

Сопов Анатолий Игоревич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОЛЕЗНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ТЕПЛА СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АПК**

05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

Научный руководитель: к.т.н., доцент Виноградов А.В.

Актуальность

Электрические трансформаторы характеризуются высоким коэффициентом полезного действия величиной 97-99 %, и высокой надежностью, так как не содержат движущихся частей. Несмотря на это, в силовых трансформаторах большой мощности потери преобразуются в сотни киловатт тепловой энергии, которую можно полезно использовать, например, для теплоснабжения объектов сельского хозяйства (теплицы, овощехранилища, птицефабрики, животноводческие комплексы, рыбные бассейны).

Особенностью сельскохозяйственных объектов как потребителей тепловой энергии является их малая тепловая мощность (до 10 МВт) и значительная рассредоточенность. Здесь преимущественно используются местные системы теплоснабжения от котельных установок, работающих на газе, жидком или твердом топливе, электронагревательных установок. Работа перечисленных систем теплоснабжения требует значительных затрат на их эксплуатацию и, прежде всего, на энергоресурсы (топливо, электроэнергию).

Поэтому актуальной является задача разработки новых средств и способов полезного использования избыточного тепла силовых трансформаторов, обладающих высокой энергетической и экономической эффективностью, для внедрения в системах энергообеспечения АПК и на электрических подстанциях электросетевых организаций.

Степень разработанности темы

Использование тепла силовых трансформаторов для отопления производственных помещений подстанций с целью снижения расхода электроэнергии

Новиков Д.А., Тайбахтин Е.С.

Устройство для использования избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора

Тимонин Ю.Н., Горелов Ю.И.,
Степанов В.М.

Энергоэффективность способов утилизации отработанного тепла систем охлаждения силовых трансформаторов

Гридин С. В., Петренко А. Ф.

Система для использования тепла трансформатора

Цой А.Д., Копырин В.С.,
Сосновский О.Г.

Оценка возможности использования сбросного тепла силовых трансформаторов для отопления и горячего водоснабжения электрических подстанций

Байшев А.В., Торопов А.С.

Установка для использования избыточного тепла от силового трансформатора

Андерссон Кьелль

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка новых способов и средств полезного использования избыточного тепла силовых трансформаторов с усовершенствованием конструкции их системы охлаждения для обогрева расположенных поблизости объектов.

Задачи исследования:

- определить потенциальный объем тепловыделений силовых трансформаторов различной мощности и провести анализ возможностей использования их избыточного тепла в целях теплоснабжения;
- разработать новый способ использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов;
- разработать силовой трансформатор с системой отбора избыточного тепла;
- разработать технические средства для осуществления отбора и передачи тепла к объектам обогрева, сохранения и создания резерва тепловой энергии, методики их расчета;
- провести технико-экономическое обоснование эффективности внедрения нового способа использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов.

Научная новизна

Научная новизна заключается в:

- разработанном способе использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов;
- разработанном силовом трансформаторе с системой отбора избыточного тепла;
- разработанных технических средствах отбора избыточного тепла, его передачи к объекту обогрева, сохранения, создания резерва тепловой энергии;
- разработанных методиках расчета элементов системы использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов.

Основные положения, выносимые на защиту

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработанный способ использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов позволяет обеспечить полезное использование избыточного тепла силовых трансформаторов для нужд теплоснабжения объектов АПК;
- разработанная конструкция силового трансформатора с системой отбора избыточного тепла позволяет обеспечить более равномерное охлаждение активных элементов трансформатора, исключить дополнительные потери на нагрев бака трансформатора, улучшить отбор избыточного тепла для использования в целях теплоснабжения, снизить тепловые выбросы в окружающую среду;
- разработанные методики расчёта элементов системы использования избыточного тепла силовых трансформаторов позволяют выбирать рациональные параметры технических средств отбора избыточного тепла, его передачи к объекту обогрева, сохранения, создания резерва тепловой энергии.

Объем избыточного тепла

Мощность тепловыделений трансформатора определяется по формуле:

$$Q_0 = \Delta P_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + \Delta P_{\text{КЗ}} k_3^2$$

Таблица – Объём избыточного тепла силовых трансформаторов при средней нагрузке

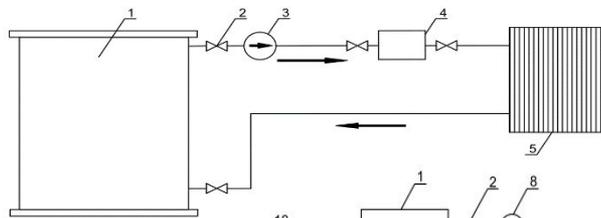
Тип трансформатора	Объем избыточного тепла при $k_3 = 0,7$, кВт	Тип трансформатора	Объем избыточного тепла при $k_3 = 0,5$, кВт	Тип трансформатора	Объем избыточного тепла при $k_3 = 0,5$, кВт
ТМГ-160/10/0.4	1,74	ТМН-4000/35	14	ТДЦ-80000/220	130
ТМГ-250/10/0.4	2,1	ТМН-6300/35	19,6	ТРДЦН-100000/220	187
ТМГ-400/10/0.4	3,5	ТДНС-10000/35	26	ТДЦ-125000/220	185
ТМГ-630/10/0.4	4,8	ТДНС-16000/35	35,8	ТРДЦН-160000/220	280
ТМГ-1000/10/0.4	6,6	ТРДН-25000/110	49	ТРДЦН-200000/220	257
ТМГ-1250/10/0.4	7,7	ТРДН-32000/110	65	ТДЦ-250000/330	365
ТМГ-1600/10/0.4	10,87	ТРДН-40000/110	64,5	ТДЦ-400000/500	511
ТМГ-2500/10/0.4	16,5	ТРДН-63000/110	96,3	ТНДЦ -630000/500	722

Таблица наглядно показывает, в качестве источника тепла для теплоснабжения помещений электрических подстанций, объектов АПК наиболее выгодно использовать трансформаторы мощностью от 25 МВА и более.

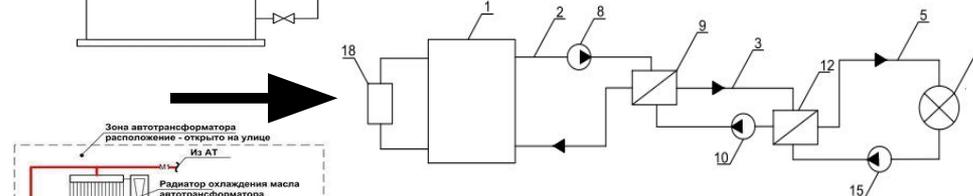
Разработка силового трансформатора с более эффективной системой отбора избыточного тепла и нового способа его использования в целях теплоснабжения позволит значительно снизить мощностную границу целесообразности применения систем обогрева от силовых трансформаторов и обеспечить надежность такого теплоснабжения даже с учетом того, что нагрузка подстанционных трансформаторов подвержена как сезонным, так и суточным изменениям.

Схемы отбора тепла от силового трансформатора:

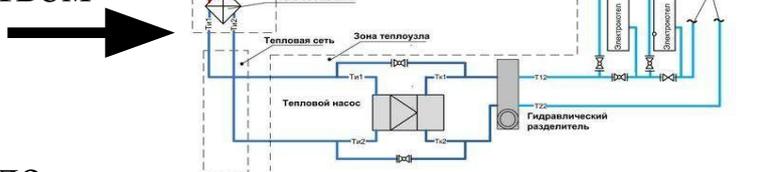
- с непосредственной подачей нагретого масла в систему отопления;



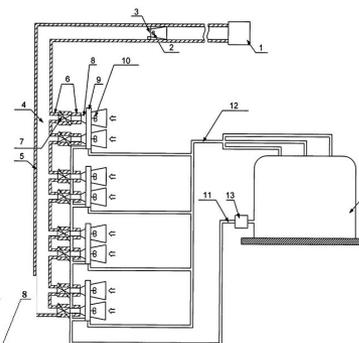
- с нагревом воды в масло-водяном теплообменнике;



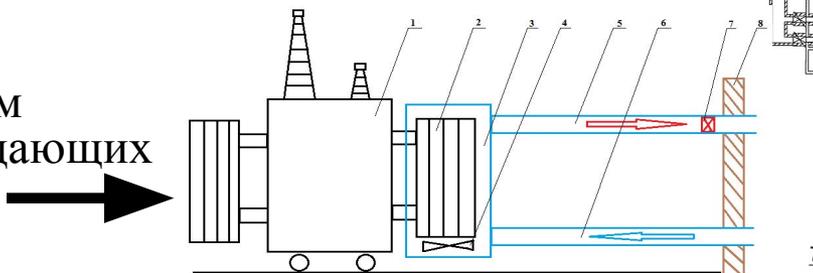
- с нагревом воды посредством теплового насоса;



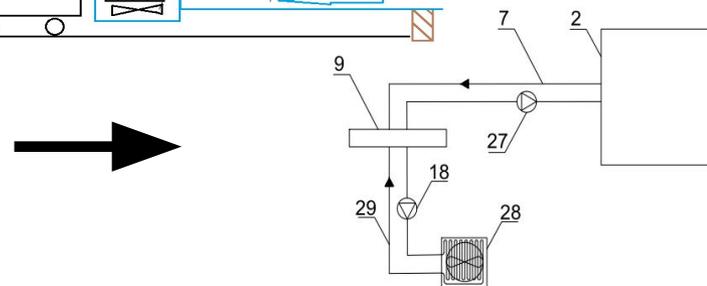
- с нагревом воздуха в масло-воздушном теплообменнике;



- с непосредственным отводом нагретого воздуха от охлаждающих радиаторов;



- с нагревом воздуха в водо-воздушном теплообменнике.



Направления улучшения теплопроводности внутри бака силового трансформатора:

1) изоляция обмоток с помощью полиэфирных, эпоксидных и других смол без растворителей (компаундов);

Таблица – Удельные теплопроводности изоляционных материалов

Материал	λ , Вт/(м·°С)
Бумага кабельная сухая	0,12
Бумага кабельная в масле	0,17
Бумага кабельная, пропитанная лаком	0,17
Электроизоляционный картон	0,17
Лакоткани электроизоляционные	0,25
Гетинакс	0,17-0,175
Текстолит	0,146-0,162
Стеклотекстолит	0,178-0,182
Лак бакелитовый и другие лаки	0,3
Компаунды	0,8-1,5
Масло при отсутствии конвекции:	0,1

Направления улучшения теплопроводности внутри бака силового трансформатора:

2) применение в качестве альтернативы трансформаторному маслу силиконовой жидкости Софексил ТСЖ;

Таблица – Сравнение тепловых характеристик диэлектрической жидкости Софексил ТСЖ и трансформаторного масла

Диэлектрическая жидкость	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Софексил ТСЖ	0,156	1,51
Трансформаторное масло	0,107	1,85

Способ снижения выброса тепла с поверхности бака силового трансформатора в окружающую среду

Изготовление бака из стеклопластика минимизирует потерю тепла с поверхности бака силового трансформатора в окружающую среду.

Таблица – Сравнительные характеристики конструкционных материалов.

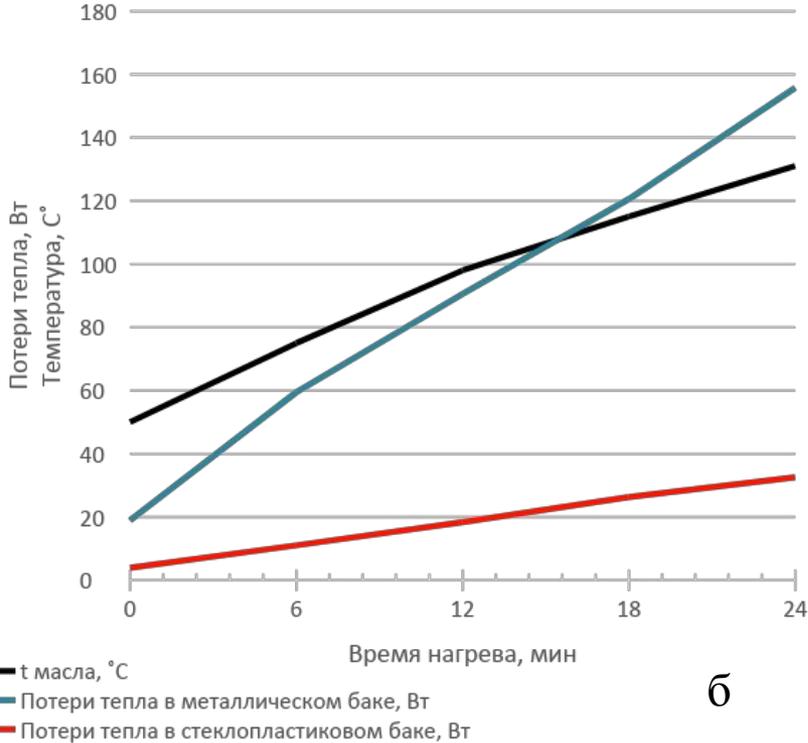
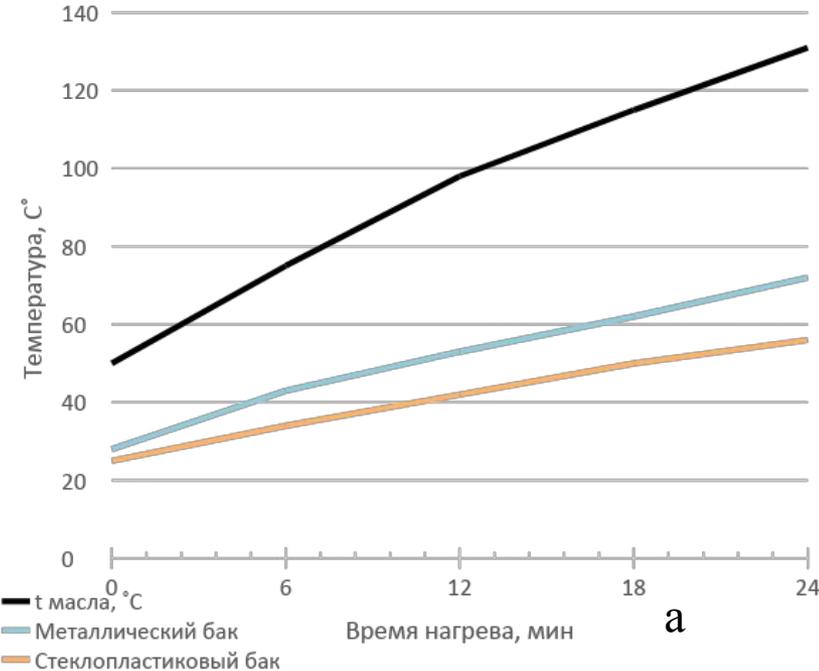
Показатель	Сталь	Алюминиевые сплавы	Стеклопластик
Плотность (кг/м ³)	7800	2640-2800	1800-1900
Модуль упругости, ГПа	210	70-71	55
Удельный модуль упругости, км	2692	2500-2689	2895-3056
Предел прочности (для металлов предел текучести) при растяжении, МПа	240	50-440	1700
Теплопроводность при 20 градусах цельсия, Вт/м·°С	64	105-200	0,75
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м	Проводник	Проводник	1,0·10¹⁰
Стойкость к воздействию химически агрессивных сред, солевых растворов	Не стоек. Требуется мероприятия по защите от коррозии	Подвержен электрохимической коррозии. Требуется специальные меры по защите.	Стойк

Для исследования теплотерь с поверхности стального бака трансформатора и стеклопластикового бака был проведен эксперимент.

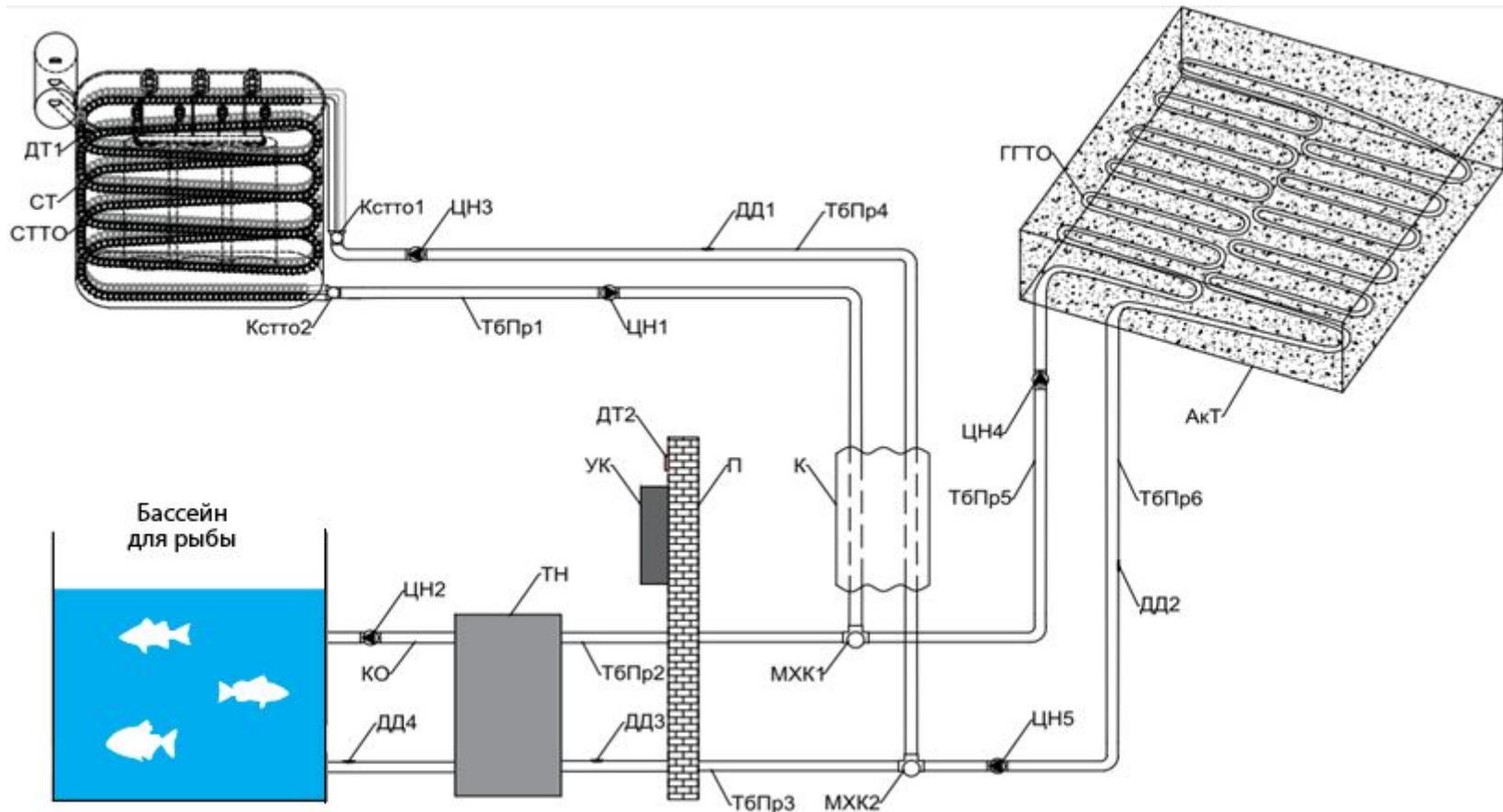
Эксперимент по исследованию теплотерь с поверхности стального бака трансформатора и стеклопластикового бака

В ходе эксперимента поочередно нагревали трансформаторное масло в металлическом и стеклопластиковом баках и определяли количество тепловых потерь с их поверхности, измеряя температуру масла внутри бака и температуру поверхности бака.

Результаты эксперимента по изучению тепловых потерь в металлическом и стеклопластиковом баках отражены на графиках: а – график температуры поверхностей, б – график потерь тепла.



Способ использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов



СТ – силовой трансформатор; СТТО – двухконтурный спиральный трубчатый теплообменник; Кстто1 – клапан переключения контуров на входе в СТТО; Кстто2 – клапан переключения контуров на выходе из СТТО; ТбПр – трубопровод; ЦН – циркуляционный насос; МХК1 – многоходовой клапан отводящего контура; ТН – тепловой насос типа «вода-вода»; П - помещение; КО – контур отопления; МХК2 – многоходовой клапан подводящего контура; ГГТО – горизонтальный грунтовый теплообменник; АкТ – аккумулятор тепла; УК – управляющий комплекс; ДТ – датчик температуры; ДД – датчик давления; К – канал размещения ТбПр и ЦН

Выбор элементов системы отбора тепла силового трансформатора

1) Наиболее эффективный отбор тепла от диэлектрической жидкости силового трансформатора обеспечит размещение внутри него двухконтурного спирального медного теплообменника с трубками двойного профиля.

2) В качестве резервного источника теплоснабжения выбран грунтовый аккумулятор тепла в виде теплоизолированного объема смеси гранитного щебня и мелкого речного песка, который будет накапливать тепло в теплые периоды года и при избытке тепловой энергии в системе.

3) В качестве теплового насоса для поддержания нужной температуры в контуре отопления потребителя в разрабатываемой системе используем парокомпрессионный ТН типа «вода-вода».

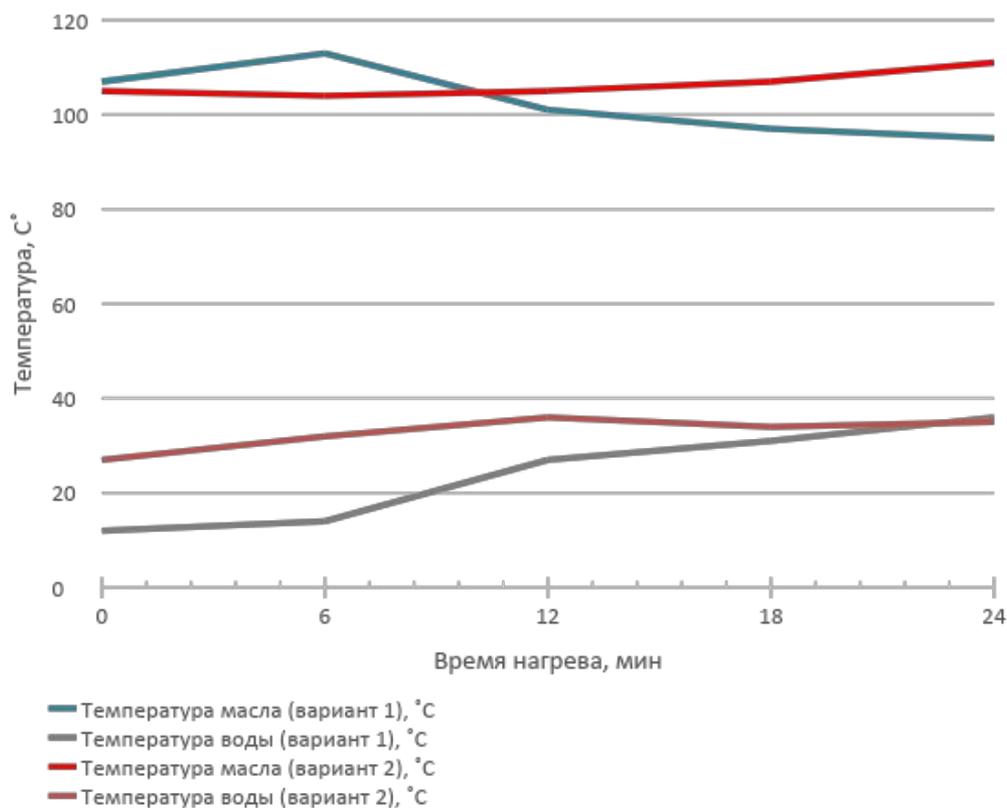
4) Для грунтового аккумулятора тепла выбран горизонтальный грунтовый теплообменник из нержавеющей труб с диффузорно-конфузорными участками для усиления теплообмена.

Для исследования лучшего способа осуществления теплообмена с диэлектрической жидкостью силового трансформатора также был проведен эксперимент.

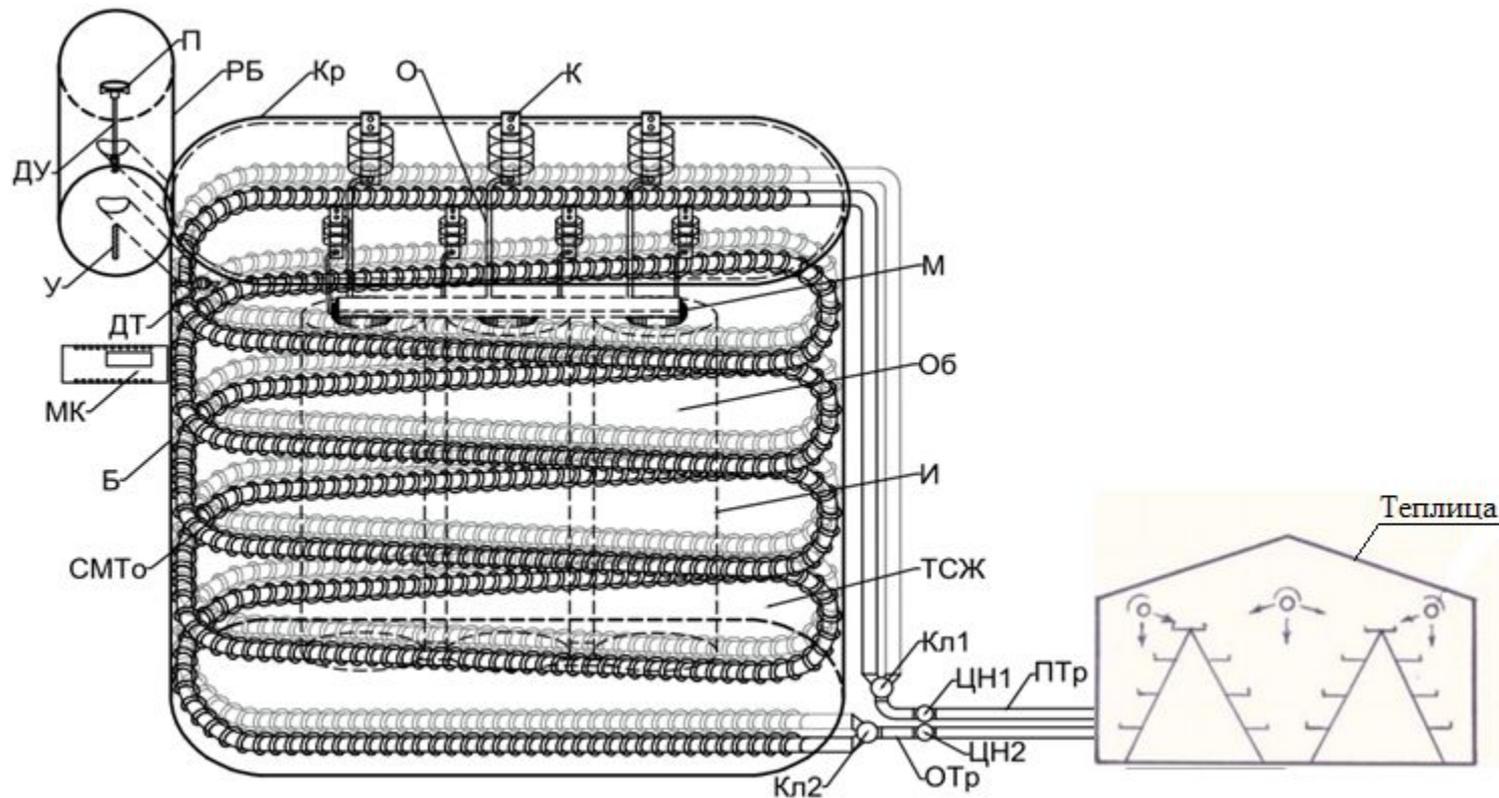
Эксперимент по исследованию лучшего способа отбора тепла

Сутью второго эксперимента является сравнение эффективности двух типов охлаждения масла в баке трансформатора: теплообменник в баке с нагретым маслом, теплоноситель – вода; теплообменник в баке с водой, теплоноситель – нагретое масло.

Результаты эксперимента по изучению теплообмена в трансформаторе в зависимости от размещения теплообменника отражены на графике.



Силовой трансформатор с системой отбора избыточного тепла



Б – бак стеклопластиковый; Кр – крышка бака, РБ – расширительный бак; П – пробка заливная; К – контакты присоединения проводов и шин; У – указатель уровня диэлектрической жидкости; ДТ – датчик температуры диэлектрической жидкости; ДУ – датчик уровня диэлектрической жидкости; СМТо – спиральный медный двухконтурный теплообменник с трубками двойного профиля; Кл1 – клапан включения основного и резервного контуров на входе спирального теплообменника; Кл2 – клапан включения основного и резервного контуров на выходе спирального теплообменника; ОTr – труба, отводящая нагретый промежуточный теплоноситель; ПTr – труба, подводящая охлажденный промежуточный теплоноситель; ЦН – циркуляционный насос; ТСЖ – трансформаторная силиконовая диэлектрическая жидкость Софекисл ТСЖ; М – магнитопровод; Об – обмотки; И – изоляция из эпоксидной или полиэфирной смолы; О – отводы; МК – микроконтроллер.

Методика расчета элементов системы полезного использования избыточного тепла силовых трансформаторов

- 1) Определение мощности потребления тепла на отопление:

$$Q = \frac{k \cdot V \cdot \Delta t}{860}$$

где: Q – потребляемая мощность помещения, кВт; k – средний коэффициент потерь тепла зданием; V – суммарный объем всего отапливаемого помещения, м³; Δt – максимальный перепад температуры между улицей и внутри помещения, °С.

- 2) Определение объема избыточного тепла трансформатора при средней загрузке :

$$Q_0 = \Delta P_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot k_3^2$$

где Q_0 – тепловой поток, отдаваемый поверхностью бака воздуху, Вт; $\sum P_{\text{ТР}}$ – суммарные потери мощности в трансформаторе, Вт; $\sum P_{\text{ХХ}}$ и $\sum P_{\text{КЗ}}$ – потери мощности холостого хода и короткого замыкания, Вт; k_3 – коэффициент загрузки.

- 3) Определение необходимой поверхность нагрева теплообменника:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{1\text{cp}}}$$

где Q – потери мощности в трансформаторе, Вт; $\Delta t_{1\text{cp}}$ – средняя разность температур, °С; K – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r + \frac{1}{\alpha_2}}$$

- 4) Выбор теплового насоса тепловой мощностью не менее мощности потребления тепла объектом.

Методика расчета элементов системы полезного использования избыточного тепла силовых трансформаторов

1) Определение мощности потребления тепла на отопление:

$$Q = \frac{k \cdot V \cdot \Delta t}{860}$$

где: Q – потребляемая мощность помещения, кВт; k – средний коэффициент потерь тепла зданием; V – суммарный объем всего отапливаемого помещения, м³; Δt – максимальный перепад температуры между улицей и внутри помещения, °С.

2) Определение объема избыточного тепла трансформатора при средней загрузке :

$$Q_0 = \Delta P_{\text{ТР}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot k_3^2$$

где Q_0 – тепловой поток, отдаваемый поверхностью бака воздуху, Вт; $\sum P_{\text{ТР}}$ – суммарные потери мощности в трансформаторе, Вт; $\sum P_{\text{ХХ}}$ и $\sum P_{\text{КЗ}}$ – потери мощности холостого хода и короткого замыкания, Вт; k_3 – коэффициент загрузки.

3) Определение необходимой поверхность нагрева теплообменника:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{1\text{cp}}}$$

где Q – потери мощности в трансформаторе, Вт; $\Delta t_{1\text{cp}}$ – средняя разность температур, °С; K – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r + \frac{1}{\alpha_2}}$$

4) Выбор теплового насоса тепловой мощностью не менее мощности потребления тепла объектом.

Инвестиционная привлекательность внедрения разработанной системы

Разработанный силовой трансформатор с системой отбора избыточного тепла даёт возможность максимально снизить вред от перегрева активных элементов трансформатора, эффективно охлаждая его независимо от колебаний наружной температуры, и тем самым продлить его реальный срок службы. Кроме того, для электросетевых организации уменьшение затрат достигается за счёт экономии электроэнергии, затрачиваемой на обеспечение собственных нужд подстанций (работу вентиляторов охлаждения силовых трансформаторов, обогрев помещений), а для предприятий АПК – за счёт экономии ресурсов автономных систем отопления.

Таблица – Экономическая эффективность внедрения силового трансформатора мощностью 1600 кВА с системой отбора и использования избыточного тепла для обогрева рыбного бассейна объёмом 10 м³

Показатели	С использованием Софексил ТСЖ	С использованием трансформаторного масла
Капитальные вложения, руб.	725487	448925
Суммарная стоимость изделий, руб.	580390	359140
Эксплуатационные издержки, руб.	132610	109380
Годовая экономия, руб.	131552	154782
Срок окупаемости, г.	5,5	2,9
Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений	0,18	0,35

Основные отличия предлагаемой системы от уже имеющихся разработок

Разработчик	Способ отбора тепла от СТ	Тип промежуточного теплоносителя	Наличие теплового насоса	Тип резервного источника тепла	Наличие аккумуляции тепла	Степень изменения конструкции бака СТ	Наличие автоматизированной системы управления
Сопов А.И.	двухконтурным спиральным медным теплообменником «масло-вода», размещенным в баке трансформатора	40% раствор этилового спирта с водой	да	Грунтовый аккумулятор тепла (смесь мелкого речного песка и гранитного щебня)	да	Полностью новый стеклопластиковый бак, заполненный диэлектрической жидкостью Софексил ТСЖ	да
Андерсон Къеель	пластинчатым теплообменником «масло-вода» наружной установки	смесь спирта с водой	да	Естественный аккумулятор тепла (скальный грунт, земля или вода)	да	Отсутствуют охлаждающие радиаторы, заполнен маслом	нет
Новиков Дмитрий	Сбор нагретого воздуха от радиаторов с помощью установленного на них кожуха	воздух	нет	Электронагреватели или центральное отопление	нет	На радиаторы установлен кожух, заполнен маслом	да
Лаврентьев С. В.	Наружным теплообменником «масло-вода»	вода	да	Отопительный котёл	нет	Отсутствуют охлаждающие радиаторы, заполнен маслом	да
Степанов В. М.	Наружными теплообменниками «масло-воздух»	воздух	нет	Электронагреватели или центральное отопление	нет	Отсутствуют охлаждающие радиаторы, заполнен маслом	да
Цой А.Д.	Наружным теплообменником «масло-вода»	Водный раствор этиленгликоля	да	Электронагреватели или центральное отопление	нет	Отсутствуют охлаждающие радиаторы, заполнен маслом	да

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. Анализ потенциального объема тепловыделений силовых трансформаторов различной мощности и возможностей использования их избыточного тепла в целях теплоснабжения показал, что силовые трансформаторы мощностью от 25000 кВА и более выделяют достаточное количество тепла для отопления помещений электрических подстанций, объектов АПК. Для снижения мощностной границы целесообразности применения систем обогрева от силовых трансформаторов необходима разработка более эффективного способа использования их тепла.
2. Разработан способ использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов, который способствует: снижению расходов организаций на обогрев помещений и других объектов, сокращению эксплуатационных затрат на обслуживание системы охлаждения силового трансформатора за счёт избавления от вентиляторов обдува, повышению надежности силового трансформатора и увеличению его срока службы за счёт улучшенного охлаждения активных элементов трансформатора в течение всего периода работы.
3. Разработан силовой трансформатор с системой отбора избыточного тепла, который за счёт изоляции обмотки с помощью полиэфирных, эпоксидных и других смол без растворителей (компаундов), использования вместо трансформаторного масла силиконовой диэлектрической жидкости Софексил ТСЖ, внедрения стеклопластикового бака трансформатора обеспечивает комфортный тепловой режим активных элементов трансформатора, а также позволяет максимально отбирать его избыточное тепло для обогрева расположенных вблизи объектов.

4. Разработанные технические средства использования тепла трансформаторов, такие как размещенный внутри бака двухконтурный спиральный трубчатый медный теплообменник с трубками двойного профиля, грунтовый аккумулятор тепла в виде теплоизолированного объема смеси гранитного щебня марки М1100 и мелкого речного песка в соотношении 2,6/1, парокompрессионный тепловой насос типа «вода-вода», горизонтальный трубчатый грунтовый теплообменник с диффузорно-конфузорными участками, которые обеспечивают максимальный отбор и передачу тепла к объектам обогрева, сохранение и создание резерва тепловой энергии.

5. Проведенный экономический анализ внедрения разработанного силового трансформатора с системой отбора избыточного тепла и способа использования избыточного тепла силового трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов на примере обогрева бассейна для рыб объемом 10 м³ от трансформатора ТМГ-1600/10/0,4, который за счет годовой экономии 131552 рублей относительно электронагревательной установки аналогичной мощности показал высокую экономическую эффективность со сроком окупаемости 5,5 года при капиталовложениях 725487 рублей и эксплуатационных издержках 132610 рублей в год.

Апробация работы

- **Апробация работы.** Основные положения исследования обсуждались в рамках Всероссийского форума «Энергообеспечение и энергосбережение»; на VI молодежном региональном конкурсе инновационных проектов – УМНИК; на Всероссийской научно-практической конференции «Студенческая наука и образование – 2018», а также Международной научно-практической конференции «Наука без границ и языковых барьеров».
- **Публикации.** По теме исследования опубликовано 8 статей, из них одна работа «Gainful Utilization of Excess Heat From Power Transformers» в соавторстве в международной книге «Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development» издательства IGI Global (SCOPUS); две статьи в журнал «Электротехнологии и электрооборудование в

А П П К (В А К)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



- **Патенты.** По теме исследования получены патенты 2736570 «Силовой трансформатор с системой отбора избыточного тепла» и 2742670 «Способ использования избыточного тепла силового масляного трансформатора для обогрева расположенных поблизости объектов»

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**