

АННОТАЦИЯ

Проведён анализ и выявлены основные причины повышенной гололёдной аварийности ЛЭП. Исследована и сформулирована задача снижения воздействия указанного вредного фактора на надёжность работы электрических сетей. Предложены методы уточнённого расчёта удельных нагрузок на провода ЛЭП и варианты практического решения задачи снижения аварийности ВЛ в период образования гололёда.

ANNOTATION

The analysis has been carried out and the reasons of the higher than normal ice loading accident risk of Power Lines have been brought into sharp focus. The task of the reducing of the impact of the mentioned hazardous factor on the reliability operation of the electrical network has been studied and formulated. Methods of refined design calculation of specific load on the Power Lines wire and variants of practical solution of the task of the reducing of the accident risk of HV line during periods of ice loading formation have been set forward.

Гололёдные аварии на ЛЭП — причины появления и способы предотвращения

М. И. Фурсанов, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические системы», **А. А. Фарино**, аспирант кафедры «Электрические системы», БНТУ
П. С. Горудко, главный инженер филиала «Молодеченские электрические сети», РУП «Минскэнерго»

Линии электропередачи (ЛЭП) являются важным звеном электроэнергетической системы и предназначены для транспортировки электроэнергии от её источников к потребителям. Безотказность и надёжность работы линий и подстанций — важнейшие показатели работы электроэнергетики. В рамках энергетического кольца Беларусь—Россия—Эстония—Латвия—Литва (БРЭЛЛ) при помощи ЛЭП обеспечиваются прямые и обратные поставки электрической энергии между государствами и регионами в случаях крупных внутрисистемных аварий. Поэтому исправное состояние ЛЭП является актуальной задачей каждого государства - участника БРЭЛЛ.

Воздушные линии (ВЛ) являются ответственным и в то же время наиболее уязвимым элементом электроэнергетической системы. Повреждение и аварийное отключение ВЛ приводит к значительному ущербу как для сетевых организаций, так и для потребителей. Наиболее тяжёлые и трудноустраняемые аварии на ВЛ — гололёдные, вызванные образованием гололёдно-изморозевых отложений (ГИО) на проводах, что в сочетании с ветровыми нагрузками является причиной обрыва проводов, поломки трансформаторов и опор ЛЭП. За последние 15 лет гололёд на

высоковольтных линиях стал возникать всё чаще. При небольшом морозе, в условиях мягкой зимы, на проводах может образовываться плотная ледяная «шуба» весом в несколько тонн на участке в один километр.

Часто при образовании гололёда на ЛЭП при длительных порывах ветра провода вступают в процесс резонансной «пляски». При этом отложения льда наблюдаются преимущественно с подветренной стороны, вследствие чего провод получает неправильную форму. При воздействии ветра на провод с односторонним гололёдом скорость воздушного потока в верхней части увеличивается, а давление уменьшается. В результате возникает подъёмная сила, вызывающая «пляску проводов» [5, 19].

«Пляска проводов», возбуждаемая ветром, характеризуется большой амплитудой, достигающей 12–14 м, и большой длиной волны, равной длине межопорного пролёта линии. При таких колебаниях фактические нагрузки на конструктивные элементы ВЛ могут значительно превышать расчётные, что способно вызвать повреждения линии.

Длительное воздействие больших амплитудных колебаний на провода в местах подвески приводит к их обрыву. Это вызывает резкое увеличение одностороннего редуцированного тяжения на промежуточные опоры, которые не выдерживают возросших механических нагрузок и разрушаются (рис. 1).

Вследствие недопоставки электроэнергии подобные аварии приносят значительный экономический

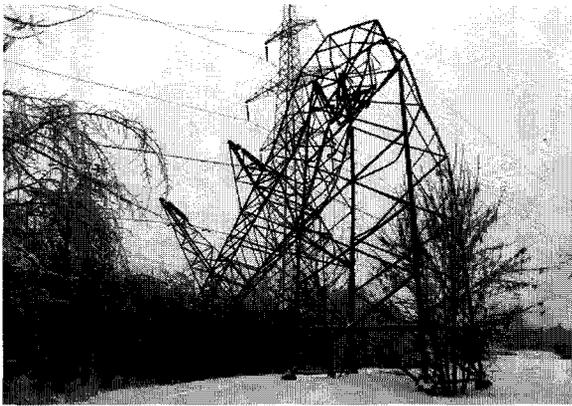


Рис. 1. Разрушенная опора ЛЭП в результате действия гололёда

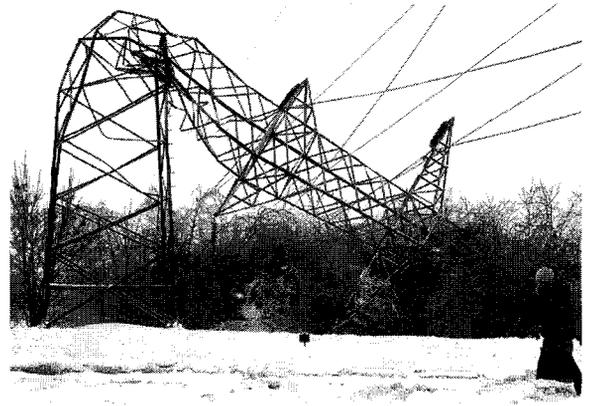


Рис. 2. Разрушенная опора ЛЭП вблизи населённой местности

ущерб, на их устранение уходит достаточно много времени и затрачиваются огромные средства. Кроме этого, такие аварии являются опасными для жителей населённых пунктов. В качестве примера на рис. 2 показана опора ЛЭП, упавшая вблизи населённой местности.

По материалам ОАО «ОРГРЭС», крупные аварии из-за гололёда за период с 1971 по 2001 гг. многократно происходили в 44 энергосистемах России. Только одна авария в сочинских электросетях в декабре 2001 г. привела к повреждению 2,5 тыс. км ВЛ напряжением до 220 кВ и прекращению электроснабжения огромного региона [13].

Очень интенсивное образование гололёда произошло в Канаде в январе 1998 г., когда в течение более 80 часов подряд на территории площадью в несколько тысяч квадратных километров шёл непрерывный «ледяной» дождь [6]. Из-за большого веса льда, наростшего на проводах, были оборваны многие линии высокого напряжения и разрушено около 1 000 опор ЛЭП. В результате более 4 млн жителей несколько дней оставались без электричества, а общий экономический ущерб превысил 5 млрд долларов.

Известно много примеров масштабного нарушения энергоснабжения по причине гололёда на территории стран Северной Европы, Поволжья России, Китая. Таким образом, борьба с обледенением проводов ВЛ является поистине глобальной проблемой, актуальной для многих стран, имеющих регионы с высокой влажностью и пониженными температурами воздуха.

Как следует из обзора публикаций [3, 7, 10, 11, 12, 18], гололёдные аварии на ВЛ имеют массовый

характер и наносят большой экономический ущерб, что является серьёзной проблемой и важной задачей для энергетики.

Для правильного решения этой задачи необходим углублённый анализ причин возникновения гололёдных аварий на ЛЭП с дальнейшей разработкой и внедрением оптимальных способов и методов их предотвращения.

Проанализируем вначале процесс образования гололёда и изморози вблизи поверхности земли. Выявлено, что в случаях, когда в околосземном слое температура воздуха близка к нулю, а на высоте до 1,5 км выше нуля, то осадки выпадают в виде дождя, а не снега. Капли дождя на поверхности земли соприкасаются с переохлаждёнными предметами и замерзают (в том числе и на проводах ВЛ). В результате образуется ледяная корка, именуемая гололёдом. Синоптиками доказано, что такое явление наблюдается при температуре воздуха вблизи поверхности земли от +3 до -4 °С [5].

Обычно при гололёде в воздушном слое высотой около 1,5 км наблюдается почти стопроцентная относительная влажность воздуха. В этом случае начинается процесс лавинообразного роста наледи, который продолжается в течение всего времени выпадения переохлаждённых осадков. Отложившийся гололёд значительно увеличивает массу проводов и может сохраняться на них много суток, что является потенциальной опасностью для возникновения аварий [12, 19].

Кроме гололёда, на воздушных ЛЭП может возникнуть зернистая изморозь в виде снеговидного и рыхлого льда, которая также образуется в туманную и ветреную погоду. Изморозь налипает на провода и может нарастать довольно долго, причём толщи-

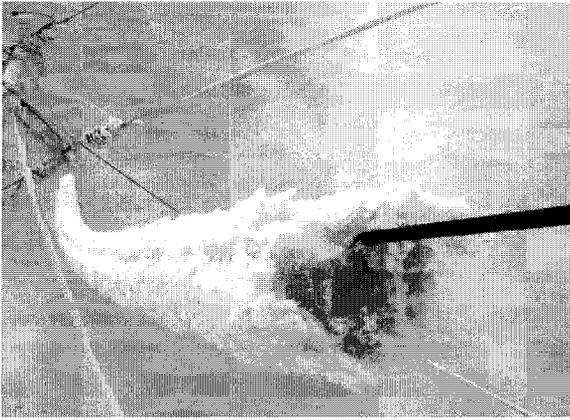


Рис. 3. Слой изморози и льда на проводах ВЛ



Рис. 4. Удаление гололёдно-изморозевых отложений с проводов ВЛ вручную

на слоя также может достигать десятков сантиметров [5] (рис. 3).

На рис. 3 видна большая разница между диаметром провода и толщиной налипшей на нём изморози, а на рис. 4 — что диаметр образовавшегося на проводах гололёда и снега соизмерим с размерами снегохода и фигуры человека.

После образования гололёда и изморози на проводах ВЛ холодный атмосферный фронт зачастую меняется на более тёплый, что сопровождается порывистыми движениями воздушных масс, аэродинамическое воздействие которых на провода приводит их в состояние «резонансной пляски». Данные природные явления в совокупности и вызывают гололёдные аварии в электрических системах [12].

К опасным регионам с точки зрения образования ГИО на проводах ВЛ относят Дальний Восток, Сахалин, Север и Северо-Запад России, а также Урал, Поволжье и Северный Кавказ. В последнее время стали наблюдаться крупные гололёдные аварии на ВЛ в районах средней полосы и Юга России, на всей территории Беларуси, а также в ряде стран Северной и Центральной Европы, где образование гололёда считалось раньше маловероятным.

Таким образом, можно утверждать, что гололёдные аварии на ВЛ непосредственно связаны с глобальным потеплением климата. В условиях «лёгкой» зимы происходит повышенное образование гололёда на проводах и достаточно часто меняются атмосферные фронты, которые сопровождаются сильными порывами ветра.

Углублённый анализ и оценка существующей методики определения удельных нагрузок конструк-

тивных элементов ВЛ показывает вероятность наличия ошибок в проводимых расчётах.

По методике [21] удельные нагрузки на провода определяют следующим образом:

- ♦ нагрузка от собственного веса провода Y_1 :

$$Y_1 = \frac{G_0 g}{F}, \quad (1)$$

где G_0 — масса провода, кг;

g — ускорение свободного падения, m/c^2 ;

F — площадь поперечного сечения провода, mm^2 ;

- ♦ нагрузка Y_2 от веса гололёда определяется из условий, что отложения гололёда на проводах имеют цилиндрическую форму и плотность $g_0 = 0,9 \text{ г/см}^3$:

$$Y_2 = \frac{\pi b(d+b)g_0 g}{F}, \quad (2)$$

где d — диаметр провода, mm ;

b — толщина стенки гололёда, зависящая от климатического района по гололёду, mm ;

- ♦ нагрузка от собственного веса провода и гололёда Y_3 определяется по формуле:

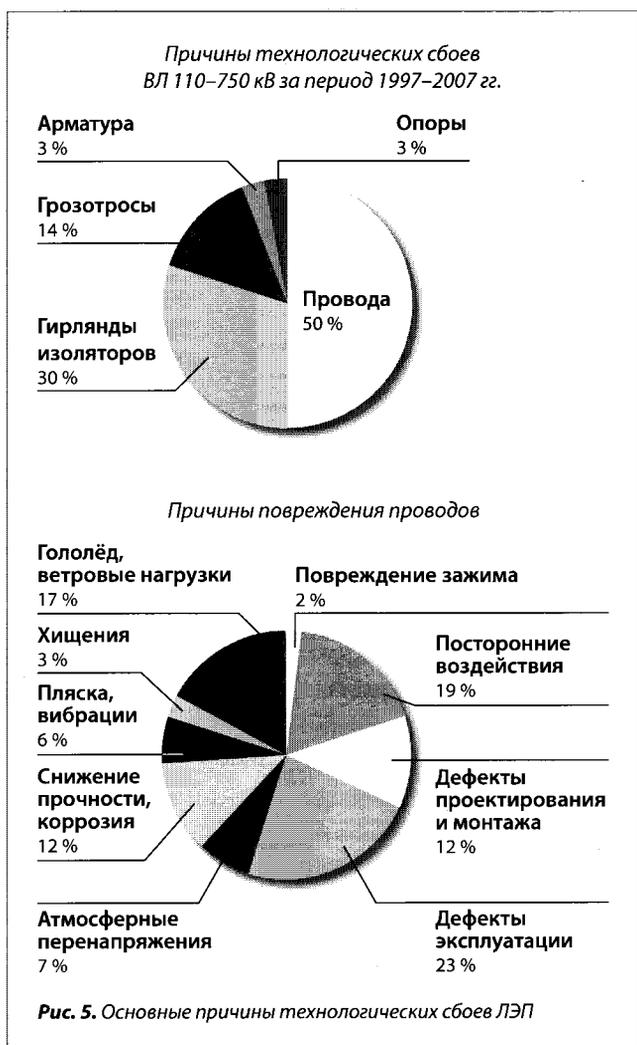
$$Y_3 = Y_1 + Y_2; \quad (3)$$

- ♦ ветровая нагрузка без гололёда Y_4 определяется по выражению:

$$Y_4 = \frac{\alpha C_x dq \sin \phi}{F}, \quad (4)$$

где ϕ — угол между направлением ветра и проводами, принимают $\phi = 90^\circ$;

q — скоростной напор ветра, Pa ;



Как говорилось выше, в условиях более тёплой зимы происходит повышенное образование гололёда на проводах ВЛ, а форма наледи изменяется с цилиндрической на продолговато-эллиптическую, что увеличивает «парусность» проводов [5,19]. Эти явления влекут за собой увеличение амплитуды колебаний и момента инерции проводов в условиях «резонансной пляски», что приводит к их обрыву в зажимных элементах крепления к опорам.

Исходя из проведённого анализа следует, что методика расчёта удельных нагрузок на провода, основанная на формулах (1)–(7) [21] требует уточнений, так как суммарная расчётная нагрузка Y_7 от веса покрытого льдом провода при длительных порывах ветра значительно ниже фактической.

Очевидно, что нагрузка Y_2 от веса гололёда должна определяться с учётом повышенного гололёдообразования на проводах, а ветровую нагрузку Y_5 при наличии гололёда нужно рассчитывать с учётом повышенной парусности обледенелых проводов по причине эллиптической поверхности наледи.

Поэтому в каждом случае для уточнённого расчёта необходимо применять дополнительные повышающие коэффициенты, а именно:

- ♦ массовый коэффициент k_m при определении нагрузки Y_2 ;
- ♦ коэффициент формы k_f для определения нагрузки Y_5 .

Диапазон рекомендуемых коэффициентов находится в пределах 1,3–1,5. Точное значение коэффициентов k_m и k_f определяется лабораторным либо эмпирическим путём.

В конечном итоге формулы (2) и (5) имеют следующий вид:

$$Y_2 = \frac{k_m \pi b(d+b)g_0 g}{F}, \quad (8)$$

$$Y_5 = \frac{k_f \alpha C_x (d+2b) \cdot q \sin \varphi}{F}. \quad (9)$$

Необходимость в проведении уточняющего расчёта удельных нагрузок для проводов ЛЭП подтверждает диаграмма надёжности [9], изображённая на рис. 5, из которой видно, что основной причиной технологических сбоев ВЛ является обрыв проводов из-за гололёдно-ветровых нагрузок и дефектов эксплуатации.

Первый вариант заключается в использовании уточняющих (повышающих) коэффициентов для определения расчётных нагрузок на конструктивные элементы при проектировании ВЛ, что обеспечит применение более прочных конструкций элементов линии.

C_x — аэродинамический коэффициент, который принимают в пределах 1,1–1,2 в зависимости от диаметра проводов;

α — коэффициент неравномерности ветра по длине пролёта, находится в пределах 1,0–0,7 [20];

- ♦ ветровая нагрузка Y_5 при наличии гололёда рассчитывается с учётом увеличения площади поверхности провода из-за гололёда:

$$Y_5 = \frac{\alpha C_x (d+2b) \cdot q \sin \varphi}{F}; \quad (5)$$

- ♦ нагрузка Y_6 от веса провода и давления ветра (без гололёда) определяется как:

$$Y_6 = \sqrt{Y_1^2 + Y_4^2}; \quad (6)$$

- ♦ суммарная нагрузка Y_7 от веса провода, гололёда и давления ветра равна:

$$Y_7 = \sqrt{Y_3^2 + Y_5^2}. \quad (7)$$

Вторым вариантом решения задачи уменьшения количества гололёдных аварий (на уже эксплуатирующихся) ЛЭП может быть использование эффективных методов ликвидации гололёда на проводах [1, 2, 4], [15–17], [22].

Первый вариант рекомендуется использовать при проектировании строительства новых ЛЭП и реконструкции действующих. Такой способ предотвращения гололёдных аварий выступает прототипом современной методики проектирования новых ЛЭП, предусматривающей внесение изменений в ПУЭ районов по «гололёду» и «ветру», обоснованных данными синоптиков.

Второй вариант решения антигололёдной задачи, как более простой и эффективный, необходимо использовать для ВЛ, сооружённых более 20 лет назад для работы в условиях более холодного климата.

Выводы

Одним из способов обеспечения надёжной работы электроэнергетики является решение глобальной проблемы гололёдных аварий на воздушных ЛЭП с тяжёлыми технико-экономическими последствиями для электросетевых организаций.

Возможны два варианта решения антигололёдной задачи:

- ♦ методом перехода на применение более прочных конструкций элементов линии путём изменения расчётных нагрузок на конструктивные элементы при проектировании ВЛ;
- ♦ путём использования эффективных методов ликвидации гололёда на проводах ВЛ. ЭИМ

Литература

1. Айзенберг, Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг. — М.: Радио и связь, 1962. — 21 с.
2. Бир, С.Н. Кибернетика и управление производством / С.Н. Бир. — М.: Наука, 2010. — 237 с.
3. Вавилова, И.В. Борьба с гололёдом в электросетевых предприятиях / И.В. Вавилова, И.Е. Голубков, Р.М. Рудакова. — Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1995. — 194 с.
4. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии. Учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. — Ростов-н/Д.: Издательские проекты, 2006. — 720 с.
5. Глухов, В.Г. Метеорологические условия образования гололёда на высотных сооружениях / В.Г. Глухов. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 100 с.

6. Гололёд 1998 года в Северной Америке [Электронный ресурс] — Режим доступа: ru.wikipedia.org/wiki/. — Дата доступа: 10.04.2017.

7. Губаев, Д. Ф. Обнаружение гололёда на линиях электропередачи локационным методом : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.2013 / Д. Ф. Губаев. — Казань, 2009. — 186 л.

8. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах / И.И. Левченко [и др.]. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 235 с.

9. Диаграмма надёжности ЛЭП [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.simross.ru/>. — Дата доступа: 10.04.2017.

10. Дьяков, А. Ф. Опыт борьбы с гололёдом на линиях электропередачи / А. Ф. Дьяков // Электр. станц. — 1982. — № 1. — С. 50–54.

11. Дьяков, А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололёдных аварий в электрических сетях / А. Ф. Дьяков. — Пятигорск: Южэнерготехнадзор, 2000. — 284 с.

12. Дьяков, А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололёдных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 160 с.

13. Кавказский Узел. Лента новостей Кавказа. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.kavkaz-uzel.eu/>. — Дата доступа: 10.04.2017.

14. Каганов, В.И. Борьба с гололёдом в линиях электропередачи с помощью высокочастотной электромагнитной волны / В.И. Каганов // Электро. — 2010. — № 5. — С. 41–45.

15. Каганов, В.И. Колебания и волны в природе и технике. Компьютеризированный курс / В.И. Каганов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2008. — № 2. — С. 8–26.

16. Каганов, В.И. Нагрев проводов электрических сетей с помощью высокочастотной электромагнитной волны для борьбы с гололёдом / В.И. Каганов // Электро. — 2012. — № 3. — С. 21–25.

17. Как расплавить лёд на проводах ЛЭП. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.nkj.ru/archive/articles/14553/>. — Дата доступа: 10.04.2017.

18. Маграттен, Г. Переходные токи и переходные напряжения / Г. Маграттен // Нов. энергетика. — 2004. — № 6. — С. 69, 70.

19. Об интенсивности обледенения проводов разного диаметра: сб. тр. / ГПО: В.Г. Глухов. — 1973. — Вып. 303. — С. 11–23.

20. Правила устройства электроустановок. 6-е издание, доп. с исправлениями. — М.: Госэнергонадзор, 2000. — 702 с.

21. Поспелов, Г.Е. Электрические системы и сети / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычёв. — Мн.: УП Технопринт, 2004. — 711 с.

22. Тамм, И.Е. Основы теории электричества. — М.: ГИТТЛ, 1956. — 271 с.