

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРОВОЛОКНА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ОТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

М.М. Авдеева, Е.М. Ананьев, О.В. Коровин, С.В. Подвигин

Институт инженерной физики, г. Серпухов, Московская обл., Россия

Статья посвящена обоснованию актуальности защиты воздушной линии электропередач от обледенения и анализу используемых в настоящее время на практике или находящихся на стадии подтверждения эффективности и отработки технологий применения методов устранения льда на проводах. Также в статье в общем виде предложена методика, позволяющая определить оптимальные значения термоэлектроволокна в рамках общей задачи оптимизации воздушной линии электропередач. Результаты оптимизации будут являться основными для формирования требований к термоэлектроволокну при решении проблемы защиты воздушной линии электропередач от обледенения. Использование описанной в статье методики планируется в ходе дальнейших исследований по обоснованию и разработке системы защиты воздушной линии электропередач от обледенения на основе применения термоэлектроволокна.

Ключевые слова: эффективность, система энергоснабжения, термоэлектроволокно, высоковольтные провода, критерии, показатели, методика, обледенение, нагрев, алгоритм.

Введение

Проблема борьбы с обледенением высоковольтных проводов (ВВП) воздушных линий электропередач (ВЛЭП) является важной и актуальной задачей, решаемой в рамках общей задачи по поддержанию эксплуатации и модернизации государственной системы электроснабжения (ГЭС).

Гололёд, то есть плотная ледяная корка, образуется при намерзании на ВВП ВЛЭП переохлажденных капель дождя, мороси или тумана при температуре от 0 до -5 °С в сочетании с высокой влажностью. Толщина гололёда на проводах может достигать 60–70 мм, существенно утяжеляя их. Например, ВВП диаметром 19,6 мм километровой длины имеет массу 846 кг, а при толщине гололёда 20 мм она увеличивается в 3,7 раза, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз, при этом общая масса ВЛЭП из восьми проводов километровой длины возрастает до 25; 60 и 115 т соответственно. Это часто приводит к обрыву ВВП и поломке металлических опор ВЛЭП. Подобные аварии приносят значительный экономический ущерб, а их устранение требует больших временных затрат [1, 2].

Сохранение актуальности рассматриваемой проблемы подтверждает приведенный ниже перечень основных масштабных аварийных происшествий за последние годы, связанных с обледенением ВВП ВЛЭП:

– 25–27 ноября 2013 г. в регионах Центрального федерального округа (Московская, Костромская, Смоленская, Тверская обл.) нарушено энергоснабжение более 100 тыс. жителей, в Дальневосточном федеральном округе (о. Сахалин, Приморский край, Еврейская автономная область) – 28,5 тыс. жителей;

– 21 января 2014 г. в Гиагинском районе республике Адыгея ледяной дождь превратил район в единое хрустальное поле. Сильное обледенение проводов привело к многочисленным порывам и падениям линий электропередач;

– 6 декабря 2015 г. в результате обледенения ЛЭП произошло отключение электричества в ряде населенных пунктов Богградского и Ширинского районов Хакасии, без электроснабжения остались более 4800 человек;

– 8 ноября 2016 г. четырнадцать населенных пунктов обесточены в Истринском районе Московской области из-за обледенения линий электропередачи в результате циклона;

– 12 ноября 2017 г. из-за обледенения поврежден ряд объектов энергоснабжения на западном побережье Сахалина. Обесточены 7 сел в 4 районах, частично – города Макаров, Холмск, Долинск, Томари. В Южно-Сахалинске частично нарушено электроснабжение в 4 районах и в ряде пригородных сел.

Учитывая чрезвычайно тяжелые последствия гололедных аварий, зачастую связанных с угрозой жизни людей и возникновением техногенных катастроф, которые могут привести к дезорганизации электроснабжения целых районов, необходимо принимать эффективные меры по их предотвращению и минимизации последствий.

1. Теоретическая часть и анализ известных методов

В настоящее время используются на практике или находятся на стадии подтверждения эффективности и отработки технологий применения следующие методы устранения обледенения ВВП ВЛЭП.

Механический способ. На небольших участках ВЛЭП производится, как правило, механическое удаление гололеда. Способ один из самых доступных, но требует большого количества времени и значительных трудозатрат [2–5].

Плавка гололеда переменным или постоянным током. Плавка наледи переменным током промышленной частоты получила широкое распространение на ВЛЭП напряжением 6–35 кВ, реже 110 кВ. На линиях более высоких напряжений плавка гололеда производится постоянным током. Основным недостатком данного метода является то, что время, необходимое для плавки гололеда, может достигать полутора часов, и всё время пока производится плавка, линия отключена от потребителей [6].

Колебание проводов за счет силы Ампера. Данный способ основывается на применении силы Ампера, периодически действующей на параллельные провода и вызывающей колебания проводов, следствием которых является разрушение слоя льда. Применение данного способа также основывается на отключении напряжения, хоть и на меньший период, чем в случае применения предыдущего способа [7].

Применение супергидрофобных покрытий. В последнее время широкое распространение получило применение растворов, которые замерзают при температурах значительно более низких, чем вода. Эти жидкости также применяются в дорожном хозяйстве и авиации. Однако срок действия таких «незамерзающих жидкостей» недолог, а регулярно наносить их на сотни и тысячи километров проводов весьма затруднительно. Кроме того, данный способ требует постоянного активного участия персонала, затрат энергии и химических реактивов [8].

Скин-эффект и бегущие волны. Электромагнитные колебания высокой частоты могут распространяться в свободном пространстве (при излучении антенной) и в волноводах, например, в так называемых длинных линиях. Такой длинной линией может служить пара проводов ВЛЭП. Чем больше сопротивление проводов линии, тем большая часть энергии электромагнитного поля бегущей вдоль линии волны преобразуется в тепло. Именно этот эффект и положен в основу нового способа предотвращения гололеда на линиях электропередач.

Вместе с тем практическое применение этого способа требует тщательной проверки эффективности в реальных условиях действующей ВЛЭП с проведением полномасштабных экспериментов и испытаний. В настоящее время рассматриваемый способ находится на этапе проведения лабораторного эксперимента, что не позволяет оценить его эффективность, безопасность и ресурсоемкость [1, 9, 10].

Метод «протонных полупроводников». Виктор Петренко из Дартмутского колледжа (штат

Нью-Гэмпшир, США), предложил новую, оригинальную методику, позволяющую использовать для удаления наледи сам лед. Так, высокочастотные сигналы, передаваемые по ВВП ВЛЭП, приводят к образованию электрического тока в самом слое налипшего льда и его плавлению. В данном методе используются свойства замерзшей воды, которая является одним из немногих естественных материалов, – так называемых «протонных» полупроводников. В обычных полупроводниковых материалах носителем заряда являются электроны, однако во льду их роль играют ионы водорода – протоны. Перемещаясь от молекулы к молекуле, протоны заставляют их колебаться и вращаться, в результате чего изменяются механические свойства льда и происходит его разрушение.

Однако данный способ не до конца изучен, а эффективность его применения в области защиты ВВП ВЛЭП от обледенения должна быть подтверждена экспериментально.

Подводя итог, можно отметить, что каждый из рассмотренных в статье способов защиты ВЛЭП от обледенения обладает как определёнными преимуществами, так и недостатками. Вопрос о выборе оптимального способа защиты необходимо решать в каждом конкретном случае с учётом особенностей местоположения ВЛЭП, географических и климатических условий района и других факторов. Кроме того, определение целесообразности использования определенного метода должно быть обосновано в рамках концепции разработки и модернизации системы ВЛЭП на основе критерия «стоимость/эффективность» [1, 11–18, 20].

Одним из методов защиты ВВП ВЛЭП от обледенения является использование термоэлектроволокна (ТЭВ). При этом возможно два варианта использования ТЭВ: внедрение в конструкцию ВВП ВЛЭП жил ТЭВ (внутреннее размещение, рис. 1) и нанесение ТЭВ на поверхность ВВП (внешнее размещение, рис. 2).

В обоих вариантах в составе системы защиты от обледенения присутствуют метеодатчики (они необходимы для определения «благоприятной» погоды обледенения проводов) и блок питания ТЭВ.

Внутреннее размещение ТЭВ в ВВП обладает следующими недостатками:

- возможность использования только на вновь разрабатываемых ВЛЭП;

- необходимость изменения технологии изготовления ВВП или разработка новой технологии (временные и финансовые затраты, необходимость оборудования новых линий и конвейеров и т. д.);

- необходимость разработки методов устранения возможного «паразитного» взаимовлияния ТЭВ и ВВП;

- невозможность текущего ремонта ТЭВ в случае его обрыва внутри ВВП, и др.

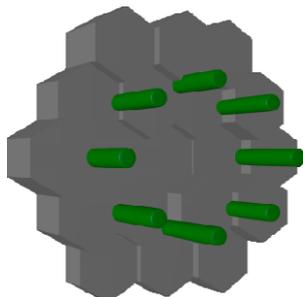


Рис. 1. ТЭВ находится внутри кабеля ВЛЭП (ТЭВ обозначено зеленым цветом)

Относительным достоинством внутреннего размещения ТЭВ является защищенность самого ТЭВ от неблагоприятных факторов внешней среды.

Вариант внешнего размещения ТЭВ на ВВП в основном лишен этих недостатков, кроме того, этот вариант позволяет модернизировать уже эксплуатируемые ВЛЭП, а также обладает высокой ремонтпригодностью (возможность ремонта ТЭВ без вмешательств в конструкцию ВВП).

Далее рассмотрим использование ТЭВ в качестве основного метода борьбы с обледенением ВВП ВЛЭП.

3. Постановка задачи

При обосновании требований к ТЭВ необходимо определить оптимальный вектор варьируемых параметров ТЭВ (\vec{x}_{opt}):

- параметры тока обогрева ТЭВ (диапазон изменения, дискретные оптимальные значения для заданных условий);

- параметры материала ТЭВ, которые, в свою очередь, будут определять электрические и теплофизические параметры ТЭВ (электрическое сопротивление, теплопроводность, температуропроводность, коэффициент рассеяния тепловой энергии, теплоемкость, КПД преобразования электрической энергии в тепловую и т. д.);

- конструктивно-компоновочную схему «ВВП+ТЭВ» (расположение ТЭВ относительно ВВП, шаг намотки, плотность намотки, толщина ТЭВ, относительная длина ТЭВ (по отношению к длине ВВП) и т. д.

При этом выбор оптимальных параметров ТЭВ проводится в ходе решения общей задачи оптимизации ВЛЭП (ТЭВ+ВВП). Исходя из этого, предлагаемая методика позволяет определить оптимальные значения ТЭВ в рамках общей задачи оптимизации ВЛЭП с использованием методики расчета теплоэлектрических параметров ТЭВ, конструктивно-компоновочной модели «ТЭВ+ВВП», методики оценки технико-экономических показателей ТЭВ и выбранного метода оптимизации.

Результаты оптимизации являются основой для формирования требований к ТЭВ при решении проблемы защиты ВЛЭП от обледенения.

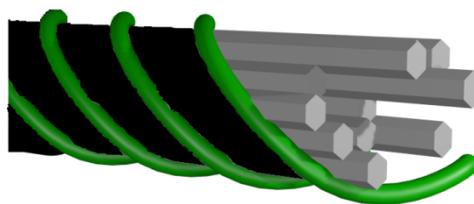


Рис. 2. ТЭВ находится на поверхности ВВП (ТЭВ обозначено зеленым цветом)

4. Практическая часть

Реализация предлагаемой методики (рис. 3) предлагает использование описанного ниже алгоритма.

В блоке 1 выбирается один из трех критериев оптимизации ТЭВ, в зависимости от целевой направленности ее разработки:

- 1) для случая определения области целевого использования ВЛЭП с ТЭВ конечным множеством заданных параметров климатических районов функционирования без учета «резерва превышения» температуры «ТЭВ+ВВП»;

- 2) для случая конечного множества вариантов климатических районов и оценки технико-экономической эффективности системы защиты ВЛЭП от обледенения с учетом реализуемых резервов по тепловой отдаче ТЭВ для каждого из климатических районов;

- 3) для случая одной расчетной задачи по защите ВЛЭП от обледенения и оценки эффективности такой защиты по интегральному показателю теплоэлектрических возможностей ТЭВ в пределах заданного диапазона изменения его конструктивно-компоновочной схемы и токовой нагрузки.

В блоке 2 вводятся исходные данные по расчетным параметрам ТЭВ, отражающие допустимые значения токовых нагрузок на ТЭВ и требуемые уровни нагрева «ТЭВ+ВВП» (задание области требований).

В блоке 3 вводятся исходные данные по климатическим параметрам рассматриваемого географического района (средняя годовая температура, влажность, направление ветра, температура точки росы, среднесуточный градиент изменения температуры и др.).

В блоке 4 выбирается материал ТЭВ из вариантов, подлежащих рассмотрению (возможных вариантов) с характеристиками, определенными физико-химическими и тепловыми свойствами материала.

В блоке 5 задаются ограничения и границы изменения параметров ТЭВ: для непрерывных величин – диапазон изменения (ток, температура и др.); для дискретных величин (признаков, типов, вариантов) – множества возможных значений (тип конструктивно-компоновочной схемы, шаг намотки,

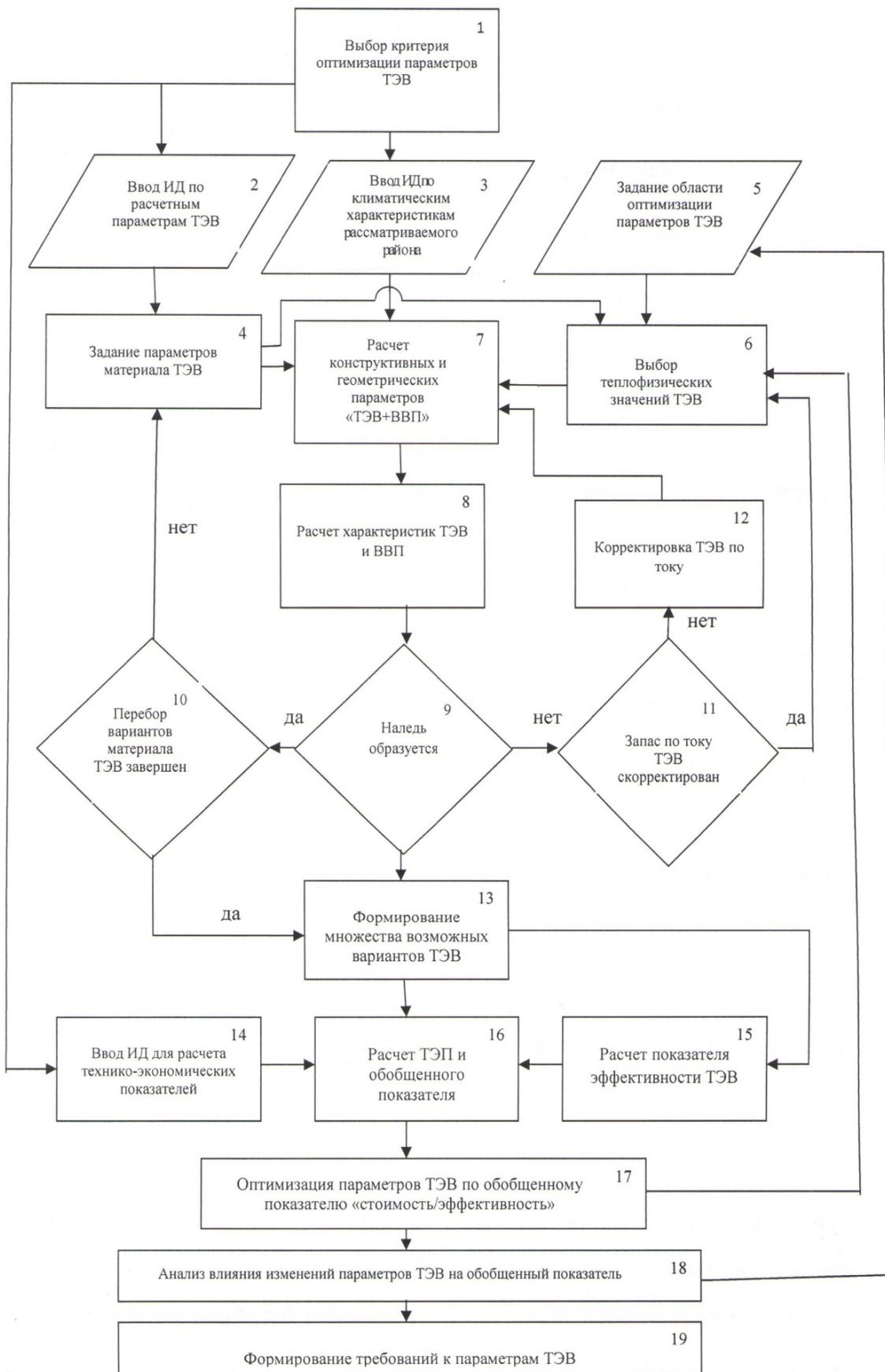


Рис. 3. Методика определения оптимальных параметров ТЭВ для защиты ВВП ВЛЭП

вариант узора намотки и размещения ТЭВ, диаметр нити ТЭВ и др.).

В блоке 6 производится выбор теплофизических значений ($\bar{x}_{0\text{тф}}$) ТЭВ из заданных диапазонов (перечней) возможных значений:

– параметры тока обогрева ТЭВ (диапазон изменения, дискретные оптимальные значения для заданных условий);

– параметры материала ТЭВ, которые, в свою очередь, будут определять электрические и теплофизические параметры ТЭВ (электрическое сопротивление, теплопроводность, температуропроводность, коэффициент рассеяния тепловой энергии, теплоемкость, КПД преобразования электрической энергии в тепловую и т. д.).

В блоке 7 производится расчет конструктивных и геометрических параметров ТЭВ ($\bar{x}_{0\text{кг}}$) для заданных параметров тока обогрева и требуемого значения минимально достаточной температуры нагрева связки «ТЭВ + ВВП».

В блоке 8 проводится расчет параметров «ТЭВ + ВВП» для выбранного материала ТЭВ, его геометрических, конструктивных и теплофизических параметров, заданных (рассчитанных) в блоках 4, 6, 7.

В блоке 9 проверяется возможность образования наледи на ВЛЭП для рассчитанных в блоке 8 параметров. Если образование наледи возможно, то такой вариант ТЭВ не рассматривается и производится выбор следующего материала для ТЭВ. Если наледь не образуется, то проводится попытка оптимизации ТЭВ по току (блок 11, 12) и конструктивно-геометрическим параметрам (блок 7), либо производится выбор следующих значений (\bar{x}_0) ТЭВ из возможных вариантов (блок 6), заданных областью ограничений параметров оптимизации (блок 5). Кроме того, полученное множество значений параметров ТЭВ (\bar{x}), удовлетворяющих условиям поиска, запоминается в блоке 13.

При окончании возможных вариантов материалов для изготовления ТЭВ (блок 10, 4) производится расчет значений показателя эффективности ТЭВ (блок 15) для всех значений параметров (\bar{x}_i), сохраненных в блоке 13.

Далее для отобранных вариантов ТЭВ вводятся исходные данные для расчета технико-экономических показателей (ТЭП) и для каждого из вариантов, определяются значения ТЭП (блок 14) и обобщенного показателя «стоимость/эффективность» (блок 16).

В случае большого количества вариантов, удовлетворяющих условиям и близких по значению обобщенного показателя, проводится попытка дополнительной оптимизации параметров ТЭВ по обобщенному показателю «стоимость/эффективность» (блок 17) путем варьирования параметрами ТЭВ (блок 6, 7). Далее проводится анализ влияния изменения параметров ТЭВ (проверка чувстви-

тельности методики) на значение обобщенного показателя (блок 18) и формируются требования к параметрам ТЭВ (блок 19).

Для решения поставленной задачи, в зависимости от целевой направленности разработки ТЭВ, могут быть использованы, например, следующие частные показатели эффективности [19]:

а) относительный объем ТЭВ к объему ВВП на единицу длины ВЛЭП:

$$\frac{V_{\text{ТЭВ}}(d, h, \rho)}{V_{\text{ВВП}} l}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ТЭВ}}$ – объем теплоэлектропровода;

$V_{\text{ВВП}}$ – объем ВВП;

d – диаметр нити ТЭВ;

h – шаг намотки ТЭВ;

ρ – плотность материала ТЭВ;

l – единица длины ВЛЭП;

б) приращение температуры ВВП на единицу длины:

$$\frac{\Delta t}{l}, \quad (2)$$

где Δt – приращение температуры ВВП;

l – единица длины ВВП;

в) тепловой КПД используемого тока обогрева:

$$\frac{\Delta t}{I \Delta T}, \quad (3)$$

где Δt – приращение температуры ТЭВ;

I – ток обогрева ТЭВ;

ΔT – единица времени,

или другие показатели, наиболее полно и точно отражающие формальные выражения потребной эффективности разработки ТЭВ.

В качестве обобщенного показателя может быть использован классический показатель

$$W = \frac{E}{C},$$

где E – обобщенный показатель эффективности ТЭВ;

C – стоимость реализации ВЛЭП с выбранной конфигурацией «ТЭВ + ВВП», которая, в свою очередь, обобщает $C_{\text{раз}}$ – разработки ТЭВ, $C_{\text{эксп}}$ – эксплуатации ТЭВ, $C_{\text{изгот}}$ – изготовления ТЭВ.

Заключение

Использование описанной в статье методики планируется в ходе дальнейших исследований по обоснованию и разработке системы защиты ВЛЭП от обледенения на основе применения ТЭВ.

Литература

1. Каганов, В.И. Как расплавить лед на проводах ЛЭП / В.И. Каганов // Наука и жизнь. – 2008. – № 8. – С. 116–118.

2. Никитина, И.Э. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи / И.Э. Никитина,

Н.Х. Абдрахманов, С.А. Никитина // *Нефтегазовое дело*. – 2015. – № 3. – С. 794–823. DOI: 10.17122/ogbus-2015-3-794-823

3. Бургсдорф, В.В. Плавка гололеда в электрических сетях как средство эффективного повышения надежности электрических сетей / В.В. Бургсдорф // *Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи: материалы II Всесоюз. совещ.* – Уфа, 1975. – С. 1–6.

4. Рудакова, Р.М. Методы борьбы с гололедом в электрических сетях энергосистем / Р.М. Рудакова, И.В. Вавилова, И.Е. Голубков. – Уфа: УГАТУ, 2005. – 187 с.

5. Дьяков, А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / А.Ф. Дьяков, А.С. Засыпкин, И.И. Левченко. – Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000. – 284 с.

6. Способы предотвращения аварий, вызванных гололедообразованием на проводах и грозозащитных тросах ВЛ / М.К. Гуревич, М.А. Козлова, А.В. Репин, Ю.А. Шершнев // *Известия НИИ постоянного тока*. – СПб.: НИИПТ, 2010. – № 64. – С. 237–249.

7. Бучинский, В.Е. Атлас обледенения проводов / В.Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 114 с.

8. Бойнович, Л.Б. Методы борьбы с обледенением ЛЭП: перспективы и преимущества новых супергидрофобных покрытий / Л.Б. Бойнович, А.М. Емельянов // *Журнал «ЭЛЕКТРО»*. – 2011. – № 6/2011. – С. 9–18.

9. Бучинский, В.Е. Гололед и борьба с ним. – Л.: Гидрометиздат, 1960. – 192 с.

10. Заморский, А.Д. Атмосферный лед / А.Д. Заморский. – М.: АН СССР, 1955. – 377 с.

11. Яворский, Б.М. Справочник по физике /

Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1978. – 944 с.

12. Бажанов, П.И. Отложение мокрого снега на проводах линий электропередачи / П.И. Бажанов // *Электрические станции*. – 1957. – № 10. – С. 60–63.

13. Левченко, И.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И.И. Левченко. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 448 с.

14. Дьяков, А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях / А.Ф. Дьяков. – Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000. – 284 с.

15. Рудакова, Р.М. Борьба с гололедом в электросетевых предприятиях / Р.М. Рудакова. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1995. – 125 с.

16. Пат. 2481684 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для сброса гололедных отложений с проводов / Д.М. Бельый, Г.Ф. Афанасьев. – Опубл. 10.05.2013, Бюл. № 1. – 3 с.

17. Обзор новых технологий в энергетике. Вып. 1. – Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра», 2008. – 11 с.

18. Андреев, Ю.Н. К вопросу о физико-метеорологических условиях образования гололеда / Ю.Н. Андреев // *Труды ГГО*. – 1947. – 2-вып. з. – С. 23.

19. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под ред. И.Г. Арамановича. – Изд. пятое. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

20. Гузаиров, М.Б. Совершенствование систем плавок гололеда на высоковольтных ВЛ / М.Б. Гузаиров, В.А. Максимов, А.Р. Валеев // *Электротехнические комплексы и системы: межвуз. науч. сб.* – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 30–34.

Авдеева Мария Михайловна, инженер, Институт инженерной физики, Московская обл., г. Серпухов; knyazeva_mariya@list.ru.

Ананьев Евгений Михайлович, канд. техн. наук, доцент, почетный работник науки и техники РФ, чл.-корр. АИО, первый вице-президент, первый заместитель генерального директора, Институт инженерной физики, Московская обл., г. Серпухов.

Коровин Олег Вениаминович, канд. техн. наук, доцент, начальник управления, Институт инженерной физики, Московская обл., г. Серпухов; kov67@iifmail.ru.

Подвигин Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт инженерной физики, Московская обл., г. Серпухов; podviginsv@gmail.com.

Поступила в редакцию 15 января 2018 г.

SEARCH ALGORITHM FOR THE OPTIMAL PARAMETERS OF HEAT-ELECTRIC FIBER PROTECTING HIGH VOLTAGE OVERHEAD WIRES AGAINST ICING

M.M. Avdeeva, knyazeva_mariya@list.ru,

E.M. Ananov,

O.V. Korovin, kov67@iifmail.ru,

S.V. Podvigin, podviginsv@gmail.com,

Institute of Engineering Physics, Serpukhov, Moscow Reg., Russian Federation

The article justifies the relevance of anti-icing overhead power transmission lines protection and analyzes the methods of wire deicing, both currently in use and being developed or tested. The article also suggests a general technique that allows establishing the optimal parameters of thermoelectric fibers being a part of a general task of overhead power transmission line optimization. The optimization results shall form the basis for the requirements set for thermo-electrical fibers when solving the problem of overhead power line anti-icing protection. The described technique is planned to be used in the course of further research on the justification and development of the overhead transmission line anti-icing protection with thermo-electric fibers.

Keywords: efficiency, energy supply system, heat-electric fibers, high voltage wires, criteria, focus, technique, icing, heating, algorithm.

References

1. Kaganov V.I. [How to Melt Ice on a Power Line]. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 2008, no. 8, pp. 116–118. (in Russ.)
2. Nikitina I.E., Abdrakhmanov N.Kh., Nikitina S.A. [Methods for Removing Ice from Power Transmission Lines]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2015, no. 3, pp. 794–823. (in Russ.) DOI: 10.17122/ogbus-2015-3-794-823
3. Burgsdorf V.V. [Melting Ice in Electrical Networks as a Means of Efficiently Increasing the Reliability of Electrical Networks]. *Plavka gololeda na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi. Materialy II Vsesoyuzn. Soveshch* [Melting Ice on Overhead Power Lines. Abstracts of the II All-Union. Council], Ufa, 1975, pp. 1–6. (in Russ.)
4. Rudakova R.M., Vavilova I.V., Golubkov I.E. *Metody bor'by s gololedom v elektricheskikh setyakh energosistem* [Methods of Ice Fighting in Electric Grids of Power Systems]. Ufa, UGATU Publ., 2005. 187 p.
5. Dyakov A.F., Zasyplin A.S., Levchenko I.I. *Predotvrashchenie i likvidatsiya gololednykh avariiv v elektricheskikh setyakh energosistem* [Prevention and Elimination of Ice-Related Failures in Power Systems Electrical Networks]. Pyatigorsk, RP “Yuzhenergotekhnadzor” Publ., 2000. 284 p.
6. Gurevich M.K., Kozlova M.A., Repin A.V., Shershnev Yu.A. [Ways to Prevent Accidents Caused by Ice Formation on Wires and Lightning Protection Cables of High-Voltage Lines]. *Izvestiya NII postoyannogo toka* [News of the NII of Direct Current]. Saint Petersburg, NIPT Publ., 2010, no. 64, pp. 237–249. (in Russ.)
7. Buchinskiy V.E. *Atlas obledeneniya provodov* [Atlas of Wires Icing]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 114 p.
8. Boynovich L.B., Emel'yanov A.M. [Methods of Combating Icing of Power Lines: Prospects and Advantages of New Superhydrophobic Coatings]. *Elektro*, 2011, no. 6/2011, pp. 9–18. (in Russ.)
9. Buchinskiy V.E. *Gololed i bor'ba s nim* [Icing and Managing It]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1960. 192 p.
10. Zamorskiy A.D. *Atmosfernyy led* [Atmospheric Ice]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955. 377 p.
11. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 944 p.
12. Bazhanov P.I. [Wet Snow Deposition on Power Transmission Lines]. *Elektricheskie stantsii* [Electric Stations], 1957, no. 10, pp. 60–63. (in Russ.)
13. Levchenko I.I. *Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdushnykh liniy elektroperedachi v gololednykh rayonakh* [Testing, Reconstruction, and Operation of Overhead Transmission Lines in Icy Regions]. Moscow, Izdatelskiy dom MEI Publ., 2007. 448 p.

14. Dyakov A.F. *Predotvrashchenie i likvidatsiya gololednykh avariya v elektricheskikh setyakh* [Prevention and Elimination of Ice-Related Failures in Electrical Networks]. Pyatigorsk, RP “Yuzhenergotekhnadzor” Publ., 2000. 284 p.

15. Rudakova R.M. *Bor'ba s gololedom v elektrosetevykh predpriyatiyakh* [Managing Ice in the Power Grid Enterprises]. Ufa, UGATU Publ., 1995. 125 p.

16. Belyy D.M., Afanas'ev G.F. *Ustroystvo dlya sbrosa gololednykh otlozheniy s provodov* [Ice Removal Device for Wires]. Patent RF, no. 2481684, 2013.

17. *Obzor novykh tekhnologiy v energetike* [Overview of New Technologies in Power Engineering]. Vol. 1. Departament tekhnicheskogo razvitiya OAO “MRSK Tsentra” Publ., 2008. 11 p.

18. Andreev Yu.N. [To the Question of the Physico-Meteorological Conditions for the Ice Formation]. *Trudy GGO* [Proceedings of GGO], 1947, vol. 2, p. 23. (in Russ.)

19. Korn G., Korn T. edited by Aramanovich I.G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya teoremy, formuly. izd. pyatoe* [Handbook on Mathematics for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems, Formulas. fifth ed.]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 831 p.

20. Guzairov M.B., Maksimov V.A., Valeev A.R. [Perfection of Glaze Ice Melting Systems on High-Voltage Overhead Lines]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: mezhvuz. nauchn. sb.* [Electrotechnical Complexes and Systems: Interuniversity. Scientific. Conf.], Ufa, UGATU Publ., 2014, pp. 30–34. (in Russ.)

Received 15 January 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Алгоритм поиска оптимальных параметров термоэлектроволокна для защиты высоковольтных проводов воздушных линий электропередач от обледенения / М.М. Авдеева, Е.М. Ананьев, О.В. Коровин, С.В. Подвигин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 12–19. DOI: 10.14529/power180202

FOR CITATION

Avdeeva M.M., Anan'ev E.M., Korovin O.V., Podvigin S.V. Search Algorithm for the Optimal Parameters of Heat-Electric Fiber Protecting High Voltage Overhead Wires Against Icing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 12–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180202