
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.315.175
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-490-497

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПРОГИБОВ ЛИНЕЙНОЙ ОПОРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ЛЭП

А. Н. ШИЛИН, С. С. ДЕМЕНТЬЕВ

*Волгоградский государственный технический университет, 400005, Волгоград, Россия
E-mail: eltech@vstu.ru*

В процессе эксплуатации опоры линий электропередачи (ЛЭП) подвергаются механическим деформациям вследствие воздействия ветра и оледенения проводов, это является причиной многочисленных аварий. Существующие методы контроля предаварийных режимов не получили широкого распространения. В связи с этим необходима разработка новых принципов действия устройств для контроля силовых нагрузок. Косвенным проявлением действующих механических нагрузок являются прогибы стоек линейных опор. Это явление наблюдается на „гибких“ опорах ЛЭП с несимметричным расположением фаз. Метод высокоточного измерения прогибов позволяет оценить степень оледенения фазных проводов. Предложен вариант технической реализации этого метода диагностики с применением видеокамеры. Описывается процедура расчета отклонения вершины опоры под действием гололеда и ветра. Обоснована целесообразность диагностики состояния линии по информации о величине прогиба опоры.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, видеоизмерения, диагностика оледенения

Введение. Одной из основных задач электроэнергетической отрасли является обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей. Наиболее уязвимым элементом электрической сети в России являются высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП), что в совокупности с физическим износом обусловлено их большой протяженностью, нахождением в различных географических зонах, а также воздействием внешних неблагоприятных климатических факторов. Для повышения надежности воздушных ЛЭП необходимо оснащать линии устройствами контроля и диагностики состояния [1], а также автоматического распознавания и определения места аварии. Такая информация позволит сократить время устранения неисправности и тем самым повысить показатель надежности — вероятность безотказной работы. Эта задача является частью современной проблемы внедрения интеллектуальных электрических сетей (*Smart Grids*).

На сегодняшний день разработано довольно много методов и средств мониторинга воздушных линий, которые можно разделить на две группы — топографические и локационные. В последнее время в связи с развитием систем телекоммуникации наибольшее распространение получили топографические методы как наиболее точные. При реализации этих методов по трассе линии (чаще всего на опорах) с некоторым интервалом устанавливаются датчики контроля аварийных и предаварийных режимов.

В настоящее время при контроле механических (вызванных гололедно-ветровым воздействием) нагрузок на провода и опоры ЛЭП используются тензометрические методы, применение которых требует изменения конструкции существующих линий. Кроме того, высокая стоимость и сложность монтажа тензодатчиков гололеда обусловили относительно малое использование приборов данного типа [2].

Нарастание гололедной муфты на проводах воздушной линии при оледенении вызывает упругую деформацию опоры вдоль вертикальной оси, а в случае „гибкой“ (многогранной или композитной) опоры с несимметричным расположением фаз утяжеление провода и увеличение его лобового сопротивления ветру приводят к прогибам опоры. Это явление позволяет использовать оптический метод контроля перемещения вершины опоры для мониторинга гололедообразования на линии. Этот метод может быть реализован аналогично существующим способам видеоконтроля деформации крупногабаритных механических систем и предполагает полностью бесконтактные измерения.

Техническая реализация метода. Для осуществления контроля прогибов линейных опор авторами настоящей статьи разработана измерительная система (рис. 1), которая содержит точечный источник света (ТИС) 1, закрепленный на вершине опоры и снабженный защитным экраном, а также цифровую видеокамеру 2 с длиннофокусным объективом, устанавливаемую у основания стойки вместе с лазерным дальномером 3. Кроме того, в состав системы входят датчик ветрового давления (анеморумбометр) 4 и блок обработки информации (компьютер) 5, на вход которого поступают сигналы с каждого из элементов 2, 3, 4.

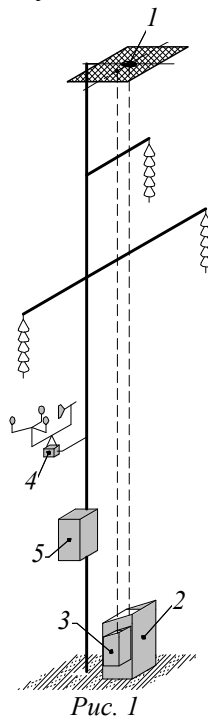


Рис. 1

Как видно из рис. 1, смещение ТИС относительно оптической вертикальной оси, регистрируемое видеокамерой, зависит от прогиба опоры, а лазерный дальномер позволяет определить вертикальное смещение опоры.

Для окончательного устранения бликов и шумовых засветок возможно ввести в оптический канал наблюдения перед длиннофокусным объективом согласованный спектральный фильтр [3].

Контроль механических нагрузок. Процесс контроля механических нагрузок включает следующие шаги.

Шаг 1. Обработка информации о засветке ПЗС-матрицы от точечного источника света. Определяется область изображения (стоп-кадр), в которой находится пятно засветки, после

чего рассчитываются координаты центра тяжести пятна засветки и величина его смещения относительно начала координат.

Определение координат светового пятна осуществляется путем поиска и распознавания на стоп-кадрах фрагмента, соответствующего шаблонному (эталонному) изображению ТИС (отражающего его размер, форму, закон распределения яркости). Для решения этой задачи предлагается использовать корреляционно-экстремальный алгоритм [4], по которому вычисляется нормированная взаимная корреляционная функция (НВКФ) $C_{A,B}$ анализируемого видеокadra A и эталонного изображения B . Если размер исследуемого видеокadra $R_1 \times R_2$, а размер эталона $r_1 \times r_2$, то размер соответствующей корреляционной матрицы составит $(R_1 - r_1 + 1) \times (R_2 - r_2 + 1)$.

При сравнении текущего фрагмента A' видеокadra A с шаблоном B НВКФ рассчитывается следующим образом [4]:

$$C_{A,B}(i, j) = \frac{1}{(r_1 + 1)(r_2 + 1)} \frac{\sum_{k=i}^{i+r_1} \sum_{p=j}^{j+r_2} [(A_{k,p} - \mu A')(B_{k-i, p-j} - \mu B)]}{\sqrt{\sigma^2 A' \cdot \sigma^2 B}},$$

где i, j — номер строки и столбца корреляционной матрицы C ; μ — математическое ожидание значений яркости пикселей; σ^2 — дисперсия.

Анализируемый фрагмент стоп-кадра и эталонное изображение ТИС идеально совпадут при значении корреляции 1.

Далее точное вычисление смещения ТИС осуществляется путем субпиксельного измерения внутри A'' — найденной ранее области исходного изображения A , содержащей пятно засветки. Координаты центра тяжести пятна (x''_c, y''_c) (рис. 2) вычисляются следующим образом [3]:

$$x''_c = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (A''_{ij} i)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A''_{ij}}, \quad y''_c = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (A''_{ij} j)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A''_{ij}},$$

где A''_{ij} — элемент матрицы A'' , значение которого отражает градацию яркости; i, j — номер строки и столбца в матрице A соответственно.

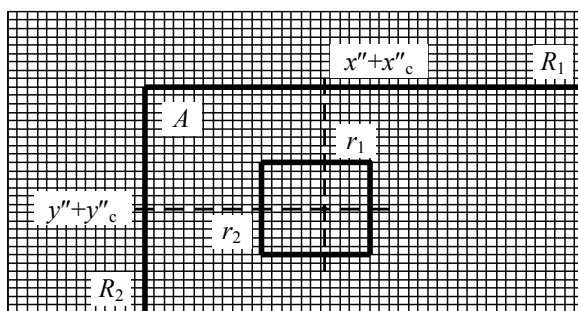


Рис. 2

Пересчет координат центра тяжести светового пятна в систему координат видеокadra A осуществляется по формулам:

$$x_c = x'' + x''_c, \quad y_c = y'' + y''_c,$$

где x'', y'' — координаты первого элемента зоны анализируемого изображения A , которая содержит пятно засветки.

Корреляционно-экстремальный алгоритм реализуется в Mathcad. Приведенный на рис. 3, а фрагмент программного кода содержит следующие блоки: 1 — захват в исходном

изображении A области A' размером $n \times m$; 2 — вычисление нормированной кросс-корреляции текущего фрагмента A' и шаблона B при помощи встроенной функции `corr`; 3 — поиск пикового значения НВКФ и выделение фрагмента A'' , соответствующего экстремуму НВКФ; 4, 5 — расчет координат центра тяжести светового пятна в системе матриц A'' и A соответственно. На рис. 3, б изображено световое пятно на стоп-кадре; на рис. 3, в приведен профиль яркости $I(x)$ тестового кадра вдоль его горизонтальной оси симметрии; на рис. 3, г отображена поверхность, образованная НВКФ и демонстрирующая обнаружение изображения ТИС на видеокadre при достижении наивысшей корреляции.

С учетом полученных значений x_c , y_c смещение ТИС (прогиб вершины опоры f) будет определяться как

$$f = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2},$$

где x_0, y_0 — координаты центра видеокadra.

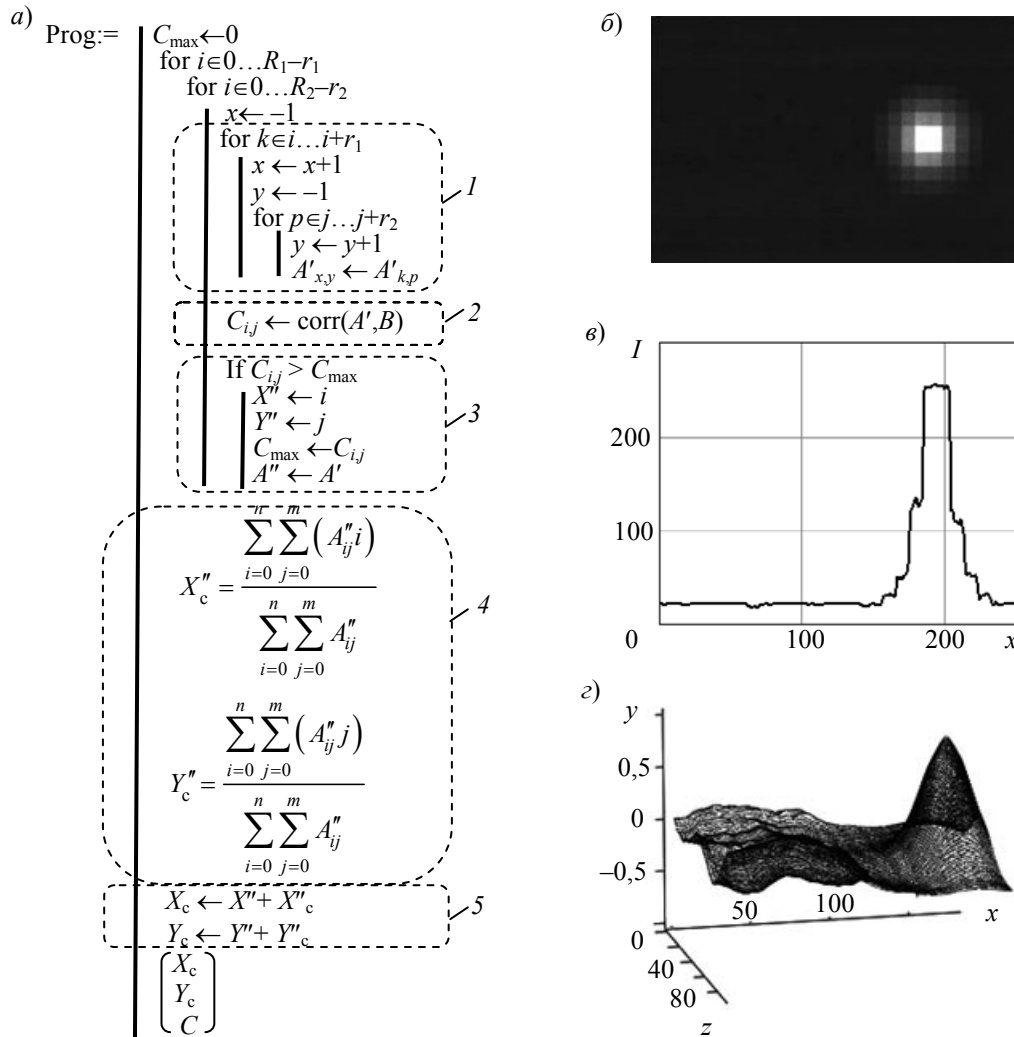


Рис. 3

Шаг 2. Расчет гололедной нагрузки на провод (толщины гололедной муфты b) по значениям прогиба опоры и параметрам ветрового давления (скорости v и направления φ ветра). На основании данных метеодатчика определяются текущая ветровая нагрузка на провод P и отклонение вершины опоры f при отсутствии ледовых отложений ($b=0$) или предыдущем зафиксированном значении. Далее расчетная величина прогиба f сравнивается с измеренным значением $f_{\text{изм}}$, при этом, если различие Δf превышает заданную погрешность, дальнейшие вычисления проводятся с увеличением значения гололедной муфты на Δb .

Очевидно, что наличие гололедных отложений приводит не только к возрастанию веса провода G , но и увеличению ветровой нагрузки P за счет утолщения миделя провода диаметром d [5]:

$$P = 0,636v^2 (d + 2b) l \sin \theta \cdot 10^{-3},$$

где v , θ — скорость (м/с) и направление (рад) ветра соответственно; $d+2b$ — диаметр оледенелого провода, мм; l — длина пролета, м.

Для расчета прогиба опоры необходимо получить уравнение упругой линии стойки, находящейся под воздействием горизонтальных (ветровых) P и вертикальных (весовых) нагрузок G (на рис. 4 представлена схема деформации опоры ПМ110-1).

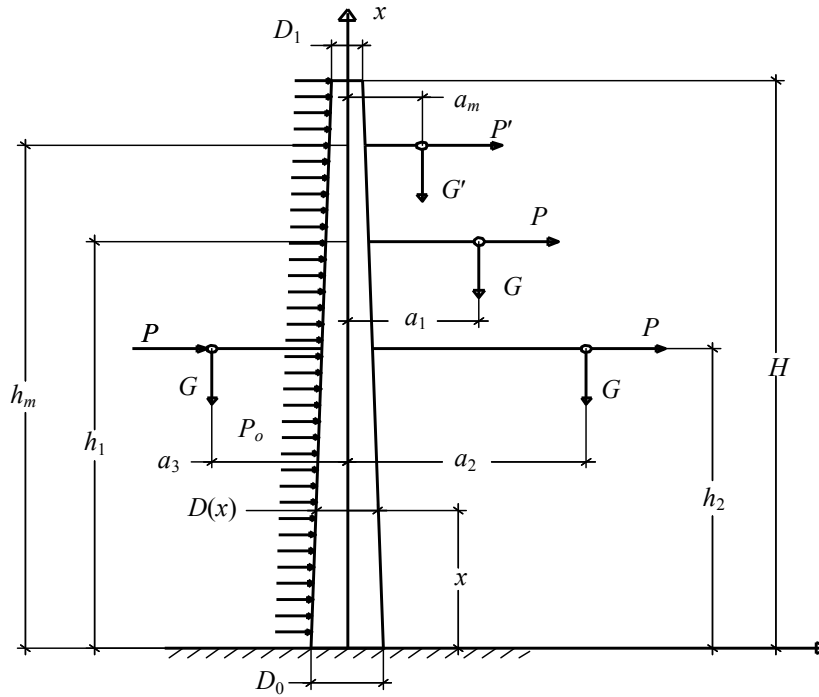


Рис. 4

Отметим, что для более корректного решения поставленной задачи требуется учет распределенного характера ветрового воздействия на опору ЛЭП. Для этого выполним разбиение оси стойки на n участков с шагом Δh ($n\Delta h = H$), тогда постоянному ветровому давлению W на опору будет соответствовать система сил

$$P_{0,i} = WD(i\Delta h)\Delta h, \quad i = \overline{0, n}, \quad (1)$$

где $D(i\Delta h)$ — толщина обдуваемого ветром участка опоры, м.

С учетом (1) выражение для изгибающего момента в произвольном сечении x опоры будет выглядеть следующим образом:

$$M(x) = P[2(h_2 - x) + (h_1 - x)] + G(a_1 + a_2 - a_3) + P'(h_T - x) + G'a_m + \sum_{i=1}^n P_{0,i}(i\Delta h - x), \quad (2)$$

где P' , G' — ветровая нагрузка на грозозащитный трос и его вес соответственно, Н; a_1 , a_2 , a_3 , a_m — вылеты траверс для крепления фазных проводов А, В, С и грозозащитного троса соответственно, м; h_m — высота подвеса грозозащитного троса, м.

Сечение полый опоры марки ПМ представляет собой N -гранное кольцо шириной $D(x)$ и толщиной δ , геометрический момент инерции которого находится как [6]:

$$J(x) = \frac{N}{24} \delta (D(x) - \delta)^3 \operatorname{tg} \frac{\pi}{N} \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{N} + 3 \right), \quad (3)$$

где

$$D(x) = D_1 \frac{x}{H} + D_0 \left(1 - \frac{x}{H} \right).$$

Представим уравнение упругой линии стойки (являющейся с точки зрения строительной механики консольной балкой) [7]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ(x)},$$

где E — модуль упругости материала опоры, Па (для стальной опоры ПМ 200 ГПа).

Поиск аналитического решения $y(x)$ ввиду сложности уравнений (2), (3) практически невозможен, в связи с чем обоснованным выглядит использование численных методов решения, наиболее распространенным из которых является метод Рунге-Кутты 4-го порядка [8].

Таким образом, задача сводится к поиску приближенных значений $y_i \approx y(x_i)$ на сетке $\{x_i\} \in [0, H]$, где $i = \overline{0, m}$.

Применение вычислительной техники позволяет компенсировать ограниченную точность численных методов более частым разбиением сетки решения (к примеру, если задать $m=1000$).

На рис. 5 приведен график прогибов многогранной опоры ПМ110-1 по высоте при наличии на проводе АС-120/19 гололедной муфты толщиной 30 мм, равномерно распределенной по пролету длиной 150 м, и ветровом давлении 800 Па.

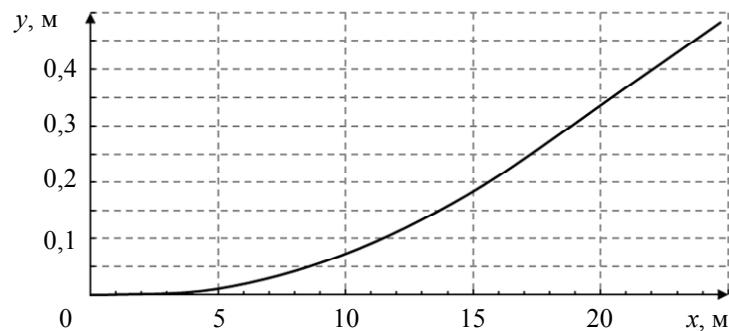


Рис. 5

Изменение величины горизонтального смещения ТИС f от параметров гололедно-ветрового воздействия (толщины гололедной муфты b и скорости ветра v : 1 — 5; 2 — 15; 3 — 25; 4 — 35 м/с) наглядно демонстрирует рис. 6.

Из приведенных на рис. 6 графиков следует, что в заданных условиях при различном гололедно-ветровом воздействии величина смещения ТИС варьирует от 0,018 до 0,481 м, что с высокой точностью может быть зафиксировано при помощи видеокамеры, размещаемой у основания опоры ЛЭП.

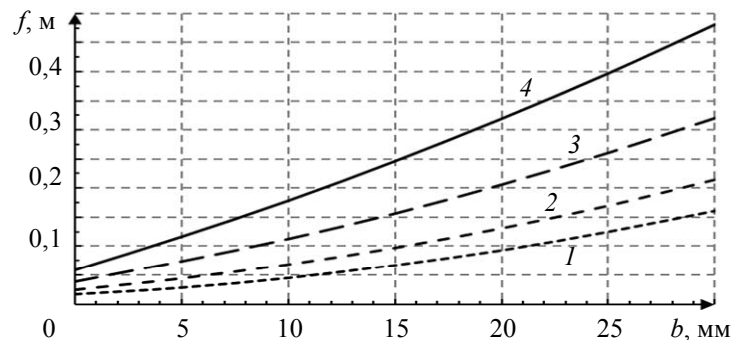


Рис. 6

Выводы. На основе результатов расчета прогибов „гибких“ линейных опор с несимметричным расположением фаз (например, ПМ110-1) определены зависимости деформации опор от механической нагрузки. С учетом полученных данных разработан метод контроля гололедно-ветровых нагрузок на линии по величине прогибов опоры. Измерительная система, реализующая этот метод, не требует установки тензометрических весовых датчиков и поэтому более проста в монтаже и обслуживании и соответственно имеет перспективы широкого внедрения в составе интеллектуальных электрических сетей (*Smart Grids*).

В статье представлены результаты исследований, выполненных по программе Erasmus+ №573879-EPP-1-2016-1-FREPPKA2-CBHE-JP „Internationalisation of master Programs In Russia and China in Electrical engineering“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wachal R. et al. A computer vision early-warning ice detection system for the Smart Grid // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Orlando, FL, May 07—10, 2012. DOI: 10.1109/TDC.2012.6281621.
2. Шилин А. Н. и др. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике. Волгоград: ВолгГТУ, 2017. 132 с.
3. Пат. 2506536 РФ, МПК G01B11/03. Способ субпиксельного контроля и слежения за перемещением удаленного объекта / А. П. Брюховецкий, Ю. Н. Бугаев, А. В. Суетенко, В. И. Третьяков, М. О. Усс. Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 4.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Т. 1. Работа и расчет проводов и тросов. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.
6. Руководство по проектированию многогранных опор и фундаментов к ним для ВЛ напряжением 110—500 кВ [Электронный ресурс]: <<http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.55.054-2010.pdf>>.
7. Дарков А. В., Штиро Г. С. Сопротивление материалов. М.: Высш. школа, 1975. 645 с.
8. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высш. школа, 2009. 840 с.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Шилин** — д-р техн. наук, профессор; ВолгГТУ, кафедра электротехники; заведующий кафедрой; E-mail: eltech@vstu.ru
- Сергей Сергеевич Дементьев** — аспирант; ВолгГТУ, кафедра электротехники; E-mail: c165tc34@yandex.ru

Поступила в редакцию
09.10.17 г.

Ссылка для цитирования: Шилин А. Н., Дементьев С. С. Оптический метод регистрации прогибов линейной опоры для диагностики состояния ЛЭП // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 6. С. 490—497.

AN OPTICAL METHOD OF REGISTRATION OF LINE TOWER DEFLECTION FOR DIAGNOSIS OF OHL STATE

A. N. Shilin, S. S. Dementyev

Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russia
E-mail: eltech@vstu.ru

During operation, the transmission line supports (OHL towers) are mechanically deformed due to wind and ice congestion, this is the cause of numerous accidents. The existing methods of monitoring pre-emergency regimes have not been widely adopted, and therefore development of new principles for the operation of devices for monitoring force loads seems necessary. Indirect manifestations of the existing mechanical loads are deflections of the pillars of linear supports. This phenomenon is observed on "flexible" power transmission lines with an asymmetric arrangement of phases. The method of high-precision deflection measurement allows estimating the degree of glaciation of phase wires. A variant of the technical im-

plementation of this diagnostic method with the use of a video camera is proposed. The procedure for calculating the deflection of the apex of the support under the influence of ice and wind is described. The perspectives of diagnostics of an OHL condition using information on support deflection is discussed.

Keywords: smart grids, OHL monitoring, video measurements, icing diagnostics

Data on authors

- | | |
|----------------------------|--|
| Alexander N. Shilin | — Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; Head of the Department;
E-mail: eltech@vstu.ru |
| Sergey S. Dementyev | — Post-Graduate Student; Volgograd State Technical University, Department of Electrical Engineering; E-mail: c165tc34@yandex.ru |

For citation: Shilin A. N., Dementyev S. S. An optical method of registration of line tower deflection for diagnosis of OHL state. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 6. P. 490—497 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-490-497