

УДК 621.311

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУНТОВОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ

Расход энергоресурсов на собственные нужды подстанций (ПС) относительно общих потерь электросетевых компаний не превышают 5%. Тем не менее потери ПС чаще всего превышают нормативные значения расхода энергии, что требует повышения эффективности использования энергоресурсов на собственные нужды. В связи с этим для повышения энергоэффективности требуется внедрение технических решений, которые позволят снизить потребность в электрической и тепловой энергии на собственные нужды ПС. Установлено, что при определенных режимах работы силовых трансформаторов достигается оптимальное значение окупаемости внедрения энергосберегающих мероприятий.

АВТОРЫ:

М.А. Назаров, аспирант, Тольяттинский государственный университет

А.Ю. Хренников, д. т. н., профессор, «Россети Научно-технический центр»

## Введение

Существует множество способов снижения потерь на собственные нужды подстанций (СН ПС). Электрическая и тепловая энергии, затрачиваемые для обогрева помещений и оборудования, являются основными статьями расхода на СН ПС. Для того чтобы снизить данные потери, необходимо применение систем утилизации

электрической и тепловой энергии, не используемой на СН ПС [1].

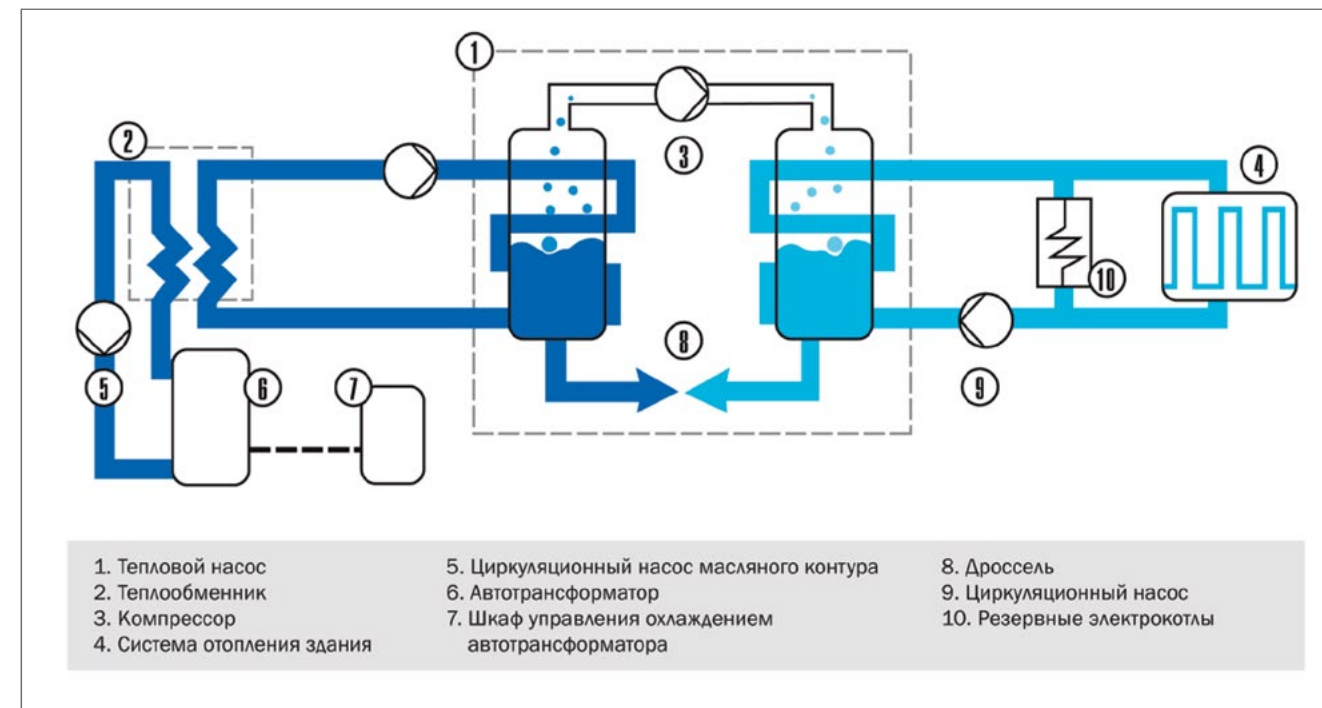
Примером такого использования может служить ПС 500 кВ «Нижегородская» ПАО «Россети». В 2020 г. завершена реализация проекта по повышению энергоэффективности, внедрены уникальные комплексные технические решения, позволяющие



Ключевые слова:  
#энергосбережение;  
#собственные нужды подстанции; #энергоэффективность;  
#снижение потерь.

УСТРОЙСТВО ОТБОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 1



снизить расход электроэнергии на охлаждение автотрансформаторов, обогрев подстанционного оборудования и зданий [2] (рис. 1).

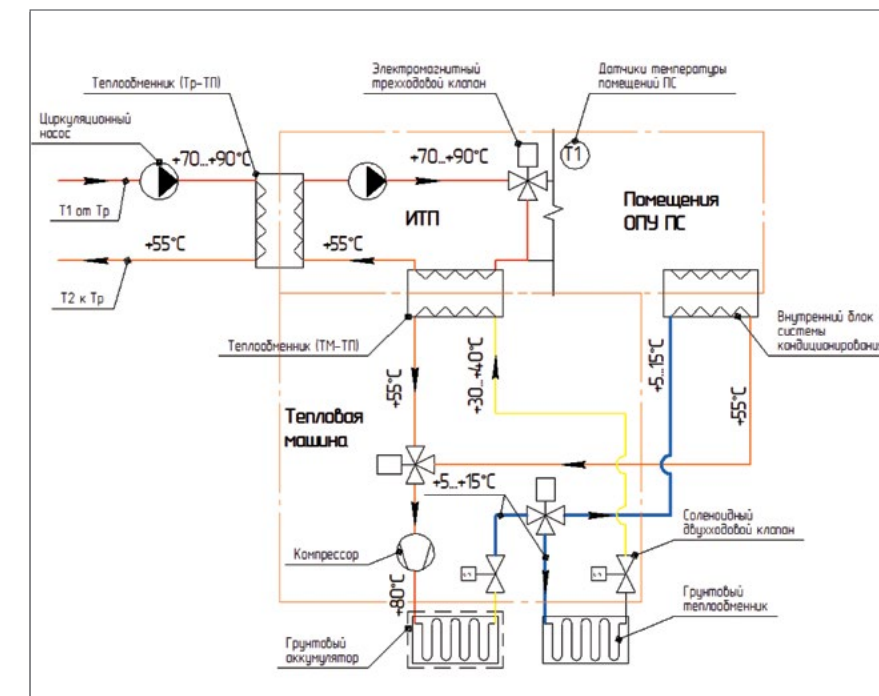
Работы проводились в рамках корпоративного проекта «Энергоэффективная подстанция», которому решением Минэнерго России присвоен статус национального [2, 3].

На первом этапе, завершеном в январе 2014 г., на ПС «Нижегородская» был установлен тепловой насос, позволивший за счет тепла автотрансформатора обеспечить обогрев общеподстанционного пункта управления (ОПУ). В результате потребление электроэнергии зданием снизилось на 340 тыс. кВт·ч в год, что составляет 77% прежнего объема потребления [2, 3, 7, 8].

Тем не менее в данной схеме тепловая энергия, отводимая системой охлаждения трансформатора в летний период, никак не задействуется, поэтому необходимо изменить схему утилизации

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Рис. 2



ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПС В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

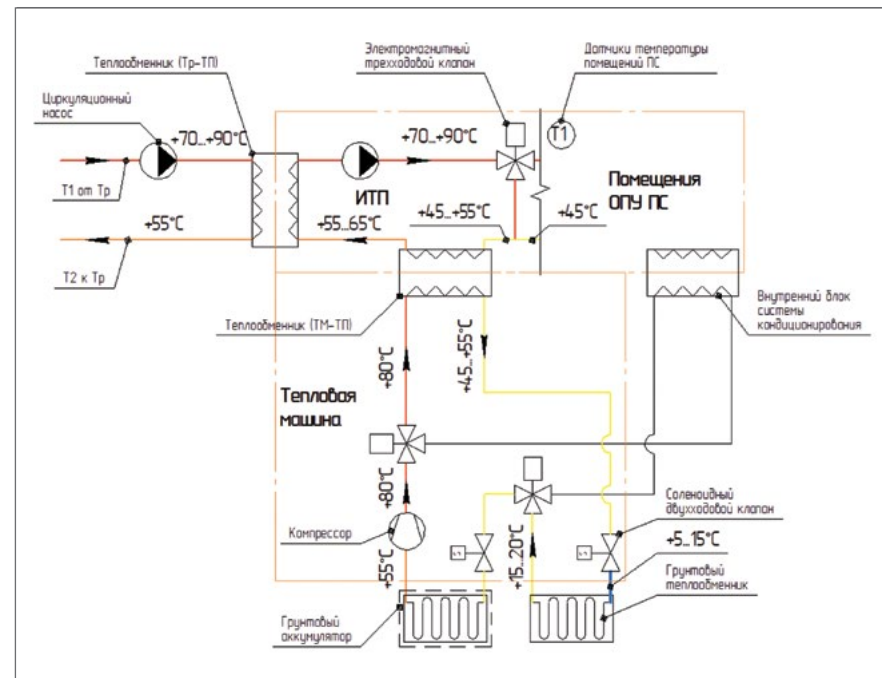


Рис. 3

для повышения энергоэффективности в зимний период эксплуатации.

**Аккумуляция тепловой энергии для СН ПС**

Энергоэффективность использования ресурсов на СН ПС предлагается повышать путем аккумуляции тепловой энергии системы охлаждения силового трансформатора и системы кондиционирования ОПУ ПС. Схема аккумуляции тепловой энергии ПС представлена на рисунке 2.

Тепловой грунтовой аккумулятор представляет собой объем грунта, который заключен в оболочку различной формы (для расчета принята прямоугольная призма), расположен ниже уровня промерзания грунта, покрыт слоями гидроизоляции и пароизоляции [4].

Теплопередача в аккумулятор осуществляется при прохождении теплоносителя по плотно уложенному

МОДЕЛЬ ОТОПЛЕНИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ ОПУ ПС

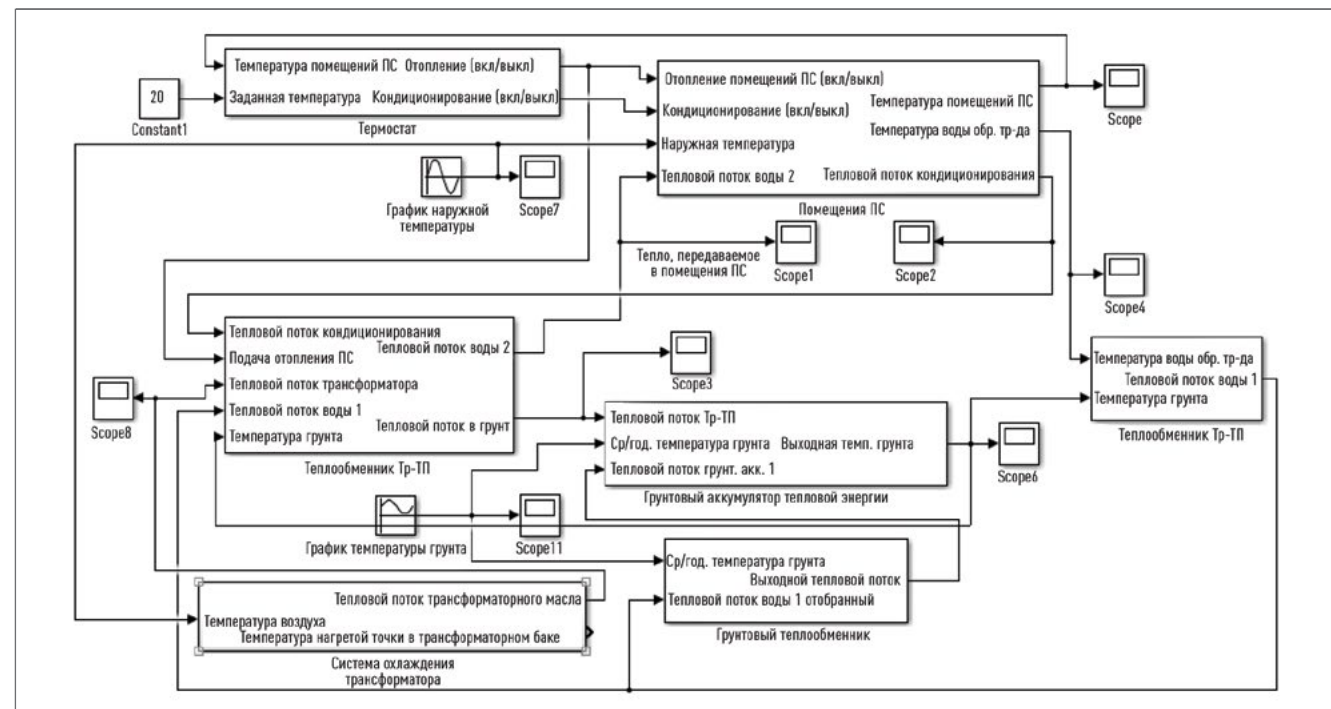


Рис. 4

контур, выполненному из полиэтиленовых труб низкого давления в виде змеевика.

Грунтовой теплообменник выполнен аналогично, причем трубы расположены в неутепленном объеме грунта. Используется контур для предварительного подогрева теплоносителя [4, 5, 6].

По мере достижения температуры ниже 18 °С ОПУ ПС подается сигнал с датчика температуры помещений ПС на электромагнитный трехходовой клапан индивидуального теплового пункта (ИТП). Заслонка электромагнитного клапана поворачивается на требуемый угол, температура помещений ПС повышается или понижается [4, 5].

В случае недостатка тепловой энергии, поступающей на подогрев теплоносителя системы отопления ПС, используется тепловая энергия, запасенная в грунтовой аккумуляции (рис. 3).

Система кондиционирования отключена, поскольку используется при температуре окружающей среды выше 24 °С.

Когда тепловая энергия не аккумуляруется, то тепловая машина работает по обратному циклу [4, 5, 6, 7, 8].

Тепловой аккумулятор эксплуатируется в течение всего года, но экономия тепловой энергии ПС получает в зимний период.

Для определения экономии тепловой энергии на СН ПС необходимо решение дифференциальных уравнений тепловых потоков [5, 6]. Экономия тепловой энергии необходимо вычислить в течение года, поэтому вычисление дифференциальных уравнений в различных температурных режимах без использования математической модели будет трудоемким.

Математическая модель, составленная на основании принципиальной схемы работы в программном ком-

плексе MATLAB, представлена на рисунке 4 [4, 5, 6, 7, 8].

Составленная математическая модель позволила вычислить экономию тепловой энергии при различных коэффициентах загрузки и количестве работающих трансформаторов. Тем не менее при снятии показаний необходимо контролировать соблюдение температурного режима теплоносителя на всех этапах, что создает трудности в подборе параметров теплового аккумулятора.

Для расчета технико-экономического эффекта использовалась ОПУ ПС «Нижегородская» размером 12 × 48 м. Также необходим учет региона для точного расчета энергии, необходимой для СН ПС. Глубина промерзания, а также изменение температуры внутри грунта учитывается при расчете в подсистеме «Грунтовой теплообменник» и «Грунтовой аккумулятор тепловой энергии» (рис. 4).

В качестве исходных данных в модели также задаются объем ОПУ ПС, габариты теплового аккумулятора, плотность грунта, график изменений температуры внутри грунта на заданной глубине установки грунтового аккумулятора, график изменений температуры наружного воздуха в течение года.

Задание температурных графиков грунта и наружного воздуха осуществляется в блоках «График температуры грунта» и «График наружной температуры» соответственно. Остальные ранее перечисленные величины задаются в MATLAB в разделе Model Explorer.

Значение затраченной тепловой энергии в течение года вычисляется в подсистеме «Помещения ПС». Контроль требуемой температуры этиленгликоля осуществляется в подсистеме «Грунтовой теплообменник», а температуры грунта внутри аккумулятора — в «Грунтовой аккумулятор тепловой энергии».

**Технико-экономический расчет строительно-монтажных работ по установке грунтового аккумулятора**

При установке грунтового аккумулятора в целях утилизации тепловой энергии силового трансформатора важно учитывать его объем. При недостаточном объеме грунтового аккумулятора повышается температура теплоносителя, что приводит к снижению надежности работы аккумулятора, поскольку перестают соблюдаться требуемые рабочие параметры. При большем объеме грунтового аккумулятора повышаются тепловые потери через утеплитель, поскольку увеличивается площадь поверхности грунтового аккумулятора, а также стоимость строительно-монтажных работ.

Объем теплоступлений в грунтовой аккумулятор тепловой энергии в большей степени зависит от коэффициента загрузки трансформатора, поскольку выделяется больше тепловой энергии системой охлаждения силового трансформатора. В связи с этим для каждого коэффициента загрузки требуется выбор оптимального объема грунтового аккумулятора (таблица 1).

Тем не менее при определении оптимальных параметров грунтового аккумулятора следует опираться не на самое низкое электропотребление отопительным котлом (резервный источник питания), полученное в модели (рис. 4), а на получаемый минимальный срок окупаемости монтажных работ.

При коэффициентах загрузки выше 0,8 аккумуляция тепловой энергии не требуется, СН ПС покрываются в любой момент времени.

Для определения окупаемости проведем расчет экономии внедрения тепловых аккумуляторов. Экономия электроэнергии отопительным котлом и стоимость проведения строительно-



РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГРУНТОВОГО АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ТИПА ДЦ

Таблица 1

| Коэф-фициент загрузки | Количество трансформаторов | Параметры грунтового аккумулятора |           |           |           |                         |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
|                       |                            | Длина, м                          | Ширина, м | Высота, м | Объем, м³ | Площадь поверхности, м² |
| 0,2                   | 1                          | 7,5                               | 7,5       | 17        | 956,25    | 566,25                  |
| 0,3                   | 1                          | 7,5                               | 7,5       | 17        | 956,25    | 566,25                  |
| 0,4                   | 1                          | 7,5                               | 7,5       | 17        | 956,25    | 566,25                  |
| 0,5                   | 1                          | 7,8                               | 7,8       | 16        | 973,44    | 560,04                  |
| 0,6                   | 1                          | 8                                 | 8         | 16        | 1024      | 576                     |
| 0,7                   | 1                          | 8                                 | 8         | 18        | 1152      | 640                     |
| 0,8                   | 1                          | 8                                 | 8         | 18        | 1152      | 640                     |
| 0,2                   | 2                          | 8                                 | 8         | 14        | 896       | 512                     |
| 0,3                   | 2                          | 8                                 | 8         | 15        | 960       | 544                     |
| 0,4                   | 2                          | 9                                 | 9         | 13        | 1053      | 549                     |
| 0,5                   | 2                          | 9                                 | 9         | 13        | 1053      | 549                     |
| 0,6                   | 2                          | 9                                 | 9         | 13        | 1053      | 549                     |
| 0,7                   | 2                          | 9                                 | 9         | 14        | 1134      | 585                     |
| 0,8                   | 2                          | 9                                 | 9         | 15        | 1215      | 621                     |

монтажных работ позволяют вычислить окупаемость инвестиций (рис. 5, 6).

Данный расчет окупаемости проведен при осуществлении реконструкции ПС с уже установленным тепловым насосом в таблице 2 и таблице 3 приложения.

Простой срок окупаемости не более 10 лет имеет аккумулятор при коэффициенте загрузки не более 0,7.

Поскольку расчет проведен для оптимальных объемов грунтового аккумулятора при различных коэффициентах загрузки, а объем должен быть постоянным, проведем перерасчет окупаемости для грунтового аккумулятора объемом 1053 м³ (табл. 1) (рис. 6).

**Заключение**

В результате проведенного исследования получаем, что для достижения

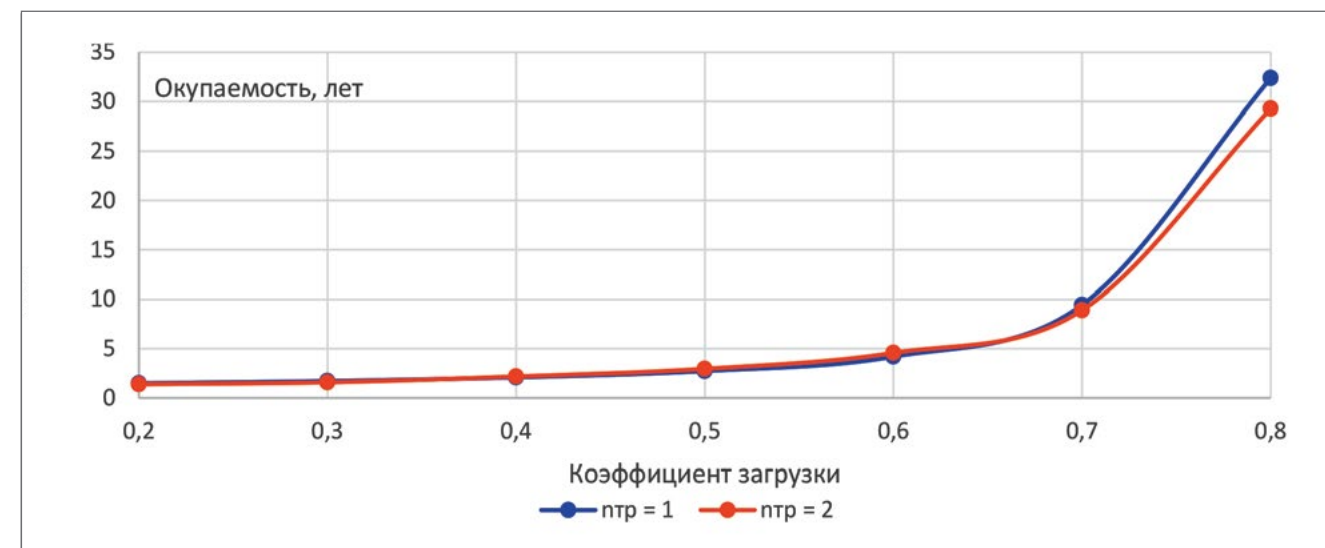
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СТОИМОСТИ РАБОТ ПО ВНЕДРЕНИЮ ТЕПЛОГО АККУМУЛЯТОРА

Таблица 2

| Коэффициент загрузки | Количество трансформаторов | Грунтовой аккумулятор |                         | Расчет стоимости работ, тыс. руб. |                                     |           |                       |               |                                 |         |
|----------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------|---------------|---------------------------------|---------|
|                      |                            | Объем, м³             | Площадь поверхности, м² | Земляные работы                   | Стоимость установки ж/б конструкций | Утепление | Трубы и теплоноситель | Тепловой узел | Монтажные работы и пусконаладка | Итого   |
| 0,2                  | 1                          | 956,25                | 566,25                  | 143,44                            | 254,81                              | 368,06    | 58,99                 | 150           | 20,90                           | 996,20  |
| 0,3                  | 1                          | 956,25                | 566,25                  | 143,44                            | 254,81                              | 368,06    | 58,99                 | 150           | 20,90                           | 996,20  |
| 0,4                  | 1                          | 956,25                | 566,25                  | 143,44                            | 254,81                              | 368,06    | 58,99                 | 150           | 20,90                           | 996,20  |
| 0,5                  | 1                          | 973,44                | 560,04                  | 146,02                            | 252,02                              | 364,03    | 59,67                 | 150           | 20,97                           | 992,71  |
| 0,6                  | 1                          | 1024                  | 576                     | 153,60                            | 259,20                              | 374,4     | 68,14                 | 150           | 21,81                           | 1027,15 |
| 0,7                  | 1                          | 1152                  | 640                     | 172,80                            | 288,00                              | 416       | 77,52                 | 150           | 22,75                           | 1127,07 |
| 0,8                  | 1                          | 1152                  | 640                     | 172,80                            | 288,00                              | 416       | 77,52                 | 150           | 22,75                           | 1127,07 |
| 0,2                  | 2                          | 896                   | 512                     | 134,40                            | 230,40                              | 332,8     | 58,77                 | 150           | 20,88                           | 927,25  |
| 0,3                  | 2                          | 960                   | 544                     | 144,00                            | 244,80                              | 353,6     | 63,46                 | 150           | 21,35                           | 977,21  |
| 0,4                  | 2                          | 1053                  | 549                     | 157,95                            | 247,05                              | 356,85    | 72,77                 | 150           | 22,28                           | 1006,90 |
| 0,5                  | 2                          | 1053                  | 549                     | 157,95                            | 247,05                              | 356,85    | 72,77                 | 150           | 22,28                           | 1006,90 |
| 0,6                  | 2                          | 1053                  | 549                     | 157,95                            | 247,05                              | 356,85    | 72,77                 | 150           | 22,28                           | 1006,90 |
| 0,7                  | 2                          | 1134                  | 585                     | 170,10                            | 263,25                              | 380,25    | 79,08                 | 150           | 22,91                           | 1065,59 |
| 0,8                  | 2                          | 1215                  | 621                     | 182,25                            | 279,45                              | 403,65    | 85,39                 | 150           | 23,54                           | 1124,28 |

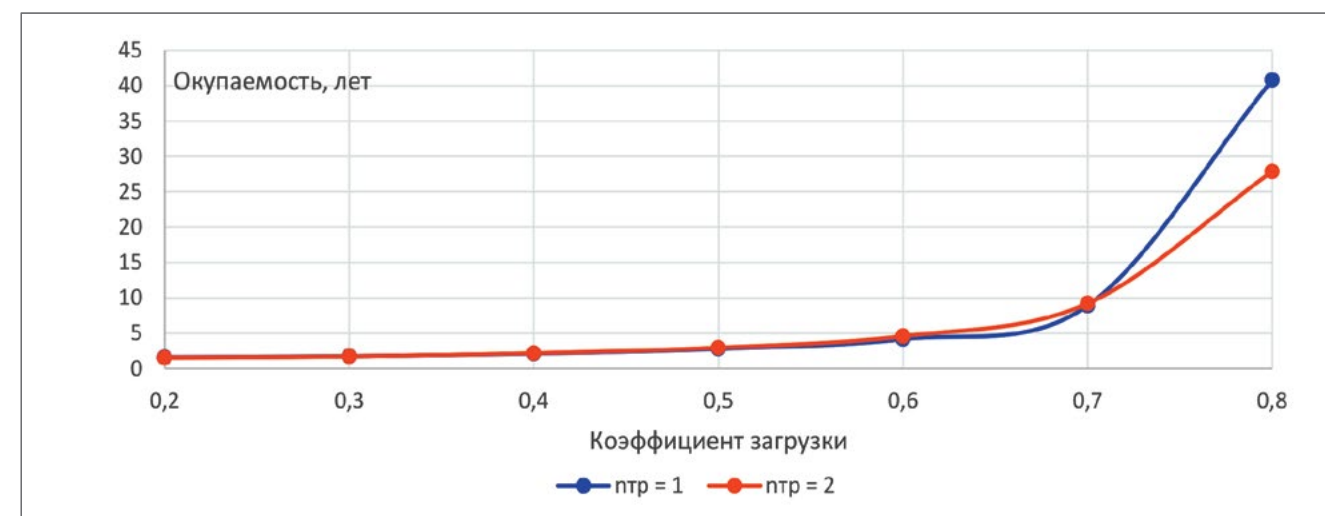
ОКУПАЕМОСТЬ РАБОТ ПО УСТАНОВКЕ ТЕПЛОГО АККУМУЛЯТОРА С ОПТИМАЛЬНЫМ ОБЪЕМОМ

Рис. 5



ОКУПАЕМОСТЬ РАБОТ ПО УСТАНОВКЕ ТЕПЛОГО АККУМУЛЯТОРА

Рис. 6



окупаемости сроком не более 10 лет на действующих и вновь строящихся ПС коэффициент загрузки трансформаторов должен составлять не более 0,7.

Внедрение аккумулирования тепловой энергии для СН ПС позволило снизить потребность в использовании резервного источника тепловой энергии в 7 раз. Средний период

окупаемости инвестиций составляет примерно 7–8 лет.

Допустимая перегрузка силовых трансформаторов ПС составляет 40%, что говорит о том, что на рассматриваемом объекте исследования требуемая окупаемость работ по установке грунтового аккумулятора тепловой энергии соблюдается в любой момент времени.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при строительстве новых и реконструкции существующих ПС в аналогичных климатических регионах.

Анализ технико-экономических показателей необходимо проводить в каждом конкретном случае, учитывая объем ОПУ ПС, климатические условия

## РАСЧЕТ ОКУПАЕМОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ ПО УСТАНОВКЕ ТЕПЛОГО АККУМУЛЯТОРА

Таблица 3

| Коэффициент загрузки | Количество трансформаторов | Стоимость работ, тыс. руб. | Потребление электроэнергии, Дж |   | Экономия |           | Окупаемость, лет |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|---|----------|-----------|------------------|
|                      |                            |                            | Тепловой насос масла-вода, Дж  | Тепловой насос с тепловым аккумулятором, Дж | МВт·ч    | тыс. руб. |                  |
| 0,2                  | 1                          | 996,20                     | 4,703·10 <sup>11</sup>         | 4,405·10 <sup>10</sup>                      | 118,39   | 670,09    | 1,49             |
| 0,3                  | 1                          | 996,20                     | 4,137·10 <sup>11</sup>         | 4,359·10 <sup>10</sup>                      | 102,81   | 581,90    | 1,71             |
| 0,4                  | 1                          | 996,20                     | 3,438·10 <sup>11</sup>         | 4,171·10 <sup>10</sup>                      | 83,92    | 474,99    | 2,10             |
| 0,5                  | 1                          | 992,71                     | 2,646·10 <sup>11</sup>         | 3,415·10 <sup>10</sup>                      | 64,00    | 362,24    | 2,74             |
| 0,6                  | 1                          | 1027,15                    | 1,814·10 <sup>11</sup>         | 2,599·10 <sup>10</sup>                      | 43,17    | 244,34    | 4,20             |
| 0,7                  | 1                          | 1127,07                    | 1,007·10 <sup>11</sup>         | 2,471·10 <sup>10</sup>                      | 21,11    | 119,48    | 9,43             |
| 0,8                  | 1                          | 1127,07                    | 3,2·10 <sup>10</sup>           | 9,87·10 <sup>9</sup>                        | 6,15     | 34,81     | 32,38            |
| 0,2                  | 2                          | 927,25                     | 4,703·10 <sup>11</sup>         | 4,801·10 <sup>10</sup>                      | 117,31   | 663,97    | 1,40             |
| 0,3                  | 2                          | 977,21                     | 4,137·10 <sup>11</sup>         | 4,528·10 <sup>10</sup>                      | 108,50   | 614,11    | 1,59             |
| 0,4                  | 2                          | 1006,90                    | 3,438·10 <sup>11</sup>         | 4,958·10 <sup>10</sup>                      | 81,72    | 462,54    | 2,18             |
| 0,5                  | 2                          | 1006,90                    | 2,646·10 <sup>11</sup>         | 4,775·10 <sup>10</sup>                      | 60,22    | 340,85    | 2,95             |
| 0,6                  | 2                          | 1006,90                    | 1,814·10 <sup>11</sup>         | 4,139·10 <sup>10</sup>                      | 38,89    | 220,12    | 4,57             |
| 0,7                  | 2                          | 1065,59                    | 1,007·10 <sup>11</sup>         | 2,459·10 <sup>10</sup>                      | 21,14    | 119,65    | 8,91             |
| 0,8                  | 2                          | 1124,28                    | 3,2·10 <sup>10</sup>           | 7,608·10 <sup>9</sup>                       | 6,78     | 38,37     | 29,30            |

(температура окружающей среды, глубина промерзания, температура грунта), тип установленных силовых трансформаторов ПС, коэффициент загрузки в течение года.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций. Опыт ПАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]: Официальный сайт НП «АВОК». URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6476](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6476) (дата обращения: 16.11.2023).
2. На ключевом центре питания Нижегородской области внедрены энергоэффективные системы контроля расхода электроэнергии [Электронный ресурс]: Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/en/node/17256> (дата обращения: 16.11.2023).
3. Вороничкин В.Э. Системы утилизации тепла трансформаторов и автотрансформаторов 220–750 кВ // Энергия единой сети. № 6 (17), декабрь 2014 — январь 2015. С. 33–42.
4. Патент РФ № 2717890. Способ подземного аккумулирования тепла или холода / Греш К. О. 2020. Бюл. № 9. 7 с.
5. Назаров М.А. Анализ затрат энергоносителей на собственные нужды подстанции с учетом утилизации

тепловой энергии силовых трансформаторов / М.А. Назаров, А.Ю. Хренников // Вопросы электротехнологии. 2023. № 2 (39). С. 46–52.

6. Назаров М.А. Использование грунтового аккумулирования тепловой энергии для собственных нужд подстанций / М.А. Назаров, А.Ю. Хренников // Энергетик. 2023. № 6. С. 18–21.
7. Гладковский Г.К., Мерзликин А.П., Загурский Ю.А., Давыдов Е.Ю., Калинин М.А., Паринов И.А., Рябин И.В. Национальный проект «Энергоэффективная подстанция». От пилотных проектов до типовых решений // Энергия единой сети. № 4 (59). 2021. С. 49–62.
8. Рябин Т.В., Давыдов Е.Ю., Паринов И.А. Возможности снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций // Энергосбережение. 2016. № 6. С. 36–42.
9. Воденников Д. Снижение расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций 500–750 кВ. Обзор существующих технологий // Электроэнергия. Передача и распределение. Ежеквартальный спецвыпуск № 2 (13), июнь 2019. С. 44–48.

Для цитирования: Назаров М.А., Хренников А.Ю., Техничко-экономический анализ эффективности применения грунтового аккумулирования тепловой энергии для собственных нужд подстанций // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 58–64.

## Хренников А.Ю. — дипломант Всероссийского конкурса «Лучшая учебная методическая и научная публикация в области гидроэнергетики России — 2023»

Конкурс был организован Ассоциацией организаций и работников гидроэнергетики «Гидроэнергетика России» под эгидой Минэнерго РФ и был направлен на распространение информации о современном научно-практическом опыте и современных публикациях в области гидроэнергетики.

Хренников А.Ю. представил на конкурсе две публикации:

□ Учебное пособие «Обслуживание автоматики и средств измерений электростанций».

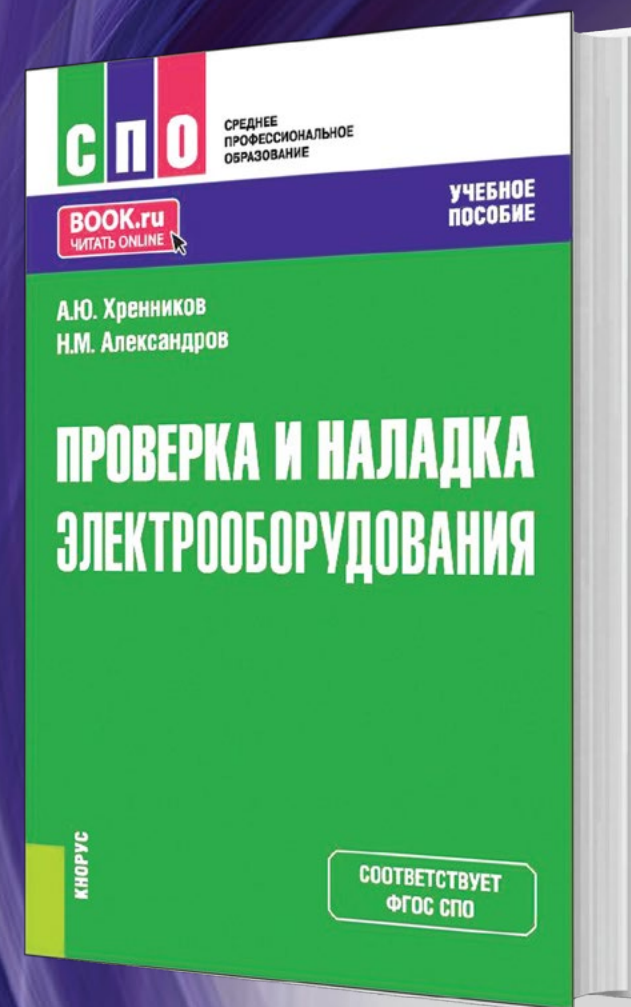
□ Учебное пособие «Высоковольтное электротехническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг», автором которых он является.

Обе работы будут включены в специальный сборник аннотаций работ победителей и дипломантов, содержащий основные положения публикаций. Сборник будет направлен в ведущие профильные вузы, научно-проектные организации, гидроэнергетические компании, а также победителям и дипломантам конкурса.

# ПРОВЕРКА И НАЛАДКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

А.Ю. ХРЕННИКОВ, Н.М. АЛЕКСАНДРОВ



Учебно-методическое пособие состоит из 12 глав на 360 страницах. Изложены вопросы организации и технологии проверки электрооборудования — организация пусконаладочных работ, испытания, наладка и ремонт аппаратов до 1000 В, испытание и наладка электрооборудования подстанций, электрических сетей и кабельных линий, наладка устройств релейной защиты и электроприводов, испытание заземляющих устройств. В части 2 рассмотрены контрольно-измерительные приборы, основы метрологии, погрешности измерений, классификация электроизмерительных приборов и систем, схемы подключения. Техническое обслуживание и эксплуатация электроизмерительных приборов, средства и системы для производства наладочных работ (ПНР). Пособие основано на многолетнем опыте работы в электроэнергетической отрасли. В конце каждой главы имеется список контрольных вопросов и тем для подготовки рефератов и докладов, а также список литературных источников для более глубокого изучения специальности.

Учебное пособие предназначено для аспирантов, студентов электроэнергетических специальностей, для специалистов технических служб предприятий электрических, распределительных сетей и электрических станций.

Москва: КНОРУС, 2024. 360 с.  
ISBN 978-5-406-12721-6