{исп}$	-
2.2	Испытательное напряжение импульсное	кВ	$U_{имп}$	-
2.3	Напряжение короткого замыкания	%	$U_k$	ГОСТ 16110-82 ГОСТ 11677-85
<b>3</b> Конструктивные показатели				
3.1	Масса полная	кг	$M$	ГОСТ 16110-82
3.2	Габаритные размеры (длина $L$ , ширина $B$ , высота $H$ )	мм	$L \times B \times H$	-
3.3	Удельная масса (по отношению к $S_{ном}$ )	кг/(кВ·А)	$m$	ГОСТ 11677-85
3.4	Удельный объем (по отношению к $S_{ном}$ )	мм <sup>3</sup> /(кВ·А)	$v$	-
<b>4</b> Показатели надежности				
4.1	Установленный полный срок службы	лет	$T_{сл.п}$	ГОСТ 27.002-89
4.2	Вероятность безотказной работы	-	$P(t)$	ГОСТ 27.002-89
4.3	Средний срок сохраняемости	лет	$T_c$	ГОСТ 27.002-89
<b>5</b> Показатели экономного использования энергии				
5.1	Потери холостого хода	кВт	$\Delta P_{xx}$	ГОСТ 16110-82 ГОСТ 11677-85
5.2	Потери короткого замыкания	кВт	$\Delta P_{кз}$	ГОСТ 16110-82 ГОСТ 11677-85
5.3	Ток холостого хода	%	$-I_x$	ГОСТ 16110-82 ГОСТ 11677-85
<b>6</b> Показатели эргономические				
6.1	Уровень звука	дБА	$L_{d1a}$	ГОСТ 12.1.003-83
<b>7</b> Показатели технологичности				
7.1	Удельная материалоемкость	кг/(кВ·А)	$m_0$	ГОСТ 27782-88
7.2	Удельная энергоёмкость	кВт·ч/(кВ·А)	$w$	ГОСТ 31532-2012 (в РБ не представлен)
7.3	Трудозатраты при монтаже трансформатора	Нормо-час	$T_z$	-

телей могут несущественно отличаться от использованных в работе. Анализ технической документации трансформаторов, приведенных в таблице 1, показывает, что не все показатели, предусмотренные ГОСТ 4.316-85, даются в технической документации о трансформаторах. В частности, у всех трансформаторов отсутствуют

сведения по испытательным напряжениям (показатели 2.1 и 2.2).

В то же время согласно [7] испытания трансформаторов повышенным напряжением должны производиться при вводе в эксплуатацию и в ее процессе. Отметим, что на промышленных предприятиях количество типоразмеров силовых трансформаторов ▶

должно быть минимальным (2–3), а для снижения затрат на электроснабжение широко практикуется использование складского аварийного резерва трансформаторов. Следует учитывать, что зачисление электрооборудования в аварийный резерв без испытаний не допускается. При этом в качестве значений контролируемых параметров оборудования при вводе в эксплуатацию принимаются показатели, указанные в паспорте или протоколе заводских испытаний.

Практически для всех трансформаторов приводится срок службы  $T_{слп} = 25$  или 30 лет (показатель 4.1), но не указываются вероятность безотказной работы  $P(t)$  и средний срок сохраняемости  $T_c$  (показатели 4.2 и 4.3). В соответствии с [8] срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации трансформатора или ее возобновления после ремонта до перехода изделия в предельное состояние.

Сохраняемость – это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования. Учитывая возможность нахождения силового трансформатора в складском резерве, срок сохраняемости  $T_c$  следует рассматривать как важный показатель качества электротехнического оборудования.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  представляет собой вероятность того, что отказ объекта не возникнет в пределах заданной наработки. Это важнейший показатель безотказности трансформатора, который необходим для расчета и прогнозирования надежности систем электроснабжения разнообразных объектов. Поэтому изготовителям целесообразно указывать значение данного показателя для выпускаемых трансформаторов.

Отметим, что в технической информации трансформаторов Чебоксарского электрозавода «Трансформатор» (Россия) приводятся данные по наработке на отказ. Например, для трансформаторов типа ТМ мощностью 630, 1000 и 1600 кВ·А указывается наработка на отказ не менее 630.000, 1.000.000 и 1.600.000 часов соответственно. Однако эти числа вызывают определенное недоверие, так как представляют собой номинальную мощность трансформатора, умноженную на 1000.

Нет в технической документации всех рассмотренных типоразмеров трансформаторов, приведенных в таблице 2, показателей 7.1 (удельная материалоемкость  $m_0$ ), 7.2 (удельная энергоёмкость  $w$ ) и 7.3 (трудозатраты при монтаже трансформатора  $T_3$ ).

Материалоемкость является показателем расхода материалов на производство ка-

Таблица 3. Показатели массы силовых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ

Тип трансформатора	Масса, кг, при $S_{ном}$ , кВ·А			Удельная масса, кг/кВ·А, при $S_{ном}$ , кВ·А		
	630	1000	1600	630	1000	1600
ТНЭЗ	2900	3850	5675	4,6	3,9	3,5
ТНЭЗ А	2300	3330	4820	3,7	3,3	3,0
ТМГ	1950	2890	-	3,1	2,9	-
ТМГ11	1860	2750	4250	3,0	2,8	2,7
ТМГ12	1870	2820	-	3,0	2,8	-
ТМГ15	1870	2820	-	3,0	2,8	-
ТМГ21	1700	2550	3860	2,7	2,6	2,4
ТМЗ	2650	3600	4930	4,2	3,6	3,1
ТМ	2030	2609	4520	3,2	2,6	2,8

Таблица 4. Потери холостого хода и короткого замыкания силовых трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ

Тип трансформатора	Значение $\Delta P_x$ , кВт, при $S_{ном}$ , кВ·А			Значение $\Delta P_k$ , кВт, при $S_{ном}$ , кВ·А		
	630	1000	1600	630	1000	1600
ТНЭЗ	1,45	1,85	2,75	5,1	8,5	11,0
ТНЭЗ А	1,45	1,85	2,75	7,5	12,5	16,0
ТМГ	1,05	1,55	-	7,6	10,2	-
ТМГ11	1,1	1,4	2,15	8,7	10,8	16,5
ТМГ12	0,8	1,1	-	6,75	10,5	-
ТМГ15	0,73	0,94	-	6,75	10,5	-
ТМГ21	1,03	1,3	2,05	7,45	11,6	16,75
ТМЗ	1,25	1,9	2,65	7,9	12,2	16,5
ТМ	1,25	1,9	2,35	7,6	11,6	16,5

кой-либо продукции. Удельная материалоемкость характеризует расход материалов, необходимый для единицы полезного эффекта от использования изделия по назначению [9].

Согласно [10] абсолютные значения показателей энергоёмкости изготовления продукции характеризуют затраты топлива и энергии на основные и вспомогательные технологические процессы изготовления продукции. Они выражаются в абсолютных значениях затрат энергоресурсов, приходящихся на единицу продукции. Удельное значение показателей энергоёмкости изготовления продукции характеризуется отношением абсолютного значения энергоёмкости этой продукции к одному из показателей, отражающих основные эксплуатационные свойства изделия. Для силовых трансформаторов удельная энергоёмкость выражается в кВт·ч/(кВ·А).

Полезной информацией является предусмотренный [6] показатель, отражающий трудозатраты при монтаже силового трансформатора.

К сожалению, в каталогах трансформаторов серии ТМГ, ТМГ11, ТМГ12, ТМГ21

и ТМГ15 Минского электротехнического завода не приводится такая важная техническая характеристика, как ток холостого хода  $-I_0$ . Эта характеристика отражает потребление реактивной мощности трансформатора на намагничивание и используется при расчете систем электроснабжения.

Не для всех трансформаторов указан уровень звука  $L_{d1a}$ , дБА, при работе. В частности, в технической документации трансформаторов типа ТМЗ, ТМГ21 и ТМГ15 информация об их акустических характеристиках отсутствовала.

Важным параметром трансформатора является напряжение КЗ  $U_k$ , определяющее его стойкость при коротких замыканиях. Чем выше  $U_k$ , тем устойчивее трансформатор к токам КЗ. Согласно [11] минимальные значения  $U_k$  для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А – 4%, 630–1250 кВ·А – 5%, 1251–2500 кВ·А – 6%.

Для силовых распределительных трансформаторов ГОСТ 4.316-85 устанавливает следующие основные показатели качества силовых трансформаторов:

1) удельная масса по отношению к номинальной мощности, кг/кВ·А (основной конструктивный показатель);

2) установленный срок службы  $T_{сл.п}$ , лет (показатель надежности, характеризующий долговечность);

3) потери холостого хода (ХХ)  $\Delta P_x$ , кВт;

4) потери короткого замыкания (КЗ)  $\Delta P_k$ , кВт;

5) ток холостого хода,  $-I_x$ , %.

Рассмотрим основные показатели качества силовых трансформаторов более подробно.

Удельная масса силового трансформатора, кг/(кВ·А), определяется по выражению

$$m = M / S_{ном}, \quad (1)$$

где  $M$  – полная масса силового трансформатора, кг;

$S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Показатели массы для силовых трансформаторов, применяемых в системах электроснабжения промышленных предприятий, приведены в таблице 3.

Анализ приведенных в таблице 3 данных показывает, что наиболее тяжелыми являются трансформаторы типа ТНЗЭ и ТМЗ, что обусловлено особенностями их конструктивного исполнения. Трансформаторы типа ТНЗЭ имеют обмотки, выполненные из меди, а ТМЗ – более мощный бак. Это ухудшает их показатели полной  $M$  и удельной  $m$  массы. Лучшие показатели массы у трансформаторов типа ТМГ21, вторичная обмотка которых выполнена из алюминиевой фольги.

Удельная масса рассмотренных трансформаторов, за исключением типа ТМ, уменьшается с увеличением номинальной мощности трансформатора  $S_{ном}$ .

Согласно [12] важнейшими характеристиками трансформаторов, определяющими их энергоэффективность, являются потери холостого хода  $\Delta P_x$  и короткого замыкания  $\Delta P_k$ . Для рассматриваемых распределительных трансформаторов эти данные приведены в таблице 4.

При мощности 630 и 1000 кВ·А наименьшие потери ХХ имеют трансформаторы типа ТМГ15, а при 1600 кВ·А – типа ТМГ21. Минимальные потери КЗ у трансформаторов с медными обмотками типа ТНЗЭ.

Трансформаторы – основной элемент комплектных трансформаторных подстанций, для которых одним из показателей эконом-

Таблица 5. Допустимые уровни потерь по стандарту HD428

S <sub>ном</sub> , кВ·А	Допустимые уровни потерь холостого хода, кВт			Допустимые уровни потерь короткого замыкания, кВт		
	$\Delta P_{xa}$	$\Delta P_{xb}$	$\Delta P_{xc}$	$\Delta P_{ka}$	$\Delta P_{kb}$	$\Delta P_{kc}$
630	1,3	1,03	0,86	6,5	8,4	5,4
1000	1,7	1,4	1,1	10,5	13,0	9,5
1600	2,6	2,2	1,7	17,0	20,0	14,0

Таблица 6. Допустимые уровни потерь для принятых комбинаций

Номер комбинации	Потери ХХ и КЗ, кВт, для трансформаторов мощностью, кВ·А					
	630		1000		1600	
	$\Delta P_x$	$\Delta P_k$	$\Delta P_x$	$\Delta P_k$	$\Delta P_x$	$\Delta P_k$
1	1,3	6,5	1,7	10,5	2,6	17,0
2	1,03	8,4	1,4	13,0	2,2	20,0
3	0,86	5,4	1,1	9,5	1,7	14,0
4	1,03	5,4	1,4	9,5	2,2	14,0
5	0,86	6,5	1,1	10,5	1,7	17,0

Таблица 7. Трансформаторы, соответствующие стандарту HD 428

Тип трансформатора	Потери ХХ, кВт	Потери КЗ, кВт	Допустимые потери, кВт, для уровня энергоэффективности (номер комбинации)
ТМГ-1000	1,55	10,2	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (1)
ТМГ11-1000	1,4	10,8	$\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (2)
ТМГ11-1600	2,15	16,5	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (1) $\Delta P_{тб} = 2,2 + 20,0$ (2)
ТМГ12-630	0,8	6,75	$\Delta P_{тса} = 0,86 + 6,5$ (5)
ТМГ12-1000	1,1	10,5	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (1) $\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (2) $\Delta P_{тса} = 1,1 + 10,5$ (5)
ТМГ15-630	0,73	6,75	$\Delta P_{тб} = 1,03 + 8,4$ (2)
ТМГ15-1000	0,94	10,5	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (1) $\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (2) $\Delta P_{тса} = 1,1 + 10,5$ (5)
ТМГ21-630	1,03	7,45	$\Delta P_{тб} = 1,03 + 8,4$ (2)
ТМГ21-1000	1,3	11,6	$\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (2)
ТМГ21-1600	2,05	16,75	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (1) $\Delta P_{тб} = 2,2 + 20,0$ (2)
ТМ -1600	2,35	16,5	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (1)

ного расхода энергии являются суммарные потери силового трансформатора, определяемые согласно [6] по формуле

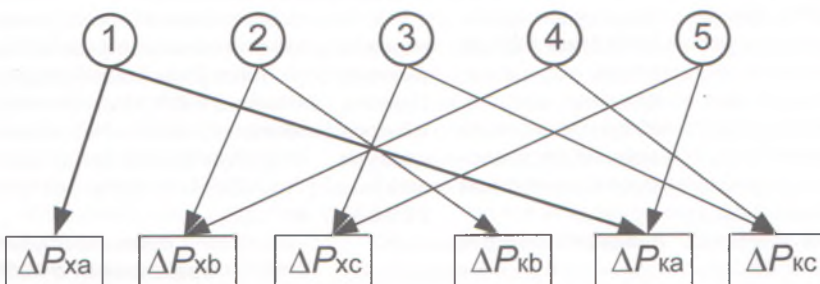
$$\Delta P_t = \Delta P_x + \Delta P_k. \quad (2)$$

Расчеты показали, что для всех рассмотренных номинальных мощностей меньшие

значения  $\Delta P_t$  имеют трансформаторы типа ТНЗЭ, большие – типа ТМГ11 при  $S_{ном} = 630$  кВ·А, ТНЗЭ А при  $S_{ном} = 1000$  и ТМЗ при  $S_{ном} = 1600$  кВ·А.

В странах Евросоюза уровень энергоэффективности масляных распределительных трансформаторов определяется стандартом HD428 «Трёхфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 50 до 2500 кВ·А с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36 кВ» [13]. В таблице 5 приведены допустимые уровни потерь мощности КЗ и ХХ в трансформаторах мощностью 630–1600 кВ·А в соответствии с указанным стандартом. Отметим, что для трансформаторов мощностью 630 кВ·А приведены данные при напряжении КЗ  $U_k = 4\%$ .

Рисунок 1. Допустимые комбинации уровня потерь





Как видно из таблицы 5, для масляных трансформаторов определенной номинальной мощности допускаются три уровня потерь ХХ ( $\Delta P_{ха}$ ,  $\Delta P_{хб}$ , и  $\Delta P_{хс}$ ), три уровня потерь КЗ ( $\Delta P_{ка}$ ,  $\Delta P_{кб}$ , и  $\Delta P_{кс}$ ). При этом соблюдаются условия

$$\Delta P_{ха} > \Delta P_{хб} > \Delta P_{хс}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{кб} > \Delta P_{ка} > \Delta P_{кс}. \quad (4)$$

Значения допустимых потерь мощности определяются по специальной методике с учетом погрешности измерений. Теоретически существует девять возможных комбинаций  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$ . Однако норматив HD428 допускает только пять комбинаций (рисунком 1), где комбинация  $\Delta P_{та} = \Delta P_{ха} + \Delta P_{ка}$  (выделена утолщенной линией) принята за основу для сравнения.

В соответствии со схемой, показанной на рисунке 1, возможны следующие допустимые комбинации потерь ХХ и КЗ в силовых распределительных трансформаторах:

$$\Delta P_{та} = \Delta P_{ха} + \Delta P_{ка}; \quad (5)$$

$$\Delta P_{тб} = \Delta P_{хб} + \Delta P_{кб}; \quad (6)$$

$$\Delta P_{тс} = \Delta P_{хс} + \Delta P_{кс}; \quad (7)$$

$$\Delta P_{тbc} = \Delta P_{хб} + \Delta P_{кс}; \quad (8)$$

$$\Delta P_{тca} = \Delta P_{хс} + \Delta P_{ка}. \quad (9)$$

Используя данные таблицы 4, определим для рассмотренных комбинаций предельно допустимые численные значения  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  для трансформаторов мощностью 630, 1000 и 1600 кВ·А и приведем их в таблице 6.

Энергоэффективность распределительного трансформатора определяется следующими условиями:

$$\Delta P_{xi} \leq \Delta P_{xj} \quad (10)$$

$$\Delta P_{ki} \leq \Delta P_{kj}, \quad (11)$$

где  $\Delta P_{xi}$  и  $\Delta P_{ki}$  – соответственно фактические потери ХХ и КЗ  $i$ -го трансформатора,

$i = 1, \dots, n$  (здесь  $n$  – количество рассматриваемых трансформаторов);

$\Delta P_{xj}$  и  $\Delta P_{kj}$  – соответственно допустимые потери ХХ и КЗ  $j$ -й комбинации,  $j = 1, \dots, 5$ .

Сопоставим технические характеристики трансформаторов (таблица 4) с данными таблицы 9 по условиям (10) и (11) и представим результаты в таблице 7.

Для масляных силовых распределительных трансформаторов уровень  $\Delta P_{тс} = \Delta P_{кс} + \Delta P_{хс}$  (комбинация 3) имеет максимальную энергоэффективность. Ни один из рассмотренных трансформаторов не соответствует данному уровню потерь мощности. Тем не менее, приведенные в таблице 7 трансформаторы, имея меньшую энергоэффективность, соответствуют стандарту HD428.

## Выводы

1. В технической документации силовых распределительных трансформаторов разных производителей приводятся не все показатели качества, регламентированные ГОСТ 4.316-85. В частности, нет данных по испытательным напряжениям, вероятности безотказной работы, среднему сроку сохраняемости, показателям технологичности. Для некоторых типов трансформаторов не указывается такая важная техническая характеристика, как ток холостого хода. Для обеспечения возможности рационального выбора и повышения эффективности использования распределительных трансформаторов в технической документации следует приводить все показатели качества, предусмотренные ГОСТ 4.316-85.

2. Проведенная оценка энергоэффективности рассмотренных силовых трансформаторов показала, что в максимальной степени критериям стандарта HD428 соответствуют распределительные трансформаторы типа ТМГ12, ТМГ15 и ТМГ21. Энергоэффективными являются также трансформаторы мощностью 1000 кВ·А типа ТМГ и ТМГ11, а также мощностью 1600 кВ·А типа ТМГ11 и ТМ.

## Литература

- ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
- ТКП 45-4.04-297-2014 (02250). Электроснабжение промышленных предприятий. Правила проектирования. – Минск: Мин. арх. и строительства Республики Беларусь, 2014. – 29 с.
- ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
- ГОСТ 14695-97. Подстанции трансформаторные комплектные мощностью от 25 до 2500 кВ·А. Общие технические условия.
- ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей.
- ГОСТ 4.316-85. Система показателей качества продукции. Трансформаторы силовые, нулевого габарита, измерительные. Подстанции комплектные трансформаторные. Вводы высоковольтные. Номенклатура показателей.
- ТКП 181-2009 (02230). Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Минск: Минэнерго, 2009. – 326 с.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
- ГОСТ 27782-88. Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения.
- ГОСТ 31532-2012. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.
- ГОСТ Р 55188-2012 (МЭК 60076-5:2006). Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям.
- ГОСТ 31607-2012. Энергоэффективность. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения.
- Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов [Электронный ресурс] / Перевод с английского Е. В. Мельниковой // «Энергосбережение». – 2004. – №1. – Режим доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2384](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2384). – Дата доступа: 27.04.2017. ■

Статья поступила  
в редакцию 27.04.2017