

М.А. Нагорный

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

*Количественная оценка степени теплового использования электрической изоляции обмотки трансформатора с помощью понятия «коэффициент теплового использования электрической изоляции» как основы для анализа принятых технических решений по совершенствованию конструкции изделий и важного стимула повышения мощности трансформатора.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: обмотка, трансформатор, конструкция, электрическая изоляция, «коэффициент теплового использования системы электрической изоляции», мощность.*

*Кількісна оцінка ступеня теплового використання електричної ізоляції обмотки трансформатора за допомогою поняття «коефіцієнт теплового використання електричної ізоляції» як основи для аналізу прийнятих технічних рішень по вдосконалюванню конструкції виробів і важливого стимулу для підвищення потужності трансформатора.*

*К л ю ч о в і с л о в а: обмотка, трансформатор, конструкція, електрична ізоляція, «коефіцієнт теплового використання системи електричної ізоляції», потужність.*

**Постановка проблемы.** В процессе работы трансформатора часть электромагнитной энергии превращается в тепло, которое рассеивается в окружающую среду. Главными источниками тепла в трансформаторе являются обмотки активной части и магнитопровод. Несмотря на то, что коэффициент полезного действия трансформатора достаточно высок, потери мощности, например, в трансформаторах мощностью 1000...1600 кВ·А, достигают нескольких киловатт. Рассеяние тепла в окружающую среду взрывозащищённых трансформаторов должно происходить так, чтобы при заданной мощности трансформатора температура отдельных его элементов и сборочных единиц не превышала допустимых значений, ограниченных ГОСТ 11677-85 и ДСТУ 7113-2009.

Допустимое превышение температуры отдельных элементов и сборочных единиц масляных и сухих трансформаторов различно и определяется заданным сроком службы, зависящим от класса нагревостойкости электрической изоляции, а также безопасностью использования их в процессе эксплуатации в течение всего срока службы.

Как известно, теоретические и экспериментальные исследования показали, что существенное влияние на эффективность и надежность взрывозащищенных трансформаторов оказывает неравномерность нагрева их обмотки. Поэтому количественная оценка теплового использования ее изоляции является достаточно актуальной.

**Анализ исследований и публикаций.** Для взрывозащищенных сухих трансформаторов с воздушным охлаждением, естественной конвекцией, применяемых автономно и в составе комплектных передвижных подстанций (КТП), допустимое превышение температуры зависит от:

- а) класса нагревостойкости витковой и главной изоляции;
- б) конструкции магнитопровода и оболочки;
- в) принятого проводникового материала;
- г) допустимой температуры воздуха в распределительных устройствах КТП для нормального функционирования приборов, блоков, силовых коммутирующих устройств и т.д.

В существующих взрывозащищенных трансформаторах применяется преимущественно витковая изоляция класса нагревостойкости Н по ГОСТ 8865-95, допускающая максимальную температуру 180 °С. В последнее время в отечественных трансформаторах находит применение также изоляция классов нагревостойкости 200 и 220, допускающая температуру 200 и 220 °С.

Температура наиболее нагретой точки обмотки активной части и её крепёжных элементов и узлов, соприкасающихся с магнитопроводом, должна быть равна или меньше допустимой температуры изоляции. Эта температура является предельной также для магнитопровода из-за контакта с ним крепёжных изоляционных устройств, хотя электротехническая сталь и проводниковые материалы могут длительное время работать при температуре 200 °С без сколько-нибудь заметного изменения электрических, магнитных и механических свойств. Срок службы изоляции в случае её нагрева выше допустимой температуры значительно сокращается. Как показывают лабораторные испытания, а также сведения, приведенные в многочисленных литературных источниках, для изоляции класса Н превышение температуры на 10...13 °С приводит к сокращению срока службы в два раза, а снижение температуры на указанное значение – к его увеличению в два раза.

Известно, что срок службы, в течение которого изоляция практически теряет механическую прочность, определяется эмпирической формулой:

$$T_{сл} = C \cdot e^{-\alpha \nu},$$

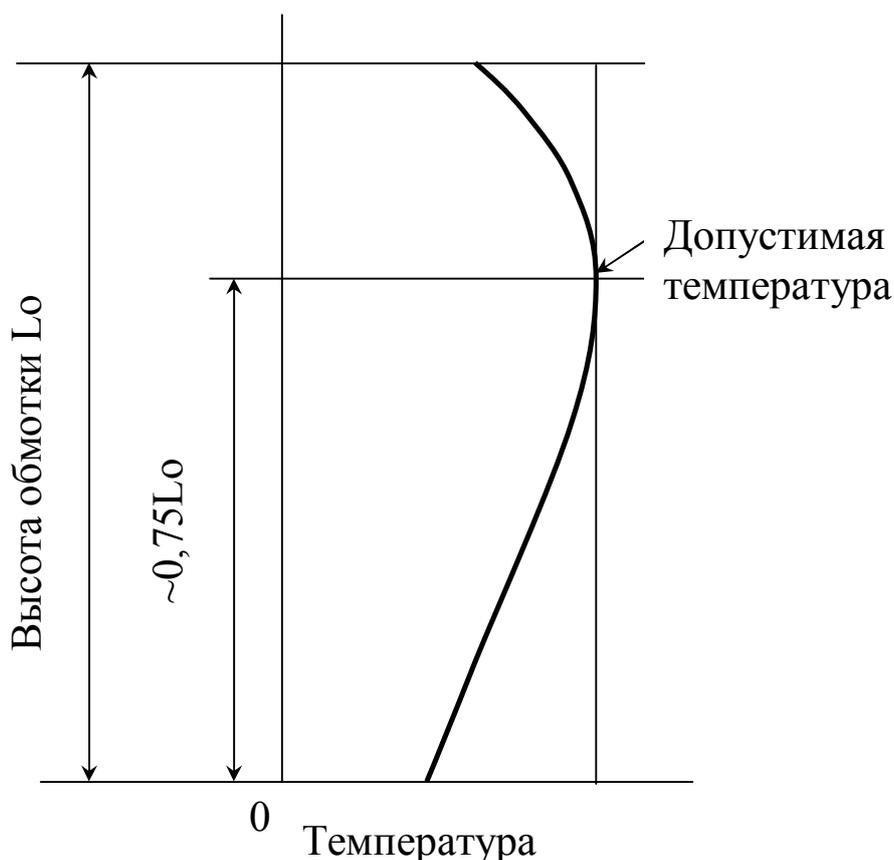
где  $T_{сл}$  – срок службы изоляции, лет;

$C$  и  $\alpha$  – постоянные коэффициенты для диапазона температуры, в котором работает изоляция;

$\nu$  – температура изоляции, °С.

Явление старения изоляции от воздействия температуры, наряду с конструктивными особенностями, температурной проводимостью, толщиной изоляции, доступностью электрических частей, характера нагрузки, является важнейшим фактором, определяющим срок эксплуатации трансформатора, а для взрывозащищённых трансформаторов, предназначенных для эксплуатации во взрывоопасных средах, кроме того – фактором надёжности и безопасности его применения в этих специфических условиях.

Нагрев обмотки трансформатора характеризуется неравномерностью прежде всего по её высоте и разностью температуры между её фазами. На рисунке 1 приведено типичное распределение температуры изоляции обмотки активной части трансформатора по высоте.



*Рисунок 1 – Характерное распределение температуры обмотки сухого трансформатора по её высоте*

Из рисунка следует, что температура изоляции обмотки в верхней её части выше температуры в нижней части обмотки. Многочисленные исследования и испытания взрывозащищённых сухих трансформаторов показывают, что зона (точка) наибольшей температуры изоляции обмотки находится приблизительно на расстоянии 0,75 общей высоты обмотки от нижнего её края. Очевидно также, сколь неэффективно используется изоляционный материал обмотки вследствие её неравномерного нагрева. Разность между температурой наиболее нагретой точки изоляции и темпера-

турой изоляции в нижней части обмотки во взрывозащищённых сухих трансформаторах достигает 80...120 °С и в значительной мере зависит от высоты обмотки.

В то же время в литературных источниках отсутствует достаточно эффективный метод количественной оценки теплового использования изоляции трансформатора и снижения неравномерности ее нагрева.

**Цель работы.** Обосновать необходимость и метод количественной оценки степени теплового использования системы изоляции обмотки трансформатора.

**Результаты исследований.** Распределение температуры  $\vartheta$  обмотки сухих трансформаторов в пределах её высоты с достаточной для расчётов точностью может быть описано уравнением

$$\vartheta = Ax^2 + Bx + C,$$

где  $x$  – относительная высота обмотки;

$A$ ,  $B$  и  $C$  – постоянные коэффициенты.

Другим фактором, влияющим на характер нагрева обмотки, определяющим в значительной мере общую его неравномерность, является нагрев в результате продолжительной неравномерной нагрузки в течение всего срока эксплуатации, характерной для взрывозащищённых трансформаторов, эксплуатирующихся в шахтных условиях. Степень неравномерности нагрева обмотки трансформатора зависит от правильности выбора мощности трансформатора для обеспечения нормальной работы электроприёмников. Выбор трансформатора повышенной мощности приводит к недоиспользованию изоляции из-за её нагрева ниже допустимой температуры, а выбор трансформатора недостаточной мощности – к перегреву обмотки, что для эксплуатации в условиях взрывоопасной среды является опасным.

До настоящего времени не использовалось понятие, отражающее степень теплового использования электрической изоляции трансформатора, которое бы могло быть представлено конкретным значением, но именно введение такого понятия позволяет подойти к вопросу нагрева изделия с точки зрения рационализации его конструкции. Анализ показывает, что для рассмотрения общего вопроса состояния изоляции при работе электротехнических изделий, наряду с требованиями к электрической изоляции, важным является необходимость определения степени теплового использования самой изоляции, выраженной количественно.

Для количественной характеристики степени теплового использования изоляции обмотки предлагается ввести понятие «коэффициент теплового использования (КТИ) системы электрической изоляции» обмотки трансформатора, под которым следует понимать отношение среднего значения температуры обмотки в пределах её высоты к допустимой темпера-

туре при номинальной мощности трансформатора в установившемся режиме.

Этот коэффициент может быть определён путем тепловых расчётов при проектировании и непосредственных физических измерений на опытных образцах трансформаторов.

Принятие расчётного КТИ системы электрической изоляции обмотки трансформатора может быть обусловлено тем, что кривые (зависимости) температуры обмотки по её высоте с изменением мощности во всех режимах нагрузки трансформатора носят приблизительно конгруэнтный характер, сравнительно легко описываются математически.

**Пример определения КТИ.** На средней фазе «В» сухого трансформатора с воздушным охлаждением и обмоткой с витковой изоляцией класса нагревостойкости Н, допускающей нагрев до 180 °С, установлены равномерно по всей высоте обмотки  $L_0$ , представленной в относительных единицах, десять датчиков температуры (порядок нумерации – снизу вверх). Трансформатор работает с номинальной мощностью до установившегося по нагреву режима. Результаты представлены в таблице 1.

Среднее значение из  $n$  измерений

$$g_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i = 136,97 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таблица 1

Номер датчика температуры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g, \text{ } ^\circ\text{C}$	44	77,0	109,9	133,1	153,3	170,0	176,8	180,0	169,3	156,3

Учитывая то, что результаты физических измерений являются приближёнными, зависимость изменения температуры обмотки по её высоте для нашего примера представим в виде интерполирующей функции, заданной в пределах относительной высоты обмотки:

$$g = 310 \cdot x^2 + 471,8 \cdot x - 3,1. \quad (1)$$

Проинтегрировав выражение (1) и соотнеся результат с допустимой температурой обмотки (180 °С), получим: КТИ = 0,7609, т.е. изоляция в средней фазе «В» трансформатора в данном случае недоиспользуется на 24 %, отсюда при более равномерном нагреве обмотки и обязательном снижении температуры наиболее нагретой точки (зоны) имеется резерв повышения мощности изделия.

Путём физических измерений аналогичным образом можно определить степень использования изоляции трансформатора и в двух других фа-

зах («А» и «С»). Общий КТИ всей обмотки трансформатора получим путём деления суммы результатов вычислений по обмоткам всех фаз на количество всех датчиков температуры.

В приведенном примере не учтено изменение температуры обмотки по её толщине, поэтому его следует рассматривать как условный.

Сравнение значений КТИ для различных конструкций трансформаторов следует проводить с учётом расхода проводникового и изоляционного материалов на изготовление обмотки и стали на изготовление магнитопровода, а также мощности изделия.

Выравнивание температуры обмотки путём рационального выполнения активной части и оболочки направлено на повышение КТИ, а следовательно – на повышение мощности трансформатора. Приближение температуры к наибольшему допустимому её значению приведёт также и к повышению температуры оболочки, что вызовет увеличение количества тепла, рассеиваемого в единицу времени, т.е. возникнут более благоприятные условия для рассеяния всего генерируемого активной частью тепла в окружающую среду. Мощность трансформатора при этом может быть повышена за счёт выравнивания температуры его обмотки при неуклонном стремлении к повышению КТИ.

Следует отметить, что предложенный КТИ не полностью учитывает неравномерность нагрева обмотки трансформатора, а именно по:

- а) её толщине и изменению этого параметра по высоте;
- б) обмотке средней и крайних фаз;
- в) обмотке высшего и низшего напряжения;
- г) длине каждого витка обмотки;
- д) соотношению между оптимальным (рациональным) расходом активных материалов и изоляции и полученным распределением температуры.

Неточность определения КТИ может быть также привнесена погрешностью применяемых средств измерения температуры обмотки. Однако неучёт указанных факторов не может оказать принципиального влияния на значение КТИ.

В связи с тем, что указанные особенности на настоящем этапе развития трансформаторостроения устранить в полной мере практически невозможно, предлагаемый КТИ может, по нашему мнению, считаться достаточным при проведении теоретических расчётов и принятии конструкторских решений по выполнению витковой изоляции и всей обмотки.

Введение понятия КТИ системы электрической изоляции обмотки трансформатора позволяет не только оценить возможность дальнейшего совершенствования конструкции активной части и трансформатора в целом путём выравнивания тепловой нагрузки на электроизоляцию обмотки, но явится важным стимулом для поиска новых технических решений, направленных на повышение мощности трансформатора при заданных массе и габаритных размерах, его надёжности и безопасности применения, осо-

бенно во взрывоопасных средах. Это понятие может послужить стимулом для дальнейшего совершенствования конструкции активной части трансформатора, повышения мощности с одновременным снижением температуры наиболее нагретой зоны его обмотки, оценки соответствия температуры наружной поверхности оболочки взрывозащищённого электрооборудования в случае образования слоёв угольной пыли на электрооборудовании требуемому согласно ДСТУ 7113-2009 ограничению (150 °С).

Анализ распределения температуры обмотки трансформатора по высоте в некоторой степени указывает и на недоиспользование проводникового материала обмотки, что является дополнительным стимулом для совершенствования активной части и трансформатора в целом. Очевидно, что применение традиционных технических решений при разработке взрывозащищённых сухих трансформаторов позволит увеличить КТИ за счет применения изоляции повышенного класса нагревостойкости и снижения высоты обмотки, что является рациональным при использовании трансформатора (или КТП) в горных выработках.

Понятие КТИ изоляции обмотки трансформатора может быть использовано для всех типов трансформаторов.

На настоящем этапе совершенствования взрывозащищённых сухих трансформаторов введение понятия КТИ может служить основой для конструктора при разработке усовершенствованных изделий за счет поиска технических решений, направленных на выравнивание температуры обмотки трансформатора, т.е. практически на повышение КТИ. Тщательный анализ таких технических решений с учётом технологических возможностей завода-изготовителя, безопасности использования в условиях эксплуатации и экономической целесообразности позволит повысить КТИ.

Понятие КТИ системы электрической изоляции обмотки трансформатора, отражающее его конструктивные особенности, может быть расширено за счёт учёта таких факторов, влияющих на срок службы изоляции, как вибрация, влажность и состав атмосферы, перегрузки, короткие замыкания в электрической сети, неравномерность токовой нагрузки во времени в результате технологических особенностей производства, пусковых токов и т.д. В этом случае оно может носить более широкий смысл. Если некоторые из факторов соответствуют понятию КТИ изоляции, но одновременно могут быть также отнесены к показателям надёжности обмотки трансформатора, то они должны определяться в рамках допустимого, определённого соответствующей технической документацией, нагрева витковой изоляции. Указанное понятие может быть отнесено и к общему КТИ системы электрической изоляции обмотки трансформатора.

При всякой новой разработке, наряду с определением мощности трансформатора, следует путём теплового расчёта или испытания на нагрев согласно ГОСТ 3484.2-88 определять КТИ изоляции обмотки трансформатора и сравнивать его с аналогичными показателями существующих

конструкций с учётом расхода активных материалов. Это послужит дополнительным стимулом для совершенствования трансформатора и подтверждения рациональности принятых конструктивных решений.

### ***Выводы.***

1. Для количественной характеристики степени теплового использования изоляции обмотки трансформатора нами предложено ввести понятие коэффициента теплового использования системы электрической изоляции обмотки трансформатора, определяемого как отношение ее средней температуры к допустимой температуре для данного класса нагревостойкости изоляции.

2. Оптимальное значение КТИ может быть обеспечено путем оценки совершенствования теплоотвода за счёт обеспечения равномерности охлаждения обмотки и эффективности принятых в конструкции трансформатора технических решений, направленных на снижение массы активных и конструкционных материалов, обусловленных нормами технической документации и удовлетворяющих требованиям эксплуатации.

3. Введение понятия КТИ в практику анализа распределения температуры активной части (в том числе обмотки трансформатора) послужит основой системного подхода к процессу теплообмена, который может явиться важнейшим стимулом повышения мощности в единице изделия, в том числе экономии материалов, повышения надёжности и безопасности эксплуатации изделия в условиях взрывоопасных сред.