

## Системы утилизации тепла трансформаторов и автотрансформаторов 220–750 кВ

Автор: В.Э. Воротницкий, д.т.н.,  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

### 1. Актуальность

На страницах отечественной и зарубежной печати уже 30 лет активно обсуждается опыт разработки и внедрения различных вариантов систем утилизации тепла нагрева силовых трансформаторов и автотрансформаторов (далее СУТТ) для теплоснабжения зданий и сооружений и горячего водоснабжения на подстанциях и вблизи них. При этом, как показала практика, обеспечивается экономия электроэнергии на собственные нужды подстанций за счет отключения в резерв традиционной системы электроотопления помещений, а также части вентиляторов воздушного охлаждения трансформаторов. Одновременно снижается шум вентиляторов охладителей, выбросы тепла нагрева в атмосферу, что благоприятно сказывается на экологической обстановке в районе расположения подстанции.

К середине 1980-х гг. в ряде стран (Германии, США, Швеции, Франции, Италии и др.) нашли практическое применение и доказали при определенных условиях свою технико-экономическую эффективность СУТТ различных конструкций [1–2]. В те же годы по инициативе Минэнерго СССР были проведены работы по: обзору зарубежного опыта разработки и внедрения СУТТ; определению областей применения вариантов СУТТ в электрических сетях; уточнению шкалы номинальных мощностей; анализу технических решений и их сравнительной эффективности; разработке методов выбора и обоснования рациональных схем СУТТ. Основные результаты этих работ, выполненных специалистами ВНИИЭ, Запорожского трансформаторного завода и Белэнергопроект, были изложены в работе [3].

К сожалению, в годы перестройки и реформирования электроэнергетики России финансирование начатых работ было прекращено. В то же время они продолжались в Литве [4], Украине [5] и особенно активно в Республике Беларусь [6]. В частности, за 2000–2013 гг. в Беларуси были установлены и эффективно работают СУТТ на 15 подстанциях 220–330 кВ. Более того, по результатам этого внедрения в стандарт Белэнерго «Нормы технологического проектирования электрической части подстанций...» [7]

включена рекомендация применять на подстанциях 330–750 кВ Беларуси «отбор тепла трансформаторов (автотрансформаторов) при наличии технико-экономического обоснования».

После ввода в действие Федерального Закона РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ [8], ряда постановлений Правительства РФ и нормативных документов ОАО «ФСК ЕЭС» об энергосбережении и повышении энергетической эффективности значительно активизировалась работа в этом направлении в ЕНЭС. По результатам обследования электрических сетей ОАО «ФСК ЕЭС» разработаны программы мероприятий по энергосбережению и повышению эффективности в магистральных электрических сетях 220–750 кВ. Особое внимание в этих программах уделено снижению расхода электроэнергии на собственные нужды, в первую очередь на отопление зданий и сооружений подстанций и охлаждение силовых трансформаторов и автотрансформаторов 220–750 кВ. С целью разработки типовых схем и конструкций систем утилизации тепла трансформаторов и автотрансформаторов было принято решение внедрить в 2012–2013 гг. опытно-промышленную СУТТ на подстанции 500 кВ «Нижегородская» [9–10]. По результатам этого внедрения в декабре 2013 г. в «Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе» [11] в раздел «Проектные и строительные решения при новом строительстве, техническом перевооружении, реконструкции ПС» включены следующие рекомендации:

«на ПС с закрытыми РУ 110–500 кВ рекомендуется предусматривать использование тепла АТ/Т для обогрева помещений, также допускается использовать тепло АТ/Т для обогрева прилегающих к территории ПС зданий городской (поселковой) застройки;

возможно применение системы утилизации тепла силовых трансформаторов для отопления зданий и сооружений подстанций в целях снижения электропотребления на собственные нужды».

Включение упомянутых рекомендаций в единую техническую политику ОАО «Россети», с одной стороны, создает основу для широкого применения СУТТ в практической реализации энергосберегающих мероприятий на подстанциях электросетевого комплекса, с другой – предъявляет повышенные требования к технико-экономической обоснованности схем и конструкций утилизации тепла и эффективности систем управления ими и охлаждением трансформаторов и автотрансформаторов.

Цель настоящей статьи – рассмотреть с учётом современного зарубежного и отечественного опыта основные требования к СУТТ, варианты их исполнения и области применения, перспективы развития в

части применения интеллектуальных систем управления отбором тепла силовых трансформаторов, отоплением зданий и сооружений на подстанциях, системами охлаждения трансформаторов, контроля его нагрузочной способности и температурных режимов.

## 2. Потенциал энергосбережения

Из структуры технологических потерь электроэнергии в ЕНЭС за 2010–2012 гг. (табл. 1) [12] следует, что расход электроэнергии на собственные нужды подстанций ОАО «ФСК ЕЭС» составляет около 1 млрд кВт·ч в год, или 4,6–4,7% от суммарных технологических потерь электроэнергии.

Таблица 1

Структура технологических потерь электроэнергии в ЕНЭС за 2010–2012 гг. [12]

Структурные составляющие потерь	Численное значение потерь, млн кВт·ч по годам		
	2010	2011	2012
Переменные (нагрузочные) потери	13 227,72	13 276,96	12 368,01
Потери на корону в воздушных линиях	5371,92	5477,20	5688,90
Холостой ход трансформаторов	1700,37	1623,75	1734,26
Расход на собственные нужды	1051,29	1039,64	1004,75
Потери в компенсирующих устройствах	296,48	265,98	201,51
Потери в шунтирующих реакторах	516,25	506,66	553,23
Прочие условно-постоянные потери	361,55	360,95	395,15
<b>Всего потери электроэнергии</b>	<b>22 525,62</b>	<b>22 553,17</b>	<b>21 945,81</b>

Из анализа структуры расходов на собственные нужды подстанций следует, что 65–70% от суммарного расхода (650–700 млн кВт·ч в год) может составлять расход электроэнергии на отопление зданий управления подстанциями, работу вентиляторов и насосов циркуляции масла систем охлаждения трансформаторов. Экономия даже 20% от этого расхода равна 130–140 млн кВт·ч в год, что является важной составляющей резерва снижения технологического расхода (потерь) электроэнергии на её передачу по электрическим сетям.

Тепло нагрева силовых трансформаторов и автотрансформаторов выделяется в них в виде постоянных потерь (холостого хода) и переменных (нагрузочных) потерь. Из табл. 1 видно, что потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах ЕНЭС в период 2010–2012 гг. составляли от 1700 до 1734 млн кВт·ч в год. Переменные потери за тот же период находились в диапазоне 1100–1300 млн кВт·ч в год. В сумме годовые потери электроэнергии в силовых трансформаторах и автотрансформаторах

составляют 2800–3000 млн кВт·ч, или 12,4–13,5% от суммарных потерь электроэнергии в ЕНЭС.

В то же время не всю энергию нагрева трансформаторов можно утилизировать [13], так как часть её поступает в окружающую среду вследствие теплопроводности, излучения и конвекции конструктивных элементов трансформатора и систем охлаждения.

Очевидно при этом, что количество тепла, теряемого трансформатором, зависит от множества факторов: площади поверхности охлаждения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра, солнечной радиации и т.п. С учётом этих факторов может теряться тепло, по мощности эквивалентное потерям холостого хода в нём. Тогда ориентировочно можно считать, что потенциальное количество тепловой энергии для целей отопления на подстанциях 220–750 кВ соответствует в среднем переменным (нагрузочным) потерям электроэнергии в трансформаторах, которые находятся в квадратичной зависимости от их загрузки. Но даже в этом случае из сравнения общего расхода электроэнергии на обогрев зданий и сооружений на подстанциях ЕНЭС (до 250 млн кВт·ч в год) и переменных потерь в трансформаторах (1100–1300 млн кВт·ч в год) следует, что последних более чем в 4 раза больше, чем потребность в обогреве помещений на подстанциях.

Это подтверждают имеющиеся данные [2–3] о том, что потенциального тепла в трансформаторах с их загрузкой более 40% (без старения изоляции самих трансформаторов) вполне достаточно не только для отопления зданий и сооружений на территории подстанций, но и теплоснабжения зданий для размещения персонала и ремонтных баз.

Приведенные цифры потенциала энергосбережения носят ориентировочный характер и требуют уточнения при конкретном технико-экономическом обосновании проектирования СУТТ.

### **3. Общие требования к системам утилизации тепла**

Очевидно, что утилизация тепла нагрева силового трансформатора всегда будет иметь сопутствующее значение по отношению к его основной функции. В странах, где СУТТ нашли практическое применение, к их конструкциям и системам управления предъявляются следующие основные требования:

- 1) обеспечение нормативной надежности эксплуатации трансформатора с подключением к нему СУТТ, безусловное исключение возможности проникновения воды или другой жидкости, используемой в

- теплообменнике, в трансформаторное масло, обеспечение требований ПУЭ и ПТЭ к трансформаторам;
- 2) обеспечение независимости срока службы трансформатора от подключения к нему СУТТ;
  - 3) обеспечение в отопительный период допустимой температуры в отапливаемых помещениях не менее  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$  при наличии в помещениях обслуживающего персонала и не менее  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в помещениях без обслуживающего персонала;
  - 4) обеспечение автоматического переключения при неполадках в СУТТ на штатное охлаждение трансформатора без нарушения его эксплуатационного режима;
  - 5) обеспечение резервного или дополнительного отопления помещений (автоматическое включение штатных обогревателей на подстанции) при выходе из строя или ремонте СУТТ, а также при недостатке отбираемого тепла в связи с низкой температурой окружающего воздуха или загрузкой трансформатора;
  - 6) унификация (типизация) конструкций СУТТ и их элементов для подключения ко всем типам трансформаторов, обеспечение возможности различного расположения СУТТ относительно трансформатора;
  - 7) обеспечение монтажа СУТТ из стандартных конструктивных элементов и узлов, оправдавших себя при производстве и эксплуатации;
  - 8) компактность и простота сборки модулей СУТТ, объединение всех функций управления, контроля, блокировки и сигнализации в одной установке, легкость, простота и доступность обслуживания СУТТ;
  - 9) обеспечение электрической изоляции систем отопления и горячего водоснабжения от трансформатора при замыкании его обмоток на корпус;
  - 10) внедрение СУТТ должно быть технико-экономически обоснованно.

#### **4. Схема прямого отбора тепла нагрева через водомасляный теплообменник**

В зависимости от номинального напряжения, мощности, места расположения на подстанции, системы охлаждения и загрузки силовых трансформаторов и автотрансформаторов, температуры масла в них, объёма здания управления подстанцией и климатического района могут применяться различные схемы утилизации тепла [2–6, 9, 10]. Эти схемы, их параметры и режимы работы определяются технико-экономическими расчётами.

#### **4.1. Схема прямого отбора тепла нагрева через водомасляный теплообменник**

Одни из первых стандартных установок отбора тепла трансформаторов модульного типа на различные мощности появились в конце 1980-х гг. в Восточной Германии и некоторых других странах. Эти СУТТ работали по принципу прямого отбора тепла нагрева масла трансформатора через водомасляные теплообменники трубчатого типа с избыточным давлением масла над водой для предотвращения попадания воды в масло трансформатора. Такая схема отбора требует искусственного поддержания в трансформаторе повышенной, но допустимой температуры масла. При этом загрузка трансформатора должна быть достаточно высокой – не менее 50–80%. На **рис. 1** приведен общий вид модуля отбора теплоты трансформатора *TVW* (нем. *Transformatoren Verlust Wärme*), разработанного в Германии [13].

На **рис. 2** представлена схема утилизации теплоты трансформатора с помощью водомасляного теплообменника.

Модуль *TVW* состоит из теплообменника «масло–вода», масляного циркуляционного насоса, соединительных трубопроводов и системы управления. Нагретая в теплообменнике вода подается потребителю по теплоизолированным трубопроводам. При температуре наружного воздуха от +5 до –10 °С практически достижимые температуры воды на выходе из теплообменника находятся в диапазоне 45–55 °С. Температура в помещении при этом поддерживается на уровне 16–22 °С. При наружной температуре ниже –10 °С в условиях климата Восточной Германии требуется включение резервного электродогревателя. В случае остановки насосов, неисправностей с понижением давления масла ниже заданной величины, нештатных ситуаций в системе охлаждения срабатывает автоматическая защита трансформатора. Учитывая положительный опыт эксплуатации первых опытно-промышленных образцов модулей *TVW*, уже в 1987 г. в Германии было налажено их серийное производство [13].

#### **4.2. Схема отбора тепла нагрева с использованием теплового насоса**

При загрузке силовых трансформаторов и автотрансформаторов 220–500 кВ на 40–50% и ниже температура масла в трансформаторе в зимний отопительный период не превышает 20–30 °С. Прямого отбора тепла

через водомасляный теплообменник при этом уже недостаточно и применяется схема утилизации тепла с применением теплового насоса. Температура на выходе теплового насоса зависит от его энергетической эффективности, оцениваемой с помощью коэффициента преобразования, который может находиться в пределах от 2 до 6 в зависимости от теплопроизводительности теплового насоса и мощности его компрессора.

Для отбора тепла силового трансформатора в этих условиях используется трёхконтурная схема (рис. 3). В первом контуре циркулирует масло между силовым трансформатором и современным пластинчатым теплообменником, который располагается поблизости от трансформатора. При этом забор масла в теплообменник от трансформатора с навесными маслоохладителями осуществляется вверху бака трансформатора от патрубка для заливки и фильтрации масла, а возврат масла из теплообменника в трансформатор – через кран для спуска и фильтрации масла внизу бака.

При использовании выносных маслоохладителей теплообменник подключается параллельно маслоохладителю. В этом случае циркуляция масла осуществляется через теплообменник, а подача масла – через выносной маслоохладитель, перекрываемый задвижкой.

Во втором контуре может использоваться как вода, так и незамерзающая жидкость, например, этиленгликоль, для предотвращения повреждений теплообменника при низких наружных температурах (10–30 °С ниже нуля). Нагретая в теплообменнике жидкость с температурой 20–30 °С сетевым насосом доставляется в испаритель теплового насоса, где испаряется жидкий хладагент – озонобезопасный фреон. Пары испаряющегося хладагента сжимаются компрессором до высокого давления, их температура повышается и они поступают в конденсатор теплового насоса. Через конденсатор протекает теплоноситель третьего контура – вода системы отопления. В процессе конденсации хладагента выделяется тепловая энергия, нагревающая воду системы отопления до 40–60 °С, которая через выравнивающую ёмкость (гидравлический разделитель) сетевыми насосами доставляется в систему отопления здания.

Опыт внедрения СУТТ показывает, что:

- при температуре трансформаторного масла ниже 60 °С и нагрузке трансформатора менее 80% все вентиляторы обдува, как правило, могут быть отключены;
- во избежание недопустимых перегревов масла внутри трансформатора все насосы принудительной циркуляции масла системы ДЦ должны обязательно находиться в работе;

- штатные водонагревательные электродкотлы зданий подстанции должны находиться в резерве и подключаться параллельно системе СУТТ в пиковые минимальные температуры наружного воздуха, когда мощности теплового насоса не хватает;
- должен быть обеспечен мониторинг температурных режимов трансформатора, режимов работы второго и третьего контуров СУТТ и температуры в здании управления подстанций с сигнализацией выхода температуры за допустимые пределы;
- должна быть обеспечена автоматика включения–отключения вентиляторов системы охлаждения трансформаторов, СУТТ и штатных отопительных систем в зависимости от результатов мониторинга температурных режимов;
- схема СУТТ, параметры и режимы её работы в обязательном порядке должны быть согласованы с заводом-изготовителем трансформатора, от которого осуществляется отбор тепла.

Из рис. 3 видно, что при использовании во втором контуре воды в определенных условиях (при положительной температуре воздуха 3–5 °С и более и достаточно высокой загрузке трансформатора – более 50–60%) возможно отключение теплового насоса и получение тепла от водомасляного теплообменника. При использовании в этом контуре этиленгликоля снижается вероятность повреждения теплообменника, но возникают дополнительные проблемы шунтирования теплового насоса и параллельной работы штатных электродкотлов в третьем контуре.

По трёхконтурной схеме отбора тепла (см. рис. 3) в Гродненских электрических сетях Белэнерго в 2006 г. на ПС мощностью 330 кВ «Гродно» была введена в эксплуатацию СУТТ от автотрансформатора АТ2 для отопления двух зданий ОПУ. За пять лет эксплуатации в отопительный период с октября по март–апрель тепловой насос мощностью 42 кВт марки *GLIVET* (Италия) работал в среднем 50–65 дней. Годовая экономия электроэнергии на обогрев двух ОПУ составляет до 230 тыс. кВт·ч. Эксплуатационные расходы по обслуживанию СУТТ минимальны. Дежурный персонал активно поддерживает применение СУТТ на подстанции. Срок окупаемости внедрения СУТТ составляет 6,5 лет. В 2011 г. на ПС 330 кВ «Гродно» запущена дополнительная СУТТ от АТ3 для отопления зданий проходной и мастерской [6]. На рис. 4, 5 представлены фотографии автотрансформатора ПС 330 кВ «Гродно» с пластинчатым теплообменником в металлическом шкафу (слева от трансформатора) и теплового насоса, установленного в помещении электродкотельной ОПУ.



Трёхконтурная схема СУТТ принята в качестве основной для первого в России проекта утилизации тепла нагрева автотрансформаторов типа АОДЦТН-167000/500/220/10 (фаза А) на подстанции 500 кВ «Нижегородская». На подстанции на обогрев помещений и охлаждение автотрансформаторов расходуется около 71% электроэнергии от общего потребления электроэнергии на собственные нужды подстанции. Объектом теплоснабжения является здание с отапливаемой площадью 1560 м<sup>2</sup>. Существующая система отопления – водяная с чугунными радиаторами без регуляторов отопления. Источники тепла – два электрических электродных котла мощностью 160 и 250 кВт с автоматическим контролем температуры воды и ручным включением котлов в работу. Расчётная максимальная тепловая мощность, необходимая для обогрева здания – около 170 кВт, средняя за отопительный период потребляемая мощность на обогрев здания – 150 кВт. Температура трансформаторного масла в зимний период составляет 15–20 °С. Использование его тепловой энергии позволяет поддерживать температуру в системе отопления на уровне 50 °С, что обеспечивает комфортное отопление здания при температуре окружающего воздуха до –27 °С. В случае необходимости подключаются находящиеся в резерве электрические котлы системы отопления.

Полученные результаты работы системы показали её эффективность и необходимость дальнейшего развития. Так, расчётная годовая экономия составляет 16 тыс. кВт·ч, а срок окупаемости внедренной на подстанции «Нижегородская» СУТТ оценивается в 6–8 лет [9].

#### ***4.3. Схемы отбора тепла нагрева для систем воздушного отопления***

Такие схемы имеют некоторые преимущества перед водяным отоплением (простота обслуживания, отсутствие коррозии и т.п.). Наибольшее распространение эти схемы в трёх вариантах [3] получили в Польше в 1980-х гг.:

- 1) схема отбора нагретого воздуха от радиаторов и его подача в обогреваемое помещение (рис. 6);
- 2) схема с использованием теплообменника «масло–воздух» (рис. 7);
- 3) схема с использованием двух теплообменников «масло–вода» – «вода–воздух» (рис. 8).

Очевидно, что схемы отбора с воздушным отоплением могут применяться на подстанциях без обслуживающего персонала и там, где

трансформаторы расположены вблизи или внутри отапливаемых помещений (на закрытых ПС).

Из вышеизложенного следует, что системы утилизации тепла нагрева и охлаждения силовых трансформаторов теснейшим образом связаны между собой. Поэтому эффективности согласованного автоматического управления этими системами должно уделяться повышенное внимание, так как она непосредственно влияет на объём экономии электроэнергии, а также на надежность и долговечность работы трансформаторов.

### **Выводы**

1. Утилизация тепла нагрева силовых трансформаторов и автотрансформаторов для снижения расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций с 2013 г. является частью технической и энергосберегающей политики ОАО «Россети».
2. Даже части выделяемого тепла (40–50%) в силовых трансформаторах (автотрансформаторах) 220–750 кВ, как правило, достаточно для горячего водоснабжения и отопления зданий и сооружений на подстанциях и производственных базах.
3. Использование трансформатора в качестве источника тепла должно всегда иметь второстепенное значение и применяться при условии тщательного технико-экономического обоснования и принятия всех мер по приоритетному обеспечению надежности работы трансформатора для каждой конкретной подстанции. Срок окупаемости затрат на внедрение СУТТ, как правило, не превышает 6–8 лет.
4. Эффективность применения СУТТ, надежность её работы и трансформатора, как источника тепла, решающим образом зависит от надежности и эффективности системы управления отбором тепла трансформатора, системой отопления и горячего водоснабжения зданий и сооружений, системой охлаждения трансформатора и мониторинга его электрических и температурных режимов.
5. Для широкого внедрения СУТТ на подстанциях ЕНЭС необходимо разработать:
  - математические модели унифицированных расчётов тепловых режимов для проектирования различных схем утилизации тепла с применением и без применения тепловых насосов, отбором теплого воздуха и т.п. и с автоматизированным выбором параметров этих схем по заданным условиям;

- алгоритмы, программные и технические средства автоматического управления СУТТ, применимые в широком диапазоне климатических условий, режимов работы трансформаторов, схем и мощности отборов тепла;
- алгоритмы и программы расчёта технико-экономической эффективности внедрения СУТТ на подстанциях различного класса напряжения с учётом передового отечественного и зарубежного опыта.

## Литература

1. *Махлин Б.Ю.* Использование тепла потерь трансформатора для обогрева помещений. Информэнерго. Серия «Электрические сети и системы за рубежом». Вып. 6. М., 1983.
2. *Воротницкий В.Э., Скобелин Б.Н.* Использование тепла потерь силовых трансформаторов. Обзорная информация «Энергетика и электрификация». Серия «Монтаж и наладка электрооборудования на электростанциях и подстанциях». Вып. 1. М.: Инфорэнерго, 1987.
3. *Воротницкий В.Э., Люблин А.С.* Использование потерь силовых трансформаторов для экономии электроэнергии на подстанциях. М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 1995.
4. *Воротницкий В.Э., Стасюкина А.В., Щегольков Е.Е.* Использование теплоты нагрева трансформаторов для снижения расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций// Электрические станции. 1989. № 8.
5. *Гусар Ф.Г.* Шляхи вивотристання скидного тепла силових трансформаторів// Энергетика и электрификация. 1999. № 9. С. 38–40.
6. Отопление зданий теплом от трансформаторов. <http://www.energopro.by/news/22/>
7. Стандарт ГПО «Белэнерго» (СТП 09110.01.2.104-7) «Нормы технологического проектирования электрической части подстанций переменного тока напряжением 35–750 кВ», пункт 15.30.
8. Федеральный Закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической

эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

9. *Бородин К.* ФСК применила технологию утилизации тепла силовых трансформаторов. <http://energo-news.ru/archives/119176>
10. Презентация «Программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности электросетевых организаций Российской Федерации» FTS Russia. Слайд 6. Проект утилизации тепла силовых трансформаторов. [www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/11/11/-Mr.Egorov-Rus.pptx](http://www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/11/11/-Mr.Egorov-Rus.pptx).
11. «Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе» (утв. Советом директоров ОАО «Россети», протокол от 23.10.2013 № 138, введено в действие Советом директоров ОАО «ФСК ЕЭС», протокол от 27.12.2013 № 208).
12. *Бударгин О.М., Бердников Р.Н., Шимко М.Б., Перстнев П.А., Воротницкий В.Э.* Под общей редакцией О.М. Бударгина. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Единой национальной электрической сети. ООО ИПК «Платина». 2014.
13. *Schwarz H.-D., Bell G.* Transformatorenverlustwaerme (TVW) in 110 kV - Umspannwerken//Energietechnik. 1987. № 2. S. 68–72.