

УДК 658.26

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Супрунук А.В., Мильто А.В.

Научный руководитель - к.т.н., доцент Радкевич В.Н.

При проектировании новых и реконструкции действующих систем электроснабжения (СЭС), а также в процессе эксплуатации электроустановок средних и крупных промышленных предприятий производится выбор силовых распределительных трансформаторов, от которых питаются электроприемники на напряжении до 1 кВ. В данной работе рассматриваются технические характеристики силовых распределительных трансформаторов, учет которых может быть полезным при их выборе.

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

В СЭС промышленных предприятий, как правило, применяются трансформаторы, имеющие  $S_{\text{ном}} = 1000-1600$  кВ·А. 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 электроснабжения административных зданий и т.п.

На рынке электротехнических изделий изготовителями и дилерами предлагаются силовые трансформаторы разных типов, изготавливаемые в странах СНГ. Выпускаются маслонаполненные трансформаторы известных типов (ТМ, ТМЗ, ТМГ, ТМГ11), а также энергоэффективные трансформаторы с использованием инновационных технических решений (ТМГ12, ТМГ15, ТНЭЗ, ТНЭЗ А, ТМГ21).

Для силовых распределительных трансформаторов ГОСТ 4.316-85 [2] 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  $T_{\text{сл.п}}$ , лет (показатель надежности, характеризующий долговечность);
- 3) потери холостого хода (ХХ)  $\Delta P_{\text{х}}$ , кВт;
- 4) потери короткого замыкания (КЗ)  $\Delta P_{\text{к}}$ , кВт;
- 5) ток холостого хода,  $I_{\text{х}}$ , %.

Рассмотрим эти показатели качества силовых трансформаторов более подробно.

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

$$m = M / S_{\text{ном}}, \quad (1)$$

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

$S_{\text{ном}}$  - номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Показатели массы для силовых трансформаторов, применяемых в системах электроснабжения промышленных предприятий, приведены в таблице 1.

Анализ приведенных в таблице 1 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  $S_{ном}$ .

Установленный срок службы трансформаторов составляет 25-30 лет.

Таблица 1- 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	3,9	3,5	3,9
ТНЭЗ А	2300	3330	4820	3,3	3,0	3,3
ТМГ	1950	2890	-	2,9	-	2,9
ТМГ11	1860	2750	4250	2,8	2,7	2,8
ТМГ12	1870	2820	-	2,8	-	2,8
ТМГ15	1870	2820	-	2,8	-	2,8
ТМГ21	1700	2550	3860	2,6	2,4	2,6
ТМЗ	2650	3600	4930	3,6	3,1	3,6
ТМ	2030	2609	4520	2,6	2,8	2,6

Согласно [2] основными характеристиками трансформаторов, определяющими их энергоэффективность, являются потери ХХ  $\Delta P_x$  и КЗ  $\Delta P_k$ . Для рассматриваемых распределительных трансформаторов эти данные приведены в таблице 2.

Таблица 2- Потери ХХ и КЗ 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

Рассмотрим более детально потери ХХ трансформатора. В режиме ХХ имеют место магнитные потери мощности в стальных частях и потери в первичной обмотке из-за тока ХХ, составляющие менее 1% от  $\Delta P_x$ . Также существуют диэлектрические потери в изоляционном слое, но для силовых трансформаторов промышленной частоты такие потери невелики и не учитываются при расчете.

Магнитные потери происходят вследствие гистерезиса и вихревых токов. При использовании холоднопрокатной электротехнической стали, на гистерезис приходится примерно четверть от магнитных потерь, соответственно на вихревые токи - около 75% потерь ХХ.

Основные причины увеличения потерь ХХ:

1. Коррозия металла, которая происходит из-за нарушения целостности лакового слоя.
2. Некачественная изоляция стягивающих шпилек, которая приводит к возникновению замкнутого короткого контура.
3. Некачественная шихтовка.
4. Перегрев стальных узлов элементов трансформатора.
5. Нестабильные качественные характеристики используемой стали.

6. Допущение механических повреждений при сборке.

По причинам 2,5,6 потери ХХ могут отличаться от номинальных, но не более чем на 15%.

Большое влияние на величину потерь ХХ оказывает качество электротехнической стали. Факторы, влияющие на характеристики стали условно можно разделить на конструктивные и технологические.

Конструктивные факторы зависят от формы стыковки пластин, метода прессовки стержней, а также типа сечения ярма, а технологические – от особенностей изготовления самих пластин (методов удаления заусенцев, способов лакировки и т.д.).

Потери КЗ напрямую зависят от трех факторов:

1. Нагрузочного тока, протекающего в обмотках трансформатора.
2. Материала проводников обмоток.
3. Сечения проводников обмоток.

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

Трансформаторы являются основным элементом комплектных трансформаторных подстанций, для которых одним из показателей экономного расхода энергии являются суммарные потери силового трансформатора, определяемые согласно [2] по формуле

$$\Delta P_T = \Delta P_x + \Delta P_k . \tag{2}$$

Расчеты показали, что для всех рассмотренных номинальных мощностей меньшие значения  $\Delta P_T$  имеют трансформаторы типа ТНЭЗ, большие – типа ТМГ11 при  $S_{ном} = 630$  кВ·А, ТНЭЗ А при  $S_{ном} = 1000$  и ТМЗ при  $S_{ном} = 1600$  кВ·А

Энергоэффективность масляных распределительных трансформаторов в странах Западной Европы оценивается по стандарту HD428 [3], в соответствии с которым в трансформаторах мощностью 630-1600 допустимые уровни потерь мощности КЗ и ХХ имеют значения, приведенные в таблице 3.

Таблица 3- Допустимые уровни потерь в трансформаторах мощностью 630-1600

S <sub>ном</sub> , кВ·А	Допустимые уровни потерь холостого хода, кВт			Допустимые уровни потерь короткого замыкания, кВт		
	ΔP <sub>ха</sub>	ΔP <sub>xb</sub>	ΔP <sub>xc</sub>	ΔP <sub>ка</sub>	ΔP <sub>kb</sub>	ΔP <sub>kc</sub>
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

Стандарт HD428 допускает следующие комбинации потерь ХХ и КЗ в силовых распределительных трансформаторах:

$$\Delta P_{та} = \Delta P_{ха} + \Delta P_{ка} ; \tag{3}$$

$$\Delta P_{tb} = \Delta P_{xb} + \Delta P_{kb} ; \tag{4}$$

$$\Delta P_{tc} = \Delta P_{xc} + \Delta P_{kc} ; \tag{5}$$

$$\Delta P_{tbc} = \Delta P_{xb} + \Delta P_{kc} ; \tag{6}$$

$$\Delta P_{tca} = \Delta P_{xc} + \Delta P_{ка} . \tag{7}$$

Сопоставив технические характеристики трансформаторов (таблица 2) с данными таблицы 3, оценим энергоэффективность рассматриваемых силовых трансформаторов. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. 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	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (3)
ТМГ11-1000	1,4	10,8	$\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (4)
ТМГ11-1600	2,15	16,5	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (3) $\Delta P_{тб} = 2,2 + 20,0$ (4)
ТМГ12-630	0,8	6,75	$\Delta P_{тса} = 0,86 + 6,5$ (7)
ТМГ12-1000	1,1	10,5	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (3) $\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (4) $\Delta P_{тса} = 1,1 + 10,5$ (7)
ТМГ15-630	0,73	6,75	$\Delta P_{тб} = 1,03 + 8,4$ (4)
ТМГ15-1000	0,94	10,5	$\Delta P_{та} = 1,7 + 10,5$ (3) $\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (4) $\Delta P_{тса} = 1,1 + 10,5$ (7)
ТМГ21-630	1,03	7,45	$\Delta P_{тб} = 1,03 + 8,4$ (4)
ТМГ21-1000	1,3	11,6	$\Delta P_{тб} = 1,4 + 13,0$ (4)
ТМГ21-1600	2,05	16,75	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (3) $\Delta P_{тб} = 2,2 + 20,0$ (4)
ТМ -1600	2,35	16,5	$\Delta P_{та} = 2,6 + 17,0$ (3)

Минимальный уровень суммарных потерь в маслонаполненных силовых распределительных трансформаторах соответствует комбинации  $\Delta P_{тс} = \Delta P_{кз} + \Delta P_{хс}$ . Ни один из рассмотренных трансформаторов не соответствует данному уровню потерь мощности. Тем не менее, приведенные в таблице 4 трансформаторы, имея меньшую энергоэффективность, соответствуют стандарту HD428.

### Выводы

1. При выборе распределительных трансформаторов следует учитывать основные показатели качества, регламентированные ГОСТ 4.316-85.

2. Важной характеристикой трансформаторов является их энергоэффективность. 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 1600 кВ·А типа ТМГ11 и ТМ.

### Литература

1. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
2. ГОСТ 4.316-85. Система показателей качества продукции. Трансформаторы силовые, нулевого габарита, измерительные. Подстанции комплектные трансформаторные. Вводы высоковольтные. Номенклатура показателей.
3. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов (электронный ресурс). Ресурс доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2384](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2384).