

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПОВЕДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В. М. ВЫСОЦКАЯ, А. А. ГУРЧЕНОК

(Представлена семинаром кафедр электромеханического факультета)

Как известно, в настоящее время во многих районах Крайнего Севера быстрыми темпами развиваются различные отрасли промышленности, в связи с этим возникла необходимость эксплуатации масляных трансформаторов в условиях интенсивного охлаждения.

Проведенные ранее исследования [1 — 4] поясняют поведение силовых трансформаторов, установленных в средней полосе СССР, в условиях низких температур. Влияние ветра при этом, как правило, не учитывается. Однако при эксплуатации электроустановок в большинстве районов Заполярья, кроме низкой температуры окружающего воздуха приходится учитывать и еще одну особенность — большую скорость ветра (до 30 м/сек). Так, например, оказывается, что при температурах порядка — 40° С и ниже и наличии ветра, в трубчатых радиаторах с тонкими сплюснутыми станками, где слой масла менее 30 мм, прекращается циркуляция масла, что вызывает перегрев трансформатора [5].

В связи с указанным представляет интерес исследование зависимости охлаждения трансформаторов от наружной температуры и скорости ветра. Для решения поставленной задачи были проведены расчеты охлаждения трансформатора типа ТМ 100/6 по стандартному методу и с применением критериальных уравнений теплопередачи. Последнее диктовалось тем, что указанный метод позволяет определять величину теплопотери с учетом скорости ветра, что не учитывается при стандартном расчете.

Стандартный расчет тепловых нагрузок и температур

Результаты стандартного расчета трансформатора ТМ 100/6 сведены в расчетную записку. В записке показаны тепловые нагрузки и превышения температур при нормальной нагрузке (100%). По данным записки температура в сердечнике и обмотках трансформатора определяется из соотношения

$$t = \varepsilon + \Theta + t_{в.} \quad (1)$$

Температура масла и поверхности охлаждения считаются одинаковыми и равными

$$t_{ст} = \Theta + t_{в.} \quad (2)$$

РАСЧЕТНАЯ ЗАПИСКА

Трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением

мощность 100 ква

токи 9,16/251 а

напряжения 6600—6300—6000/230 в

числа витков 832—794—757/29 витков

частота 50 гц					схема и группа Y/Y ₀ —12				
0,85	сталь толщина в мм	диаметр в мм	сече- ние в см ²	расст. между осями в мм	высо- та ок- на в мм	вес в кг	индук- ция в гс	Кст	потери в вт
стержень	0,5 лак	155	155	290	225	81	13350	2,88	234
ярмо	то же		184			195	11200	20	390
общий вес медных проводов 70 кг				общий вес стали 276 кг		И/n=4,59		P _{ст} =624	

Потери		Ток холостого хода 6,5 а				
Ступень напряжения		100%		По расчету	По нормам	
Потери в медных проводах в вт	ВН	1295	Нагрузка	100 ква	100 ква	
	НН	1145	Ступень напряжения	100%	100%	
	Сумма	2440	e_R	2,44%	2,4%	
			e_L	5,05%	—	
P_m в вт		2440	e_k	5,6%	5,5%	
$P_{ст}$ в вт		624	Превышение температуры		°С	
Общие потери в вт Расчетные потери в вт		3064	В сердечнике и обмотках ВН и НН над температурой масла		τ	25
		3370				
Поверхность охлаждения, м ²		6,09	Масла над температурой воздуха		θ	45
Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения, вт/м ²		500	Расчетная температура воздуха		t_v	35

По данным расчетной записки получим $t = 105^\circ \text{C}$, $t_{\text{ст}} = 80^\circ \text{C}$, что является допустимым по нормам эксплуатации трансформаторов.

Расчет охлаждения трансформатора по уравнениям теплопередачи

Процесс теплоотдачи от поверхности охлаждения трансформатора к окружающему воздуху может происходить в условиях свободной конвекции при разных температурах, в условиях обдувания воздухом с определенной скоростью. Рассмотрим эти условия.

а) Теплоотдача в условиях свободной конвекции

В условиях свободной конвекции процесс охлаждения будет складываться из теплоотдачи конвекцией и излучением

$$q = q_{\text{к}} + q_{\text{л}}. \quad (3)$$

Теплоотдача конвекцией определяется из уравнения

$$q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}}) \text{ вт/м}^2. \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи α находится из критериального уравнения

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^m, \quad (5)$$

где — Nu , Gr , Pr — соответственно критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля;

C , m — коэффициенты, величина которых зависит от значения произведения $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ [6].

Теплоотдача излучением определяется из уравнения

$$q_{\text{л}} = 5,4 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{ст}} + 273}{100} \right)^4 + \left(\frac{t_{\text{в}} + 273}{100} \right)^4 \right] \text{ вт/м}^2, \quad (6)$$

где ε — степень черноты поверхности охлаждения.

На рис. 1 (кривые 1, 2, 3) приведены результаты расчета зависимости теплоотдачи от температуры воздуха при разных значениях нагрева стенки бака. Результаты расчета по уравнениям теплоотдачи согласуются с данными, полученными по стандартному методу расчета (кривая 1, $t_{\text{ст}} = 80^\circ \text{C}$). Дополнительно графики показывают, что при низких температурах воздуха теплоотдача увеличивается: при $t_{\text{в}} = -14^\circ \text{C}$ — в два раза, при $t_{\text{в}} = -55^\circ \text{C}$ — в три раза по сравнению с теплоотдачей при расчетной температуре воздуха $+35^\circ \text{C}$.

Если температура стенки бака снижается, то теплоотдача уменьшается. При $t_{\text{ст}} = 40^\circ \text{C}$ выделяющееся тепло будет отведено, при $t_{\text{в}} = -20^\circ \text{C}$, при $t_{\text{ст}} = 0^\circ \text{C}$, при $t_{\text{в}} = -60^\circ \text{C}$.

При охлаждении стенок трансформатора до 0°C происходит прекращение циркуляции масла в наружных трубах из-за замерзания в нем влаги. В теплоотдаче участвует только поверхность самого бака, что резко сокращает поверхность охлаждения трансформатора. Происходит разогрев масла в баке. Расчет показывает, что в этом случае при $t_{\text{ст}} = 80^\circ \text{C}$ все тепло можно отвести при $t_{\text{в}} = -45^\circ \text{C}$. При $t_{\text{в}} = -20^\circ \text{C}$ будет отводиться 75%, при $t_{\text{в}} = 0^\circ \text{C}$ — 50% тепла, выделяющегося при нормальной нагрузке трансформатора (кривая 5, рис. 1). Этим объясняются имеющиеся случаи перегрева трансформаторов в условиях низких температур и ветра [5].

б) Теплоотдача при обдувании ветром

Расчет теплоотдачи при обдувании ветром производится аналогично разделу (а) по уравнениям (3), (4), (6).

Коэффициент теплоотдачи α определяется из следующего критериального уравнения:

$$\text{Nu} = 0,18 \Psi \text{Re}^{0,52}, \quad (7)$$

где Ψ — коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи при неперпендикулярном обдувании;

Re — критерий Рейнольдса.

На рис. 1 (кривая 4) приведены результаты расчета теплоотдачи при различных значениях скорости ветра. Из графика видно, что при

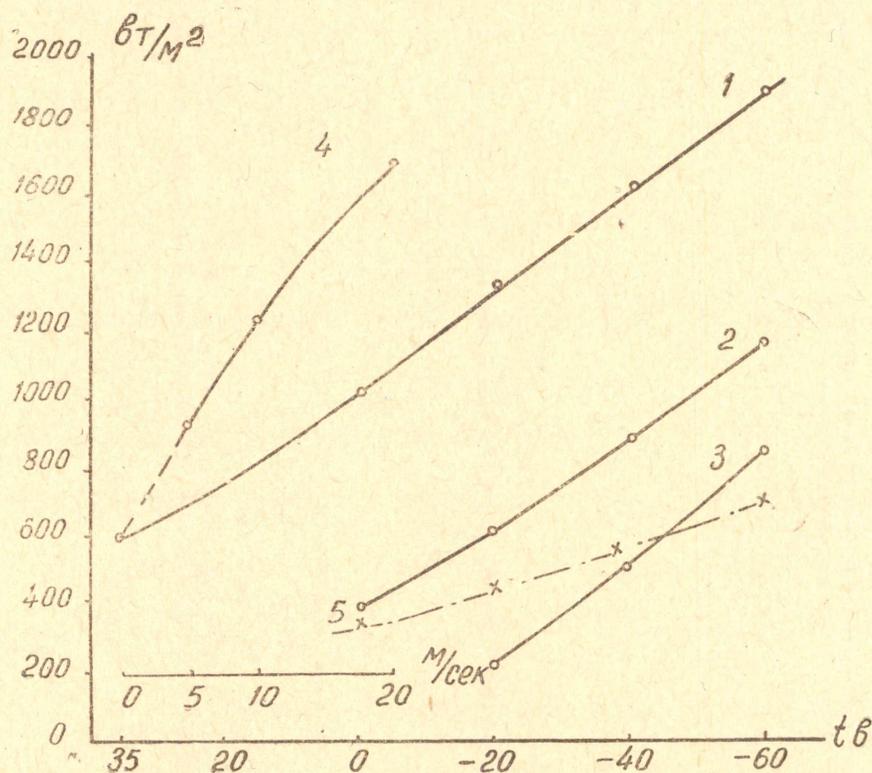


Рис. 1. Кривые зависимости теплоотдачи от температуры воздуха в условиях свободной конвекции при: 1— $t_{ст}=80^{\circ}\text{C}$, 2— 40°C , 3— 0°C ; при $t_{ст}=80^{\circ}\text{C}$; 4—теплоотдача с ветром, 5—при прекращении циркуляции в охлаждающих трубах.

наличии ветра в 10 м/сек теплоотдача увеличивается более чем в два раза, при 20 м/сек — в три раза.

Охлаждение трансформатора при работе с перегрузкой

В процессе эксплуатации трансформаторов допускается в аварийных случаях работа трансформаторов с перегрузкой. Значения допускаемых перегрузок и их длительности представлены в табл. 1.

Наиболее длительными являются перегрузки в 1,3 и 1,6 раза. Причем, перегрузка в 1,3 раза может допускаться и в неаварийном

Таблица 1

Величина перегрузки, N/N_n	1,3	1,6	2,0	2,4
Допустимая длительность перегрузки, часов	2	0,5	0,125	0,05

порядке при условии, что коэффициент заполнения суточного графика трансформатора меньше единицы.

Результаты расчета величины удельных тепловыделений и допустимой температуры масла внутри трансформатора при перегрузочных режимах работы представлены на рис. 2.

Сопоставление данных об охлаждении трансформатора позволяет определить условия, при которых возможна длительная работа с перегрузкой. Так из рис. 1 и рис. 2 легко установить, что для режима с перегрузкой на 30% температура стенки бака должна быть не выше 66°C . По условиям наружного охлаждения в этом случае возможна длительная работа при следующих условиях:

- а) при температуре воздуха ниже 0°C без ветра;
- б) при температуре воздуха $+35^{\circ}\text{C}$ с ветром в 9 м/сек и более.

Для режима работы с перегрузкой 60% аналогично получаем: температура стенки бака не должна превышать 49°C . Длительная работа возможна при:

- а) температуре воздуха минус 40° и ниже без ветра;
- б) при температуре воздуха $+35^{\circ}\text{C}$ с ветром 18 м/сек и выше.

По данным опытного исследования при длительной работе трансформатора с перегрузкой 40% в условиях естественного мороза с температурой $t_{\text{в}} = -30^{\circ}\text{C}$ температура масла не поднималась выше 40°C , что хорошо согласуется с приведенными на рис. 2 данными расчета [3]. Там же приведены данные об установившейся темпера-

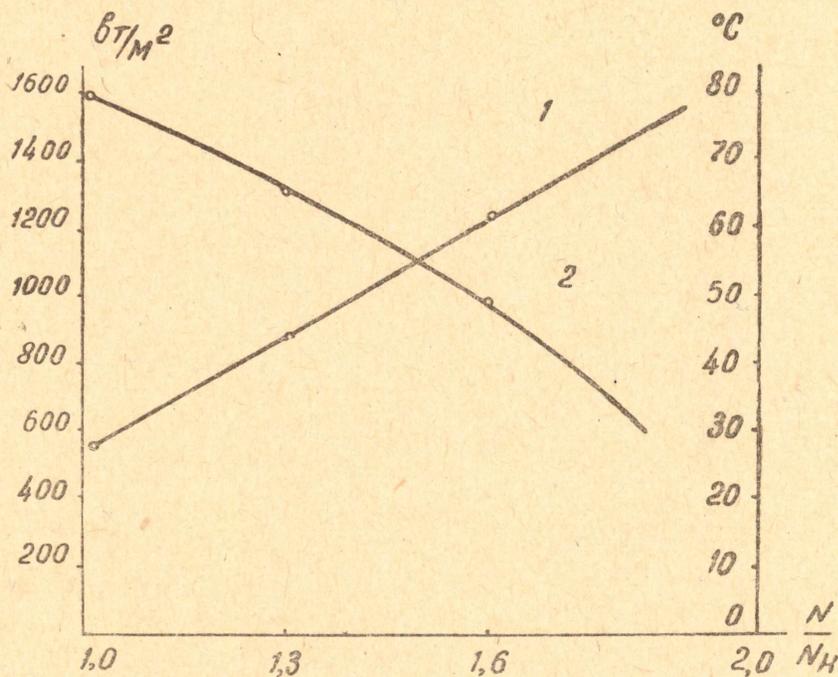


Рис. 2. Кривые зависимости: 1—удельных тепловыделений, 2—допустимой температуры масла от величины перегрузки трансформатора.

туре масла внутри трансформатора в условиях естественного мороза с температурой $t_{\text{в}} = -30^{\circ}\text{C}$ при длительной работе с перегрузкой 55%. По данным опыта значение температуры масла в этом режиме поднималось и устанавливалось на уровне $+53^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, можно сделать вывод, что длительная работа трансформаторов с перегрузками на 30 и 60% возможна при условии достаточного наружного охлаждения.

Выводы

1. Проведенные теоретические расчеты охлаждения и результаты опытного исследования включения под нагрузку трансформатора в условиях низкой температуры воздуха показали возможность и полезность расчета охлаждения трансформаторов по критериальным уравнениям, позволяющим учитывать наличие ветра.

2. При наличии ветра значительно улучшаются условия охлаждения трансформатора снаружи и позволяют отвести в два-три раза больше тепла, чем при расчетной максимальной температуре без обдувания.

3. При включении трансформатора, находящегося в замороженном виде, или при прекращении циркуляции масла в наружных трубах необходимо придерживаться следующего правила: при $t_{\text{в}} = 0^{\circ}\text{C}$ трансформатор включается на 50%, при $t_{\text{в}} = -20^{\circ}\text{C}$ — на 75%, при $t_{\text{в}} = -45^{\circ}\text{C}$ — 100% мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Шницер. Ж. Электричество, № 4, 1939.
 2. Е. К. Завадовская. Ж. Электричество, № 8, 1939.
 3. Е. К. Завадовская, А. К. Красин. Труды СФТИ, т. VI, 1945.
 4. Н. Н. Зюзиков. Ж. Эл. станции, № 3, 1946.
 5. А. А. Александров. Ж. Пром. энергетика, № 2, 1960.
 6. М. А. Михеев. Теория теплопередачи. Госэнергоиздат, 1956.
-