

Е.А. Сорока, с.н.с.

(Украина, Донецк, Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством)

И.Н. Луценко

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА РУДНИЧНОЙ ПОДСТАНЦИИ МОЩНОСТЬЮ 1000 кВ·А В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Постановка проблемы. В современном электромашиностроении, в том числе в рудничном трансформаторостроении, при проектировании и эксплуатации оборудования приходится сталкиваться с необходимостью решения ряда проблем, из которых проблема нагревания и охлаждения, ввиду решающей роли тепловых ограничений играет важнейшую роль при совершенствовании конструкции существующих машин и, особенно, при разработке новых – повышенной мощности, у которых тепловые нагрузки значительно возрастают. С процессами нагревания электрических машин и трансформаторов, особенно рудничных взрывозащищенного исполнения с их тяжелыми условиями охлаждения активной части, связана также проблема уменьшения габаритов и массы изделий, которая в значительной мере может быть решена за счет оптимально выбранных теплового режима и системы охлаждения. Поэтому исследование тепловых режимов сухих взрывобезопасных трансформаторов (ТСВ) комплектных подстанций (КТП) повышенной мощности (1000 кВ·А и выше), т.е. вопросов, составляющих специфическую и одну из наиболее сложных, как в теоретическом, так и в практическом отношении проблем, определяющих технический уровень современного рудничного трансформаторостроения, приобретает особую актуальность.

Анализ исследований и публикаций. В трансформаторах типа ТСВ с вертикальным расположением стержней магнитопровода и концентрически установленными на них обмотками высшего и низшего напряжения (ВН и НН) охлаждение активной части обеспечивается за счет естественной конвекции внутреннего воздуха и излучения с поверхности обмоток и магнитопровода. Условия охлаждения обмоток усложняются тем, что кроме непосредственного нагрева они испытывают также взаимный подогрев и подогрев от магнитопровода. Данное обстоятельство потребовало всестороннего и тщательного изучения теплового состояния активной части трансформаторов типа ТСВ в различных условиях нагрева и охлаждения.

Экспериментально-теоретическое исследование макетов различных типов обмоток с целью определения оптимальных по теплоотдаче геометрических размеров охлаждающих каналов (система внутреннего охлаждения) выполнено в работе [1], в которой показаны результаты и сравнительный анализ нагрева обмоток с точки зрения эффективности их охлаждения. В работе [2] определено тепловое состояние комплектной трансформаторной подстанции типа КТПВ – 630/6 в номинальном, повторно-кратковременном режиме работы по ГОСТ 18311-80, характеризующемся относительной продолжительностью включений ПВ = 60%. Приведенный тепловой режим представляет интерес в плане сравнения средних и максимальных перегревов элементов активных частей ТСВ в различных временных режимах нагрева и определения необходимости принять за расчетный режим работы рудничных КТП повышенных мощностей (1000, 1250 и 1600 кВ·А) повторно-кратковременный (ГОСТ 18311-80).

Цель статьи. Исследование теплового состояния активной части КТП мощностью 1000 кВ·А в наиболее характерных режимах работы.

Результаты исследований. Проведено экспериментально-теоретическое исследование нагревания активной части ТСВ номинальной мощностью 1000 кВ·А (рис. 1), являющейся основной сборочной единицей КТП.

Особенности конструкции и технологии изготовления активной части: силовой трансформатор сухого типа с естественным воздушным охлаждением выполнен на трехстержневом шихтованном магнитопроводе из холоднокатаной электротехнической стали марки 3408 по ГОСТ 21427.1-83 с низкими удельными потерями; с целью снижения потерь холостого хода стыки крайних стержней и ярм изготовлены «косыми» под углом 45°.

Обмотки трансформатора выполнены медным нагревостойким проводом марки ПСДКТ-Л прямоугольного сечения с кремнийорганической изоляцией, выдерживающей нагревание до температуры 200 °С (ГОСТ 8865-93). Обмотка НН – цилиндрическая с осевым охлаждающим каналом между слоями шириной 12 мм; обмотка ВН – непрерывная катушечная с радиальными охлаждающими каналами. На рисунке 1 схематично изображена активная часть (фазы С и В) с указанием габаритных размеров вертикальных и горизонтальных охлаждающих каналов.

Исследования нагрева активной части проводились в двух принципиально различных вариантах ее теплового состояния (такой эксперимент проведен впервые):

- а) нагревание при свободном теплообмене с окружающей воздушной средой в открытом состоянии;
- б) нагревание в условиях, полностью ограничивающих свободный теплообмен с окружающей средой по причине расположения объекта в герметичной оболочке, служащей своеобразным теплообменником, воспринимающим тепловые потоки от обмоток и магнитопровода и передающим тепло окружающей оболочке среде.

Следовательно, с технической точки зрения тепловые исследования разделены на два этапа. Первый – определение теплового состояния объекта без оболочки КТП при естественном воздушном охлаждении в продолжительных рабочих режимах. Второй – определение теплового состояния и эффективности охлаждения активной части в качестве сборочной единицы КТП, помещенной в ее оболочку.

Для определения температурного поля активной части в характерных точках ее конструкции было установлено 56 медь-константановых термоэлектрических термометров (ТМК), получивших благодаря своей технологичности наибольшее распространение при тепловых испытаниях и исследованиях электрических машин и трансформаторов [3].

Термопары ТМК № 1-14 и ТМК № 27-40 собраны блоками и помещены в осевых каналах обмоток НН фаз С и В соответственно; блоки ТМК № 15-26 и ТМК № 41-54 находились в осевых каналах, образованных магнитопроводом и обмоткой НН, и измеряли распределение температуры охлаждающего воздуха в каналах по высоте обмоток НН; ТМК №№ 55 и 56 находились на поверхности верхнего ярма магнитопровода (рис. 1).

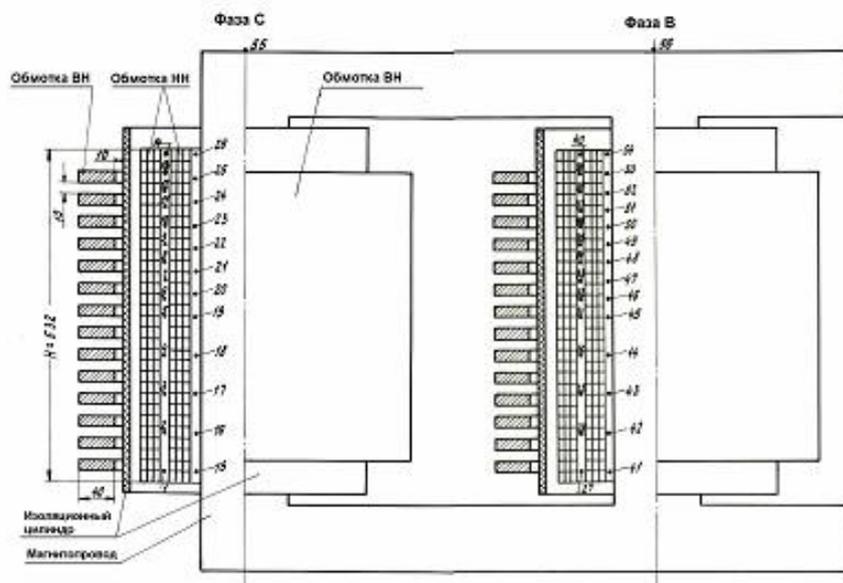


Рис. 1. Расположение термопар в осевых охлаждающих каналах и на магнитопроводе активной части трансформаторной подстанции типа КТПВ-1000/6-1,2

Исследования проводились на специализированном испытательном стенде методом взаимной нагрузки по ДСТУ 30645-97 (ГОСТ 3484.2-98) и контролировались по показаниям ТМК № 1-54 с помощью измерительной аппаратуры, в комплект которой входил высокоточный цифровой вольтметр типа В7-23.

Теплофизический процесс нагрева продолжался до установившегося теплового состояния исследуемого объекта при $\Theta_{нн \max} = const$ (рис. 2), после чего трансформатор отключался от сети и измерялось среднее электрическое сопротивление постоянному току обмоток ВН и НН с помощью мостовой установки типа У-303 высокого класса точности ($R_x = 10^{-6} \dots 10^6 \text{ Ом}$). Измерение сопротивления обмоток при повторно-кратковременном режиме нагрева КТП проводилось в середине последнего рабочего периода ($t_{\text{раб.пер.}} = 36 \text{ мин}$) по достижении практически повторяющихся температур $\Theta_{нн \max} = const$.

Графо-аналитический метод расчета сопротивления обмоток R_o в момент их отключения от сети позволил определить их среднее превышение температуры по формуле:

$$\Theta_{нн,вн}^{T_{окр}} = \frac{R_o - R_{хол}}{R_{хол}} \cdot (K + T_{хол}) + T_{хол} - T_{окр},$$

где R_o – электрическое сопротивление обмоток постоянному току в момент отключения, Ом; $R_{хол}$ – то же в холодном состоянии, Ом; $T_{хол}$ – окружающая температура при измерении $R_{хол}$, °C; $T_{окр}$ – то же при измерении R_o , °C; K – коэффициент, равный 235 для обмоток из меди.

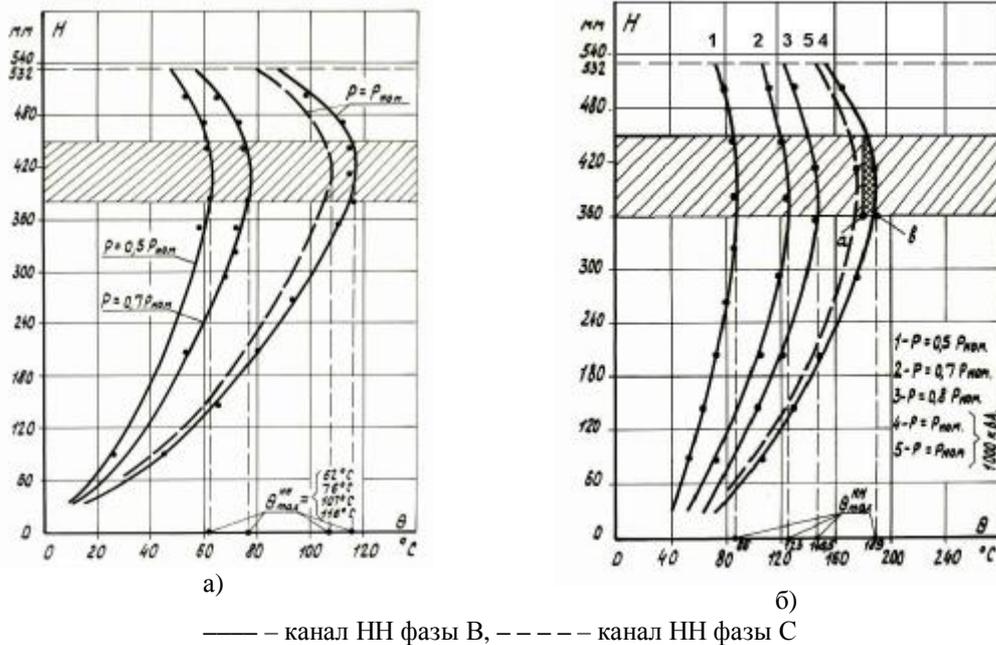


Рис. 2. Распределение превышения температуры по высоте обмотки НН активной части в различных режимах нагрузки: а) – без оболочки; б) в оболочке КТП

Экспериментальные данные превышений температуры в установившихся режимах нагрузки после соответствующей обработки сведены в таблицу 1, а экспериментально-расчетные значения средних превышений температуры обмоток ВН и НН – в таблицу 2.

Таблица 1

| Этап исследования | | Режим нагревания | Превышение температуры, °C, в канале обмотки НН фазы «В» по номерам ТМК | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------------------|---|-----|-------|-----|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| | | | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| Активная часть НН (без оболочки) | 1. Продолжительный $P_{ном.}=1000$ кВ·А $T_{окр}=12,8$ °C | 10,6 | 45 | 66 | 80 | 94 | 98 | 102,4 | 111 | 116 | 114 | 114,3 | 111,6 | 98 | 87,6 |
| | 2. Продолжительный $P=0,8P_{ном.}=800$ кВ·А $T_{окр}=25,2$ °C | 64 | 90 | 104 | 122 | 133 | 137 | 141 | 244 | 145,5 | 144 | 143 | 138 | 132 | 129 |
| | 3. Продолжительный $P_{ном.}=1000$ кВ·А $T_{окр}=16,8$ °C | 74 | 107 | 130 | 150,5 | 168 | 175 | 185 | 188 | 192 | 194 | 187 | 181 | 176 | 167 |
| | 4. Повторно-кратковременный (ПВ=60%), $P_{ном.}=1000$ кВ·А $T_{окр}=24$ °C | 65,5 | 99 | 109 | 120,5 | 134 | 135 | 138 | 149,5 | 154 | 148 | 148 | 147 | 137,7 | 129,5 |

Сравнительный анализ двух тепловых режимов при номинальной нагрузке $P=1000$ кВ·А активной части без оболочки (режим 1) и в оболочке КТП (режим 2) показывает определенное различие в распределении температуры по высоте обмотки НН, что следует из характера графических зависимостей вида $\Theta_{нн} = f(H_{обм})$ (рис. 2). Температурные кривые для всех режимов показывают распределение данного параметра в канале обмотки фазы В, как наиболее нагреваемой по сравнению с крайними фазами А и С (для сравнения представлены данные о температурном поле в канале фазы С для режима $P=1000$ кВ·А, при

Таблица 2

Экспериментально-расчетные значения средних превышений температуры обмоток

| Мощность в продолжительном режиме, кВ·А | Среднее превышение температуры обмоток (по сопротивлению, ГОСТ 3484.2-98), °С | | | | | | | |
|---|---|------------|-----------------------|------|-------------------------------|------------|-----------------------|------|
| | Активная часть без оболочки | | | | Активная часть в оболочке КТП | | | |
| | обмотка НН | обмотка ВН | Т _{окр} , °С | | обмотка НН | обмотка ВН | Т _{окр} , °С | |
| 500 | 27,1 | 24,4 | 12 | 12,4 | 59,4 | 52,2 | 15,3 | 15,5 |
| 700 | 42,5 | 43,1 | 12,6 | 12,8 | 89,4 | 83,9 | 15,6 | 16,3 |
| 800 | - | - | - | - | 105,1 | 113,8 | 24,1 | 25,2 |
| 1000 | 61 | 72,9 | 12,9 | 13,4 | 144,4 | 149,5 | 16,8 | 17,6 |

котором максимальное превышение температуры достигает 177 °С). Следовательно, межфазная разность максимальной температуры, зафиксированной ТМК-35 и ТМК-10, составляет 12 °С.

Анализ показывает: процесс нагревания теплоносителя в канале идет по возрастающему закону степенной функции вида $Y=X^a$; в зоне $3/4H_{обм}$ (горизонтальная заштрихованная область на графике $\Theta_{нн} = f(H_{обм})$, рис. 2) достигает наибольшего значения, что отражено на графике в виде вертикального заштрихованного участка в интервале температур $a-b$ – зоны T_{max} при номинальной нагрузке. Выше максимальной зоны нагревания, т.е. на участке верхней 1/4 длины канала, наблюдается определенное снижение интенсивности теплообмена, что характеризуется изгибом кривой в сторону понижения температуры и следующим отрицательным градиентом (таблица 2): для режима 1 (активная часть без оболочки) – $\Delta\Theta_{нн}^{35,40} = 28,4$ °С; для режима 3 (активная часть в оболочке) – $\Delta\Theta_{нн}^{35,40} = 32,5$ °С (35 и 40 – локальные точки температурных измерений в канале). Фактическое температурное поле по высоте обмотки $H_{обм}$ для анализируемых режимов следующее. Превышение температуры воздуха на входе в охлаждающий канал составляет: в режиме 1 – 10,6 °С (ТМК-27), в режиме 3 – 74 °С; на выходе из него – 87,6 °С и 156,5 °С соответственно (ТМК-40), т.е. осевые температурные градиенты по длине канала равны $\Delta\Theta_{нн}^1 = 77$ °С и $\Delta\Theta_{нн}^3 = 82,5$ °С (где 1 и 3 – номера режимов по таблице 2). Характерным для этих режимов является также разность температуры между максимальным превышением температуры Θ_{max} и минимальным Θ_{min} : $\Delta\Theta_{max-min}^1 = 105,4$ °С, $\Delta\Theta_{max-min}^3 = 115$ °С. Учитывая расположение точек измерения температурного поля (рис. 1), констатируем, что максимальное превышение температуры воздушного потока зафиксировано в зоне 1/4 высоты от выхода из канала (ТМК-35). Это согласуется с ранее установленным фактом, что зона T_{max} находится на высоте, равной 3/4 высоты обмоток, доказанным многочисленными тепловыми исследованиями натуральных образцов взрывобезопасных трансформаторов различных мощностей [2].

Особенностью осевого температурного градиента $\Delta\Theta_{нн}$ является снижение температуры в верхней части обмотки со 116 до 87,6 °С (режим 1) и со 194 до 167 °С (режим 3) вследствие охлаждения нескольких верхних витков за счет теплоотдачи торца обмотки излучением и конвекцией, а также за счет теплопроводности через опорные детали.

Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки НН является одним из главных параметров при определении норм температурного режима трансформатора и непосредственно влияет на его технико-экономические показатели. Снижение этой температуры – резерв для дальнейшего увеличения мощности ТСВ, т.к. позволит снизить расход активных материалов и трудоемкость его изготовления. При этом уменьшается как разность между Θ_{max} и средней температурой, так и градиент по высоте обмоток, основным составляющим которого является разность между Θ_{max} (194 °С) и Θ_{min} (74 °С), благодаря чему достигается равномерность их охлаждения.

Из сопоставления температуры в различных режимах нагрузки следует, что градиент по высоте обмотки НН растет с увеличением нагрузки: $\Theta_{нн}^{0,7} = 58,7$ °С; $\Theta_{нн}^{0,8} = 65$ °С; $\Theta_{нн}^{1,0} = 82,5$ °С (где 0,7; 0,8; и 1,0 – значения нагрузки в долях от номинальной). Причем во всех случаях около 70% градиента температуры приходится на нижнюю половину обмотки, что свидетельствует о низкой эффективности теплоотдачи в верхней части трансформатора (режимы 2,3). Следует отметить, что высота обмоток сухих трансформаторов, в том числе типа ТСВ (в большей степени, чем трансформаторов общего назначения), заметно влияет на осевые градиенты $\Delta\Theta_{нн}$ и на отношение между максимальным и средним превышением температуры $\Delta\Theta_{ннср}$ [4]. Низкие обмотки имеют меньшую максимальную температуру, чем высокие при равных значениях их средних превышений над температурой окружающей среды, что является важным фактором при проектировании ТСВ повышенных мощностей (1000 кВ·А и выше).

На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости максимального превышения температуры обмотки НН и магнитопровода активной части двух вариантов исследования от режима нагрузки. Эти зависимости показывают значительное различие в характере нагревания магнитопровода активной части в оболочке КТП и вне ее. В первом случае процесс подчиняется экспоненциальному закону – кривая 4 по возрастающей идет вверх, сперва полого, потом все круче; во втором – (кривая 2) процесс происходит почти линейно с тенденцией к стабилизации теплового состояния системы.

Превышение температуры магнитопровода определялось на поверхности верхнего ярма по осям стержней фаз С и В (рис. 1). Максимальное превышение температуры в режиме 1000 кВ·А, (активная часть в оболочке КТП) фазы В составляет 178 °С (ТМК-56), а по оси фазы С – 168 °С (ТМК-55). Следовательно, горизонтальный температурный градиент верхнего ярма магнитопровода равен $\Delta\Theta_{\text{магн}} = 10\text{ °С}$, что на 4,4 °С больше аналогичного КТПВ-630/6, который составил 5,6 °С [2]. Процесс нагревания обмотки НН (кривые 1 и 3) происходит с различной скоростью нарастания температуры, со значительной разностью ее максимальных значений ($\Delta\Theta_{\text{НН}}^{0,7} = 47\text{ °С}$; $\Delta\Theta_{\text{НН}}^{1,0} = 73\text{ °С}$) и описывается с помощью показательной функции.

Зависимости среднего превышения температуры обмоток НН и ВН от режима нагревания исследуемой активной части имеют следующие особенности (рис. 4): для активной части с открытым охлаждением зависимости $\Theta_{\text{нн,вн,ср}} = f(P/P_{\text{ном}})$ почти линейные; для активной части в оболочке (основной элемент системы охлаждения ТСВ) характер аналогичных зависимостей изменяется – кривые роста $\Theta_{\text{ср}}$ изменяются по возрастающей, подчиняясь закону показательной функции. Однако в обоих случаях среднее превышение температуры обмотки НН выше соответствующего обмотки ВН до определенного значения нагрузки (для режима 1 – $0,7 \cdot P_{\text{ном}}$; для режимов 2,3 – $0,75 \cdot P_{\text{ном}}$), начиная с которого $\Theta_{\text{вн,ср}}$ становятся больше, чем обмотки НН и разность в превышениях температуры режима 1000 кВ·А составляет 11,9 °С в режиме 1 и 8,7 °С – в режиме 3 (таблицы 1,2).

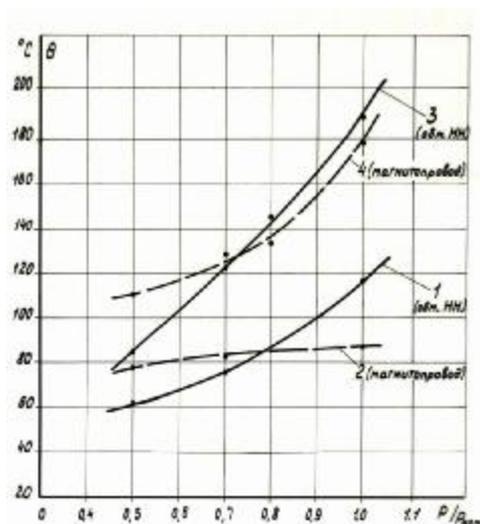
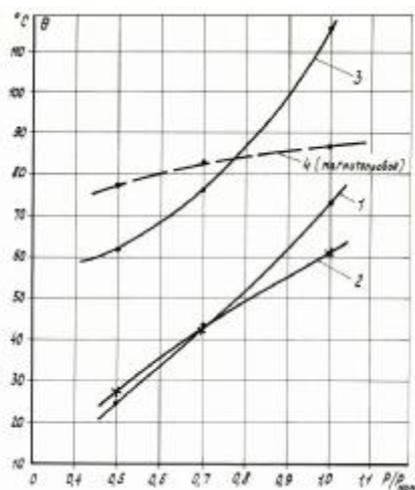
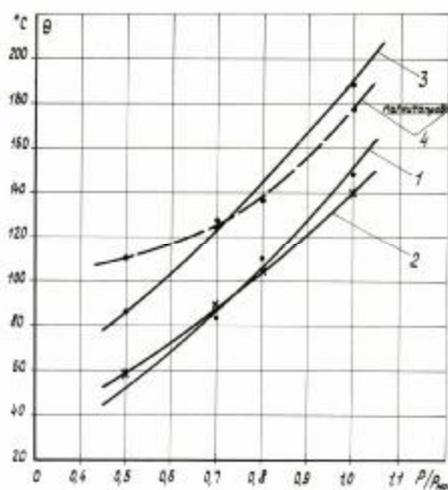


Рис. 3. Зависимость максимального превышения температуры обмотки НН и магнитопровода от нагрузки:
1, 2 – активная часть без оболочки,
3, 4 – активная часть в оболочке КТП



а)



б)

$$1 - \Delta\Theta_{\text{вн,ср}} = f(P/P_{\text{ном}}); 2 - \Delta\Theta_{\text{нн,ср}} = f(P/P_{\text{ном}});$$

$$3 - \Delta\Theta_{\text{нн,макс}} = f(P/P_{\text{ном}}); 4 - \Delta\Theta_{\text{магн,макс}} = f(P/P_{\text{ном}})$$

Рис. 4 – Зависимость среднего и максимального превышения температуры обмоток ВН, НН и магнитопровода активной части от нагрузки: а – без оболочки; б – в оболочке КТП

Выводы

1. Превышение температуры обмоток активной части в оболочке КТП, определенное по изменению их электрического сопротивления после продолжительного установившегося номинального режима нагрузки при температуре окружающей среды 17°C, составляет для обмотки НН – 144,4 °С, для обмотки ВН – 149,5°C (находится на пределе нормируемого по ТУ У 31.1-00217159-034-2002).

2. Превышение температуры обмоток активной части в оболочке КТП, определенное по изменению их электрического сопротивления после повторно-кратковременного установившегося номинального режима нагрузки (ПВ=60%, $t_{цикл} = 1$ час) при температуре окружающей среды 24 °С, составляет: для обмотки НН – 105,5 °С, для обмотки ВН – 112,6 °С; $\Theta_{магн.маx} = 146$ °С.

3. Тепловое состояние обмоток НН характеризуется неравномерным распределением температуры, в результате чего максимальное ее превышение в режиме нагрузки 1000 кВ·А достигает 194 °С, а в режиме ПВ=60% при $P_{ном.} = 1000$ кВ·А – 154 °С.

4. Снижение максимальной температуры обмоток рудничных трансформаторов типа ТСВ может быть достигнуто за счет следующих технических решений: 1) исследование и выбор оптимальных параметров и геометрических размеров охлаждающих каналов обмоток (система внутреннего охлаждения); 2) исследование и выбор оптимальных параметров оболочек ТСВ; 3) применение системы принудительного воздушного охлаждения активной части; 4) за расчетный режим работы КТП повышенных мощностей принять повторно-кратковременный (ГОСТ 18311-80) с ПВ=60%; 5) применение современных технических средств – "сверхпроводников тепла" или тепловых труб, встраиваемых в охлаждающие каналы обмоток.

Список литературы

1. Сорока Е.А. Особенности нагрева катушечных и слоевых обмоток рудничных трансформаторов типа ТСВ // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 2001. – С.105-112.
2. Сорока Е.А. Исследование нагревания взрывобезопасной трансформаторной подстанции типа КТПВ мощностью 630 кВ·А // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 2002. – С.108-116.
3. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин / Э.И. Гуревич – Л.: Энергия, 1997. – 294с.
4. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961.

Рекомендовано до друку: проф. Разумним Ю.Т.