

УДК 621.315.175

# УСТРОЙСТВО ВИДЕОИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ГАБАРИТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОЛЕДЕНЕНИЯ ЛЭП

# А.А. Шилин, С.С. Дементьев

# Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия eltech@vstu.ru

**Резюме:** Долговременное бесперебойное электроснабжение потребителей требует «интеллектуализации» существующих электрических сетей. Одним из этапов создания «умной» сети является оснащение воздушных линий электропередачи устройствами автоматического сбора информации о гололёдообразовании. В статье предложен алгоритм мониторинга оледенения воздушных ЛЭП посредством онлайн-видеоизмерения габарита фазных проводов. Представлен вариант технической реализации соответствующего устройства и сделан вывод о целесообразности его применения.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, интеллектуальные сети, мониторинг ЛЭП, видеоизмерения, диагностика оледенения.

# SAG VIDEO MEASUREMENT DEVICE FOR EVALUATION OF OHL ICING INTENSITY

## A.A. Shilin, S.S. Dementyev

# Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia eltech@vstu.ru

**Abstract:** The long-term trouble-free electricity supply to consumers requires the intellectualization of existing power grids. The one the stages of the creation of smart grid is to equip the overhead power lines with devices for automatically collecting information on ice formation. The article proposes the algorithm for OHLs icing monitoring by means of online video measurement of a phase conductor sag. A variant of the technical implementation of the given device is presented and a conclusion about the expediency of its application is made.

**Keywords**: reliability of power supply, smart grids, OHL monitoring, video measurements, icing diagnostics.

#### Введение

В настоящее время реализация политики энергосбережения и энергоэффективности, в совокупности с увеличением темпов роста реального сектора экономики, диктует принципиально иные требования к организации энергообеспечения, что приводит, в частности, к постепенному отказу от наращивания генерирующих мощностей в пользу обеспечения долгосрочного, бесперебойного электроснабжения потребителей с минимальными эксплуатационными издержками. В этой связи наиболее многообещающим выглядит создание «интеллектуальной» электрической сети (smart grid), представляющей собой единую автоматизированную систему, которая позволит контролировать режимы работы всех участников процессов выработки, передачи и потребления электроэнергии [1, 2]. При этом, так как основным источником аварий в сети электроснабжения являются именно воздушные линии, одним из первых шагов на пути развёртывания smart grid может стать оснащение ЛЭП устройствами непрерывной диагностики состояния. В нашей стране особая уязвимость воздушных линий электропередачи объясняется эксплуатацией в условиях экстремального метеорологического воздействия, что, вкупе со значительным физическим износом самих ЛЭП, приводит к массовому обрыву проводов и падению линейных опор в гололёдный период [3].

# Оценка интенсивности оледенения

На сегодняшний день большинство устройств диагностики состояния ЛЭП реализуют тензометрические методы измерения гололёдных нагрузок и требуют значительного изменения конструкции линий ввиду установки силоизмерительных датчиков. Высокая стоимость и сложность монтажа привели к относительно малому распространению данных устройств даже в условиях их объективной необходимости [4], в связи с чем поиск новых принципов количественной оценки гололёдообразования на ЛЭП остаётся актуальным.

Помимо прямого измерения веса гололёдных отложений очевидным показателем оледенения проводов является уменьшение их габарита  $\Gamma$  до земли и, соответственным образом, увеличение стрелы провеса f (рис. 1), т.к.

$$\Gamma = H - f \; ,$$

где *H* – высота подвеса провода. При этом линия провисания провода с достаточной точностью аппроксимируется уравнением идеально гибкой нити, имеющим в данном случае вид [5]





© А.А. Шилин, С.С. Дементьев

$$L' = \Gamma \cdot \sin h \left(\frac{x}{\Gamma}\right),$$

которое, после разложения в ряд Маклорена, примет вид

$$L' = x + \frac{x^3}{3!\Gamma^2} + \frac{x^5}{5!\Gamma^4} + \dots$$
(1)

Из формулы (1) очевидным образом следует, что полная длина L провода в пролёте найдётся как

$$L = l + \frac{l^3}{24 \cdot \Gamma^2} + \frac{l^5}{1920 \cdot \Gamma^4} + \dots,$$

где *l* – длина пролёта.

Изменение механических нагрузок, действующих на провод, а также вариация его нагрева проходящим током и окружающей средой приводят к изменению длины провода, текущее значение которой (в *i*-й момент времени) соотносится с предыдущим следующим образом [6]:

$$L_{i} = L_{i-1} \Big( 1 + \Delta \varepsilon_{\mathcal{Y}} + \Delta \varepsilon_{t} \Big), \tag{2}$$

где Δε<sub>y</sub>, Δε<sub>t</sub> – приращения, соответственно, упругих и температурных деформаций. При этом из литературы [6] известно, что

$$\Delta \varepsilon_y = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{E}, \qquad (3)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение в материале провода; *E* – модуль Юнга, а величина

$$\Delta \varepsilon_t = \alpha \left( t_i - t_{i-1} \right), \tag{4}$$

где α – температурный коэффициент линейного удлинения; *t* – нагрев провода.

Выражая из (2) величину приращения упругой деформации и подставляя (3), (4) в данное уравнение, получим:

$$\sigma_{i} - \sigma_{i-1} = E \left( \frac{L_{i}}{L_{i-1}} - \alpha \left( t_{i} - t_{i-1} \right) - 1 \right).$$
(5)

Заметим, что механическое напряжение  $\sigma$ , удельная нагрузка  $\gamma$  на провод и стрела его провисания *f* связаны между собой формулой [6, 7]:

$$f = \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma} \,. \tag{6}$$

Тогда, выражая из (6) величину σ и подставляя в выражение (5), после ряда элементарных преобразований получим уравнение для расчёта текущей механической нагрузки на провод:

$$\gamma_i = f_i \left( \frac{8 \cdot E}{l^2} \left( \frac{L_i}{L_{i-1}} - \alpha \left( t_i - t_{i-1} \right) - 1 \right) + \frac{\gamma_{i-1}}{f_{i-1}} \right).$$

Также очевидно, что полная нагрузка  $\gamma_i$  складывается из удельных нагрузок от собственного веса провода  $\gamma_{np}$  и изменяющегося веса гололёдной муфты  $\gamma_{rm(i)}$ :

$$\gamma_i = \gamma_{\rm np} + \gamma_{\rm \scriptscriptstyle TM(i)} \,. \tag{7}$$

Известно [7], удельная нагрузка на провод диаметром  $d_{np}$  и сечением S от веса гололёдной муфты плотностью  $g_0=900$  кг/см<sup>3</sup> диаметром  $d_{rm}$  определяется как

Проблемы энергетики, 2017, том 19, № 11–12

$$\gamma_{\rm FM} = \frac{\pi}{4} \left[ \left( d_{\rm np} + d_{\rm FM} \right)^2 - d_{\rm np}^2 \right] \cdot \frac{g_0}{S} \,. \tag{8}$$

Объединяя уравнения (7), (8) и выражая величину текущего диаметра  $d_{\text{гм}(i)}$  гололёдной муфты, получим

$$d_{\rm FM}(i) = \sqrt{\frac{4S(\gamma_i - \gamma_{\rm np})}{\pi \cdot g_0} + d_{\rm np}^2} - d_{\rm np}$$

При этом интенсивность нарастания (таяния) гололёдных отложений за промежуток времени  $\Delta \tau = \tau_i - \tau_{i-1}$  составит [8]:

$$V_{i} = \frac{d_{\rm FM}(i) - d_{\rm FM}(i-1)}{\tau_{i} - \tau_{i-1}}$$

Необходимо подчеркнуть, что интенсивность образования отложений является ценным информационным параметром, т.к. позволяет объективно оценивать динамику изменения процесса в ближайшей перспективе и более корректным образом составлять карту плавки [4].

Из всего вышесказанного следует, что устройство для мониторинга интенсивности оледенения ЛЭП, использующее в качестве чувствительного параметра величину линейного габарита, должно функционировать по алгоритму, показанному на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм мониторинга интенсивности оледенения

## Устройство видеоизмерения габарита

Наиболее точный метод измерения провисания проводов заключается в вычислении по данным видеонаблюдения координат оптических меток, что подразумевает установку ПЗС-камеры с лазерной или инфракрасной подсветкой на теле опоры и маячков со светоотражающим покрытием (фликеров) на каждой фазе на расстоянии ~50 м от начала

пролёта (рис. 3).

Установка трёх оптических меток объясняется необходимостью мониторинга гололёдной нагрузки на всех проводах ЛЭП, что, в свою очередь, продиктовано неравномерностью оледенения фаз нижнего и верхнего ярусов [9].



a) – внешний вид; б) – оптическая метка с кольцом светоотражающей ленты

В реальных условиях эксплуатации применение видеодатчика габарита также потребует использования термокожуха, устройства для стабилизации горизонтального положения, системы обогрева и очистки стекла.

Для мониторинга нагрева провода протекающим током нагрузки и окружающей средой предлагается использовать подвесной модуль измерения температуры (ПМИТ), включающий в себя соответствующий сенсор 1, микроконтроллер 2, Wi-Fi (ZigBee)-модем 3, а также устройство отбора мощности (УОМ) 4, зарядное устройство (ЗУ) 5 и аккумуляторную батарею (АКБ) 6, объединённые в едином корпусе 7 (рис. 4).



Рис. 4. Подвесной модуль измерения температуры провода

#### Видеорегистрация координат провода

Вычисление текущего габарита линии до земли (провисания) Г, м, на основании изменения ординаты оптической метки на видеокадре  $\Delta Y$ , пикс, выполняется с использованием следующего выражения:

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{\Delta Y}{N}$$
,

где Г<sub>0</sub> – начальное значение клиренса провода, м; *N* – переводной коэффициент, пикс/м.

Определение координат маячка осуществляется путём поиска и распознавания на стоп-кадрах фрагмента, соответствующего полученному ранее эталонному изображению фликера. Для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм корреляционного совмещения, который сводится к поиску максимума двумерной функции корреляции анализируемого изображения (F) и шаблона (W) [10].

#### Проблемы энергетики, 2017, том 19, № 11–12

Заметим, что в данном случае более предпочтительным выглядит использование нормированной кросскорреляционной функции (НККФ), автоматически нивелирующей яркостные различия двух изображений и имеющей вид [10]:

$$C(\alpha,\beta) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left[ W'(i,j) \cdot F'(\alpha+i,\beta+j) \right]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left[ W'(i,j) \right]^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left[ F'(\alpha+i,\beta+j) \right]^2}}$$

при этом

$$W'(i, j) = W(i, j) - \frac{\sum \sum W(i, j)}{n \cdot m},$$
  
$$F'(\alpha + i, \beta + j) = F(\alpha + i, \beta + j) - \frac{\sum \sum F(\alpha + i, \beta + j)}{n \cdot m},$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – номера строки и столбца корреляционной матрицы; N, M – размер изображения F; n, m – размер изображения W.

Идеальное совпадение анализируемого фрагмента видеокадра и эталонного изображения оптической метки (рис. 3,  $\delta$ ) будет иметь место при значении корреляции 1, полному различию будет соответствовать -1, а значение 0 засвидетельствует отсутствие корреляции между двумя изображениями.

Немаловажным является и то, что успешное определение пространственных координат провода возможно лишь при наличии у оптической метки уникальных внешних характеристик, благодаря чему не допускается фиксация объекта с идентичными свойствами на фоновой области видеоизображения.

# Заключение

Предлагаемый алгоритм мониторинга интенсивности оледенения ЛЭП посредством контроля габарита проводов и оценки их удлинения является основополагающим при реализации соответствующего видеоизмерительного устройства, которое, ввиду потенциально более высоких метрологических характеристик (по причине исключительной помехоустойчивости оптического канала наблюдения), простоты монтажа на существующих линиях и дешевизны, представляет собой очевидную выгодную альтернативу аналогичным устройствам тензометрии гололёдных нагрузок.

### Литература

1. Шилин А.А., Артюшенко Н.С., Дементьев С.С. «Умные» опоры воздушных линий электропередачи // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодёжи: матер. III российской молодёжной науч. школы-конф. (21–23 окт. 2015 г.) / Томск: Нац. исслед. Томский политехн. ун-т. 2015. С. 235–239.

2. Kabalci E., Kabalci Y. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids // Measurement science review. 2013. Vol. 13. No 5. 248–252 pp. DOI: 10.2478/msr-2013-0037.

3. Башкевич В.Я., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А., Стебеньков С.Б. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях: монография. Саратов: СГТУ, 2013. 244 с.

4. Угаров Г.Г., Титов Д.Е. Системы мониторинга гололёдообразования и перспективы их совершенствования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №7. С. 52–29.

5. Power electronics handbook: devices, circuits and applications / edited by Muhammad H. Rashid. 3<sup>rd</sup> ed. 2011. 1410 p.

6. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.

7. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. В 2 т. Т. 1.

#### © А.А. Шилин, С.С. Дементьев

Работа и расчёт проводов и тросов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.

8. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах: учеб. пособие. М.: МЭИ, 2007. 494 с.

9. Никитина И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитина С.А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. 2015. №3. С. 794–823. [Электронный ресурс]: http://ogbus.ru/issues/3\_2015/ogbus\_3\_2015\_p794-823\_NikitinaIE\_ru.pdf (дата обращения 04.04.2017)

10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

#### Авторы публикации

Шилин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета.

*Дементьев Сергей Сергеевич* – аспирант кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета.

#### References

1. Shilin A.A. The "smart" towers of overhead power lines / A.A. Shilin, N.S. Artyushenko, S.S. Dementyev // Power engineering, electromechanics and energy-efficient technologies as viewed by youth: materials of III Russian Youth Scientific School-conf. (October 21-23, 2015) / Nat. Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2015. P. 235–239.

2. Kabalci E., Kabalci Y. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids // Measurement science review. 2013. Vol. 13. No 5. 248–252 pp. DOI: 10.2478/msr-2013-0037.

3. Monitoring of overhead power lines operating in extreme weather conditions: monograph / V. Ya. Bashkevich, G.G. Ugarov, P.A. Kuznetsov, S.B. Stebenkov. Saratov: SGTU, 2013. 244 p.

4. Ugarov G.G., Titov D.E. Ice formation monitoring systems and prospects for their improvement // Electrical equipment: operation and repair. 2014. No 7. P. 52–29.

5. Power electronics handbook: devices, circuits and applications / edited by Muhammad H. Rashid. 3<sup>rd</sup> ed. 2011. 1410 p.

6. Keselman L.M. Fundamentals of the overhead power lines mechanics. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 352 p.

7. Glazunov A.A. Fundamentals of the mechanical part of overhead power lines. In 2 parts. Part 1: The work and the calculation of wires and cables. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 192 p.

8. Diagnostics, reconstruction and maintenance of overhead power lines in the sleet areas / I.I. Levchenko, A.S. Zasypkin, A.A. Aliluev, E.I. Satsuk. Moscow: MEI, 2007. 494 p.

9. Nikitina I.E., Abdrakhmanov N.Kh., Nikitin S.A. Methods of ice removing from the wires of electric power lines // Oil and Gas Engineering. 2015. No 3. 794–823 pp. Available at: http://ogbus.ru/issues/3\_2015/ogbus\_3\_2015\_p794-823\_NikitinaIE\_en.pdf (accessed 04/04/2017).

10. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow: Technosphere, 2005. 1072 p.

#### Authors of the publication

*Aleksey A. Shilin* – Cand. Sci. (Techn.), assistant professor, Department "Electrical engineering", Volgograd State Technical University.

*Sergey S. Dementyev* – postgraduate student, Department "Electrical engineering", Volgograd State Technical University.

#### Поступила в редакцию

14 июля 2017 г.