

УДК 621.3.051.2

К ВОПРОСУ О РАЗРУШЕНИИ ЛЕДЯНОЙ ОБОЛОЧКИ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Кульков В.Г., Фокин Р.А.

Волжский филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Волжский, e-mail: vikulkov@yandex.ru

Образование гололеда на проводах линий электропередач значительно увеличивает их массу. Внешние атмосферные условия являются дополнительным вредным фактором воздействия на работоспособность и целостность конструкции линии. Рассматривается сущность такого природного явления, как обледенение проводов, затрагиваются вопросы, связанные с образованием корки льда и ее ростом. Приводятся сравнительные параметры увеличения массы проводов линии при различной степени обледенения. Обсуждаются различные следствия наличия ледяной оболочки на проводах. Она приводит к возникновению хаотических колебаний и вибраций проводов под воздействием ветра, взаимному замыканию их между собой. Наиболее разрушительным следствием обледенения является обрыв одного или нескольких проводов. Это приводит к потере работоспособности линии. Устранение аварий связано со значительными финансовыми и временными затратами. Рассматриваются существующие методы борьбы с явлением. В работе приводятся статистические сведения о количестве нарушений работоспособности линий на примере Волгоградской области. Обсуждается метод разрушения ледяной оболочки при помощи воздействия на провода силой Ампера. Делается оценка собственной частоты колебаний обледенелого провода. По участку линии протекает ток с частотой, близкой к резонансной. Для того чтобы уменьшить силу сцепления между металлом провода и льдом, по проводу пропускается ток высокой частоты. В результате происходит плавление тонкой оболочки льда.

Ключевые слова: линии электропередач, обледенение, аварийность, резонансная частота, поверхностный эффект

TO THE QUESTION OF THE DESTRUCTION OF THE ICE SHELL OF OVERHEAD POWER LINES WIRES

Kulikov V.G., Fokin R.A.

Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Volzhsky branch, Volzhsky, e-mail: vikulkov@yandex.ru

The formation of ice on the wires of power lines significantly increases their mass. External atmospheric conditions are an additional harmful factor affecting the performance and integrity of the line structure. The essence of such a natural phenomenon as icing of wires is considered, and issues related to the formation of an ice crust and its growth are discussed. Comparative parameters of increasing the mass of line wires at different degrees of icing are given. Various consequences of the presence of an ice shell on the wires are discussed. It leads to chaotic vibrations and vibrations of the wires under the influence of wind, and their mutual closure. The most destructive consequence of glaciation is the breakage of one or more wires. This causes the line to lose its functionality. Elimination of accidents is associated with significant financial and time costs. The existing methods of combating the phenomenon are considered. This paper provides statistical data on the number of line failures in the Volgograd region. The method of breaking the ice shell by applying an ampere force to the wires is discussed. The estimation of the natural frequency of vibrations of the iced wire is made. A current flows along a section of the line with a frequency close to the resonant one. In order to reduce the coupling force between the metal wire and the ice, a high-frequency current is passed through the wire. As a result, the thin ice shell melts.

Keywords: power lines, icing, accident rate, resonant frequency, surface effect

При обледенении проводов происходит снижение прочности, срока службы и безопасности ЛЭП, так как увеличивается их лобовое сопротивление ветру, что может привести к обрывам проводов и повреждению опор. Поэтому вопросы эффективной борьбы с явлением образования льда на проводах являются актуальными [1].

Под обледенением проводов необходимо понимать различные виды твердых осадков: мокрый снег, изморозь, гололед и их сочетания. Мокрый снег при температуре около 0 °С обладает большой липкостью, имеет массовую плотность 0,12–0,3 г/см³. Изморозь – это белый кристаллический непрозрачный осадок с плотностью 0,02–0,3 г/см³, образующийся при температуре -10 – -40 °С. Гололед – это твердый сплошной полупрозрачный осадок с плот-

ностью 0,6–0,9 г/см³, чаще образующийся при дождях и туманах. Толщина гололеда на проводах и грозозащитных тросах может достигать 60–70 мм, существенно их утяжеляя.

Часто для упрощения расчетов полная масса отложения гололеда на проводах представляется в виде полого цилиндра льда с одинаковой со всех сторон толщиной стенки. Например, провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм километровой длины имеет массу 846 кг, при толщине гололеда 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 линии электропередачи из восьми проводов километровой длины возрастает соответственно до 25, 60 и 115 тонн, что приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор [2].

Сущность явления обледенения – это осаждение с последующим замерзанием капель воды на поверхности проводов или налипание мокрого снега при скорости ветра, не превышающей 10–20 м/сек. Обледенение происходит с наветренной стороны проводов, если ветер перпендикулярен ЛЭП, и равномерно по всей длине, если ветер направлен параллельно проводу. В последнем случае гололед менее опасен для ЛЭП, так как имеет более пористую структуру и меньшую плотность.

Гололедно-изморозевые отложения откладываются по фазным проводам очень неравномерно, в результате чего расстояния в провесе проводов с гололедом и без гололеда отличаются на несколько метров.

Обледенение проводов вызывает так называемую пляску проводов, то есть хаотические их колебания с двумя степенями свободы, а также нарушение регулировки проводов и тросов, их обрыв, перекрытие линейной изоляции высоковольтной линии при таянии льда. Эти эффекты вызывают разрушение опор. Подобные аварии приносят значительный экономический ущерб. Длительность их устранения составляет от нескольких часов до нескольких дней. Это требует определенных затрат. По статистике, в энергосистемах по причине гололеда происходит от 6 до 8 крупных аварий в год [3]. В таблице показано общее количество аварийных отключений за 2015–2019 гг. по данным ПАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго», в том числе по причине гололедаообразования. Экономический ущерб по причине образования льда на проводах по тем же данным составил 130, 310 и 90 тыс. руб. за 2017, 2018 и 2019 гг. соответственно.

Целью настоящей работы является анализ существующих методов удаления льда с проводов, а также обоснование нового комбинированного метода.

Материалы и методы исследования

Борьба с обледенением проводов включает в себя комплекс средств. К ним нужно отнести механические, электротермические, физико-химические, термодинамические и электромеханические методы [4].

Простейший механический способ – это сбивание гололедных отложений с помощью длинных шестов с автовышек или земли. Данный способ применяется на не протяженных участках ЛЭП. Для применения данного способа могут использоваться шесты, длинные палки, веревки и другой подручный инструмент. При удалении гололедных отложений без отключения ВЛ необходимо применять шесты из стеклопластика, бакелита и других аналогичных изолирующих материалов.

К механическому способу можно отнести воздействие на отложения гололеда перемещающихся по проводам шнеков, использующих энергию постоянных магнитов, ветра или электромагнитного поля фазного тока ВЛ.

Электротермический способ заключается в предусмотренном заранее подогреве на 10–20 °С проводов ВЛ и непосредственной плавке обледенения на проводах путем нагрева ЛЭП до температуры 120–130 °С.

Физико-химический метод – это нанесение на провода специальных растворов, которые не позволяют каплям воды намерзать на проводах. Данный метод основан на получении покрытий с низкой адгезией к снегу, льду и всем водным средам. Для снижения адгезии используются супергидрофобные покрытия.

При электромеханическом способе удаление льда происходит при пропусках по проводам периодических импульсов тока, имеющих ударно-встряивающий характер, вызывая их колебания и разрушение обледенения при возникновении механического резонанса.

Интенсивность обледенения зависит как от высоты расположения проводов ВЛ, так и от диаметра провода ЛЭП. При увеличении высоты расположения провода увеличивается и толщина образовавшегося гололеда. При увеличении толщины провода уменьшается гололедная муфта и меньше закручивается провод.

Персонал, обслуживающий ЛЭП, в осенне-зимний период должен вести регулярные наблюдения за образованием опасных гололедно-изморозевых отложений и своевременно применять требуемые методы борьбы с ними.

Аварийность на объектах энергетики Волгоградской области

Осенне-зимний период, гг.	Кол-во аварийных отключений по причине гололедаообразования, шт.	Общее количество аварийных отключений, шт.	Доля аварийных отключений по причине гололеда от общего количества, %
2017	26	5680	0,45
2018	80	4751	1,68
2019	78	4500	1,73

Наблюдение за образованием гололеда производят по указанию диспетчера, получающего информацию от метеорологической станции, на специальных гололедных постах, которые ориентированы по розе ветров и расположены на значительном расстоянии от административных построек и жилых домов.

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. В качестве более эффективного метода борьбы с обледенением проводов предлагается комбинированный метод.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод разрушения ледяной оболочки провода линии заключается в последовательном или одновременном расплаве прилежащего к проводу слоя льда и встряхивании ледяной оболочки путем пропускания по параллельным проводам переменного тока определенной частоты с возникновением силы Ампера между ними. Реальная ситуация должна учитывать множество факторов, таких как неоднородность толщины льда вдоль и поперек провода, его рыхлую структуру, условия теплообмена на внутренней и наружной поверхностях ледяной оболочки, движение границы раздела лед-вода при фазовом переходе, состояние окружающей среды и т.д. Остановимся на оценочном расчете времени пропускания высокочастотного тока до появления водяной прослойки и частоты тока встряхивания проводов.

1. Плавление тонкого слоя льда, непосредственно примыкающего к проводу, путем пропускания по нему тока высокой частоты. Известно, что на высоких частотах имеет место поверхностный эффект (скин-эффект). Он заключается в том, что высокочастотный ток вытесняется к поверхности провода так, что реально он протекает в некотором поверхностном слое с эффективной толщиной, зависящей от частоты. Поскольку эффективное сечение проводника уменьшается, его сопротивление растет. В результате оно может во много раз превышать величину, определяемую для постоянного тока. Отношение сопротивлений в этом случае равно

$$\frac{R}{R_0} = \frac{r_0 \sqrt{\omega \mu \gamma}}{2\sqrt{2}}, \quad (1)$$

где R и R_0 – сопротивления переменному и постоянному току, r_0 – радиус провода, ω – частота, μ – магнитная проницаемость материала провода, γ – его удельная проводимость.

Протекание высокочастотного тока с действующим значением I в течение времени τ приводит к выделению джоулевой теплоты

$$Q = RI^2\tau. \quad (2)$$

Это количество теплоты идет на неоднородное нагревание ледяного покрытия, расплавление цилиндрического слоя толщины b , последующее нагревание образовавшейся водяной прослойки. Удельная теплоемкость льда и воды составляет величины соответственно $2,1 \cdot 10^3$ и $4,2 \cdot 10^3$ Дж/кг·К. Удельная теплота плавления льда равна $3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Количество энергии, необходимое для плавления ледяной прослойки можно определить по формуле

$$Q_1 = \lambda m_1, \quad (3)$$

где λ – удельная теплота плавления льда, m_1 – масса расплавленной ледяной прослойки. Нагрев льда от начальной температуры окружающего воздуха ($-30 - -10^\circ\text{C}$) до температуры плавления Δt_2 требует количество энергии

$$Q_2 = Kmc_2\Delta t_2. \quad (4)$$

Здесь m – первоначальная масса ледяной оболочки, c_1 – удельная теплоемкость льда, $K \ll 1$ – коэффициент, учитывающий неравномерность радиального нагрева. Считаем, что температура внешней поверхности льда не изменяется. Количество энергии, необходимое для нагрева полученной воды, рассчитывается по аналогичной формуле с параметрами, характерными для воды.

Принимая во внимание соотношение величин энергии (3) и (4), можно пренебречь величинами (4) для водяной прослойки и ледяного панциря по сравнению с (3). Тогда затрата энергии на получение водяной прослойки и нагрев провода до температуры плавления льда составляет

$$Q = \pi \lambda \rho_2 l \left((r_0 + b)^2 - r_0^2 \right) + \pi r_0^2 l \rho_{me} c_{me} \Delta t_{me}, \quad (5)$$

где ρ_2 – массовая плотность льда, l – длина провода, приближенно равная расстоянию между опорами, b – толщина водяной прослойки. Во втором слагаемом индексы величин означают, что они относятся к металлу проводов. Учитывая высокую теплопроводность металла, можно считать, что его нагрев также происходит от температуры окружающего воздуха до температуры водяной прослойки. Тогда $\Delta t_{me} = \Delta t_2$. Пренебрегая, подобно тому, как это было сделано выше, вторым слагаемым в (5), а также считая $b \ll r_0$, можно записать (5) в виде:

$$Q = 2\pi \lambda \rho_2 l r_0 b. \quad (6)$$

Подставляя R из (1) в (2) и приравнявая затем к (5) с учетом указанного приближения, получаем время пропускания высокочастотного тока.

$$\tau = \frac{2\sqrt{2}\pi l}{I^2 R_0 \sqrt{\omega \mu}} (2\lambda \rho_2 b + r_0 \rho_{me} c_{me} \Delta t_2). \quad (7)$$

Электрическое сопротивление провода постоянному току можно записать как

$$R_0 = \frac{l}{\pi r_0^2 \gamma}. \quad (8)$$

Подстановка этого выражения в (7) дает

$$\tau = \frac{2\pi^2 r_0^2}{I^2} \sqrt{\frac{2\gamma}{\omega \mu}} (2\lambda \rho_2 b + r_0 \rho_{me} c_{me} \Delta t_2). \quad (9)$$

Если воспользоваться приближением (6), то

$$\tau = \frac{4\pi^2 \lambda \rho_2 b r_0^2}{I^2} \sqrt{\frac{2\gamma}{\omega \mu}}. \quad (10)$$

2. Разрушение ледяного слоя путем пропускания по проводу низкочастотного тока резонансной частоты. Провод с ледяной оболочкой, расположенный между двумя соседними опорами линии электропередачи, подобен натянутой струне с закрепленными концами. Наименьшая собственная частота колебаний провода в этих условиях определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\rho'}}, \quad (11)$$

где T – сила натяжения провода, ρ' – эффективная линейная массовая плотность обледенелого провода с учетом водяной прослойки. Последнюю величину нетрудно найти:

$$\rho' = \pi \left(B^2 - (r_0 + b)^2 \right) \rho_2 + 2\pi b r_0 \rho_1 + \pi r_0^2 \rho_{me}. \quad (12)$$

Здесь B – внешний радиус ледяного цилиндра, ρ_1 и ρ_{me} – массовая плотность воды и металла провода. С учетом соотношения $b \ll r_0$ выражение (12) можно записать в виде

$$\rho' = \pi \left(B^2 \rho_2 + 2r_0 b (\rho_1 - \rho_2) + r_0^2 \rho_{me} \right). \quad (13)$$

Тогда частота подаваемого переменного тока для сбрасывания ледяной оболочки равна

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \left(\frac{T}{\pi l^2 \left(B^2 \rho_2 + 2r_0 b (\rho_1 - \rho_2) + r_0^2 \rho_{me} \right)} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Следует заметить, что теоретические оценки собственной частоты колебаний провода не могут быть произведены с приемлемой степенью точности. Дело в том, что толщина слоя льда не одинакова вдоль провода, кроме того, его форма не является цилиндрической. Колебания провода имеют составляющие в двух плоскостях, и на процесс оказывают значительное воздействие окружающие провод воздушные массы. В работе [5] предлагается вводить коэффициент, учитывающий изменение собственной частоты колебаний провода с намерзшим на нем льдом относительно собственной частоты колебаний провода безо льда. Согласно этой работе, расчетная величина такого коэффициента близка к единице. Более надежным является экспериментальное определение собственной частоты, которая зависит от параметров линии и может составлять 0,5–1 Гц.

Для того чтобы осуществлять эффективное воздействие на ледяную оболочку провода, рекомендуется использовать генератор с плавно изменяющейся частотой в пределах 0,2–3 Гц и подбирать частоту непосредственно на данном участке линии. При этом судить об эффективности воздействия можно визуально.

Для возникновения резонансных колебаний необходимо замкнуть конец линии и по двум проводам образовавшегося контура, состоящего из двух параллельных проводников, пропустить достаточной величины ток с частотой, равной половине собственной частоты колебаний системы. В этом случае под действием силы Ампера, возникающей при взаимодействии противоположно направленных токов, провода будут отталкиваться с частотой в два раза большей частоты тока. Это происходит потому, что независимо от направления тока в одном из проводов в другом протекает ток противоположного направления, а значит, они всегда отталкиваются. Амплитуда силы взаимодействия токов на единицу длины равна

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2}{\pi a}, \quad (15)$$

где a – расстояние между проводами, μ_0 – магнитная постоянная.

Предварительное оплавление прослойки льда существенно уменьшает его сцепление с металлом провода, что облегчает его последующее отделение после встряски. Кроме того, неравномерный прогрев нерасплавленной ледяной оболочки приводит к неоднородному напряженному состоянию с повышенной концентрацией механических напряжений вблизи внутренней его части. Это увеличивает вероятность зарождения внутренней трещины, благодаря которой инициируется разрушение ледяной оболочки при резонансных колебаниях проводов.

Разрушение ледяной оболочки проводов импульсным током описано в ряде работ, например в [5; 6]. В них предлагается пропускать импульсный ток, что приводит к резкому встряхиванию проводов. Использование синусоидального тока с предварительным или одновременным проплавлением прилегающего слоя является методом, при котором уменьшается вероятность обрыва провода импульсным воздействием силы.

Выводы

1. Гололедно-изморозевые отложения на проводах линий электропередач представляют серьезную опасность для их работоспособности и целостности.

2. Разрушение ледяной оболочки можно производить воздействием силы Ампера при пропускании электрического тока по проводам линии. При этом для уменьшения сцепления металла провода со льдом можно предварительно пропустить ток высокой частоты.

Список литературы

1. Левченко И.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 494 с.
2. Никитина И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитина С.А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2015. № 3. С. 794–823.
3. Костин В.Н. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения. СПб.: СЗТУ, 2004. 184 с.
4. Фокин Р.А., Кульков В.Г. Проблема борьбы с обледенением линий электропередачи // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции (Камышин, 15 ноября 2019 г.) В 3 т.; Т. 1. Волгоград: Издательство ВолгГТУ, 2019. С. 153–156.
5. Сухоруков С.И., Соловьев В.А., Черный С.П., Савельев Д.О. К вопросу определения текущей частоты импульсов при удалении гололеда с проводов линий электропередач электродинамическим способом // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. № 2. С. 10–12.
6. Сухоруков С.И., Орлов Д.А., Соловьев В.А., Козин В.М. Способ удаления гололеда с проводов линий электропередач // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 54–56.