

УДК 621.314.21-213.34.017

Е.А. СОРОКА, Ю.Н. ПАПАЗОВ (канд.техн.наук)

Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством
tr@ukrniive.com.ua

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА СТАДИИ НИР И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Представлена оценка эффективности различных систем охлаждения, сравнение их конструкции и надежности с целью нормализации теплового режима взрывозащищенных сухих трансформаторов (ТСВ) передвижных комплектных подстанций для питания электроприемников угольных шахт.

Постановка проблемы. При проектировании и эксплуатации электрических машин (в том числе силовых трансформаторов) наряду с максимально допустимыми электрическими и механическими напряжениями необходимо соблюдать предельно допустимые ограничения по температуре активных частей. По этой причине общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует процесс совершенствования систем охлаждения.

Система охлаждения трансформатора общего назначения вместе с наружной частью включает в себя и систему внутреннего охлаждения (осевые и радиальные охлаждающие каналы), обеспечивающую передачу тепла от активной части к теплоносителю (минеральному маслу в масляном трансформаторе, воздуху – в сухом).

Об эффективности работы этих систем можно судить по тепловому состоянию обмоток низшего и высшего напряжений (НН и ВН), определяемому по ГОСТ 3484.2-98. Для сухих трансформаторов необходимо также определение местных (максимальных) нагревов, играющих основную роль в старении изоляционной системы. Следовательно, вопросы проектирования систем охлаждения неразрывно связаны с тепловым состоянием активной части трансформатора.

Для трансформатора, представляющего собой в тепловом отношении неоднородное тело, необходимо, чтобы температура его наиболее нагретой, активной части была не выше допустимой, т.е. система охлаждения должна быть рассчитана на отвод тепла, выделяющегося в трансформаторе во внешнюю среду, и обеспечивать его тепловой режим в соответствии с требованиями ГОСТ 11677-85. Нагрев зависит от потерь энергии и интенсивности охлаждения, т.е. чем интенсивнее охлаждение трансформатора, тем больше допустимые потери энергии и чем больше его номинальная мощность, тем сложнее осуществить охлаждение. Так, для трансформаторов малой мощности (сотни В·А) естественное воздушное охлаждение оказывается достаточным. Для трансформаторов большой мощности (сотни и тысячи кВ·А) применяют специальные меры для повышения интенсивности охлаждения (масляное охлаждение, вентиляционные каналы, обдув оболочек и т.д.). Это объясняется тем, что с увеличением мощности трансформатора увеличиваются его линейные размеры, которые возрастают пропорционально корню четвертой степени от мощности $l = S^{1/4}$. Внешняя, охлаждаемая воздухом поверхность трансформатора увеличивается пропорционально квадрату линейных размеров $F_o \equiv l^2 \equiv S^{1/2}$, а удельные потери q также возрастают в пропорции $q \equiv \Sigma P / F_o = S_{mp}^{1/4}$.

Таким образом, с увеличением номинальной мощности трансформатора и его размеров потери энергии в нем увеличиваются в большей степени, чем поверхность охлаждения. Для того, чтобы с ростом мощности трансформатора сохранить удельную тепловую нагрузку поверхности оболочки q и превышение ее температуры над окружающим воздухом $\Theta_{об.в}$ неизменными, прибегают к увеличению внешней поверхности трансформаторов путем дополнительного его оребрения.

Для сухих трансформаторов вопрос интенсификации охлаждения усложняется по следующим причинам:

1) в них, в отличие от масляных, система наружного охлаждения, как правило, не выделяется в виде отдельных конструктивных единиц;

2) система внутреннего охлаждения, не являясь функционально самостоятельным конструктивным узлом, представляет собой неотъемлемый элемент активной части, а потому при ее проектировании требования в отношении нагрева обмоток и магнитопровода неразрывно связаны с требованиями к электродинамической стойкости обмоток и электрической прочности изоляции;

3) тепловой режим их более напряженный, чем масляных, вследствие того, что воздух, как теплоноситель, является менее совершенной охлаждающей средой, чем трансформаторное масло ($\lambda_e = 0,022$ Вт/м·°С при 20°С и 760 мм рт.ст., $\lambda_{тр.м} = 0,15$ Вт/м·°С);

4) из-за меньшей теплопроводности воздуха электромагнитные нагрузки активных материалов в трансформаторах меньше, что приводит к увеличению сечения проводов обмотки и магнитопровода;

5) для нормируемого теплового режима сухих трансформаторов при условии не превышения максимальной и средней температуры обмоток над окружающей средой значений, установленных ГОСТ 11677-85 и ГОСТ 8865-93, увеличение наружной поверхности оказывается недостаточным, а идти по пути увеличения охлаждающих поверхностей обмоток и магнитопровода неприемлемо из-за значительного удорожания изделий.

В трансформаторах взрывозащищенного исполнения активная часть помещена во взрывонепроницаемую герметичную оболочку, полностью исключающую в нее доступ наружного воздуха, поэтому их тепловой режим еще более напряженный, чем в трансформаторах общего назначения, что привело к повышению рабочей температуры обмоток и магнитопровода и повлекло за собой необходимость применения дорогостоящей кремнийорганической изоляции классов нагревостойкости Н и 200 по ГОСТ 8865-93 [1].

Из вышеизложенного можно заключить, что при создании сухих взрывозащищенных трансформаторов (ТСВ) и на их основе комплектных подстанций (КТП) оптимальной конструкции важен правильный выбор и расчет системы охлаждения, так как от нее зависит надежность как этих изделий, так и угледобывающих комплексов в целом. Поэтому вопрос анализа, исследования и поиска дополнительных резервов при проектировании эффективных систем охлаждения, при которых температура отдельных частей трансформатора не превысит предельно допустимых значений, является важным и актуальным.

Анализ исследований и публикаций. В отечественной литературе нет специальных работ по вопросам теплообмена, систем охлаждения и повышения эффективности сухих трансформаторов как общего назначения, так и взрывозащищенных.

Относительно трансформаторов типа ТСВ при отсутствии объемных монографий по излагаемому вопросу имеется ряд публикаций, анализ которых показывает следующее. Первые отечественные трансформаторы для КТП были с кварцевым заполнением, у которых взрывозащита в аварийном режиме обеспечивалась за счет гашения электрической дуги кварцевым песком. Потери в обмотках отводятся к оболочке посредством теплопроводности в большей мере (60...65 %) через алюминиевые теплоотводящие пластины, установленные между обмотками ВН и НН, и через кварцевый песок (35...40 %). Охлаждение наружной поверхности оболочки обеспечивается за счет естественной конвекции воздуха и излучения. На основе опыта производства и эксплуатации подобных КТП серии ТКШВП, а также в связи с созданием более мощных горных машин была расширена шкала мощностей и освоены трансформаторы и КТП мощностью 100, 160, 250, 400 и 630 кВ·А типа ТСШВ и ТСШВП.

Установившееся при данной нагрузке превышение температуры трансформатора над температурой окружающей среды ($\Theta_{уст}$) зависит от площади его теплоотдающей поверхности и интенсивности теплоотдачи и выражается зависимостью [2]:

$$\Theta_{уст} = P / (\alpha \cdot F),$$

где P – потери в трансформаторе;

α – коэффициент теплоотдачи (КТО);

F – площадь теплоотдающей поверхности.

Следовательно, при проектировании трансформатора необходимо обеспечить соответствующую поверхность охлаждения, т.е. вполне определенную рассеивающую поверхность на кВт потерь. Однако потери с ростом мощности увеличиваются быстрее поверхности охлаждения и, начиная с некоторой мощности, эта поверхность оказывается уже недостаточной ($\Theta_{уст} > \Theta_{норм}$). Поэтому в сухих трансформаторах приходится все охлаждающие каналы системы внутреннего охлаждения делать большими, а электромагнитные нагрузки активных материалов допускать меньшими, чем в масляных. Такой путь для трансформаторов общего назначения ограничивается максимальной мощностью 10 МВ·А; для взрывозащищенных он неприемлем из-за значительно возрастающих габаритных размеров изделий. Взамен необходимо стремиться к увеличению КТО, что стало предметом экспериментально-теоретического исследования различных систем охлаждения на образце трансформатора ТСШВ-400/6.

В 1990-х годах проявился повышенный интерес к применению в различных областях техники испарительно-конденсационных устройств – тепловых труб (ТТ), которые позволяют решить проблему эффективности охлаждения и надежного обеспечения требуемых температурных режимов. Принцип действия ТТ основан на использовании скрытой теплоты парообразования при фазовых превращениях промежуточного теплоносителя. Их достоинствами являются высокая эффективность теплопередачи, компактность, автономность и технологичность, что послужило основанием для применения их в конструкциях трансформаторов типа ТСВ.

УкраНИИВЭ совместно с институтом тепло- и массообмена ИТМО Академии наук Белорусии впервые в отечественной практике были разработаны трансформаторы и КТП мощностью 1000 кВ·А с использованием ТТ, отвечающие требованиям эксплуатации в угольной промышленности. Патентный поиск и анализ достижений в области разработки и применения ТТ позволил принимать наиболее прогрессивные решения по конструкции систем охлаждения трансформаторов и КТП [3]. На рис. 1 показаны различные варианты конструкции ТТ, представляющей собой замкнутый цилиндрический испарительный термосифон без капиллярно-пористой структуры.

Цель статьи. Сравнительный анализ систем охлаждения взрывозащищенных трансформаторов и КТП, оценка их эффективности и перспективы практического применения.

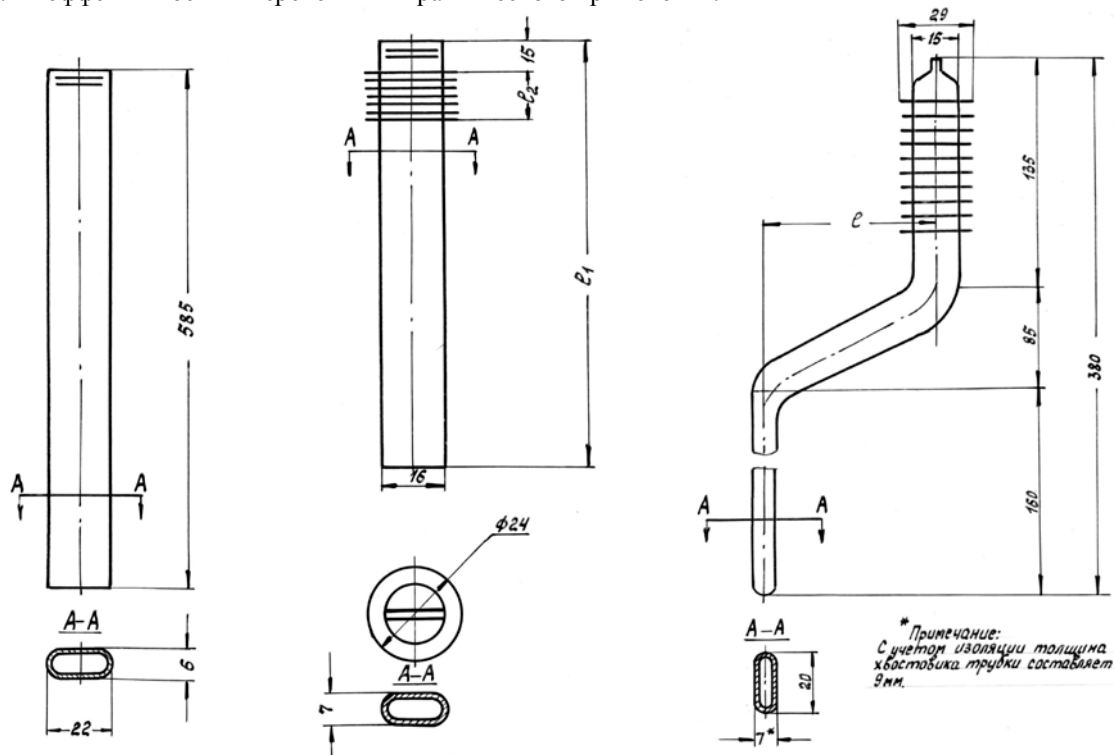


Рисунок 1 – Тепловые трубы, установленные в теплообменнике (а), в магнитопроводе (б) и обмотках НН (в)

Результаты исследований. Создание серии взрывозащищенных сухих трансформаторов и КТП мощностью до 630 кВ·А и пересмотр стандартов ГОСТ 15542-79 и ГОСТ 16837-79 с повышением требований к ним определило необходимость выбора и разработки оптимальных параметров системы охлаждения активной части и оптимальных геометрических соотношений охлаждающих каналов обмоток. Таким образом, в данном случае нашла применение система естественного воздушного охлаждения с теплопередачей на оболочку посредством конвективного теплообмена. По мере изучения возможности применения ТТ наметилось второе направление – создание ТСВ с испарительно-конденсационной системой охлаждения, которое является перспективным при создании КТП мощностью более 1000 кВА, т.к. в связи со стесненным пространством подземных выработок допустимые размеры изделий могут быть обеспечены при применении более эффективных систем охлаждения.

К третьему направлению в развитии рудничного трансформаторостроения можно отнести работы по созданию ТСВ с принудительным охлаждением, обеспечивающим повышение их номинальной мощности до 1600 кВ·А и выше, а также улучшение на 30...35% массогабаритных характеристик подстанций серии КТПВ [4].

Патентный поиск по наиболее развитым странам, анализ технической литературы и других источников показали, что применение принудительного воздушного охлаждения является перспективным направлением нормализации теплового режима ТСВ повышенной мощности, обеспечивая снижение их массы и размеров.

Повышение интенсивности охлаждения есть в сущности увеличение КТО посредством конвекции от наружных и внутренних поверхностей охлаждения. Так, интенсификация теплоотдачи внутри оболочки возможна при ее заполнении инертными газами (элегазом, азотом) под некоторым избыточным давлением или в случае внутреннего принудительного охлаждения воздухом, например, с помощью разработанной УкрНИИВЭ системы принудительного воздушного охлаждения со встроенными в оболочку трубами.

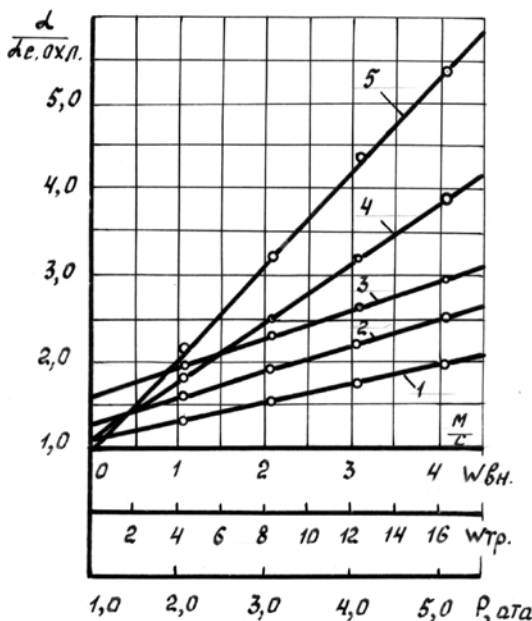
Для сравнительной оценки различных способов интенсификации теплоотдачи проведены расчеты КТО для трансформатора ТСШВ-400/6 со следующими системами охлаждения:

- естественная конвекция элегаза, азота или смеси элегаза (50 %) с азотом (50 %), заполняющих оболочку при давлении 0,1...0,6 МПа;
- принудительное воздушное охлаждение со встроенными в оболочку трубами;
- внутренний принудительный обдув.

Первые две системы интенсифицируют теплоотдачу внутри оболочки, третья – в окружающую среду. Расчеты приведены на рис. 2. Для сравнения различных систем их КТО дан в отношении к КТО при естественном воздушном охлаждении. На оси абсцисс для систем принудительного охлаждения внутри оболочки и по трубам отложено значение скорости циркуляции воздуха, для системы с газовым заполнением – избыточное давление.

КТО в зависимости от скорости циркуляции и давления (рис. 3) в рассматриваемых системах увеличивается:

- при заполнении оболочки элегазом при 0,1 МПа и естественной конвекции – в 1,5 раза; при 0,55 МПа – в 3 раза;
- при охлаждении с трубами со скоростью воздуха 18 м/с – в 4 раза;
- при внутреннем обдуве со скоростью воздуха 4,5 м/с – в 6 раз.



1 – азот (100 %), естественное охлаждение; 2 – элегаз (50 %) и азот (50 %), естественное охлаждение;
3 – элегаз (100 %), естественное охлаждение;
4 – принудительный обдув по трубам; 5 – принудительный внутренний обдув

Рисунок 2 – Значения КТО в зависимости от скорости циркуляции и давления для различных систем охлаждения

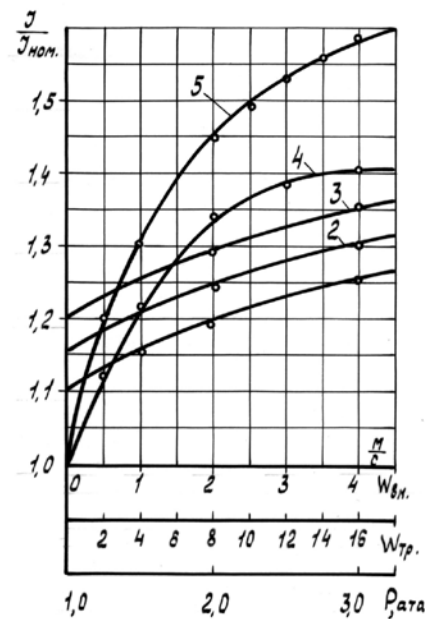


Рисунок 3 – Расчетная эффективность различных систем охлаждения трансформатора ТСШВ-400/6

По зависимостям определены длительные допустимые нагрузки (при $\Theta_{обм} = 125^\circ\text{C}$) для ТСШВ-400/6 (рис. 3, позиции те же, что и на рис. 2) и оценена эффективность систем охлаждения. Наиболее эффективна система принудительного воздушного охлаждения внутри оболочки. При $W_{воз} = 4,5$ м/с длительная токовая нагрузка по сравнению с номинальной может быть увеличена в 1,6 раза. При охлаждении по трубам длительная нагрузка при $W_{воз} = 18$ м/с может быть увеличена в 1,4 раза, при заполнении элегазом и давлении 0,1 МПа – в 1,2 раза.

При выборе системы охлаждения необходимо учитывать не только эффективность системы, но и возможность ее реализации в конструкции трансформаторов, а также параметры надежности.

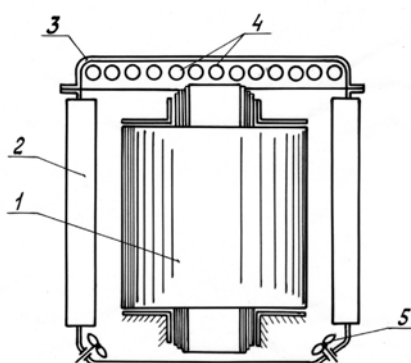
Система охлаждения по трубам менее эффективна по сравнению с системой внутреннего принудительного охлаждения, однако лишена ее недостатка, так как основной тепловой поток от активной части в окружающую среду отводится через трубы и отпадает необходимость в гофрированной оболочке, упрощая конструкцию системы.

Система охлаждения с заполнением оболочки ТСВ инертными газами под давлением, наименее эффективна из рассмотренных, т.к. сложна в эксплуатации и требует постоянного наблюдения за герметичностью оболочки.

Таким образом, для шахтных сухих трансформаторов наиболее эффективна система двойного принудительного воздушного охлаждения, позволяющая увеличить мощность трансформатора в тех же размерах при неизменном расходе активных материалов приблизительно на 60 %, т.е. на две ступени по шкале мощности ГОСТ 9680-77. Исходя из этого, на базе трансформатора $S = 1000$ кВА может быть разработан трансформатор с принудительным охлаждением мощностью до 1600 кВА.

Отметим конструктивные особенности следующих опытных образцов сухих трансформаторов с применением системы принудительного охлаждения: ТСШВД-1000/6 расчетной мощностью 1000 кВ·А (рис. 4), ТКВ-1600/6 (трансформатор кварценополненный мощностью 1600 кВА с интенсификацией охлаждения активной части и оболочки), трансформатор КТП ТСВПД-400/6 расчетной мощностью 400 кВ·А.

Система охлаждения ТСШВД-1000/6 представляет собой оболочку прямоугольной формы со съемной верхней крышкой, в которой над активной частью в зоне наибольшего нагрева находятся расположенные в один или несколько рядов охлаждающие трубы ($d = 50$ мм, $l = 2400$ мм).



1 – активная часть; 2 – гофры; 3 – объемная крышка оболочки;
4 – охлаждающие трубы; 5 – вентиляторы

Рисунок 4 – Конструкция системы охлаждения трансформатора типа ТСШВД-1000/6

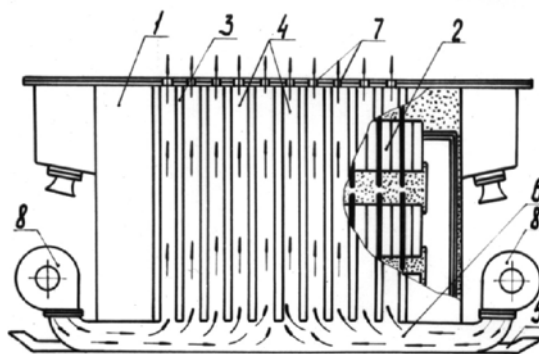
Для увеличения теплоотдачи от активной части к трубам применена принудительная внутренняя вентиляция (в нижней части оболочки установлено шесть центробежных нагнетающих вентиляторов). Внешний нагнетающий вентилятор установлен сверху оболочки на коробке выводов НН. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность данной системы охлаждения: его фактическая тепловая мощность составила 1090 кВт·А.

Образец взрывозащищенного трансформатора единичной мощностью 1600 кВт·А (рис. 5) явился первым в отечественной практике трансформатором подобного класса и мощности. При разработке опытного образца главной проблемой был выбор системы охлаждения. В результате проведения комплекса НИР и ОКР изобретены и использованы следующие системы охлаждения:

а) для активной части – испарительно-конденсационная система охлаждения с помощью ТТ [5];

б) для оболочки – система принудительного воздушного охлаждения с помощью двух наружных центробежных вентиляторов установленных на опорной раме трансформатора [4].

Активная часть ТКВ-1600/6 представляет собой трехстержневой шихтованный магнитопровод с горизонтально расположенными стержнями и дисковыми чередующимися обмотками ВН и НН, между катушками которых для отвода потерь в меди к оболочке установлены в соответствии с [5] алюминиевые теплообменники с ТТ (см. рис. 1).



1 – оболочка; 2 – активная часть; 3 – гофры; 4 – межгоферные охлаждающие каналы; 5 – опорная рама; 6 – горизонтальные (продольные) каналы; 7 – отверстия в крышке оболочки для выхода наружу тепловых конвективных потоков воздуха; 8 – вентиляторы

Рисунок 5 – Конструкция системы охлаждения трансформатора типа ТКВ-1600/6

Свободные концы теплообменников входят в вертикальные гофры оболочки. Тепловые потери активной части благодаря теплообменникам эффективно отводятся на оболочку, для отвода которых разработана высокоэффективная система воздушного охлаждения с помощью наружных вентиляторов [4].

В качестве воздухопроводов использована полая опорная рама с горизонтальными каналами, по которым воздух подводится снизу к межгоферным каналам оболочки. Двигаясь по ним, воздушный поток равномерно омывает поверхности гофр по их высоте. Равномерное распределение воздуха по каналам обеспечивается встречным включением вентиляторных устройств. За счет этого создается турбулизация потока и увеличивается КТО оболочки в окружающую среду. Эффективность охлаждения трансформатора (по сравнению с естественным воздушным) возрастает на 30 %. Это позволяет снизить температуру

трансформатора и уменьшить расход активных материалов. В конструкции ТКВ-1600/6 за счет увеличения эффективности охлаждения увеличена плотность тока в обмотках ВН и НН (соответственно и удельные тепловые нагрузки), в результате чего его тепловая мощность, определенная по зависимости $\Theta_{cp} = f(P_{нагр})$ для обмотки ВН, составила 1495 кВт·А, а для обмотки НН – 1615 кВт·А (рис. 6).

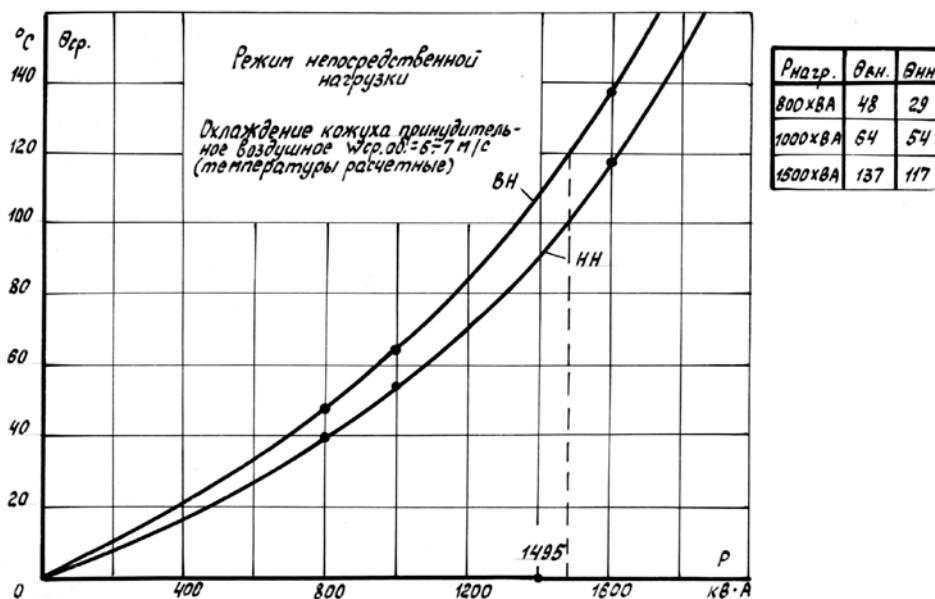


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость превышения температуры обмоток трансформатора ТКВ-1600/6 от нагрузки

Еще один вариант принудительного охлаждения внедрен на образце КТП типа ТСВПД-400/6 с помощью двух осевых вентиляторов, установленных внутри оболочки трансформатора (рис. 7).

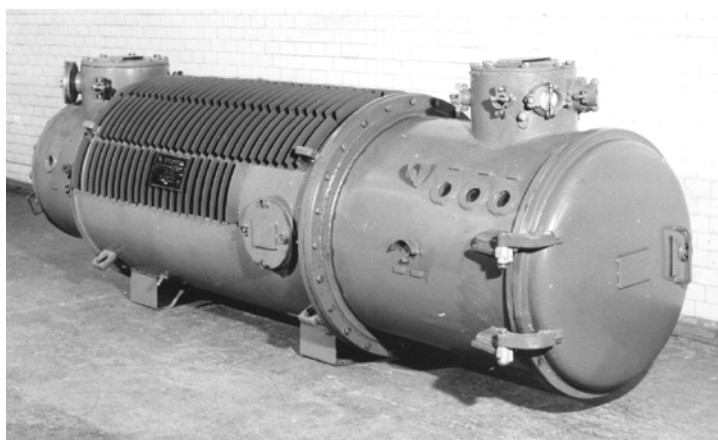


Рисунок 7 – Взрывозащищенная подстанция типа ТСВПД-400/6 с внутренним принудительным воздушным охлаждением

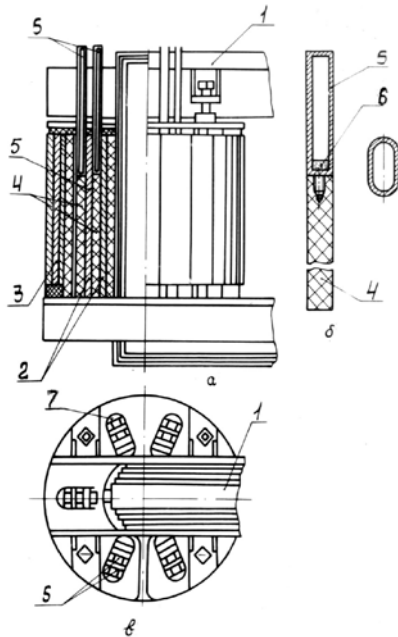
Система охлаждения включает в себя замкнутый контур внутренней принудительной вентиляции. Ее особенностью и достоинством является максимальное использование геометрической формы оболочки ТСВ и взаимного расположения внутри нее основных частей.

Эффективность охлаждения активной части оценивалась сравнением температуры обмоток в идентичных режимах нагрева при включении двух вентиляторов, одного вентилятора и при их отключении. Применение такого охлаждения изменяет процесс теплоотдачи в оболочке, так как она осуществляется с поверхности обмоток и магнитопровода с помощью вынужденной конвекции. За счет увеличения скорости циркуляции теплоносителя ($W_{воз} = 3...5$ м/с) значительно возрастает КТО от указанных поверхностей к внутреннему воздуху, в результате повышения температуры которого возрастает и $T_{обол.}$. Тепловые потери активной части более интенсивно отводятся в окружающую среду, а эффективность охлаждения трансформатора возрастает.

Следующим шагом в совершенствовании испарительно-конденсационной системы охлаждения сухих трансформаторов стала разработка системы с применением ТТ, установленных непосредственно в активной части. Условия охлаждения обмоток НН (многослойных цилиндрических с осевыми каналами) очень

неблагоприятные, так как конструктивно они располагаются непосредственно на стержнях магнитопровода внутри обмоток ВН, а также испытывают подогрев от магнитопровода. Для улучшения эффективности охлаждения предложена система, в которой использованы цилиндрические ТТ, встраиваемые в осевые каналы обмоток [6]. Превышение температуры ее наиболее нагретой точки ($\frac{3}{4}$ высоты обмотки) является одним из главных параметров при определении норм температурного режима ТСВ и непосредственно влияет на его технико-экономические показатели. Снижение этой температуры является резервом дальнейшего увеличения мощности трансформатора, позволяет снизить расход активных материалов. Это было учтено при разработке предложенной в [6] системы охлаждения: тепловоспринимающие части ТТ, выполненные как одно целое с дистанцирующими рейками, расположены на высоте, равной $\frac{3}{4}$ высоты обмоток.

На рис. 8 показана обмотка одной фазы ТСВ с дистанцирующими рейками, совмещенными с ТТ. Трансформатор содержит магнитопровод 1, многослойные цилиндрические обмотки низшего напряжения 2 с осевыми каналами, обмотки 3 высшего напряжения, дистанцирующие рейки 4, установленные в осевых каналах обмоток НН. Верхняя часть 5 дистанцирующих реек 4 представляет собой ТТ, залитую рабочей жидкостью 6. Температура кипения жидкости соответствует рабочей температуре обмоток.

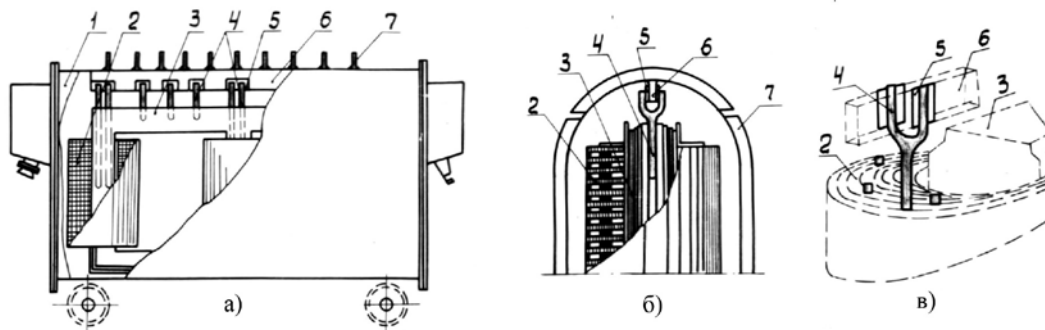


- а) установка реек с ТТ в осевых каналах цилиндрических обмоток НН;
 б) дистанцирующая рейка, выполненная совместно с ТТ;
 в) обмотка фазы трансформатора, вид сверху

Рисунок 8 – Система охлаждения с ТТ, совмещенными с рейками обмоток НН

Установка тепловоспринимающих частей ТТ, в зоне наибольшего нагрева, увеличивает эффективность работы труб, так как при прочих равных условиях увеличивается перепад температуры между зонами испарения и конденсации. Снижается перепад между Θ_{max} и средней температурой обмоток, уменьшается градиент температуры по их высоте и достигается равномерность охлаждения.

С целью увеличения эффективности охлаждения активной части предложено техническое решение [7], реализация которого достигается встраиванием в стержни и ярмо магнитопровода охлаждающих элементов в виде ТТ с теплоотводящими частями V-образной формы, жестко скрепленными с оболочкой продольными шинами (рис. 9).



- а) вид сбоку, частичный разрез трансформатора; б) поперечный разрез; в) активная часть со встроенными V-образными ТТ

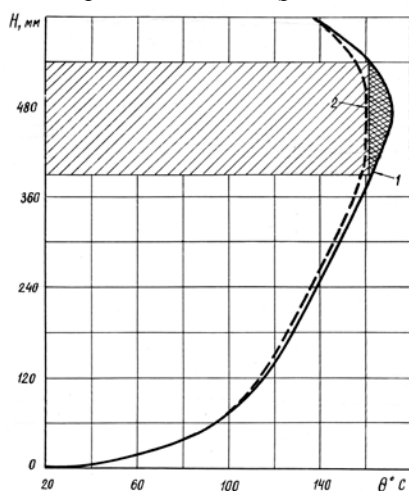
Рисунок 9 – Система охлаждения активной части трансформатора с тепловыми трубами V-образной формы

В герметичной оболочке 1 помещается активная часть 2; в стержни и ярмо магнитопровода 3 (в каналах) установлены ТТ4, заполненные хладагентом (спиртом, ацетоном, водой, фреоном или другими жидкостями с температурой кипения 40...100 °С). Тепловоспринимающие части ТТ расположены в зонах наибольшего нагрева системы, а теплоотдающие части V-образной формы с пластинами 5 на концах разветвлены, выступают за пределы активной части и жестко скреплены сборными шинами 6 оболочки. Разветвленные теплоотводящие части труб значительно увеличивают зону конденсации паров хладагента и интенсифицируют процесс теплоотдачи, а их V-образная форма обеспечивает надежный тепловой контакт ТТ с оболочкой.

Для определения эффективности системы проведены тепловые исследования экспериментального образца трансформатора с изоляцией класса нагревостойкости Н, разработанного на базе серийного 2ТСВ-400/6 и удовлетворяющего требованиям ГОСТ 15542-79.

Охлаждение осуществляется двумя способами: естественным воздушным и испарительно-конденсационной системой. В качестве элементов последней использованы ТТ (см. рис. 1), теплоносителем в которых является дистиллированная вода. Для увеличения теплоотдачи ТТ установлены в осевые каналы равномерно по окружности (33 шт.), их верхние части оребрены и омываются внутренним воздухом за счет конвекции, а тепловоспринимающие части расположены на высоте обмотки НН и имеют с ней хороший тепловой контакт.

По результатам исследований получено распределение превышения температуры по высоте обмотки НН. В зоне обмотки НН в интервале от 400 до 500 мм при естественном охлаждении (без ТТ) $\Theta_{max} > 162^\circ\text{C}$, что превышает нормированное значение для максимально нагретой точки. Применение ТТ снижает температуру в этой зоне на 10...15°С, при этом она не превышает нормированного значения, т.е. устраняется вероятность ускоренного старения изоляции (рис. 10).



1 – без тепловых труб; 2 – с тепловыми трубами

Рисунок 10 - Распределение превышений температуры по высоте обмотки НН серийного трансформатора типа ТСВ-400/6 с естественным воздушным охлаждением

Для сухих трансформаторов мощностью до 630 кВА включительно благодаря модернизации оребренно-гофрированной взрывонепроницаемой оболочки, как системы охлаждения, температура которой является функцией потерь, выделяемых активной частью, было достигнуто увеличение КТО ее внешней поверхности до $\alpha_{м.гофр} = 28 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $\alpha_{м.реб} = 29,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, что больше соответствующих значений КТО в вертикальных каналах оболочки овального профиля в 2,64 и 1,89 раза [8]. Образец трансформатора с усовершенствованной по теплоотдаче оболочкой (с наклонными гофрами), являющегося основной сборочной единицей КТП типа КТПВ-630/6, показан на рис. 11.



Рисунок 11 – Общий вид трансформатора типа 2ТСВ-630/6

Первостепенное значение при расчете температурных полей, и вообще в тепловых расчетах, имеет КТО. В общем случае он зависит от геометрической формы Φ и размеров l поверхности теплообмена (оболочки), скорости движения среды в охлаждающих каналах W , температурных условий и т.д.:

$$\alpha = f(\Phi, l, v, \rho, W, T_{нов}, T_{ср}).$$

Повысить КТО теплоотдающих поверхностей оболочки – значит увеличить интенсивность охлаждения трансформатора. Поэтому при исследованиях теплового состояния наряду с исследованием нагревания их активных частей значительное внимание уделяется изучению теплового поля оболочек с целью оптимизации по теплоотдаче их конструкции [9]. Экспериментальные данные о влиянии оболочки как элемента системы охлаждения на максимальное и среднее превышение температуры обмоток приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Превышение температуры обмоток НН и ВН КТП мощностью 1000 и 1250 кВ·А

Объект исследований	Продолжительный режим нагревания при мощности, кВ·А	КТПВ-1000/6			КТПВ-1250/6*		
		$\Theta_{ННср}$	$\Theta_{ВНср}$	$\Theta_{ННmax}$	$\Theta_{ННср}$	$\Theta_{ВНср}$	$\Theta_{ННmax}$
Активная часть без оболочки КТП	при 1000	61	72,9	116	–	–	–
	при 1250	–	–	–	73,5	85	158
Активная часть в оболочке КТП	при 1000	142,4	149	199,4	–	–	–
	при 1250	–	–	–	149	156	218

Примечание. * – расчетные значения по ДСТУ 3645-97 (ГОСТ 3484.2-98, МЭК 76-2-93)

Для интенсификации охлаждения трансформаторов мощностью 1000 и 1250 кВ·А применена система охлаждения с трубами [10], вертикально установленными с боковых сторон оболочки в плоскостях, параллельных ее продольной оси. Анализ показал, что среднее превышение температуры обмоток ВН практически равно предельному значению 150°C, а максимальная температура обмотки НН превышает нормируемую по ГОСТ 8865-93. Заметим, что в повторно-кратковременном режиме работы при ПВ = 60 % превышение температуры КТПВ-1000/6 составляет: $\Theta_{ВНср} = 112,6^\circ\text{C}$; $\Theta_{ННmax} = 154^\circ\text{C}$. Вышеизложенное указывает на необходимость совершенствования системы естественного охлаждения с трубами.

Выводы.

1. Анализ эффективности различных систем охлаждения, сравнение их конструкции и надежности показывает, что принудительное воздушное охлаждение является перспективным направлением нормализации теплового режима взрывозащищенных трансформаторов и КТП повышенной мощности.

2. Исследования нагрева и охлаждения, проведенные на ряде экспериментальных образцов сухих трансформаторов различной мощности, показывают, что применение системы с горизонтальными трубами и внутреннего перемешивания воздуха позволяет увеличить мощность трансформатора в прежних габаритных размерах и при неизменном расходе активных материалов в 1,6 раза, т.е. на две ступени по шкале мощности ГОСТ 15542-79.

3. Мощность нагнетательных элементов системы – 2,3 кВт, что составляет 0,23% от номинальной (расчетной) мощности ТСВ 1000 кВ·А.

4. Применение принудительной системы воздушного охлаждения подстанции ТСВПД-400/6 позволило:

- снизить максимальное превышение температуры обмотки по сравнению с естественным воздушным охлаждением на 15...20°C;

- достигнуть соответствия фактической тепловой мощности изделия расчетной мощности 400 кВ·А;

- снизить расход активных и конструкционных материалов (масса по сравнению с ТСВПД-400/6 снижена на 900 кг).

5. Разработана высокоэффективная испарительно-конденсационная система охлаждения с применением ТТ, позволившая повысить эффективность охлаждения сухих трансформаторов, в результате чего:

- снижается максимальная температура элементов активной части;

- уменьшаются температурные перепады $\Delta\Theta_{обм}$;

- снижается как среднее превышение температуры обмоток, так и разность между $\Theta_{ННmax}$ и $\Theta_{ННср}$.

6. Совершенствование системы охлаждения трансформаторов с вертикальными трубами требует дополнительного исследования тепловых параметров охлаждающего агента в конструкции оболочки (W, q, α) для последующей ее оптимизации (определение оптимального диаметра труб и их количества).

7. При выборе системы охлаждения необходимо наряду с эффективностью учитывать и возможность ее реализации в конструкции ТСВ, а также параметры надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоснабжение высокопроизводительных угледобывающих комплексов / И.Я. Чернов, Л.Б. Ландкоф, В.В. Шилов // Уголь Украины. - 2002. - №9. - С.21-23.
2. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов / А.М. Голунов, Н.С. Сещенко. - М.: Энергия, 1984.-215 с.
3. Интенсификация охлаждения взрывобезопасных трансформаторов на основе применения тепловых труб / Михайленко Э.П., Стельмах Е. В., Баранецкий Н.В. и др. // Трансформаторы, комплектные подстанции, реакторы. Обзор информ. Сер.03. - 1988. - Вып. 1.(4).
4. Взрывобезопасный трансформатор: а.с. 684623 (СССР), МКИ Н 01F 27/08 / А.А.Гусев, Э.П. Михайленко, А.И.Плетнев и др. (СССР). - №2542701/24-07; заявл.14.11.77; опубл. 05.09.79, Бюл.№ 33.
5. Устройство для отвода тепла: а.с. 714521 (СССР), МКИ Н 01F 27/18; Н 01F 27/22 / А.И. Кубрак, А.И. Плетнев, Н.П. Степанищев, В.Н.Колчак и др. (СССР). - №2158847/24-07; Заявл.23.07.75; Опубл. 05.02.80, Бюл. № 5.
6. Сухой трансформатор: а.с. 760207 (СССР), МКИ Н 01F 27/18 / А.А.Гусев, А.И.Кубрак, Э.П.Михайленко, А.И.Плетнев, Е.В.Стельмах, Е.А.Сорока и др. (СССР). - №2611231/2407; заявл. 03.05.78; опубл. 30.08.80, Бюл. № 32.
7. Взрывобезопасный трансформатор: а.с. 920862 (СССР), МКИ Н 01F 27/08 / Н.В.Баранецкий, И.А.Горбань, А.А.Гусев, Э.П.Михайленко, А.И.Плетнев, Е.В.Стельмах, Е.А.Сорока (СССР). - №2933396/24-07; заявл. 30.05.80; опубл. 15.04.82, Бюл.№ 14.
8. Сорока Е.А. Совершенствование оболочки рудничных взрывозащищенных трансформаторов и трансформаторных подстанций мощностью 400 и 630А кВ / Е.А. Сорока // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб.науч.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 1998. – С.147-160.
9. Исследование и сравнительный анализ стационарного температурного поля оболочек трансформаторных подстанций типа КТПВ мощностью 1000 и 1250 кВА / Сорока Е.А., Золотарев Е.В., Калач Е.Н., Локтионов Г.Л. // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб.науч.тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2005. - С.59-68.
10. Взрывонепроницаемая оболочка для рудничных сухих трансформаторов: а.с. 1403114 (СССР), МКИ Н 01F 27/08 / А.И.Плетнев, М.А.Нагорный, В.М.Грушко, В.Н.Колчак и др. (СССР). - №4000178/24-07; заявл.02.01.86; опубл. 15.06.88; Бюл. № 22.

Надійшла до редколегії 20.12.2010

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

Є.А. СОРОКА, Ю.М. ПАПАЗОВ

Український науково-дослідний, проектно-конструкторський і технологічний інститут вибухозахищеного і рудничного електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом

Удосконалювання системи охолодження вибухозахищених трансформаторів на стадії НДР і серійного виробництва. Надана оцінка ефективності різних систем охолодження, проведено порівняння їх конструкції та надійності з ціллю нормалізації теплового режиму вибухозахищених сухих трансформаторів (ТСВ) пересувних комплектних підстанцій для живлення електроприймачів вугільних шахт.

E. SOROKA, Y. PAPAZOV

Ukrainian Scientific-Research Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment with Experimental Production

Improvement of the Explosion-Proof Transformers Cooling System at the stage of Research Scientific Work and Serial Manufacturing. Estimation of different cooling systems efficiency, comparison of their construction and reliability with the purpose of normalization of the thermal mode of the explosion-proof dry transformers (TDE) of the mobile completed substations to supply collectors of the coal mines are considered.