

## Information-Measuring System for Monitoring the Climate Impact on Overhead Power Lines

Shilin A. N., Shilin A. A., Dement'ev S. S.h

Volgograd State Technical University  
Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** Studying the problem of diagnosing high-voltage lines is the goal of this research. The high accident rate of overhead lines due to icing and current overloads makes this problem important. Current overloads during distributed power generation lead to overheating of the lines. The goal of the research is achieved due to the fact, that the article notes the relationship between icing and overloads. The necessity of joint solution of these problems and the development of the concept of a multifunctional measuring system is proved. For this, an analysis of the main parameters that determine the mode of operation of overhead lines is carried out. Technical solutions for the measurement of these quantities are considered. The detection of ice formation by comparing the values of dew points and desublimation is described. The calculation of the limiting current load taking into account weather conditions is given. The amount of sagging wires is selected as a universal characteristic of the state of the line. A significant result of the study is the optical method of icing control. This method consists in measuring the coordinates of the line wires through a weatherproof CCTV-camera. To do this, optical tags and a temperature sensor are placed on the wires. The optimal architecture of the measuring system for assessing the climatic impact is given. The significance of the results is that a multifunctional and high-precision system without expensive load sensors is proposed. The conclusion about the importance of the results for building a smart grid is made.

**Keywords:** smart grid, reliability of power supply, telemetry system, icing diagnostics, OHL temperature monitoring, weather conditions monitoring.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3898086

**UDC:** 621.315.17

### Sistem informațional de măsurare pentru monitorizarea impactului climei asupra liniilor electrice aeriene

Șilin A.N., Șilin A. A., Dementiev S.S.

Universitatea tehnică din Volgograd, Federația Rusă

**Rezumat.** Scopul studiului constă în examinarea problemei diagnosticării stării curente a liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune. Semnificația acestei probleme este determinată de rata mare de accidente a liniilor aeriene, datorită susceptibilității lor la îngheț și a supraîncărcărilor cu curent electric. Problema supraîncărcării cu curent este relevantă în special în condițiile de descentralizare a generării de energie electrică, care este însoțită de sarcină mare și supraîncălzire a liniilor. Scopul studiului este atins datorită faptului că în lucrare s-a depistat legătura mutuală a proceselor depunere a chiciurii și supraîncărcarea liniei. Este dovedită necesitatea soluționării comune a acestor probleme și dezvoltarea conceptului unigenții” rețelelor electrice. S-a realizat analiza principalilor parametri, care determină regimul de funcționare a liniilor aeriene. Sunt luate în considerare soluțiile tehnice pentru implementarea controlului și măsurării parametrilor selectați. Se indică la posibilitatea detectării precoce a formării de gheață, care este sesizată în baza raportului dintre punctele de rouă și desublimare. Este descris mecanismul de calcul al încărcării maxime de curent pe baza stării actuale a mediului extern. Ca o caracteristică universală a stării liniei aeriene, este selectată valoarea săgeții conductoarelor liniei. Rezultatul cel mai semnificativ al studiului este dezvoltarea unei metode optice pentru monitorizarea solicitărilor provocate de vânt și gheață. Semnificația rezultatelor obținute este confirmată de faptul, că implementarea sistemului propus nu necesită o procedură complicată pentru încorporarea în linie a senzorilor tensometrici scumpi, concomitent se asigură multifuncționalitatea și precizia diagnosticului. Având în vedere cewle expuse, seformulează concluzia despre perspectivele soluției propuse și conformitatea acesteia cu conceptul de rețea electrică de nouă generație „inteligentă”.

**Cuvinte-cheie:** rețea ”inteligentă”, fiabilitate a alimentării, sistem de telemetrie, diagnosticarea formării gheții, monitorizarea temperaturii liniilor de înaltă tensiune, monitorizarea condițiilor meteorologice.

**Информационно-измерительная система для мониторинга климатического воздействия на воздушные линии электропередачи**

**Шилин А. Н., Шилин А. А., Дементьев С. С.**

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью исследования является рассмотрение вопроса диагностики текущего состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи. Важность данного вопроса объясняется высокой аварийностью воздушных линий в силу их подверженности обледенению и перегрузкам по току. Последняя проблема особо актуальна в условиях децентрализации выработки электроэнергии, что сопровождается высокой нагрузкой и перегревом линий. Поставленная цель исследования достигается за счёт того, что в статье впервые отмечается исключительная взаимосвязь процессов обледенения и перегрузки линии. Доказывается необходимость совместного решения указанных проблем и разработки концепции многофункциональной измерительной системы в рамках «интеллектуализации» электрических сетей. Проводится анализ основных параметров, определяющих режим функционирования воздушных линий. Рассматриваются технические решения по реализации контроля и измерения данных величин. Указывается на возможность раннего обнаружения гололёдообразования на основании соотношения точек росы и десублимации. Описывается механизм расчёта предельной токовой нагрузки на основе текущего состояния внешней среды. В качестве универсальной характеристики состояния воздушной линии выбирается величина провисания её проводов. Наиболее существенным результатом исследования является разработка оптического способа мониторинга гололёдно-ветровых нагрузок. Данный метод подразумевает использование видеокамер для высокоточной фиксации провисания проводов линии в любых метеоусловиях. Это достигается посредством установки на проводах оптических меток их положения и датчика температуры. Также подразумевается оснащение видеокамер инфракрасными прожекторами для подсветки меток в ночное время суток. В статье приводится оптимальная архитектура измерительной системы для оценки климатического воздействия на воздушные линии электропередачи. Значимость полученных результатов подчёркивается тем, что для реализации предлагаемой системы не требуется сложная процедура встраивания в конструкцию линии дорогостоящих тензометрических датчиков, при этом обеспечивается многофункциональность и точность диагностирования. С учётом всего этого делается вывод о перспективности предлагаемого решения и его соответствия концепции «умной» электрической сети нового поколения.

**Ключевые слова:** «умная» сеть, надёжность электроснабжения, система телеизмерений, диагностика гололёдообразования, температурный мониторинг ВЛЭП, контроль метеоусловий.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основными приоритетами деятельности электроэнергетического комплекса во всех развитых странах мира являются поддержание и модернизация сетевой инфраструктуры (линий электропередачи и подстанций) с целью долгосрочного обеспечения качественного и доступного электроснабжения. Очевидно, что решение данной задачи заключается в комплексном увеличении надёжности всей электрической сети, а в первую очередь – воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), как её наиболее уязвимого элемента.

Причиной, объясняющей высокий уровень аварийности воздушных линий, является перманентное воздействие многочисленных метеорологических и эксплуатационных факторов.

Так, наиболее аварийно-опасными, вызывающими частые и длительные перебои электроснабжения (более 60 % от общей

продолжительности всех отключений [1, 2]), являются экстремальные механические нагрузки, вызванные сочетанием гололёдного и ветрового воздействия на протяжённые элементы ВЛЭП (провода).

Более инерционным, но в перспективе приводящим к не менее тяжёлым последствиям, является нагрев сталеалюминевых проводов выше допустимых значений как результат перегрузки воздушной линии по току вкупе с неблагоприятным сочетанием климатических условий (высокая температура воздуха, отсутствие ветра, значительная интенсивность солнечной радиации) [3].

Перегрев воздушной линии влечёт за собой изменение физико-химических свойств материала проводов, вызывает ускоренный износ, коррозию, потерю механической прочности и, как следствие, увеличивает вероятность перекрытия и последующего короткого замыкания по причине нарушения безопасных габаритов [4, 5, 6].

Ключом к достижению долговременной безаварийной эксплуатации воздушных ЛЭП является «интеллектуализация» сети электроснабжения, а именно, внедрение комплекса технических средств, работающих в автоматическом режиме и выявляющих наиболее «слабые» и аварийно-опасные участки сети с целью коррекции её характеристик и топологии (технология smart grid) [7-12]. Первым шагом в данном направлении станет оснащение существующих электрических сетей системами сбора информации о состоянии ВЛЭП [9, 13].

На сегодняшний день работы по созданию систем телеизмерений гололёдно-ветровых нагрузок и устройств динамической оценки цепи по нагреву (dynamic thermal circuit rating [14, 15]) ведутся обособленно, при этом функционал большинства современных информационно-измерительных систем (ИИС), которые устанавливаются на линиях (тензометрические комплексы [1] и «умные сферы» [16, 17]), не подразумевает одновременный контроль обледенения и температурного режима проводов. В этой связи разработка ИИС для оценки текущего состояния воздушных линий электропередачи с учётом вариации метеоусловий остаётся актуальной.

На начальном этапе исследования проанализируем основные параметры, определяющие режим эксплуатации ВЛЭП и подлежащие контролю и измерению.

### МОНИТОРИНГ ГОЛОЛЁДНЫХ НАГРУЗОК

Отслеживание метеорологических условий, способствующих образованию гололёдно-изморозевых отложений (ГИО) на протяжённых элементах воздушной линии делает возможным выполнение своевременных профилактических мероприятий (например, обогрева проводов путём перераспределения токовых нагрузок) по недопущению обледенения [18, 19]. Для этой цели перспективным выглядит использование термодинамического способа диагностики, подробное описание которого приводится в [20].

Данный метод подразумевает вычисление значений точек росы  $t_{dew}$  и десублимации  $t_{sub}$ , (°C) [20]:

$$t_{dew} = \frac{243.12 \left( \ln(RH) + \frac{17.62 \cdot t_{atm}}{243.12 + t_{atm}} \right)}{17.62 - \left( \ln(RH) + \frac{17.62 \cdot t_{atm}}{243.12 + t_{atm}} \right)},$$

$$t_{sub} = \frac{272.62 \left( \ln(RH) + \frac{22.46 \cdot t_{atm}}{272.62 + t_{atm}} \right)}{22.46 - \left( \ln(RH) + \frac{22.46 \cdot t_{atm}}{272.62 + t_{atm}} \right)},$$

где  $RH$  – относительная влажность воздуха, ед.;  $t_{atm}$  – температура окружающей среды, °C.

Гололёдообразование невозможно при температуре поверхности провода  $t$  больше 0 °C, а также, если величина  $t$  в области отрицательных температур превышает значения точек росы  $t_{dew}$  и десублимации  $t_{sub}$  [20].

При невыполнении данного условия задачей информационно-измерительной системы является оповещение дежурного персонала о вероятности обледенения проводов.

Количественные параметры формирования ГИО на линейных проводах и их обдува потоками воздуха являются отправными для принятия оперативным персоналом решения о необходимости упреждающих мер (плавки гололёда) и подготовки к их реализации [2].

Гололёдно-ветровое воздействие в каждый  $i$ -й момент времени вызывает изменение стрелы провеса провода  $f_i$  и его отклонение от вертикали на угол  $\varphi_i$  (рис. 1), что описывается очевидными соотношениями:

$$f_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2},$$

$$\varphi_i = \arctg \left| \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right|,$$

где  $x_0, y_0$  – координаты подвеса провода, м;  $x_i, y_i$  – текущие координаты провода в пространстве, м.

Как видно из рис. 1, величина стрелы провеса  $f_{wt}$  при воздействии нагрузки от веса обледенелого провода, может быть выражена следующим образом:

$$f_{wt} = f_{sum} \cdot \cos \varphi,$$

где  $f_{sum}$  – стрела провеса при воздействии суммарной гололёдно-ветровой нагрузки, м. При этом известно, что

$$f_{wt} = \frac{\gamma_{wt} \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{wt}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{wt}$  – удельная нагрузка от веса провода, покрытого гололёдом, кг/(м·мм<sup>2</sup>);  $\sigma_{wt}$  – соответствующее механическое напряжение в материале провода, кг/мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина пролёта, м [21].

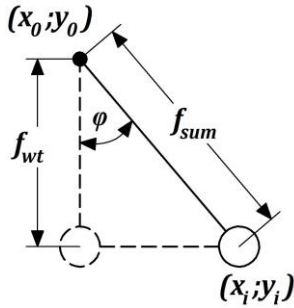


Рис. 1. Отклонение провода под действием ветра.<sup>1</sup>

Связь между параметрами двух разных режимов (текущего и исходного), отличающихся между собой климатическими условиями, осуществляется при помощи уравнения состояния провода [21]:

$$l + \frac{l^3 \gamma_i^2}{24 \sigma_i^2} = \left( l + \frac{l^3 \gamma_0^2}{24 \sigma_0^2} \right) \times \left[ 1 + \frac{1}{E} (\sigma_i - \sigma_0) + \alpha (t_i - t_0) + \frac{\alpha}{E} (t_i - t_0) (\sigma_i - \sigma_0) \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $t_i$  – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура провода (°C) в текущем режиме;  $\sigma_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $t_0$  – соответствующие параметры исходного режима;  $E$  – модуль упругости материала провода, кг/мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного удлинения, град<sup>-1</sup>.

Заметим, что приведённая выше полная запись уравнения состояния провода (2) является более корректной, т.к. учитывает

отличие длины провода в пролёте  $L$  от длины самого пролёта  $l$ , а также изменение величины  $L$  под действием механических усилий в различных режимах (рис. 2).

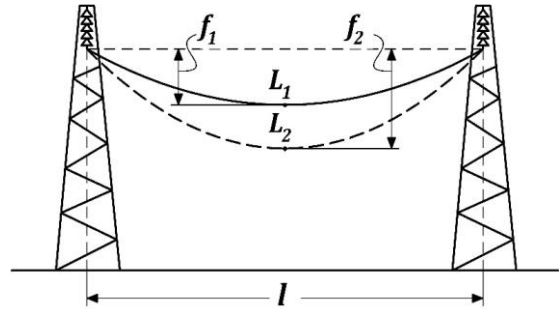


Рис. 2. Растяжение провода под действием механических нагрузок.<sup>2</sup>

Параметры исходного режима заранее известны и определяются в ходе эталонных измерений.

Выразив из уравнения (1) величину  $\sigma_{wt}$  и подставив в (2), получим формулу для расчёта удельной нагрузки  $\gamma_{wt}$  по данным измерения стрелы провеса  $f_{wt}$  и температуры провода  $t$ :

$$\gamma_{wt} = \frac{8 f_{wt} E}{l^2} \left[ \frac{\frac{8 f_{wt}^2}{3l} - \frac{l^3 \gamma_0}{24 \sigma_0} - \alpha \cdot l (t - t_0) \left( 1 + \frac{l^2 \gamma_0}{24 \sigma_0^2} \right)}{l [1 + \alpha (t - t_0)] \cdot \left( 1 + \frac{l^2 \gamma_0}{24 \sigma_0^2} \right)} + \sigma_0 \right].$$

По известным значениям нагрузок от веса обледенелого провода  $\gamma_{wt}$  и свободного от гололёда  $\gamma_{wire}$ , можно найти удельную нагрузку от веса гололёдной муфты  $\gamma_{ice}$ :

$$\gamma_{ice} = \gamma_{wt} - \gamma_{wire}, \quad (3)$$

которая также вычисляется по формуле, приведённой в [21]:

$$\gamma_{ice} = \frac{\pi}{4} \left[ (d + 2b)^2 - d^2 \right] \cdot \frac{g_0}{S}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр провода, мм;  $b$  – эквивалентная толщина стенки гололёдной муфты (рис. 3), мм;  $g_0$  – плотность гололёдно-изморозевых отложений, кг/см<sup>3</sup>;  $S$  – площадь сечения провода, мм<sup>2</sup>.

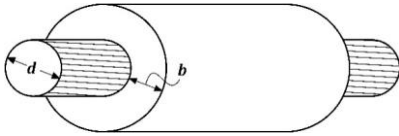


Рис. 3. Отложения эквивалентной цилиндрической формы.<sup>3</sup>

Толщина гололёдной муфты, а также параметры ветрового давления определяют значение удельной нагрузки от воздействия ветра  $\gamma_{wind}$ , вызывающей отклонение провода от вертикали [21]:

$$\gamma_{wind} = \frac{0,0636v^2(d+2b)}{S} \sin \theta \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\theta$  – угол встречи ветра с поверхностью провода (угол атаки), град.

Выразив параметр  $b$  из уравнений (4), (5) с учётом (3) и приравняв соответствующие выражения, получим формулу для расчёта плотности отложений:

$$g_0 = \frac{(\gamma_{wt} - \gamma_{wire}) \cdot S}{\pi \left( \frac{\gamma_{wind} \cdot S \cdot 10^3}{0,1272v^2 \cdot \sin \theta} - \frac{d^2}{4} \right)}, \quad (5)$$

Вычисление плотности ГИО позволяет судить о типе отложений – так, для прозрачного или матового льда характерна плотность 600...900 кг/м<sup>3</sup>, в то время как плотность снеговых и изморозевых образований не превышает 600 кг/м<sup>3</sup> [2].

Вид отложений является важным информационным параметром, т.к. определяет удельную теплоёмкость ГИО (2,26 Вт·с/(г·°C) и 2,09 Вт·с/(г·°C) для льда и изморози соответственно [2]) и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , учитываемые в расчётах режима плавки гололёда, при этом если для льда значение  $\lambda$  практически постоянно (2,27 Вт/(м·°C) [2]), то в случае изморози изменяется в зависимости от её плотности по закону [2]:

<sup>3.4</sup> Appendix 1  $\lambda = (2,1 + 42 \cdot 10^{-3} g_0 + 216 \cdot 10^{-9} g_0^3) \cdot 10^2$  (4)

Необходимо отметить, что наиболее целесообразным выглядит мониторинг гололёдной нагрузки на каждом из проводов ВЛЭП – это объясняется неравномерностью намерзания льда на проводах нижнего и верхнего ярусов, что впоследствии может привести к недопустимому сближению фаз – «подпрыгиванию» нижнего провода из-за более быстрого таяния ГИО и, соответственно, большей скорости уменьшения стрелы провеса (рис. 4) [22].

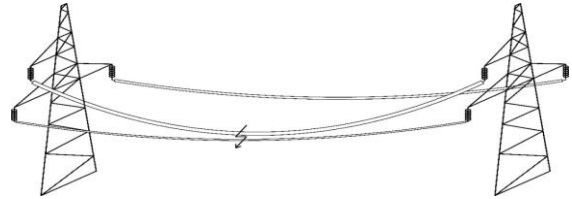


Рис. 4. Перекрытие изоляции при неравномерном сбросе льда.<sup>4</sup>

### МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

Нагрев проводов выше допустимого значения (90 °C) происходит вследствие перегрузки ВЛЭП в случае перераспределения потоков мощности в сети при аварийных или запланированных отключениях других элементов сети [23, 24]. В последнее время температурный мониторинг воздушных линий приобретает всё большую актуальность по причине роста электропотребления при отказе от углеводородного топлива и развития децентрализованной генерации, что в совокупности также приводит к росту транзитных перетоков мощности [16].

Текущий нагрев провода зависит от протекающего по нему тока и атмосферных условий: температуры воздуха, скорости и направления ветра, солнечной радиации. Очевидно, что допустимая температура провода  $t_{lim}$  может быть определена как

$$t_{lim} = t_{am} + \Delta t_{adm}, \quad (6)$$

где  $\Delta t_{lim}$  – превышение допустимого (предельного) нагрева провода над температурой окружающей среды, °C.

При свободной конвекции (отсутствии ветра) величина  $\Delta t_{lim}$  вычисляется следующим образом [4]:

$$\Delta t_{lim} = \frac{3,935 \left( j_{lim}^2 N_a^2 d_a^4 R_{20} / d \right) \cdot (1 + 0,006 t_{am}) + 7,704 W_s' (1 + 0,0016 t_{am})}{(t_{am} + 273)^{3,3} \cdot (1 - d_a / d) \cdot 10^{-6} + 410 / d^{0,32}}, \quad (7)$$

где  $j_{lim}$  – допустимая плотность тока в проводнике, А/мм<sup>2</sup>;  $N_a$  – число проволок токоведущей части провода;  $d_a$  – диаметр алюминиевой проволоки, мм;  $d$  – диаметр провода, мм;  $R_{20}$  – удельное сопротивление провода при 20 °С по ГОСТ 839-80, Ом/км;  $W_s'$  – интенсивность солнечной радиации, поглощаемой проводом, Вт/м<sup>2</sup>.

Для расчёта интенсивности нагрева провода солнечным излучением используется выражение [4]:

$$W_s' = \varepsilon \cdot k_h \cdot W_s \cdot \sin \delta,$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты тела (для окисленного алюминия 0,6);  $k_h$  – коэффициент, учитывающий влияние высоты трассы ВЛЭП над уровнем моря (например, для средней полосы России 1,0);  $W_s$  – интенсивность солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$\delta$  – активный угол наклона солнечных лучей (град), вычисляемый по формуле [23]:

$$\delta = \arccos[\cos h_s \cdot \cos(180 - \psi)],$$

где  $h_s$  – угловая высота Солнца над горизонтом, град;  $\psi$  – географический угол линии электропередачи (ориентация по отношению к меридиану в диапазоне 0...180°).

Входящая в уравнение (7) величина допустимой плотности тока определяется очевидным соотношением:

$$j_{lim} = \frac{I_{lim}}{S}, \quad (8)$$

где  $I_{lim}$  – допустимая токовая нагрузка, А;  $S$  – сечение провода, мм<sup>2</sup>.

Объединив (6)-(8) и выразив величину  $I_{lim}$ , получим формулу для расчёта допустимой токовой нагрузки ВЛЭП с учётом нагрева провода в текущих условиях внешней среды:

$$I_{lim} = S \sqrt{\frac{d \left[ (t_{lim} - t_{am}) \cdot \left[ (t_{am} + 273)^{3,3} \cdot (1 - d_a / d) \cdot 10^{-6} + 410 / d^{0,32} \right] - 7,704 W_s' (1 + 0,0016 t_{am}) \right]}{3,935 N_a^2 d_a^4 R_{20} (1 + 0,006 t_{am})}}.$$

В случае вынужденной конвекции (при наличии ветра) изменение скорости и режима движения теплоносителя (воздуха) приводит к повышению коэффициента теплоотдачи, что учитывается в соответствующем аналитическом выражении для определения превышения температуры провода над температурой окружающей среды [4]:

$$\Delta t_{lim} = \frac{5,018 \left( j_{lim}^2 N_a^2 d_a^4 R_{20} / d \right) \cdot (1 + 0,0052 t_{am}) + 8,926 W_s'}{(t_{am} + 273)^{3,3} \cdot (1 - d_a / d) \cdot 10^{-6} + 1977 k_\theta v^{0,6} / d^{0,4}}, \quad (9)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $k_\theta$  – поправочный коэффициент на угол атаки, который находится по формуле [4]:

$$k_\theta = 0,5443 - 5,2164 \cdot 10^{-4} \theta + 2,3128 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 1,939 \cdot 10^{-6} \theta^3,$$

где  $\theta$  – угол встречи ветра с поверхностью провода, град.

С учётом (9) можно получить выражение для расчёта допустимой токовой нагрузки в условиях вынужденной конвекции:

$$I_{lim} = S \sqrt{\frac{d \left[ (t_{lim} - t_{am}) \cdot \left[ (t_{am} + 273)^{3,3} \cdot (1 - d_a / d) \cdot 10^{-6} + 1977 k_\theta v^{0,6} / d^{0,4} \right] - 8,926 W_s' \right]}{5,018 N_a^2 d_a^4 R_{20} (1 + 0,0052 t_{am})}}. \quad (10)$$

При осуществлении мониторинга температурного режима ВЛЭП назначением информационно-измерительной системы является сигнализация термической

перегрузки (нагрева провода выше допустимого), предоставление информации о резерве пропускной способности линии в текущих условиях окружающей среды, а в

перспективе и прогнозирование величины допустимой токовой нагрузки с учётом изменения метеоусловий.

### СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Опираясь на всё вышеизложенное, перечислим основные параметры, подлежащие анализу в процессе мониторинга гололёдно-ветрового воздействия и температурного режима работы ВЛЭП:

- положение провода в пространстве (стрела провеса и отклонение от вертикали);
- температура провода;
- климатические условия: влажность и температура воздуха, скорость и направление ветра, мощность солнечной радиации.

Рассмотрим возможные способы измерения перечисленных величин.

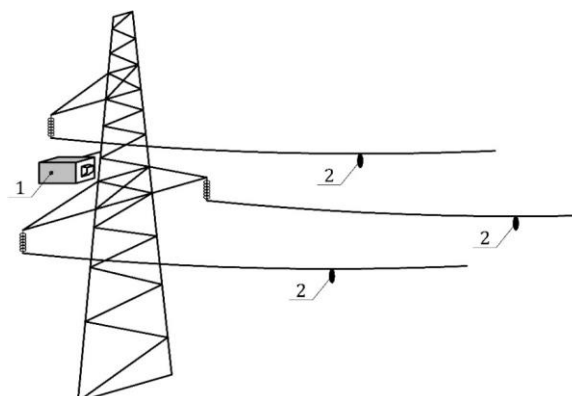
Для контроля положения провода предлагается использовать технологию компьютерного зрения, что подразумевает вычисление координат оптической метки, устанавливаемой на соответствующем проводе, в процессе непрерывной видеоаналитики.

Смещение метки в результате гололёдно-ветрового воздействия на провод регистрируется камерой видеонаблюдения, подключенной к блоку обработки информации (видеосерверу), который, выполняя попиксельное сканирование соответствующих областей видеокладов, производит точное вычисление координат оптической метки с их последующим пересчётом в координаты точки максимального провисания провода.

Как отмечалось ранее, ввиду неравномерности распределения гололёдной нагрузки по проводам наиболее целесообразным выглядит размещение оптических меток на каждой фазе. Таким образом, сложный и дорогостоящий монтаж тензодатчиков гололёдной нагрузки (между траверсой и гирляндой изоляторов [1, 2]) заменяется сравнительно простой процедурой установки камеры видеонаблюдения на опоре и «маячков» (оптических меток) на проводах (рис. 5).

Применяемые в качестве меток положения проводов «маячки» могут быть как активными (со светодиодной подсветкой), так и пассивными (со светоотражающим покрытием). Использование активных

«маячков» подразумевает наличие источников питания, в то время как применение пассивных меток требует организации инфракрасной подсветки.



1 – камера видеонаблюдения, 2 – оптическая метка.

Рис. 5. Контроль провисания проводов с применением системы видеонаблюдения.<sup>5</sup>

Контроль температуры провода может осуществляться с помощью измерительного модуля, состоящего из накладного термодатчика, аналого-цифрового преобразователя, источника питания, а также Wi-fi- или ZigBee-модема для беспроводной связи с блоком обработки информации. Датчик температуры провода конструктивно может быть совмещён с оптической меткой.

Для оценки климатических условий (влажности и температуры воздуха, скорости и направления ветра, мощности солнечной радиации) могут применяться соответственно гигрометр, термометр, анеморумбометр и пиранометр в составе портативной метеостанции, обладающей стандартным интерфейсом подключения к цифровому блоку обработки информации.

Результатом синтеза предлагаемых технических решений является изображённая на рис. 6 структурная схема информационно-измерительной системы для мониторинга обледенения и перегрузки воздушных линий электропередачи.

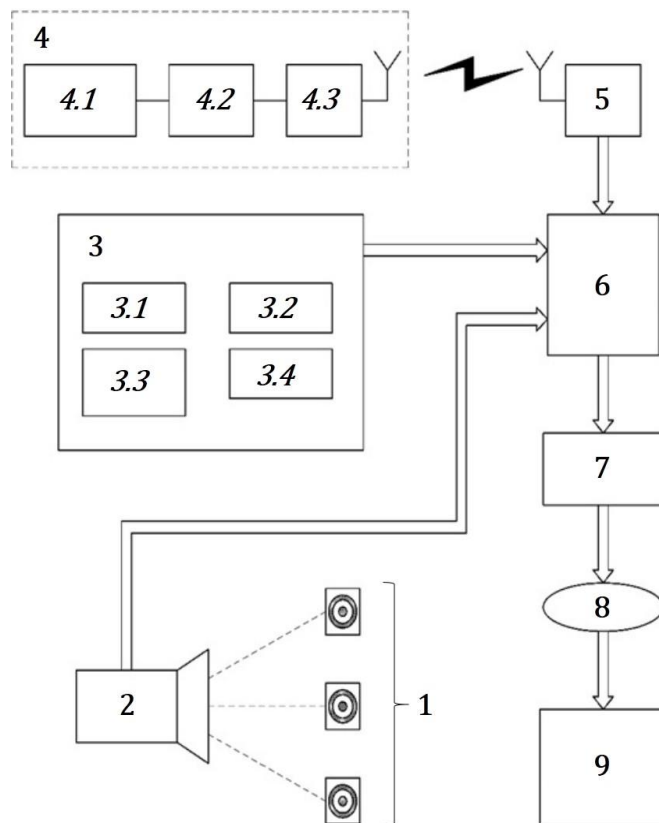
Электроснабжение измерительного поста осуществляется от аккумуляторной батареи, работающей в режиме перманентного подзаряда от солнечной батареи с помощью специализированного контроллера (зарядного устройства). В перспективе возможна разработка устройства бесконтактного отбора мощности от ВЛЭП, принцип действия которого основывается на явлении

<sup>5</sup> Appendix 1

электростатической индукции, например, отбора мощности от грозозащитных тросов.

Передача информации на удалённый центр мониторинга может выполняться по спутниковым или радиоканалам, с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)

или комбинацией перечисленных способов. В случае выбора GSM-канала целесообразно обеспечить доступ к сетям сотовой связи нескольких операторов.



1 – метки положения проводов, 2 – видеодатчик, 3 – портативная метеостанция (3.1 – гигрометр, 3.2 – термометр, 3.3 – анеморумбометр, 3.4 – пиранометр), 4 – блок измерения температуры провода (4.1 – датчик температуры, 4.2 – аналого-цифровой преобразователь, 4.3 – модем), 5 – модем, 6 – блок обработки информации, 7 – устройство телепередачи, 8 – канал связи, 9 – удалённый центр мониторинга.

Рис. 6. Структурная схема информационно-измерительной системы.<sup>6</sup>

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная структурная схема информационно-измерительной системы отвечает заявленному требованию к многофункциональности (возможности мониторинга гололёдно-ветрового воздействия и температурного режима эксплуатации), а заложенные технические решения позволяют значительным образом удешевить монтаж компонентов ИИС на существующих линиях.

Отметим, что предлагаемая система диагностирует обледенение линии по увеличению

провисания проводов на основе видеоданных и, следовательно, реализует совершенно новый метод измерения гололёдных нагрузок, не требующего установки тензометрических датчиков, но отличающегося высокой точностью ввиду помехоустойчивости оптического канала наблюдения.

Следует обратить внимание и на то, что традиционно проблемы мониторинга обледенения проводов, а также их перегрева в контексте обеспечения надёжного функционирования ВЛЭП рассматриваются сугубо обособленно. Между тем, резюмируя всё изложенное выше, можно прийти к

<sup>6</sup> Appendix 1



выводу о том, что задачи контроля гололёдно-ветровых нагрузок и динамической оценки цепи по нагреву коррелируют друг с другом, т.к. для их осуществления необходимы в том числе идентичные сенсоры (датчики температуры провода и метеоусловий). В свою очередь это свидетельствует о том, что слияние отдельных средств измерений в единую информационно-измерительную систему приводит к синергетическому эффекту –

повышению точности диагностирования ВЛЭП и тем самым надёжности электроснабжения путём мониторинга любых проявлений климатического воздействия на линии. Таким образом, предлагаемая система может рассматриваться как один из инструментов для контроля состояния воздушных линий электропередачи в рамках «интеллектуальной» сети.

#### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>Fig. 1. Deviation of the wire in the wind.

<sup>2</sup>Fig. 2. Wire stretching under the influence of mechanical stress.

<sup>3</sup>Fig. 3. Equivalent cylindrical ice deposits.

<sup>4</sup>Fig. 4. Insulation short circuit during uneven ice discharge.

<sup>5</sup>Fig. 5. Using a CCTV to line sag monitoring. (1 – CCTV camera, 2 – optical marker).

<sup>6</sup>Fig. 6. Block diagram of an information measuring system. (1 – marks of coordinates of wires, 2 – video sensor, 3 – portable weather station (3.1 – hygrometer, 3.2 – thermometer, 3.3 – anemometer, 3.4 – pyranometer), 4 – block for measuring wire temperature (4.1 – temperature sensor, 4.2 – analog-to-digital converter, 4.3 – modem), 5 – modem, 6 – information processing unit, 7 – remote transmission device, 8 – communication channel, 9 – remote monitoring center).

#### Литература (References)

- [1] Bashkevich V.YA., Ugarov G.G., Kuznetsov P.A., Steben'kov S.B. *Monitoring vozdushnykh liniy elektroperedachi, ekspluatiruyemykh v ekstremal'nykh meteouloviyakh* [Monitoring overhead power lines operating in extreme weather conditions]. Saratov, 2013. 244 p.
- [2] Levchenko I.I., Zasyupkin A.S., Alliluyev A.A., Satsuk E.I. *Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdushnykh liniy elektroperedachi v gololodnykh rayonakh* [Diagnostics, reconstruction and operation of overhead power lines in icy areas]. Moscow, 2007. 494 p.
- [3] Samarina A.V., Rygalin D.B., Shklyayev A.A. *Sovremennyye tekhnologii monitoringa vozdushnykh elektrosetey LEP* [Modern technologies of overhead power lines monitoring]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki – Natural and Technical Sciences*, 2012, no. 1 (57), pp. 296-304. (In Russian).
- [4] Deb A.K. *Powerline ampacity system: theory, modeling, and applications*. Boca Raton, 2000. 251 p.
- [5] Seppa T.O. Increasing transmission capacity by real time monitoring. *Proc. Winter Meeting of the IEEE-Power-Engineering-Society*. New York, 2002, pp. 1208-1211.
- [6] Seppa T.O., Cromer E., Whitlatch W.F. Summer thermal capabilities of transmission-lines in northern California based on a comprehensive study of wind conditions. *Proc. Summer Meeting of IEEE*. Seattle, 1992, pp. 1551-1561.
- [7] Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecat C., Hancke G.P. Smart grid technologies: communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 529-539. doi: 10.1109/TII.2011.2166794.
- [8] Yanmin Q., Nan Z. The Overview of smart grid. *Proc. International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*. Hong Kong, 2012, pp. 140-142.
- [9] Zhou X.S., Shang B., Ma Y.J. Survey of development and technology of smart grid. *Proc. 2nd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT)*. Zhuhai, 2012, pp. 328-330.
- [10] Souran D.M., Safa H.H., Moghadam B.G., Ghasempour M., Heravi P.T. Smart grid technology in power systems. *Proc. 6th International Workshop on Soft Computing Applications*. Timisoara, 2014, pp. 1367-1381. doi: 10.1007/978-3-319-18416-6\_109.
- [11] Zhou G.Y. The Development of smart grid and its key technology. *Proc. International Conference on Industrial Technology and Management Science (ITMS)*. Tianjin, 2015, pp. 1781-1783.
- [12] Dileep G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 2020, no. 146, pp. 2589-2625. doi: 10.1016/j.renene.2019.08.092.
- [13] Wang C.L., Cao M.J., Lucas R.M. Design of load optimal control algorithm for smart grid based on demand response in different scenarios. *Open Physics*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 1046-1055. doi: 10.1515/phys-2018-0125.
- [14] Seppa T.O. Accurate ampacity determination – temperature-sag model for operational real-time ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 10, no. 3, pp. 1460-1470. doi: 10.1109/61.400930.
- [15] Motlis Y., Barrett J.S., Davidson G.A., Douglass D.A., Hall P.A., Reding J.L., Seppa T.O., Thrash F., White H.B. Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high

- operating temperatures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 2, pp. 549-560. doi: 10.1109/61.754102.
- [16] Lovrenchich V., Gabrovsek M., Kovach M., Gubelyak N., Soyat Z., Klobas Z. The contribution of conductor temperature and sag monitoring to increased ampacities of overhead lines (OHLs). *Periodica Polytechnica. Electrical Engineering and Computer Science*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 70-77. doi: 10.3311/PPee.8585.
- [17] Gubeljak N., Lovrencic V., Kovac M., Banic B., Nikolovski S. Preventing transmission line damage caused by ice with smart on-line conductor monitoring. *Proc. 1st International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*. Osijek, 2016, pp. 155-163.
- [18] Muller M., Muller Z., Tlustý J. Dynamic behaviour of overhead line under icing conditions. *Proc. 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*. Stara Lesna, 2015, pp. 109-112.
- [19] Sakamoto Y. Snow accretion on overhead wires. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Mathematical-Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, no. 1776, pp. 2941-2970. doi: 10.1098/rsta.2000.0691.
- [20] Titov D.E. e.a. *Sposob obnaruzheniya golodnykh, izmorozevykh i slozhnykh otlozheniy na provode i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [A method of detecting ice, rime and complex deposits on the wire and device for its implementation]. Patent RF, no. 2554718, 2015.
- [21] Keselman L.M. *Osnovy mekhaniki vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [Fundamentals of the mechanics of overhead power lines]. Moscow, 1992. 352 p.
- [22] Tarasov E.V. *Montazh, naladka, ekspluatatsiya elektrooborudovaniya. Chast' 1. Vozdushnyye i kabel'nyye linii elektroperedachi* [Installation, adjustment, maintenance of electrical equipment. Part 1. Overhead and cable power lines]. Tomsk, 2010. 146 p.
- [23] Ren L.J., Li H., Liu Y. On-line monitoring and prediction for transmission line sag. *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Bali, 2012, pp. 813-817.
- [24] De Villiers W., Cloete J.H., Wedepohl L.M., Burger A. Real-time sag monitoring system for high-voltage overhead transmission lines based on power-line carrier signal behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 389-395. doi: 10.1109/TPWRD.2007.905550.
- [25] Albizu I., Fernandez E., Mazon A.J., Alberdi R. Forecast ratio and security analysis of rating forecasting methods in an overhead line. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, vol. 11, no. 6, pp. 1598-1604. doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1649.
- [26] Hsu T.S., Chiu H.C., Yang Y.C., Tseng C.Y., Lin M.J., Wang J.C., Jiang J.A. An IoT-based sag monitoring system for overhead transmission lines. *Proc. IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. Bangkok, 2019, pp. 515-519.

#### Сведения об авторах.



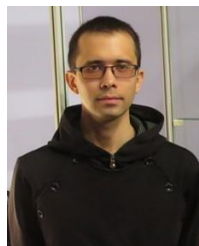
**Шилин Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, действительный член Метрологической Академии Российской Федерации, заведующий кафедрой «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).

E-mail: [eltech@vstu.ru](mailto:eltech@vstu.ru)



**Шилин Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).

E-mail: [shilin.jr@gmail.com](mailto:shilin.jr@gmail.com)



**Дементьев Сергей Сергеевич** – преподаватель кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ).

E-mail: [c165tc34@yandex.ru](mailto:c165tc34@yandex.ru)