

На правах рукописи



Васильев Павел Филиппович

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ
УСТРОЙСТВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Специальность

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН, г. Якутск

Научный руководитель: д.т.н.
Кобылин Виталий Петрович

Официальные оппоненты: Хрущев Юрий Васильевич
д.т.н., профессор,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
профессор кафедры электрических сетей
и электротехники

Гайворонский Александр Сергеевич
к.т.н.,
ОАО «СибНИИЭ», г. Новосибирск,
директор испытательного центра
высоковольтного электрооборудования

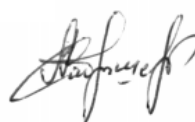
Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Новосибирская
государственная академия водного
транспорта»

Защита состоится «25» апреля 2012 г. в 15⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «14» марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшими техническими задачами энергетики являются: обеспечение безопасной работы обслуживающего персонала, безаварийная работа электрических систем и установок, грозозащита зданий, различных сооружений и линий связи с помощью устройства надежных заземлений, удовлетворяющих требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ) в течение всего года.

В связи с тем, что распространение многолетнемерзлых грунтов на земле имеет глобальный характер, в этих условиях существует проблема снижения сопротивления растеканию тока заземляющих устройств, а также его дальнейшая стабилизация в зимний период, которая включает в себя исследования распространения многолетнемерзлых грунтов, их состава, особенностей и характеристик. Так в условиях многолетнемерзлых грунтов выполнение заземляющих устройств в соответствии с требованиями ПУЭ сопряжено с дополнительными трудностями, что обуславливает высокие затраты составляющие 30-35% сметной стоимости объекта. Например, на одной из подстанций 110 кВ в пос. Усть-Нера, расположенной на территории Республики Саха (Якутия), для получения расчетного сопротивления заземления 0,5 Ом потребовалось 30600 газовых труб длиной по 3 м и 110 км полосовой стали сечением 40х4 мм. Общая масса стали для одного контура составила 490 т, а для размещения всех электродов потребовалась площадь около 1 км². Снижение капиталовложений за счет использования рациональных конструкций заземлителей и методов их выполнения, а также повышение надежной работы энергосистем и обеспечение безопасности персонала являются очень актуальными задачами.

Работа выполнена в отделе электроэнергетики Института физикотехнических проблем Севера СО РАН в рамках программ НИР (шифр 6.1.7 «Анализ прогнозного фона и выявление ключевых задач нового этапа развития энергетики региона Севера (на примере Республики Саха (Якутия))»; шифр 3.1.1.6 «Комплексный анализ потенциала эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, надежности и экологической безопасности систем энергетики Республики Саха (Якутия) при формировании энергетических центров Востока России в первой четверти XXI века».

Целью работы является разработка научных основ, методов и средств снижения и круглогодичной стабилизации сопротивления растеканию тока заземляющих устройств, вложенных в многолетнемерзлые грунты, на основе электроподогрева деятельного слоя грунта коаксиальными электродами-нагревателями.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

- обзор существующих методов снижения и стабилизации сопротивления заземляющих устройств в многолетнемерзлых грунтах;
- разработка метода создания круглогодично проводящего слоя грунта

на основе электродов-нагревателей коаксиальной конструкции;

- разработка технического решения заземляющих устройств коаксиальной конструкции для стационарных и мобильных электроустановок;

- разработка методики расчета заземляющих устройств с применением электродов-нагревателей коаксиальной конструкции;

- разработка метода вмещения заземляющих устройств в высокопроводящие слои многолетнемерзлых грунтов.

Методы исследования. В работе используются методы:

- математического моделирования;

- системного анализа;

- интегрального теплового баланса;

- анализа экспериментальных данных;

- припасовывания;

- теории вероятности.

Положения, выносимые на защиту:

- 1.Метод снижения сопротивления растеканию тока в многолетнемерзлых грунтах и его стабилизация в зимний период времени на основе электродов-нагревателей коаксиальной конструкции.

- 2.Методика расчета электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, как дополнение к стандартным методам расчета заземляющих устройств.

- 3.Способ заложения заземляющих устройств в высокопроводящие слои многолетнемерзлых грунтов.

- 4.Методика определения действия сил вертикальной деформации на электроды заземляющих устройств и ее решение посредством заземления в вечномерзлый слой грунта.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1.Разработан метод снижения сопротивления заземляющих устройств путем искусственного создания таликовой зоны вокруг электродов-нагревателей коаксиальной конструкции для стационарных и мобильных электроустановок.

- 2.Разработана методика расчета электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, как дополнение к стандартным методам.

- 3.Предложены способ, и устройство, вмещения заземляющих устройств в высокопроводящие слои, обеспечивающий снижение на два порядка сопротивления контура заземления в зимний период времени.

- 4.Впервые предложен метод борьбы с силами вертикальной деформации контура заземления путем заземления расчетной части электродов многолетнемерзлым грунтом.

Практическая значимость результатов работы:

Предложенный новый метод снижения сопротивления растеканию тока имеет практическое применение в энергоснабжающих и промышленных предприятиях, находящихся в зоне распространения многолетне-

мерзлых грунтов. Внедрение данного метода снижает сопротивление растеканию тока до требуемых, уменьшает затраты на сооружение заземляющих устройств энергообъектов, повышает надежность работы релейной защиты и автоматики, обеспечивает электробезопасность работы обслуживающего персонала.

Совокупность полученных результатов представлена в диссертации, как теоретическое обобщение и решение важной научно-технической проблемы, имеющей большое хозяйственное значение.

Достоверность и обоснованность научных положений обеспечены применением современной экспериментальной техники и методик и подтверждены результатами натурных испытаний.

Реализация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены Якутскими городскими электрическими сетями и в учебный процесс кафедры электроснабжения СВФУ (имеются акты внедрения).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: III, IV, V Международных Евразийских симпозиумах по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (Якутск, 2006, 2008, 2010); 2-м Международном форуме «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2006); 79-м заседании международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Вологда, 2007); IV Ларионовских чтениях (Якутск, 2009); IX Международном симпозиуме по развитию холодных регионов ISCORD 2010 (Якутск, 2010).

Личный вклад. Постановка научно-исследовательских задач и их решения, научные положения, выносимые на защиту, основные выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору. Личный вклад в работы, опубликованные в соавторстве, составляет не менее 50%.

Публикации. Содержание работы изложено в 13 научных трудах, в том числе 1 статья в периодическом издании по перечню ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименований. Материал диссертации изложен на 104 страницах машинописного текста и включает 21 рисунков и 14 таблиц, а также 7 приложений на 11 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и научные задачи исследования; приведены основные научные результаты, выносимые на защиту; показана научная новизна объекта исследований; оценена практическая значимость результатов;

даны структура и объем диссертационной работы, а также объем публикаций.

В первой главе дан критический анализ работ по характеристикам электрофизических свойств многолетнемерзлых грунтов и водоемов в условиях Крайнего Севера, а также конструкций заземлителей, методы их расчетов и реализации. Проанализированы основные принципы выполнения заземляющих устройств в условиях холодного климата и методы снижения сопротивления растеканию тока заземляющих устройств вмещенных, в многолетнемерзлые грунты.

В разные годы решением проблемы снижения и стабилизации сезонных вариаций сопротивления заземляющих устройств в многолетнемерзлых грунтах занимались и внесли значительный вклад А.И. Якобс, Н.Н. Максименко, В.В. Бургсдорф, Э.Б. Альтшулер, В.Н. Грачев, Ю.В. Целебровский, В.С. Якупов, М.В. Якушев, В.А. Седалищев, Н.А. Цытович и др.

Для снижения сопротивления заземлителей в многолетнемерзлых грунтах, имеющих высокое удельное электрическое сопротивление, рекомендуют следующие способы: применение глубинных заземлителей, специальную обработку грунта, вынос заземлителей в подошвенный или подрусловый талик, устройство заземлителей в деятельном слое.

Одним из наиболее эффективных путей уменьшения сезонного изменения сопротивления заземления в условиях холодного климата и многолетнемерзлых грунтов является сохранение части среды, вмещающей заземлители, в талом состоянии в зимний период времени. В этом случае сезонные изменения сопротивления заземления будут определяться сезонным изменением объема таликовой зоны, которая сохранится к началу сезонного протаивания. Сохранение или искусственное создание таликовых зон в мерзлых породах и их электропроводность эффективно управляются с помощью электроподогрева.

Методами снижения сезонных вариаций сопротивления заземления электроподогревом путем использования греющего кабеля или пропусканием тока между заземлителями занимались такие исследователи как Э.Б. Альтшулер, Ю.В. Шевцов, В.С. Якупов, В.Н. Грачев, Ю.Г. Шасткевич и др.

Главным недостатком данных методов является непрерывная работа греющих элементов, которые обуславливают высокие эксплуатационные затраты потребления электроэнергии.

Таким образом, на основе выполненного анализа методов и средств снижения сопротивления растеканию тока автором предлагается метод электроподогрева грунта на основе электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, как наиболее эффективный с минимальными эксплуатационными затратами.

Во второй главе описаны основные принципы построения заземляющих устройств с применением электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, также рассмотрены способы выполнения заземляющих

устройств для мобильных электроустановок в условиях Крайнего Севера.

Электроды-нагреватели коаксиальной конструкции представляют собой разновидность стальных нагревателей для низкотемпературного нагрева. В простейшем случае коаксиальный электронагреватель – это два цилиндрических проводника, соединенные последовательно таким образом, что один из них по всей длине расположен соосно внутри другого, образуя цилиндрический бифиляр. Например, на *рис.1* в качестве проводников используется стержень 2 внутри трубы 1 с электрической изоляцией 3 между ними.

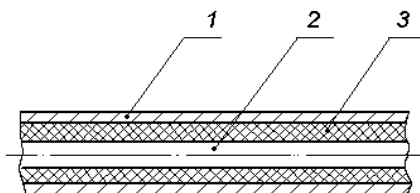


Рисунок 1. Коаксиальный электрод-нагреватель в разрезе

С одной стороны концы проводников сваривают, образуя последовательное соединение, а к противоположным подводят напряжение. Таким образом, электрический ток во внутреннем и наружном проводниках протекает встречно и при взаимодействии электромагнитных полей близко расположенных проводников в них возникает эффект вытеснения электрического тока к обращенным друг к другу поверхностям проводников. При этом на наружной поверхности внешнего проводника электромагнитное поле практически отсутствует, и при безопасных напряжениях электронагреватель может применяться без электрической изоляции. Эта особенность коаксиального электрода-нагревателя позволяет его помещать непосредственно в нагреваемую среду.

Для того чтобы электромагнитная волна полностью затухала, толщина стенки наружной трубы должна быть не менее 2,5 мм, т.к. эквивалентная глубина проникновения токов в сталь при частоте 50 Гц в среднем составляет около 1,5 мм. При значительных токах и повышении температуры нагревателя глубина проникновения возрастает до 3-4 мм. Массивные проводники нагревателей обладают очень малым сопротивлением и для их питания необходим понизительный трансформатор со вторичным напряжением в пределах 6-24 В и рабочим током до 1 кА, поэтому токопроводы должны быть рассчитаны на термическую стойкость. Поскольку коаксиальный нагреватель представляет активно-индуктивную нагрузку, то его коэффициент мощности меньше единицы и находится в пределах 0,85-0,95 в зависимости от сортамента стали.

К достоинствам коаксиальных нагревателей относятся их простота, надежность и долговечность. Эти качества особенно важны при использовании их в заземляющих устройствах электроустановок.

Принцип построения заземляющего устройства, вмещенного в деятельный слой в комплексе с электроподогревом в виде электродов-

нагревателей коаксиальной конструкции, представлен на *рис.2*. Здесь показана схема размещения в деятельном слое 7 устройства заземления 5, гальванически связанного проводником 6 с проводником 2 нагревателя 1 (таликовая зона 9 заштрихована).

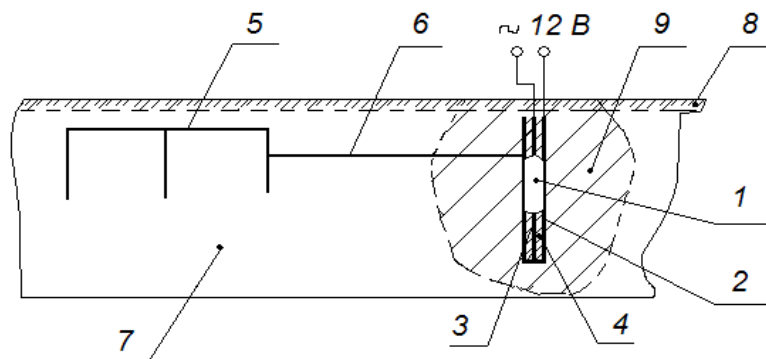


Рисунок 2. Заземляющее устройство в комплексе с электродом-нагревателем коаксиальной конструкции:

1 – электрод-нагреватель; 2, 3 – соосные цилиндрические проводники; 4 – изоляционный промежуток; 5 – устройство заземления; 6 – токопровод; 7 – деятельный слой; 8 – тонкий слой талого грунта; 9 – искусственная таликовая зона

Размещение устройства автором предлагается выполнить в двух вариантах:

1) главный контур заземления 1 гальванически связать со вспомогательным контуром заземления 2 в виде одного или ряда электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, расположенным в непосредственной близости (*рис.3*);

2) главным контуром заземления выступает ряд электродов-нагревателей коаксиальной конструкции 2, размещенный по площади подстанции (*рис.4*).

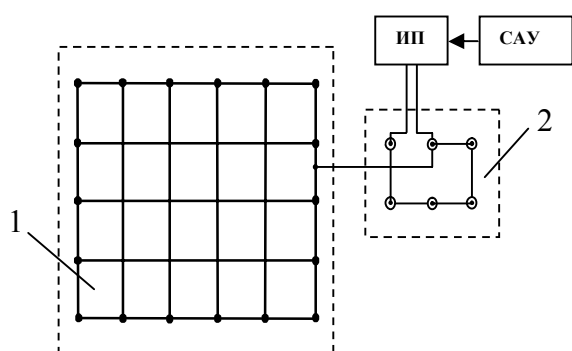


Рисунок 3. Схема размещения вспомогательного контура заземления в виде коаксиальных электродов-нагревателей в непосредственной близости от главного

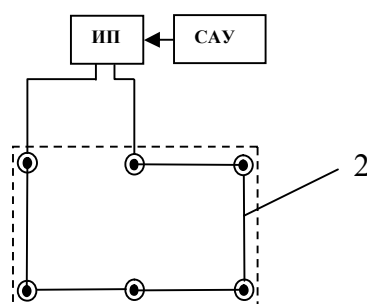


Рисунок 4. Схема размещения контура заземления в виде коаксиальных электродов-нагревателей

1 – главный контур заземления; 2 – контур в виде электродов-нагревателей коаксиальной конструкции; ИП – источник питания электродов-нагревателей; САУ – система автоматического управления

Размещение главного контура заземления в деятельном слое в комплексе со вспомогательным контуром коаксиальной конструкции решает проблему обеспечения таликовой зоны в переходный зимне-весенний период (начала таяния снежного покрова, когда появляется тонкий высокопроводящий поверхностный слой). В это время возникает наибольшая вероятность поражения электрическим током обслуживающего персонала, поскольку основная масса грунта, в который помещен главный контур заземления, находится в мерзлом состоянии и имеет высокое удельное сопротивление. Основную функцию заземляющего устройства принимает на себя вспомогательный контур, связанный электрически с главным контуром и имеющий связь с талым высокопроводящим слоем за счет наличия таликовых зон вокруг электродов. Таким образом, обеспечивается надежная работа заземления и защиты обслуживающего персонала от напряжения прикосновения.

В зимний период времени, в момент резкого повышения сопротивления растеканию тока главным контуром, которым являются электроды-нагреватели коаксиальной конструкции, создается талик с удовлетворяющим требованиям ПУЭ сопротивлением растеканию тока. Данное значение сопротивления поддерживается системой автоматического управления.

Для заземления мобильных электроустановок до 1000 В с кратковременной дислокацией предлагаются разработанные автором способ и устройство поверхностного переносного заземлителя коаксиальной конструкции, которое предназначено для оперативного обеспечения нормативных величин сезонного сопротивления растеканию тока заземляющих устройств в условиях многолетнемерзлых грунтов.

На *рис.5 (а, б)* представлено устройство поверхностного заземлителя коаксиальной конструкции, электроды *1* которого изготовлены из листовой стали толщиной 1,5 мм, плоской прямоугольной формы, размещенные в теплозащитном корпусе *2* с отражателем, внутренняя поверхность которого зеркальная. Контактный болт *3* предназначен для подключения нулевого провода источника электропитания и корпуса заземляемого объекта. Источник питания *4* рассчитан на 6-12 В. Стабилизатор температурного режима грунта *5* работает в комплексе с датчиком температуры *5*. Для снижения переходного сопротивления между устройством заземления и землей применяется балластный груз *7* массой не менее 40 кг. Электроды-нагреватели покрываются электроизоляционным термостойким лаком. Перед установкой устройства проводится очистка грунта от снега. При подключении устройства к источнику тока электроды разогреваются, и под заземлителем создается таликовая зона. Устройством стабилизации температурного режима, в свою очередь, выбирается оптимальный режим работы поверхностного заземлителя.

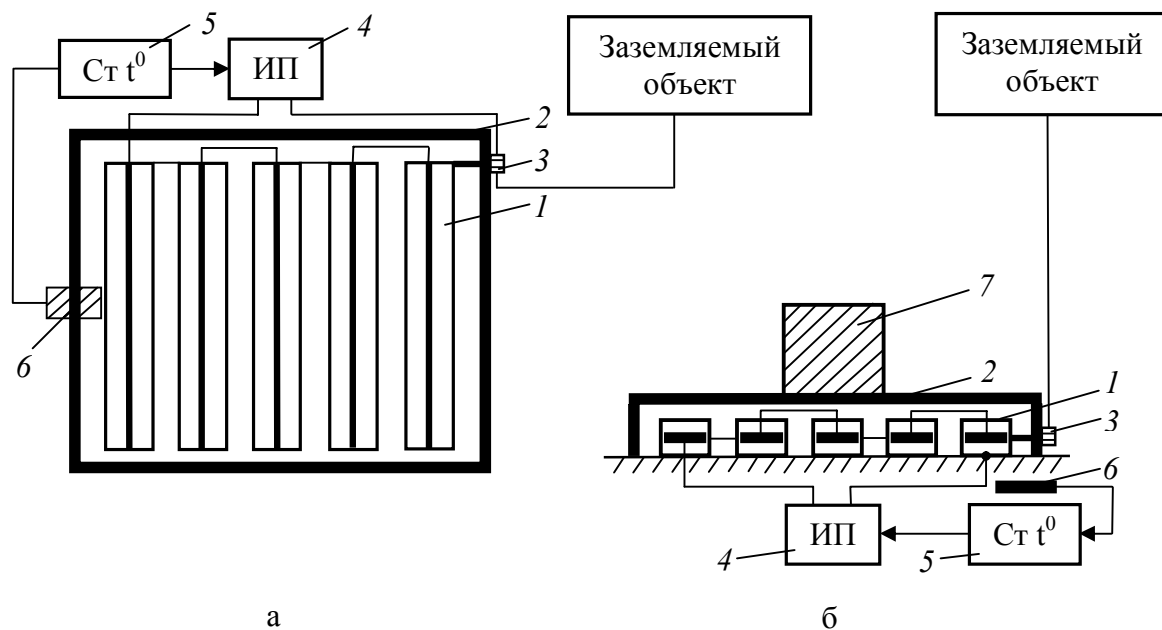


Рисунок 5. Поверхностный переносной заземлитель коаксиальной конструкции:
а – схема электрических соединений электродов-нагревателей
б – вид со стороны подключения ИП

1 – коаксиальные электроды-нагреватели; 2 – корпус заземлителя; 3 – контактный болт;
4 – источник питания; 5 – стабилизатор температурного режима грунта; 6 – датчик температуры; 7 – груз

Предлагаемый поверхностный заземлитель по сравнению с традиционными имеет следующие преимущества: отпадает необходимость транспортировки и эксплуатации буровой установки для устройства заземления передвижных электроустановок; исключается обработка грунта соле- и кислотосодержащими средствами, так как при таянии мерзлого грунта создается более эффективная таликовая зона с низким удельным сопротивлением; достигается низкое сопротивление заземления с меньшими затратами времени, труда и материальных средств, исключая вынужденную засоленность почвы, которая в условиях многолетне-мерзлых грунтов в летний период мигрирует в надмерзлотном слое, концентрируясь в низких местах и оказывая негативное воздействие на почву и растительный покров.

Вторым предлагаемым в данной работе методом является заложение заземлителей, при котором используют в качестве высокопроводящей среды тонкие высокоминерализованные слои (криопэги) или грунты, которые сохраняют достаточно высокую проводимость круглогодично. Под тонким проводящим слоем понимается слой легких пылеватых суглинков или водоносных горных пород, имеющих удельное электрическое сопротивление в пределах от 10-100 Ом·м, толщину 0,1-5 м и находящихся на глубине от 1-20 м.

В качестве заземлителя предлагается использовать плоскостной электрод в виде пластины или диска сравнительно небольших размеров, погружаемых в слой.

Данный метод менее затратный по сравнению с аналогами. Тонкие проводящие слои имеют преимущество перед предлагаемым электронагревом в том случае, если они расположены в непосредственной близости от заземляемых объектов на небольшой глубине.

На *рис.6 и 7* показаны варианты расположения заземлителя в высокопроводящем слое: вариант 1 – пластина в надмерзлотном талике; вариант 2 – диск в межмерзлотном талике.

На территории проектируемого объекта производятся съемка по площади и зондирование высокочастотными методами электроразведки. По результатам съемки оконтуривается распространение тонкого проводящего слоя по исследуемой площади и выбирается место заложения заземления, определяются глубина залегания, удельное электрическое сопротивление и толщина слоя. По этим параметрам рассчитывается необходимая площадь электрода заземлителя. В зависимости от расчетной площади электрода и глубины залегания тонкого проводящего слоя выбирается способ рационального доступа к слою: либо рытье шурфа или траншеи, либо шнековое бурение скважины.

Заложение заземлителя по варианту 1 (*рис.6*) производится в тонкий проводящий слой (надмерзлотный талик) 3. После выемки грунта пластина 7 закладывается в тонкий проводящий слой 3 в плоскости его простираения на глубине, соответствующей половине мощности слоя. Затем обеспечивается ее соединение заземляющим проводником 8 с объектом заземления.

По варианту 2 (*рис.7*) заложение заземлителя в тонкий проводящий слой 3 может быть произведено на любой глубине. Возможности этого ва-

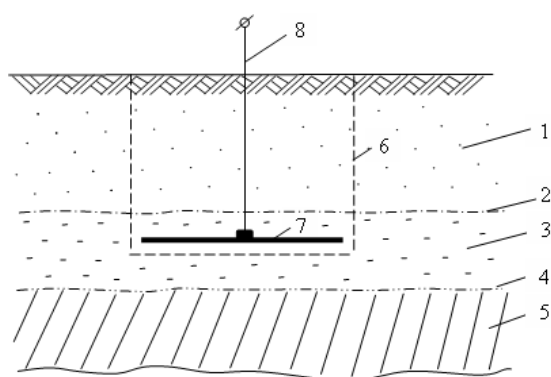


Рисунок 6. Пластина в надмерзлотной таликовой зоне

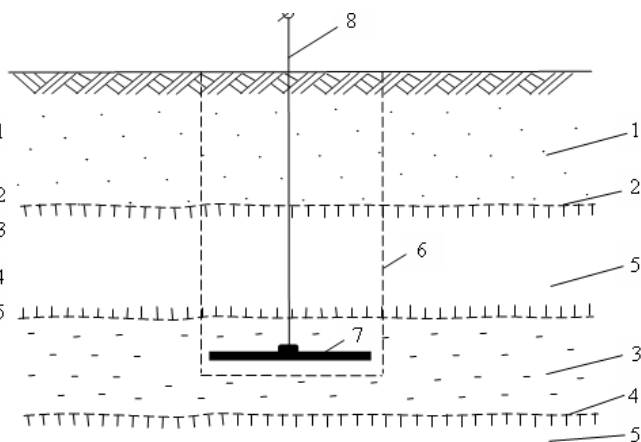


Рисунок 7. Диск в межмерзлотной таликовой зоне

1 – деятельный слой; 2 – граница сезонного оттаивания; 3 – надмерзлотный или межмерзлотный талики; 4 – кровля сплошной многолетней мерзлоты; 5 – многолетнемерзлый грунт; 6 – граница выемки грунта; 7 – пластина или диск

-рианта ограничиваются доступной величиной диаметра шнека, который должен быть больше чем диаметр диска 7 с минимальной площадью, обеспечивающей требуемое сопротивление заземлителя в слое. Скважина бурится до заглубления в тонкий проводящий слой, в который и погружается диск. При обеспечении соединения диска с объектом заземления заземляющим проводником 8 может служить стальная полоса, приваренная к диску и вместе с ним опущенная в скважину. Засыпка скважины выполняется проводящим материалом (бентонитом, глиной или угольной крошкой).

Недостатком широкого применения данного метода является то, что тонкие проводящие слои имеют очаговое распространение.

В третьей главе предложена методика расчета коаксиальных электродов-нагревателей и приведены результаты экспериментальных исследований по ней, а также представлена эффективность ее применения; описаны способ и устройство стабилизации требуемого сопротивления заземляющих устройств; приведены результаты оценочного сравнения подстанции на основе данного метода заземления.

Для решения задачи определения величины протаивания предполагаем, что скважина радиусом r_0 обогревается электродом-нагревателем коаксиальной конструкции, имеющим удельное тепловыделение q .

Тепловой расчет электрода сводится к определению их термического сопротивления и удельной поверхностной мощности или рабочей температуры.

Предположим, что скважина радиусом r_0 обогревается нагревательным электродом, имеющим удельное тепловыделение q .

Для математического моделирования данного процесса сформулируем осесимметричную задачу теплопроводности с учетом фазового перехода влаги, насыщающей грунт, то есть его протаивания за счет действия нагревателя в скважине. Запишем в безразмерном виде основные уравнения, а также соответствующие физике процесса начальные и граничные условия.

Для талой зоны:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad 1 \leq r \leq s(t), \quad (1)$$

$$T_1(s, t) = 0, \quad (2)$$

$$-\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=1} = q, \quad (3)$$

Для мерзлой зоны:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad s(t) \leq r \leq \infty, \quad (4)$$

$$T_2(r, 0) = T_f, \quad (5)$$

$$T_2(s, t) = 0. \quad (6)$$

На границе протаивания ставится условие Стефана:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \frac{ds}{dt} \quad (7)$$

и условие равенства температур на этой границе температуре фазового перехода, что выражается граничными условиями (2) и (6).

Здесь приняты следующие обозначения:

$$T_i = \frac{\bar{T}_i}{T_0}, T_f = \frac{\bar{T}_f}{T_0}, r = \frac{\bar{r}}{r_w}, t = \frac{\bar{t} \chi_2}{r_w^2}, s = \frac{\bar{s}}{r_w}, \chi = \frac{\chi_1}{\chi_2}, \lambda_i = \frac{\bar{\lambda}_i T_0}{\chi_2 \rho w l}, q = \frac{\bar{q}}{2\pi h \bar{\lambda}_1 T_0}, i=1,2$$

(1 – талая зона, 2 – мерзлая зона). Переменные с чертой – размерные значения температуры, радиальной координаты, отсчитываемой от оси скважины, времени, координаты фронта фазового перехода, коэффициента теплопроводности грунта и мощности нагревателя.

Для решения поставленной нелинейной задачи воспользовались методом интегрального теплового баланса, который успешно используется для изучения теплового взаимодействия нефтяных и газовых скважин с мерзлыми горными породами. Этот метод позволяет свести исходную задачу для уравнений в частных производных к решению задачи Коши для системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений. В данном случае видоизменяем решение с учетом специфики процесса, что отражается в виде граничного условия (3), которое выражает постоянство теплового потока на поверхности скважины, в которой расположен нагревательный элемент.

В соответствии с методом интегрального теплового баланса вводим радиус теплового влияния $R(t)$, который определяется из соотношений:

$$T = T_f, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ при } r = R(t). \quad (8)$$

Условия (8) заменяют собой начальное условие (5) и условие ограниченности решения на бесконечности. Вспомогательная переменная $R(t)$ определяется из интеграла теплового баланса, который выводится путем интегрирования дифференциального уравнения (4) и имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \int_{s(t)}^{R(t)} r T_2(r, t) dr = T_f R \frac{dR}{dt} - s \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=s(t)}. \quad (9)$$

В результате простых, но громоздких вычислений для определения безразмерного радиуса протаивания получаем систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \frac{\lambda_1 q}{s} + \frac{\lambda_2 T_f (u-1)}{s(u \ln u + 1 - u)} \\ \frac{dR}{dt} &= \frac{1}{\frac{\ln u}{6}(u^2 + u + 1) + 0.25(1 - u^2)} \left(\frac{1}{s} (u \ln u + 1 - u) - \frac{ds}{dt} \left(\frac{u^3}{12} + \frac{u}{4} - u \ln u - \frac{1}{3} \right) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Для ее однозначного решения необходимо задать начальные условия следующего вида:

$$s(0) = 1, R(0) = R_m, \quad (11)$$

где начальное значение радиуса влияния определяется путем решения следующего трансцендентного уравнения:

$$\frac{R_m \ln R_m}{R_m - 1} = 1 - \frac{T_f}{q}. \quad (12)$$

Второе условие в (11) означает, что протаивание мерзлого грунта начнется через некоторое время после включения нагревателя, за которое радиус теплового влияния увеличится до величины R_m .

Математическая модель (11)-(12) может быть использована не только для расчетов протаивания при работе нагревательного устройства, но и смерзания грунта при его отключении. Для этого в уравнениях (11) необходимо положить $q = 0$, а в начальных условиях (12) заменить значения $s(0)$, $R(0)$ на величины, полученные на предыдущем этапе вычислений. И в том, и в другом случае соответствующая задача Коши решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Расчеты выполнялись для грунтов (песков, супесей, суглинков и глин) в зависимости от объемного веса, дисперсности, влажности и тепловых характеристик. Значения объемного веса грунтов, коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости при влажностях равных 0,20 и 0,35. Дополнительно использовались следующие значения параметров: наружный радиус скважины – 0,0135 м; теплота плавления льда – 80 ккал/кг; начальная температура грунта – -4°C , -8°C ; диаметр электрода – 0,027 м.

Пример динамики изменения радиуса зоны талого грунта (супеси) представлен на *рис.8*.

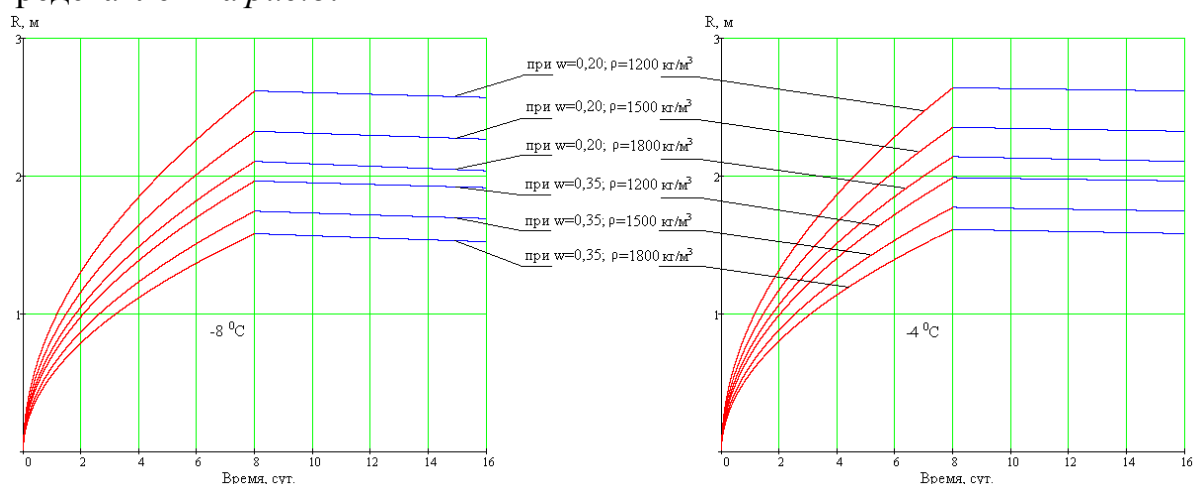


Рисунок 8. Динамика изменения радиуса зоны талого грунта при:

включенном ($0 < t \leq 8$ сут.) и выключенном ($8 < t \leq 16$ сут.) нагревательном процессе

Нижние кривые на рисунке относятся к случаю, когда влажность грунта составляла 0,35, верхние – 0,20. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: во-первых, в соответствии с физикой процесса скорость протаивания главным образом зависит от влажности грунта окружающего нагревательное устройство; во-вторых, величина протаивания практически не зависит от начальной температуры грунта, это объясняется большой мощностью нагревателя; в-третьих, скорость протаивания значительно выше скорости смерзания. Таким образом, для обеспечения нормируемого сопротивления заземляющего устройства в зимне-весенний период от мерзлого грунта в талое достаточно однократного включения электродов-нагревателей.

С целью подтверждения правомерности теоретических разработок была выбрана подстанция мощностью 160 кВА 10/0,4 кВ, питающей экспериментальное хозяйство Ботанического сада Якутского научного центра СО РАН.

Перед началом эксперимента были сняты характеристики грунтовых условий: грунт – суглинок; влажность грунта – 0,35-0,4; сопротивление растеканию тока коаксиального электрода – 960 Ом; удельное сопротивление земли – $12 \cdot 10^5$ Ом·м.

Питание вспомогательного контура заземления из электродов-нагревателей осуществлялось от специально изготовленного трансформатора с напряжением питания 12 В. При этом сопротивление электродов составляло 0,018 Ом. Экспериментальным путем установлено, что коаксиальные электроды-нагреватели представляют собой в основном активную нагрузку с коэффициентом мощности $\cos\varphi=0,95$, мощность электродов составила $P = \frac{U^2 \cdot \cos\varphi}{R_n} = 7,6$ кВт, а установившийся ток

$$I = \frac{U}{R_n} = 666,6 \text{ А.}$$

Нагрев грунта производился в весенний период, когда на поверхности земли образовалась тонкая проводящая пленка. Этот период соответствует времени максимальных удельных сопротивлений грунта и, следовательно, повышенной вероятности поражения обслуживающего персонала электрическим током из-за отказов защитных средств автоматики и релейной защиты. Для создания таликовой зоны в 1,5 м потребовалось 8 суток (192 ч) непрерывной работы вспомогательного контура, связанного гальванически с главным контуром. Потребление электроэнергии на создание данного талика составило $\mathcal{E} = P \cdot t = 7,6 \cdot 192 = 1460$ кВт·ч.

В конце оттайки грунта замерялась температура на расстояниях 0, 30, 50, 100 и 150 см от электродов.

Температурный режим грунта в зоне электронагрева

Расстояние от нагревателя, см	Температура грунта, °С	
	расчетная	экспериментальная
0	85,0	80,2
30	77,5	72,9
50	40,9	36,1
100	28,0	23,3
150	1,30	1,00

Значения температур экспериментальных и расчетных данных приведены в таблице. При этом объем талика составил 18 м³. Сопротивление растеканию тока коаксиального электрода-нагревателя составило 4,2 Ом.

Необходимо отметить, что сопротивление грунта при смерзании и оттаивании носит скачкообразный характер и происходит вблизи 0 °С.

Сходимость расчетных и экспериментальных данных находится в допустимых пределах. Снизить погрешность можно за счет обработки внутренней поверхности наружной трубы (убрать заусенцы на шве сварки) и внутреннего стержня. Таким образом уменьшается изоляционный зазор и повышается эффект нагрева, снижаются потери на разогрев электродов-нагревателей.

Для круглогодичной стабилизации нормированного сопротивления растеканию тока с заземляющего устройства необходимо обеспечить в зимний и зимне-весенний периоды включение системы контроля и управления стабилизирующим устройством. Для достижения данной цели автором предлагаются два решения:

1) для эксплуатируемой подстанции с главным контуром следует в момент полного промерзания деятельного слоя (весенний период) включить вспомогательный контур заземления коаксиальной конструкции и создать таликовую зону, которая обеспечит требуемое сопротивление растеканию тока вплоть до начала естественной оттайки;

2) для новых подстанций с устройством заземления в виде контура из электродов-нагревателей коаксиальной конструкции в момент начала промерзания деятельного слоя (резкого повышения сопротивления растеканию тока) от системы стабилизации подается сигнал на включение источника питания контура. Включение и выключение источника питания, зависят от температуры грунта вокруг электродов-нагревателей, которое контролируется заложенными в грунт термодатчиками.

В технико-экономическом расчете затраты на сооружение контура заземления электродами-нагревателями коаксиальной конструкции в большей степени будут складываться из затрат на изготовление электродов-нагревателей и затрат на специальный трансформатор.

Стоимость одного электрода-нагревателя без учета затрат на изготовление будет определяться длиной, диаметром наружной и внутренней труб, толщиной их стенок и типа изоляционного материала.

Оценочный расчет показал, что сооружение заземляющего контура электродами-нагревателями коаксиальной конструкции взамен вертикальных стальных электродов удорожает затраты в пределах 5%.

Четвертая глава посвящена оценке влияния вертикальной деформации грунта на эксплуатационную надежность работы заземляющих устройств в условиях многолетнемерзлых грунтов.

При промерзании в зимний период времени деформирующих грунтов за счет увеличения их объема, вследствие расширения воды при переходе в твердую фазу, существует реальная угроза деформации и целостности контура заземления, что влечет к разрыву и повышению его сопротивления.

На Севере деятельный слой многолетнемерзлых грунтов достигает 0,2-4 м в зависимости от рельефа местности, экспозиции склонов, растительного покрова, состава грунтов, влагосодержания и других факторов. Глубина заложения контура заземления определяется условиями

протаивания деятельного слоя без учета надежного заземления в мерзлоте, противодействующего силам вертикальной деформации.

Известно, что при замерзании воды в грунте вследствие объемного расширения (увеличение объема воды на 9,1%) возникают внутренние силы, которые перемещают минеральные частицы и изменяют строение грунта. Поскольку промерзание грунта сопровождается увеличением его объема за счет расширения воды при переходе в твердую фазу, в результате чего поверхность земли в зимнее время деформируется (выпирается) на 5-10 см и более. Это явление начинается при температуре от $-0,5 \dots -0,8^{\circ}\text{C}$ и заканчивается при $-3 \dots -5^{\circ}\text{C}$. Интенсивная деформация длится около полутора месяцев. Деформация грунта – процесс, в основном обратимый, но вертикальная деформация контура заземления под влиянием давления льда вверх – процесс накапливаемый, необратимый.

Анализ экспериментальных исследований показал, что наибольшей деформации подверглись объекты, заглубленные на 2 м. Это объясняется тем, что большая часть их длины находилась в деятельном слое, а нижняя часть опиралась на многолетнемерзлые грунты, которые препятствовали просадке при оттаивании деятельного слоя, а заглубленных на 2,5-3 м силам вертикальной деформации препятствовала удерживающая сила смерзания грунта с поверхностью объекта, находящейся в зоне многолетнемерзлых грунтов.

Расчетное минимальное значение глубины заземления электродов в многолетнемерзлый грунт, при которой силы смерзания и деформации равны:

$$h_M = k \cdot \frac{\tau^H \cdot F - N_1^H}{R_{cg}^H \cdot u}, \quad (13)$$

где k – коэффициент однородности грунта; τ^H – нормальное значение касательной силы вертикальной деформации грунта, принимаемое на основании опытных данных, кг/см^2 (при отсутствии опытных данных допускается принимать равным $0,8 \text{ кг/см}^2$ для районов с температурой грунтов ниже -3°C или в зависимости от деформации грунтов для сильной степени – 1,0, для средней – 0,8, для слабой – 0,6); F – площадь боковой поверхности части электрода, находящейся в пределах деятельного слоя, см^2 ; N_1^H – нормативное значение постоянной нагрузки, кг ; R_{cg}^H – нормативное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу по боковой поверхности смерзания для расчетной температуры в середине 1-го слоя многолетнемерзлого грунта; u – среднее значение периметра электрода, см .

Решение проблемы достигается: во-первых, заземлением вертикальных электродов контура заземления в многолетнемерзлый грунт на расчетную величину; во-вторых, использованием контуров заземляющего устройства коаксиальной конструкции с созданием таликовых зон, вокруг которых отсутствуют действия сил вертикальной деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы вносят вклад в решение важной научной проблемы, имеющей большое хозяйственное значение – снижение и круглогодичная стабилизация нормированного сопротивления растеканию тока заземляющих устройств, вмещенных в многолетнемерзлые грунты.

Основные научные и практические результаты, обобщенные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Разработанный метод размещения устройства вспомогательного контура заземления коаксиальной конструкции, как дополнение к главному контуру заземляющего устройства, вмещенному в деятельный слой, решает проблему снижения сопротивления растеканию тока в зимний и в переходный зимне-весенний периоды, когда появляется тонкий, талый высокопроводящий поверхностный слой. При этом основную функцию заземляющего устройства принимает на себя вспомогательный контур заземляющего устройства.

В ходе проведения эксперимента выявлено, что использование электродов-нагревателей коаксиальной конструкции снизило сопротивление растеканию тока с 960 до 4,2 Ом.

2. Предложенное техническое решение стабилизации сопротивления заземляющего устройства с программным управлением температурного режима таликовой зоны вспомогательного контура заземляющего устройства коаксиальной конструкции обеспечивает работу заземления с минимальными эксплуатационными затратами.

3. Предложенная методика расчета с помощью решения осесимметричной нелинейной задачи теплопроводности с учетом фазового перехода влаги, насыщающей грунт методом интегрального теплового баланса, позволяет определить динамику изменения радиуса зоны талого грунта. Определение этой зоны необходимо для минимизации эксплуатационных затрат.

Погрешность между расчетными и экспериментальными величинами температур грунта находится в удовлетворительных пределах. Снизить погрешность можно за счет обработки внутренней поверхности наружной трубы и внутреннего стержня. Таким образом уменьшается изоляционный зазор и повышается эффект нагрева, снижаются потери на разогрев электродов-нагревателей.

4. Техническое решение устройства заземления для передвижных мобильных электроустановок до 1000 В на базе электродов-нагревателей коаксиальной конструкции успешно решает проблему их заземления в условиях многолетнемерзлых грунтов.

5. Метод заложения заземлителей в тонкие высокопроводящие слои следует использовать, когда вынос заземлителя в подосерный или подрусловый талик невозможен или экономически нецелесообразен. Обнаружение тонкого проводящего слоя производится в любое время года по результатам высокочастотных электромагнитных зондирований с

поверхности грунта, позволяющих оперативно получить информацию с малыми затратами. В качестве заземлителей следует применять плоскостные электроды, погружаемые в слой.

6. Метод борьбы с негативным действием сил вертикальной деформации на электроды-заземлители путем заземления расчетной части электродов многолетнемерзлым грунтом обеспечивает долговечность и надежность работы заземляющего контура.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Научная работа, опубликованная в издании, рекомендованном ВАК:

1. **Васильев, П.Ф.** Методы снижения сопротивления растеканию тока в многолетнемерзлых грунтах / В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су, П.Ф. Васильев // Изв. РАН. Энергетика. – М., 2008. – №1. – С. 117–121.

Научные работы, опубликованные в сборниках научных трудов международных и российских конференций:

2. **Васильев, П.Ф.** Способ создания талика для заземления в многолетнемерзлых грунтах / П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су // III Евразийский симпозиум по проблемам энергетики Севера: сб. тр. Ч. II. – Якутск, 2006. – С. 86–91.

3. **Васильев, П.Ф.** Методы снижения сопротивления растеканию тока / П.Ф. Васильев // Актуальные проблемы современной науки: сб. докл. II междунар. форума – Самара, 2006. – С. 5–8.

4. **Васильев, П.Ф.** Методы снижения и стабилизация сопротивления растеканию тока в условиях многолетнемерзлых грунтов / П.Ф. Васильев // Наука на рубеже тысячелетий: сб. докл. III междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2006. – С. 87–89.

5. **Васильев, П.Ф.** Методы расчета параметров коаксиальных нагревателей заземляющих устройств для создания таликовой зоны / П.Ф. Васильев // Проблемы энергоснабжения в условиях Крайнего Севера: сб. докл. конф. – Якутск, 2007. – С. 34–37.

6. **Васильев, П.Ф.** Методы стабилизации сопротивления контура заземления в условиях многолетнемерзлых грунтов / П.Ф. Васильев // Научно-практическая конференция молодых ученых: сб. докл. – Томск, 2007. – С. 20–23.

7. **Васильев, П.Ф.** Метод создания таликовой зоны для заземляющего устройства, вмещенного в многолетнемерзлый грунт / П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су // Математические модели и методы исследования надежности либе-рализованных систем энергетики: сб. докл. междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко. 79-е заседание. – М., 2008. – С. 284–290.

8. **Васильев, П.Ф.** Методы снижения сопротивления заземляющих устройств вмещенных в многолетнемерзлые грунты / П.Ф. Васильев // Форум научной молодежи РС (Я), посвященный 70-летию академика В.П. Ларионова: сб. работ. – Якутск, 2008. – С. 169–174.

9. **Васильев, П.Ф.** Искусственное понижение удельного сопротивления многолетнемерзлых грунтов / П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин, В.А. Седалищев // IV Евразийский симпозиум по проблемам энергетики Севера: сб. тр. Ч. II. – Якутск, 2008. – С. 131–134.

10. **Васильев, П.Ф.** Метод создания таликов для заземляющего устройства, вмещенного в многолетнемерзлый грунт с помощью электрода-заземлителя коаксиальной конструкции / П.Ф. Васильев // Актуальные вопросы современной науки, техники и технологий: сб. материалов II Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2010. – С. 78–80.

11. **Васильев, П.Ф.** Влияние вертикальной деформации грунта на эксплуатационную надежность работы заземляющих устройств / П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // IX международный симпозиум по развитию холодных регионов ISCORD 2010: сб. тр. – Якутск, 2010. – С. 104–106.

12. **Васильев, П.Ф.** Способы заземления передвижных электроустановок в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / П.Ф. Васильев, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су // V Евразийский симпозиум по проблемам энергетики Севера: сб. тр. – Якутск, 2010. – С. 67–69.

13. **Васильев, П.Ф.** Методика расчета заземлителя скин-эффектной конструкции, вмещенного в многолетнемерзлые грунты / П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин, Р.П. Ли-Фир-Су // V Евразийский симпозиум по проблемам энергетики Севера: сб. тр. – Якутск, 2010. – С. 83–86.