

Исследования нестационарного температурного поля в трансформаторной шине<sup>1</sup>

Целью исследования являлось определения допустимых критических нагрузок трансформатора, при которых охлаждающее шину трансформаторное масло сохранило бы свою структуру и свойства.

Известно, что по мере нагрева нефтепродуктов в них происходят структурные перестройки и разложение больших молекул на более мелкие, в результате чего существенно меняются основные теплофизические характеристики и свойства. Одной из важнейших (с точки зрения безопасной эксплуатации силовых трансформаторов) характеристик трансформаторного масла является так называемая температура вспышки  $t_{всп}$ . Это температура, при которой пары масла в смеси с воздухом способны загореться от малейшей искры и вызвать взрыв в замкнутом объеме. Для большинства марок трансформаторных масел (ГК, Т-1500У, ТКл) эта температура невысока и составляет 135 °С [1, 2]. Другой критической характеристикой является температура самовоспламенения масла  $t_{св}$ , при которой оно воспламеняется без каких-либо внешних воздействий. Эта температура лежит в пределах 350...400 °С [1]. Поэтому эксплуатационные температуры принимаются ниже названных, и обычно верхний предел их не превышает 90 °С [1].

При работе трансформатора под нагрузкой в шинах его выделяется джоулево тепло, которое теплоотдачей передается охлаждающему маслу, повышая его температуру, как правило, до уровня 50 °С [1]. Нагретое масло направляется во внешний теплообменник и отдает выделенное тепло в окружающую среду. При изменении нагрузки трансформатора изменяется и количество выделяемого в шине тепла, и это вызывает определенный нестационарный переходный процесс от одного теплового состояния к другому. При увеличении нагрузки такой процесс приводит к повышению температурных уровней, а при определенных перегрузках температура в зоне контакта шины с маслом может превзойти опасные пределы. Поэтому определение такой максимальной температуры в зависимости от величины нагрузки представляет большой практический интерес. Нагрузка представлена в виде объемной мощности тепловыделения, которую можно найти по формуле

$$q_v = I^2 \rho / F^2 \cdot 10^{-6},$$

где  $q_v$  – объемная плотность тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>;  $I = N_{эл} / U$  – ток в шине, А;  $U$  – рабочее напряжение, В;  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника Ом · мм<sup>2</sup>/м;  $F$  – площадь сечения проводника, м<sup>2</sup>.

Условия теплоотдачи с разных сторон шины заметно различаются, и это не позволяет решить задачу о нестационарной теплопроводности этого тела аналитически, или (при введении ряда упрощений) получаемое аналитическое решение очень громоздко и неудобно для практических расчетов. Поэтому задача решалась численным способом с использованием специального пакета ELCUT [3], предназначенного для решения задач электростатики, электродинамики и нестационарного теплообмена методом конечных элементов. Это позволило также более полно учесть реальную геометрию шины и теплофизические свойства электротехнической меди.

На рис. 1 приведены результаты выполненных расчетов, в частности вид температурного поля медной шины марки ПБ сечением

5,6 × 18 мм при номинальной нагрузке трансформатора ТМ 630/10 мощностью 630 кВА. При этом значения коэффициентов теплоотдачи были рассчитаны с использованием рекомендованных критериальных уравнений [4] и принимались соответственно 105 Вт/(м<sup>2</sup> · К) со стороны с лучшим обтеканием (между шиной и наружным кожухом) и 70 Вт/(м<sup>2</sup> · К) с той стороны, где движение масла затруднено из-за ограниченного пространства между шиной и обмоткой трансформатора. На рисунке более темные оттенки серого соответствуют более высоким температурам, а линии изображают изотермы.

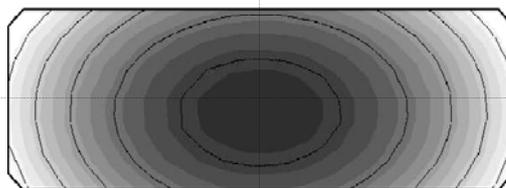


Рис. 1. Температурное поле шины при нагрузке 630 кВт

Из рисунка видно, что наиболее горячие места на поверхности находятся на оси симметрии шины. Именно для точки, находящейся на нижней середине ребра, построен график зависимости температуры от времени при выходе трансформатора на номинальную нагрузку (рис. 2).

<sup>1</sup> Работа выполнена под руководством проф. В.И. Ляшкова.

Как видно из графика, процесс нагрева имеет нелинейный характер, что объясняется постепенным уменьшением температурного градиента между центром шины и ее периферией. Ко времени  $\tau = 300$  с процесс теплообмена практически выходит на стационарный режим. При средней температуре масла  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  максимальная температура на поверхности шины при этом составила  $t = 103,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

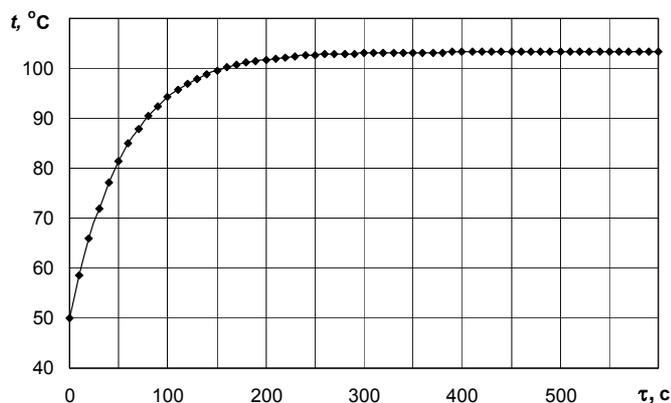


Рис. 2. Изменение  $t_{ст}^{max}$  по времени

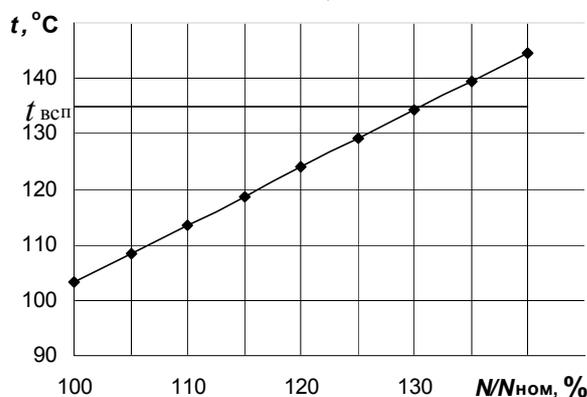


Рис. 3. Изменение максимальной температуры шины при увеличении перегрузки трансформатора

На рис. 3 представлена зависимость максимальной температуры на поверхности шины от величины перегрузки трансформатора. Именно мощность аппарата определяет величину тока в шине и, при неизменном удельном сопротивлении проводника, величину удельной мощности тепловыделения  $q_v$ .

По данному графику можно определить, какую наибольшую нагрузку можно реализовать в трансформаторе, чтобы избежать опасных ситуаций, максимальная температура на поверхности шины превысит температуру вспышки. Для рассчитанного варианта, как это видно из рисунка, при нагрузке в 130 % от номинальной максимальная температура на поверхности шины достигает величины  $t_{всп}$ .

Предложенный подход, таким образом, может быть использован при проектировании нового электроэнергетического оборудования и режимов его эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учебное пособие / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. ЗАО Росма. Энергетические масла // <http://rosma.ru>.
3. ELCUT. Руководство пользователя. – СПб., 2002. – 185 с.
4. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 260 с.