ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.056.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112

ДИАГНОСТИКА ГОЛОЛЕДА НА ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Г.В. Вагапов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vagapov@list.ru

Резюме: Цель исследования заключается в выборе эффективной технологии мониторинга состояния грозозащитных тросов в пролете на основе применения программно-аппаратного комплекса обеспечения анализа технического состояния грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше, позволяющих выполнить комплексную оценку воздействия как внешних климатических факторов от ветровой и гололедной нагрузок, так и величины теплового удлинения грозозащитных тросов от воздействия протекающего тока в режиме плавки гололеда. Методы исследования заключаются в проведении анализа текущего состояния грозозащитных тросов и их предельных значений механической прочности, позволяющих произвести оценку эффективности мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций. Результатами исследования выступает возможность визуализации текущих параметров грозозащитных тросов в пролете воздушной линии электропередачи, что в свою очередь сокращает время принятия решений по предотвращению аварийных режимов работы линий. В качестве вывода исследования выступает алгоритм мониторинга состояния грозозащитных тросов, основанный на информации о текущих значениях продольного и поперечного углов, а также значениях окружающей температуры и температуры грозозащитного троса получаемой с сенсоров, смонтированных непосредственно на тросах.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, мониторинг, стрела провеса, уравнение состояния грозозащитного троса.

Для цитирования: Вагапов Г.В. Диагностика гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 104-112. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112.

DIAGNOSTICS OF THE ICE ON THE STRIKE PROTECTION WIRE

GV. Vagapov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vagapov@list.ru

Abstract: The relevance of the research problem is chose of effective technology of strike protection wire monitoring in span with use of technical system of analysis of technical condition of strike protection wire of 110 kV voltage power line for complex assessment of the impact of both external climatic factors from wind and ice loads and the magnitude of the thermal elongation of the strike protection wire with influence of current during de-icing process. Analysis of the strike protection wire mode and their limiting values of mechanical strength allow evaluation of the effectiveness of events of prevent of accidents and reduce the undersupply of electricity to the end consumers. Visualization of the operative parameters of the strike protection wire in the span of the overhead power line will allow reduce the time to make decisions on the prevention of accidents of lines. Algorithm of monitoring of operative parameters of wires of overhead power lines base on information of longitudinal and transverse angles received from sensors installed directly on the strike protection wire.

Keywords: overhead power line, ice load, monitoring, sag, main equation of strike protection wire.

For citation: Vagapov GV. Diagnostics of the ice on the strike protection wire. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):104-112. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-104-112.

Введение

Актуальность исследования

Одной из основных тенденций развития единой общероссийской электрической сети является направление на устранение технологических ограничений перетока электрической энергии и развития пропускной способности электрических сетей, что нашло отражение в работах [2, 4]. В качестве природных факторов, ограничивающих передачу электроэнергии и мощности по электрическим сетям, выступают ветровые и особенно гололедно-изморозевые природные воздействия на провода и грозозащитные тросы (ГЗТ) воздушных линий (ВЛ) электропередачи. Гололедно-изморозевые отложения (ГО), как правило, приводят к существенным механическим перегрузкам ГЗТ и, как следствие, к их обрывам. Обрывы на ВЛ, в свою очередь, накладывают существенные ограничения на отпуск электроэнергии конечному потребителю, что подтверждается особым вниманием к ежегодным мероприятиям по подготовке к осенне-зимнему периоду со стороны Министерства энергетики Российской Федерации и нормативной документацией. ГЗТ ВЛ напряжением 110 кВ и выше подвержены в наибольшей степени негативному влиянию ГО из-за их существенной протяженности и ежегодного прироста количества плавок гололеда. Таким образом, ГО оказывают существенное влияние на функционирование электросетевого комплекса, в особенности на ГЗТ ВЛ, ввиду их преимущественно меньшего сечения по сравнению с фазными проводами.

Проведенные исследования по раннему выявлению и снижению негативного воздействия ГО выявили наличие существенного количества теоретических направлений исследований как в отечественной [1, 2, 4], так и в зарубежной литературе [3, 5, 6]. Имеет место быть существенное разнообразие установленных технических систем в электрических сетях. Однако, несмотря на большое количество публикаций и внедренных противогололедных систем, в электрических сетях всех классов напряжений, например [7, 8, 9], проблема ГО не теряет своей актуальности, что подтверждается работами [10, 11].

Теоретическое обоснование

Классическая методика определения состояния ГЗТ в пролете при воздействии ГО базируется на определении значений механического напряжения и стрелы провеса. Данные параметры определяются для предельных случаев: при наибольших значениях нагрузки; при низших значениях температур для исключения превышения значения напряжения больше допустимого. Целью мониторинга состояния ГЗТ предполагает выявление воздействия на ГЗТ внешних возмущений еще на ранней стадии их появления. Для мониторинга ГО на ГЗТ в данном исследовании предложено использовать сенсоры, отслеживающие как угол продольного провеса ГЗТ, так и угол его поперечного отклонения (рис. 1). Методика оценки воздействия ледяных отложений основывается на измеряемых геометрических параметрах с учетом конкретного места крепления сенсора в пролете и с учетом вытяжки ГЗТ за время его эксплуатации.

Определение состояния ГЗТ в пролете основывается на каноническом уравнении цепной линии [12],

$$y = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right), \quad (1)$$

где a – параметр канонического уравнения цепной линии.

Общее уравнение состояния ГЗТ в пролете описывается классическим уравнением [12]:

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m) \right] \cdot [1 + \lambda \cdot (t_n - t_m)] \quad (2)$$

где E – модуль упругости; L_n – длина ГЗТ в пролете в конечном состоянии; L_m – длина ГЗТ в пролете в начальном состоянии; σ_n – напряжение в ГЗТ в точке подвеса в конечном состоянии; σ_m – напряжение в ГЗТ в точке подвеса в начальном состоянии; λ –

коэффициент температурного линейного расширения; t_n – температура ГЗТ в конечном состоянии; t_m – температура ГЗТ в начальном состоянии.

Уравнения (1) и (2) образуют общую систему уравнений определения текущего состояния ГЗТ. Аналогичный подход представлен в работе [13].

Рис. 1. Сенсор на ГЗТ

Рис. 2 иллюстрирует общий случай подвеса ГЗТ в пролете, при котором точки подвеса ГЗТ являются разновысокими, ось ординат проходит через нижнюю точку провеса ГЗТ.

Рис. 2. Стрела провеса ГЗТ: A и B – координаты разновысоких точек подвеса ГЗТ на опорах; x_A – расстояние между координатой точки A и осью ординат; f – стрела провеса ГЗТ; l – расстояние между опорами в пролете; α – угол наклона касательной в точке подвеса ГЗТ; h – расстояние по вертикали точек подвеса ГЗТ

Согласно работе [2], тангенс угла наклона касательной α в точке подвеса ГЗТ раскрывает зависимость от параметра a следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \frac{x_a}{a}. \quad (3)$$

Как показали результаты натурных экспериментов [2], значение угла α должно определяться с точностью до сотых значений градуса при длине пролета ВЛ более ста метров для снижения погрешностей определения стрелы провеса f ГЗТ, которая определяется по известной формуле [2]:

$$f = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - 1 \right). \quad (4)$$

Согласно [2] параметр h на рис. 1 имеет следующую зависимость от значений a и x_a :

$$h = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - \operatorname{ch} \frac{l - x_a}{a} \right). \quad (5)$$

Объединение уравнений (3) и (5) в общую систему уравнений предоставляет возможность однозначного определения значений a и x_a . В данной системе уравнений значение угла α наклона касательной в точке подвеса ГЗТ определяется по данным с сенсора, значения h и l определяются из проектных данных на ВЛ или по результатам натурного обследования.

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \frac{x_a}{a} \\ h = a \left(\operatorname{ch} \frac{x_a}{a} - \operatorname{ch} \frac{l - x_a}{a} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Система уравнений (6) является нелинейной. Для ее решения предлагается использование любого математического программного продукта. Ниже описывается реализация этой функции в системе мониторинга гололеда ГЗТ. В результате решения системы уравнений (5) появляются однозначные значения параметров a и x_a . Полученные значения предоставляют возможность точного математического определения геометрической длины ГЗТ L в пролете по уравнению

$$L = a \cdot \left(\operatorname{sh} \frac{x_a}{a} + \operatorname{sh} \frac{l - x_a}{a} \right) \quad (7)$$

и стрелы провеса ГЗТ – по формуле (4).

Значение геометрической длины ГЗТ в пролете предоставляет возможность перехода к уравнению состояния ГЗТ непосредственно к определению действующих условий работы ГЗТ через начальное и конечное значение геометрической длины ГЗТ в пролете. Данный переход от геометрических параметров к физическим вызван необходимостью определения степени воздействия таких внешних климатических параметров, как ветер и ГО. Необходимо также отметить, что при переходе от геометрического описания длины ГЗТ к физическому через уравнение состояния ГЗТ появляется в явном виде возможность численного описания различных видов удлинений ГЗТ, в том числе температурных и гуковских удлинений.

Основная суть перехода от определяемой геометрической длины к классическому уравнению длины ГЗТ через начальное и конечное состояния состоит в определении σ_n напряжения в ГЗТ в точке подвеса ГЗТ в конечном состоянии. Искомое напряжение позволяет осуществить переход непосредственно к определению нагрузок, воздействующих на ГЗТ.

Переход от геометрических параметров к физическим осуществляется посредством объединения уравнений (2) и (7) на основе значения длины ГЗТ в пролете.

Подобный же подход от геометрических параметров к физическим представлен и в других исследованиях [1, 12]. В большинстве как отечественных, так и зарубежных работ [6–11] уравнение (8) позволяет определять граничные условия работы ГЗТ в пролете. В подавляющем большинстве случаев данное уравнение состояния используется на этапе проектирования ВЛ и не учитывает вытяжки ГЗТ на этапе эксплуатации. Однако необходимость учета вытяжки указывается в [14].

С учетом вытяжки ГЗТ в уравнение (8) введен новый множитель, который учитывает этот фактор. Итоговое уравнение с учетом нового фактора принимает вид

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m) \right] \cdot [1 + \lambda \cdot (t_n - t_m)] \cdot [1 + \sigma_T \cdot T], \quad (8)$$

где T – количество полных лет с момента монтажа грозозащитного троса в пролете; λ – коэффициент температурного удлинения ГЗТ; E – модуль упругости; σ_T – величина вытяжки грозозащитного троса за год.

Величина σ_T может быть определена по статистическим данным либо определена расчетным путем с использованием специализированного программного обеспечения.

Поскольку в качестве исходного принят базовый режим, когда σ_m определяется механической нагрузкой только от собственного веса ГЗТ, то увеличение значения σ_n относительно σ_m означает появление дополнительной механической нагрузки на проводе.

При отсутствии ветра это будет именно гололед при изменении температуры не более десяти градусов между режимами n и m .

Наличие ветра не меняет принципиально предложенную методику распознавания ГО на проводе. Учет воздействия ветра выполняется за счет отслеживания угла отклонения ГЗТ от вертикали ϕ_{Π} (рис. 3).

Рис. 3. Визуализация отклонения ГЗТ от воздействия ветра на угол ϕ

Диагностическая суть определения значения поперечного угла ГЗТ заключается в выделении весовых и ветровых нагрузок при воздействии бокового ветра ГЗТ. Подобный подход необходим для разделения суммарной нагрузки на все ее составляющие, в том числе и выделение наиболее важной – составляющей от воздействия гололедной нагрузки. Следует учесть, что значения стрел провеса f_n и f_m рассчитываются на основе решения уравнений (6), в которых при наличии ветра угол α уже не тот, который измеряется сенсором, где чувствительный элемент основан на гравитационном принципе.

Практическая реализация системы мониторинга

На электротехническом рынке существует целый ряд компаний, производящих те или иные модификации сенсоров, что предоставляет широкий выбор первичного оборудования. Предложенные теоретические положения были опробованы в системе мониторинга на ГЗТ действующей ВЛ напряжением 110 кВ (рис. 4). В качестве первичного оборудования были выбраны первичные сенсоры наклона, подробно описанные в работе [2]. Сенсоры используемого типа предоставляют информацию о текущем значении поперечного и продольного углов провеса провода (рис. 4).

Рис. 4. Сенсор провеса ГЗТ

Значения угла провеса ГЗТ с сенсора определяются каждые 20 минут в нормальном режиме с возможностью переключения на интервал 10 секунд в период ГО. На рис. 5 в качестве примера приведены данные угла провеса и температуры ГЗТ в ОЗП 2017–2018 года в период отсутствия гололедообразований на ВЛ. На рис. 6 приведены данные изменений продольного угла ГЗТ в ОЗП 2017–2018 года. Имеется однозначная корреляционная зависимость между продольным углом наклона ГЗТ и температурой окружающей среды.

Рис. 5. Масштабированная динамика изменения температуры ГЗТ за период 22.09.2017–25.09.2017

Рис. 6. Масштабированная динамика изменений продольного угла ГЗТ за период 22.09.2017–25.09.2017

Изменение температуры ГЗТ приводит к изменению длины троса в пролете, что сказывается на углах провеса ГЗТ. Таким образом, на основании предложенного алгоритма возможно определение не только граничных условий работы ГЗТ, но и его текущих значений.

В качестве практической реализации предложенной методики было разработано программное обеспечение по текущему мониторингу состояния ГЗТ в пролете на основе информации о значениях продольного и поперечного углов провеса ГЗТ, поступающей с сенсоров действующей ВЛ 110 кВ (рис. 7). Программа определяет следующие параметры ГЗТ в пролете ВЛ: стрела провеса, напряжение, длина ГЗТ, тяжение. Одновременно предусмотрена сигнализация при достижении критических параметров ГЗТ.

Рис. 7. Диалоговое окно программы расчета текущего состояния ГЗТ

Вывод

Система мониторинга гололедообразований на воздушных линиях электропередачи предоставляет данные о значении температуры ГЗТ, а также о значении продольного угла провеса ГЗТ. Одновременно имеется возможность технического контроля угла поперечного отклонения ГЗТ. Система мониторинга также предоставляет возможность определения действующих значений температуры в ГЗТ. По представленным физическим параметрам программное обеспечение определяет расчетные значения: напряжения, тяжения, стрелы провеса и длины ГЗТ.

Литература

1. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф. Разработка устройства для системы мониторинга и количественного контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 3–4. С. 69–79.
2. Fedotov A., Kurth S., Voigt S., Vagapov G. A concept for an ice detection system on overhead power lines, theory and practical results // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika 2017. pp. 297–300.
3. Макаров В.Г., Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В. Моделирование воздушной линии электропередачи в пакете Matlab/Simulink // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 13. С. 93–96.
4. Минуллин Р.Г. Локационный метод обнаружения гололеда на проводах воздушных ЛЭП // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 1(22). С. 74–82.
5. Yu S.F.; Gao Y.B.; Hu Y.Z.; Zheng Z.Y.; Ke D.F. A novel on-load de-icing method for distribution lines // 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016). 2016. pp. 1–4.
6. Xu Ji; Erkan Oterkus. A novel dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations // 2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean). 2016. pp. 70–73.
7. Xingliang Jiang; Ze Xiang; Zhijin Zhang; Jianlin Hu; Qin Hu; Lichun Shu. Predictive Model for Equivalent Ice Thickness Load on Overhead Transmission Lines Based on Measured Insulator String Deviations // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. V. 29. N 4. pp. 1659–1665.

8. Sahar Lashkarbolooki; Anil Pahwa; Al Tamimi; Ryan Yokley. Decreasing the ice storm risk on power conductors by sequential outages // 2017 North American Power Symposium (NAPS). 2017. pp. 1–4.
9. Xin-bo Huang; Hong-bo Li; Yong-can Zhu; Yu-xin Wang; Xin-xin Zheng; Yi-ge Wang. Transmission line icing short-term forecasting based on improved time series analysis by fireworks algorithm // 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2016. pp. 643–646.
10. Xiaoming Rui; Kunpeng Ji; Lin Li; Ghyslaine McClure. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. V. 32. N3. pp. 1287–1294.
11. Yaqin Li; Xinwei Qiu; Yiyuan Ge; Junfa Wang; Siyu Chen. Research on the Failure Criterion of Snow-Ice Constitutive Model // 2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). 2018. pp. 409–412.
12. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. М.:Госэнергоиздат, 1956. 192 с.
13. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.
14. Fischer R., Kiesslin F. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung; mit 86 Tabellen 4. Aufl. - Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993doi: 10.1007/978-3-642-97924-8.
15. Arsalan Habib Khawaja.; Qi Huang; Jian Li.; Zhenyuan Zhang. Estimation of Current and Sag in Overhead Power Transmission Lines with Optimized Magnetic Field Sensor Array placement // IEEE Transactions on Magnetics. 2017, V.1. N. 99. pp 1-1.

Автор публикации

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Yaroslavsky DA., Sadykov MF. Development of a device for a system of monitoring and quantitative control of icing on overhead power lines. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2017;3–4:69–79.
2. Fedotov A., Kurth S., Voigt S., Vagapov G. A concept for an ice detection system on overhead power lines, theory and practical results. *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Elektroenergetika* 2017. pp. 297–300.
3. Makarov VG., Fedotov AI., Basyrov RSh., Vagapov GV. Simulation of an overhead power line in Matlab/Simulink. *Bulletin of the technological university*. 2017; 13:93–96.
4. Minullin RG. Locational method of detecting ice on wires of overhead power lines. *Electricity. Transmission and distribution*. 2014;1(22):74–82.
5. Yu SF., Gao YB., Hu YZ., Zheng ZY., et al. A novel on-load de-icing method for distribution lines. *12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016)*. 2016. pp. 1–4.
6. Xu Ji., Erkan Oterkus. A novel dynamic ice-structure interaction model for ice-induced vibrations. *2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean)*. 2016. pp. 70–73.
7. Xingliang Jiang., Ze Xiang., Zhijin Zhang., Jianlin Hu., Qin Hu., Lichun Shu. Predictive Model for Equivalent Ice Thickness Load on Overhead Transmission Lines Based on Measured Insulator String Deviations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. pp. 1659–1665.
8. Sahar Lashkarbolooki., Anil Pahwa., Al Tamimi., Ryan Yokley. Decreasing the ice storm risk on power conductors by sequential outages. *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. 2017. pp. 1–4.
9. Xin-bo Huang., Hong-bo Li., Yong-can Zhu., Yu-xin Wang., Xin-xin Zheng., Yi-ge Wang. Transmission line icing short-term forecasting based on improved time series analysis by fireworks algorithm. *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. 2016. pp. 643–646.
10. Xiaoming Rui., Kunpeng Ji., Lin Li., Ghyslaine McClure. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. pp. 1287–1294.
11. Yaqin Li., Xinwei Qiu., Yiyuan Ge., Junfa Wang., Siyu Chen. Research on the Failure Criterion of Snow-Ice Constitutive Model. *2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)*. 2018. pp. 409–412.

12. Glazunov AA. *Fundamentals of the mechanical part of overhead power lines*. M.: Gosenergoizdat, 1956. 192 p.
13. Keselman LM. *Fundamentals of mechanics of overhead power lines*. M.: Energoatomizdat, 1992. 352 p.
14. . Fischer R.; Kiessling F. *Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung*. mit 86 Tabellen .4. Aufl. - Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993. doi: 10.1007/978-3-642-97924-8.
15. Arsalan Habib Khawaja., Qi Huang., Jian Li., Zhenyuan Zhang. Estimation of Current and Sag in Overhead Power Transmission Lines with Optimized Magnetic Field Sensor Array placement. *IEEE Transactions on Magnetics*.2017.pp. 1-1.

Author of the publication

Georgii V. Vaganov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

20 марта 2019 г.