

Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи локационным зондированием как средство предотвращения аварий и экономических потерь в электрических сетях

А.С. Минкин,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет (e-mail: cntnur_mn@mail.ru)

Аннотация. В статье представлены данные об аварийности в электрических сетях от различного вида причин. Рассматриваются повреждения, которые могут вызваться гололедно-изморозевыми отложениями на проводах, которые являются наиболее тяжелыми и наносящими серьезный экономический ущерб. Описан метод мониторинга состояния воздушных линий электропередачи – метод локационного зондирования, который позволяет обнаруживать и контролировать гололед на проводах.

Abstract. The article presents data on accidents in electric networks from various types of causes. The damage that can be caused by ice and frost deposits on wires, which are the most severe and causing serious economic damage, is considered. A method for monitoring the condition of overhead power lines is described - a method of location sensing, which allows detecting and controlling ice on wires.

Ключевые слова: электрические сети, линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, плавка гололеда, локационный комплекс, толщина стенки гололеда, мониторинг, экономический ущерб.

Keywords: electrical networks, power line, ice and frost deposits, ice melting, location complex, ice wall thickness, monitoring, economic damage.

Аварийность в электроэнергетике является причиной недопоставки электрической энергии и приносит ощутимый ущерб как поставщикам, так и потребителям электрической энергии. Кроме того некоторые аварийные ситуации приводят не только временным к отключениям, но и выводят из строя элементы электроэнергетической структуры, на восстановление которых требуются серьезные материальные и временные затраты. По данным о количестве отключений, объеме недопоставленной электроэнергии и экономическом ущербе в ПАО «ФСК ЕЭС» за 2021 год количество аварийных отключений составило

более одной тысячи, а экономический ущерб превысил более 338 млн.рублей [1]. Ниже на диаграмме (рис.1) по данным ПАО «Россети» приведены причины аварийных отключений сети напряжением 110 кВ и выше в 2022 году [2]. Аварийные отключения, перерывы в электроснабжении потребителей приводят к потерям, которые состоят из прямых потерь, социально-экономических потерь, экологического ущерба, косвенных потерь [3]. Поэтому обеспечение безопасных и надежных поставок энергоресурсов является залогом избежания этих потерь.

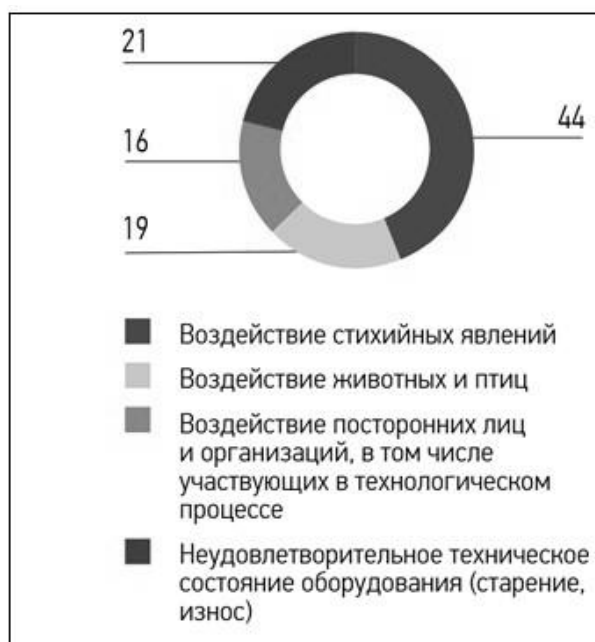


Рис. 1. Основные причины технологических нарушений по электрическим сетям 110 кВ и выше в % за 2022 по данным ПАО «Россети»

Как видно из диаграммы, причиной наибольших нарушений электрических сетей 110 кВ и выше является воздействие стихийных явлений – это воздействие грозových разрядов, ветровых нагрузок, гололедно-изморозевых отложений и т.д.

Из стихийных воздействий на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) наиболее серьезными и трудно устранимыми повреждениями являются аварии из-за образования гололедно-изморозевых отложений на её элементах. Такие аварии имеют массовый характер, и сопровождаются обрывом фазных проводов, грозозащитных тросов, разрушением опор, поломкой изоляторов и арматуры. Даже небольшое обледенение может значительно увеличить механические нагрузки на все элементы воздушных линий: так, при ледяной муфте толщиной 10 мм масса двупековой ЛЭП из 6 проводов 200-метровой длины возрастает с 565,2 кг до 1,5 тонн. При муфте 30 мм – до 5 тонн, при муфте 40 мм – до 8 тонн. Статистический анализ аварийных отключений на объектах энергетики за несколько лет показывает, что доля аварий по причине гололеда от общего количества аварий составляет $11 \pm 3\%$ [4]. Энергетики рассматривают обледенение линий электропередачи в качестве одного из наиболее серьезных бедствий. Подобные аварии приносят значительный экономический ущерб, на их устранение требуется время и затрачиваются огромные средства. Среднее время ликвидации гололедных аварий превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз. Опишем несколько случаев серьезных аварий на линиях электропередачи, которые возникали из-за гололедно-изморозевых отложений. Например, только одна авария из-за гололедно-ветровых воздействий в Сочинских электрических сетях ОАО «Кубань-энерго» в декабре 2001 года привела к повреждению 2,5 тыс. км воздушных линий напряжением 0,38-220 кВ, прекращению подачи электроэнергии в коммунально-бытовой сектор с населением

320 тыс. человек, длительному ограничению электроснабжения огромного района [5]. В 2008 году убытки от разрушений воздушных линий электропередачи на о. Сахалин составили свыше 200 млн руб. [6]. Из-за «ледяного дождя», прошедшего в декабре 2010 года над Центральной Россией и Поволжьем, только в Московской области без электричества в 24 районах осталось 455 населенных пунктов или около 200 тыс. человек. Одновременно тогда отключилось 217 высоковольтных линий, 134 питающих центра 220 кВ, а также более 10 тыс. трансформаторных подстанций, без света оказалось порядка 150 социально значимых объектов, в том числе 14 больниц. Некоторые поселки ждали тогда подачи электрической энергии больше недели. Самой же известной катастрофой, вызванной именно образованием гололеда на проводах линии электропередачи, до сих пор считается гололед в Северной Америке 1998 года. Эта стихия привела к масштабным разрушениям линий электропередачи и более 4 миллионов жителей в Канаде и США от нескольких дней до нескольких месяцев оставались без света и тепла. Совокупные оценки ущерба от этой аварии по оценкам колебались между 4 и 6 млрд. долларов [5].

Причина появления гололедно-изморозевых отложений – это конденсация имеющихся в воздухе паров на охлажденной поверхности проводов и конструкций ЛЭП. На проводах и конструкциях сети отложение гололедных образований наблюдается обычно при неустойчивой погоде, когда оттепель сменяется похолоданием, в туманную погоду или при выпадении переохлажденного дождя. Различают три основных вида гололедных образований: гололед, представляющий собой плотное твердое прозрачное или полупрозрачное вещество плотностью 600–900 кг/м³; изморозь – кристаллический налет плотностью 20–100 кг/м³ и смесь, образующуюся при наложении гололеда и изморози, плотностью 200–600 кг/м³ [6]. Изморозь на элементах воздушной линии электропередачи показана на рисунке 2.

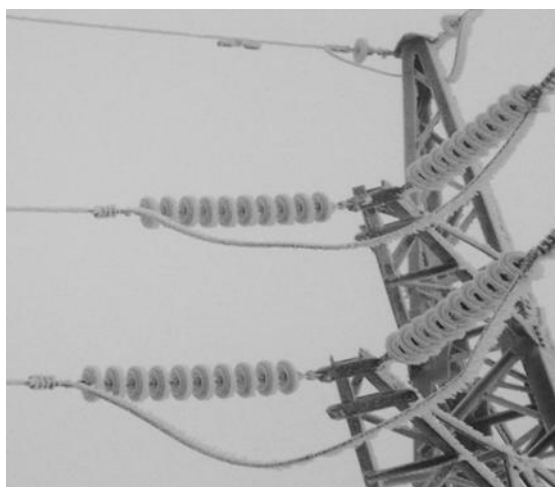


Рис. 2. Изморозь на элементах воздушной линии электропередачи

В настоящее время существует несколько основных методов, которые используются для удаления образовавшегося гололеда на проводах ЛЭП. Это механический метод, когда выполняется сбивание льда с помощью длинных шестов, выполненных из диэлектрического материала. Физико-химический метод, когда на провода наносятся растворы специальных веществ, отталкивающих воду. Электротермический метод, когда по коротко закороченным проводам ЛЭП пропускают токи достаточные для нагрева проводов, что приводит к плавке гололеда. Сетевые компании, в основном, используют метод плавки гололеда. Во время плавки гололеда прекращается подача электрической энергии потребителям по этой линии электропередачи, происходит значительное потребление электрической энергии для самой плавки, производится нагрев проводов, что отрицательно может сказываться на их состоянии. Поэтому плавку гололеда надо производить только при существовании реальной опасности возникновения гололедной аварии. Получение информации об образовании, развитии гололедных отложений и определение критических толщин стенки гололедного отложения для принятия решения о проведении плавки актуально. Одним из таких аппаратных методов контроля состояния линии электропередач является локационное зондирование [6–10]. Метод локационного зондирования линий электропередачи основан на измерениях значений затухания и запаздывания отраженных импульсных сигналов, которые зависят от параметров гололедно-изморозевых отложений (толщины стенки, плотности, температуры, протяженности). По экспериментальным данным измерений, проведенных локационным комплексом, получены величины стенки гололедно-изморозевых отложений и их плотности, которые могут вызвать аварии на воздушных линиях электропередачи. Отслеживая изменение толщины стенки гололеда и зная его плотность можно оценить допустимые для конкретной линии электропередачи значения стенки гололеда, когда это может привести к критическим механическим напряжениям. Основным мерилом допустимости гололедных нагрузок на провода ЛЭП является разрывное усилие для провода, при превышении этого значения возникает аварийная ситуация.

В [11] проведены теоретические расчеты значений механического напряжения провода в зависимости от толщины стенки гололедных отложений различной плотности для линии электропередачи напряжением 110 кВ. Решением уравнения состояния провода, найдены значения механического напряжения провода от толщины стенки гололедных отложений с плотностями 0,3 г/см³, 0,6 г/см³ и 0,9 г/см³ при отсутствии ветровых нагрузок. Показано, что чем меньше плотность гололедно-изморозевых отложений, тем при больших значениях толщины стенок отложения достигается критическое значение механического напряжения провода рассматриваемой линии электропередачи.

Локационное зондирование позволяет также отслеживать процесс плавки гололеда, а при обрыве проводов или возникновении коротких замыканий определять место повреждений. Локационный метод является многоканальным, позволяет контролировать одновременно все линии, отходящие с одной подстанции. Разработанная локационная технология позволяет одним программно-аппаратным комплексом решить обе озвученные проблемы (обнаружение повреждений и гололедных отложений на проводах ЛЭП), заменяя многочисленные измерительные методы и средства, применяемые при этом. Локационные комплексы используют для зондирования высокочастотный (ВЧ) тракт ЛЭП одновременно с аппаратурой ВЧ связи, передающей информацию с систем телемеханики, релейной защиты, автоматики и телефонии. Поэтому программно-аппаратные локационные комплексы не требуют вмешательства в конструкцию ЛЭП и располагаются в помещении подстанции, чем повышается ее надежность и удобство обслуживания.

В КГЭУ изготовлено несколько вариантов программно-аппаратных локационных комплексов для выполнения научных исследований и отработки технологии локационного мониторинга ЛЭП [5]. Изготовленные комплексы установлены на 6 подстанциях России и осуществляют непрерывный локационный мониторинг ЛЭП 35–330 кВ. Зондирование воздушных ЛЭП происходит в автономном автоматическом режиме через 15–60 мин. На рисунке 3 показан 16-ти канальный экспериментальный образец локационного комплекса.

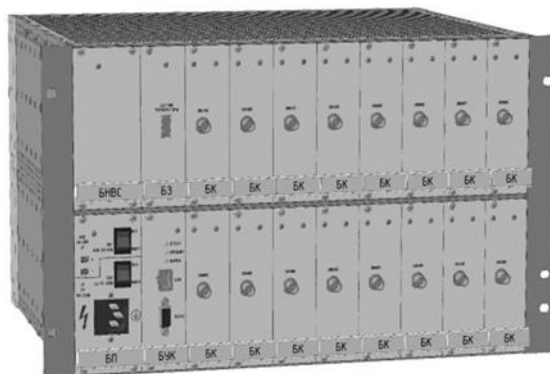


Рис. 3. Экспериментальный образец локационного комплекса

Результаты зондирования передаются в реальном времени через локальные сети

диспетчерам подстанций (рис.4) [10] и через GSM канал на мониторы Центра мониторинга КГЭУ без

ограничения расстояния, обеспечивая в удобном интерфейсе в реальном масштабе времени наблюдение за динамикой гололедообразования

на проводах ЛЭП и за динамикой освобождения проводов от гололедных отложений при их плавке.

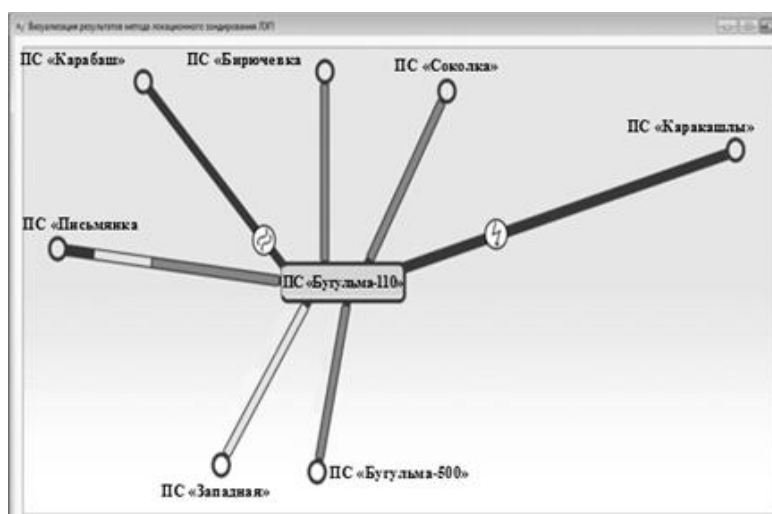


Рис. 4. Оперативная визуализация результатов локационного мониторинга на экране монитора диспетчерского пункта подстанции «Бугульма-110» (Татарстан) с использованием мнемосхемы отходящих ЛЭП.

На рисунке 4 показан пример интерфейса диспетчера, на котором демонстрируются цветовой градацией уровни гололедных отложений и наличия повреждений для семи ЛЭП на подстанции «Бугульма-110»: зеленый – гололед отсутствует, желтый – гололед в пределах нормы, красный – гололед превысил нормативное значение, черный – повреждение на линии.

Экономический эффект от оснащения локационным комплексом воздушных линий электропередачи, которые подвержены воздействию гололедно-изморозевых отложений, очевиден, т.к. потери от несвоевременной или проведенной без необходимости плавки гололеда не идут в сравнение со стоимостью локационного комплекса, который может работать автономно годами. Затраты на установку локационного комплекса включают только стоимость локационного комплекса с количеством каналов на необходимое количество линий подстанции. Подключение локационного комплекса производится к существующим каналам ВЧ связи с настройкой длительности и амплитуды локационного сигнала для каждой линии в зависимости от её характеристик. Локационный комплекс не оказывает отрицательного воздействия на работу ВЧ аппаратуры подстанции.

Библиографический список:

1. Техническое состояние сетей ПАО «Россети» [Электронный ресурс] URL: <https://www.rosseti.ru/consumers/consumers-of-pjsc-rosseti/electricity-transmission/technical-condition>
2. Производственные активы и надежность сети. ПАО «Россети» [Электронный ресурс] URL: <https://ar2022.mrsk-1.ru/strategic-report/production-assets-network-reliability>
3. Тимофеева, Т. Б. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электропитании. [Текст] / Т.Б. Тимофеева, В.С. Петров // Экономика региона. – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 847–858.
4. Ратушняк, В.С. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ

[Электронный ресурс] / В.С.Ратушняк, В.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, О.Ю. Вахрушева // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2018. — №1. — [Электронный ресурс] URL : <http://mnv.ircups.ru/toma/11-2018>

5. Стихия на проводах. [Электронный ресурс] URL:

https://kislodod.life/keysy/stikhiya_na_provodakh/?fbclid=IwAR0pnVW2UJNlHZqkbW9keuvOGiNiU0wps6zdj7O-ywtZVO62pMnbgOeZm4

6. Санакулов, А.Х. Проблемы обледенения электрических и контактных сетей. [Текст] / А.Х. Санакулов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2016. – №2. – С. 34–51.

7. Минуллин, Р.Г. Локационный мониторинг гололеда и повреждений на линиях электропередачи [Текст] / Р.Г. Минуллин – Казань: КГЭУ. – 2022. – 439 с.

8. Писковацкий, Ю.В. Способ обнаружения гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи. [Текст] / Ю.В. Писковацкий, Д.Ф. Губаев, Р.Г. Мустафин. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 1-2. – С. 41-45.

9. Касимов, В.А. Метод локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на воздушных линиях электропередачи и программно-аппаратные комплексы для его реализации: специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Касимов Василь Амирович; КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. – Казань, 2019. – 395 с.

10. Минуллин, Р. Г., Касимов В. А., Ахметова И. Г., Минкин А. С. Технология контроля состояния воздушных линий электропередачи локационным методом. [Текст] / Р.Г. Минуллин, В.А. Касимов, И.Г. Ахметова, А.С. Минкин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы VII Международной научно-технической конференции. – Чебоксары: ЧГУ. – 2023. – С. 34–42.

11. Минкин, А. С. Зависимость механического напряжения провода высоковольтной линии электропередачи от толщины стенки гололедно-изморозевых отложений с различной плотностью. [Текст] / А.С. Минкин // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы VII Международной научно-технической конференции. – Чебоксары: ЧГУ. – 2023. – С. 46–50.