

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

Тула
Издательство ТулГУ
2021

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Грязев М.В., д-р техн. наук.
Первый заместитель председателя
Ворошилин М.С., д-р техн. наук.
Заместитель председателя
Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.
Ответственный секретарь
Фомичева О.А., канд. техн. наук, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –
гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;
Берестнев М.А., канд. юрид. наук, –
гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;
Борискин О.И., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Технические науки»;
Егоров В.Н., канд. пед. наук, –
гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, –
гл. редактор серии «Педагогика»;
Кацурын Н.М., д-р техн. наук, –
гл. редактор серии «Науки о Земле»;
Понаморева О.Н., д-р хим. наук, –
гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Заместитель главного редактора
Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь
Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ
Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Александров А.Ю., д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтарева, г. Ковров);
Баласахан Б.С., д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);
Заномель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, г. Острава, Чехия);
Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);
Лавриченко В.Ю., д-р техн. наук, (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);
Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Мельников В.Е., д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);

Мецераков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);
Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);
Распопов В.Я., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);
Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Сычугов А.А., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Траудобов В.Н., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ», г. Тула);
Ячки С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

05.02.02 Машиноведение системы приводов и детали машин;
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;
05.02.08 Технология машиностроения;
05.02.09 Технологии и машины обработки давлением;
05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);
05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции;
05.09.03 Электротехнические комплексы и системы;
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);
05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);
05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Активация Windows

© Авторы научных статей, 2021
© Издательство ТулГУ, 2021
Windows, перейди к компьютеру

акустического излучения. Акустический метод включает прием, обработку и сравнение результатов акустических измерений с прежде измеренными значениями. Метод количественный, детерминированный, может широко использоваться при мониторинге и формировании базы данных о техническом состоянии элемента СЭС на всем протяжении его жизненного цикла. Одним из направлений акустической диагностики является ультразвуковая дефектоскопия, в принципе работы которой заложено принудительное формирование акустических сигналов и получение отклика диагностируемого электрооборудования посредством датчиков.

Для поиска дефектных изоляторов на подстанциях и воздушных линиях (ВЛ), установления местонахождения помех, возникающих в электросетях от всевозможных корон и разрядов на оборудовании и влияющих на каналы телемеханики и связи, определения развивающихся дефектов в закрытых распределительных устройствах типа КРУ, КРУН и т.д., где нет видимого обзора токоведущих частей, обнаружения мест утечек воздуха на сухопроводах воздушных выключателей, на самих воздушных выключателях, а также дефектов разделки высоковольтного кабеля и др. находит применение ультразвуковой прибор "Ультрапроб 2000", представляющий собой портативный переносной ультразвуковой детектор. Шкалу прибора «Ультрапроб 2000» можно настраивать на частоты от 20 до 100 кГц. Наушники позволяют пользователю "слышать" ультразвук в дополнение к показаниям аналогового измерительного прибора. Применение компьютерной обработки поступающих ультразвуковых сигналов, преобразованных в звуковую частоту и записанных на воспринимающее устройство, позволяет качественно оценивать характер разрядов и на этом основании правильно диагностировать оборудование.

Беспилотные летательные аппараты, оснащенные видеокамерами, дальномерами, позволяют составить фактические схемы сооружений СЭС, определить их плановое и высотное положение. Многократное сканирование с наружи сооружения (например, эпопы ЛЭП) позволяет с помощью компьютерных программ составить рабочие чертежи и их конструктивных элементов [8].

Из анализа методов контроля технического состояния видно, что они требуют специального оборудования, подготовленных специалистов и значительного количества времени. Состав при меняемых на оборудовании методов и средств диагностирования и контроля определяется и обосновывается востребованной степенью идентификации повреждений, потребностью получения прогнозных оценок работоспособности оборудования и при наличии существенных отклонений технических параметров элементов энергосистемы от нормы.

Список литературы.

1. Карагодин В.В., Вишняков Е.П. Задачи диагностирования электроустановок систем электроснабжения специальных комплексов объектов МО // Сборник научных трудов военно-космической академии имени А.Ф.Можайского / ВКА имени А.Ф.Можайского. СПб., 2008. С. 85 – 90.
2. Кошчев В.Б., Сосновкина Е.Л., Чалов А.А. Оценка надежности бесщеточных систем возбуждения мощных турбогенераторов. В кн. Бесщеточные системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: ВНИИЭлектромаш, 1986. С.119-127.
3. Лизунов С.Д. Состояние изоляции в эксплуатации и методы ее профилактики // Трансформаторы: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-76) / Под ред. В.М. Погостина и С.И. Рабиновича. М.: Энергия, 1979. С. 42-54.
4. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле трансформаторного оборудования. М.: ЭНАС. 2000.
5. РД 34.46.302-89 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. М.: Союзтехэнерго, 1989.
6. Рыбаков Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ: Научное издание. М.: Энергоатомиздат, 2004. 421 с.
7. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Когана. М.: Энергосервис, 2001. 496 с.

8. Богомолов С.И. Перспективные методы неразрушающего контроля состояния конструкций зданий и сооружений // Журнал «Военный инженер» №1 ВИ (ТИ) ВА МТО, СПб., 2016. С.60-63.

Богомолов Сергей Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Тиличко Юрий Николаевич, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

COMPLEX DIAGNOSTIC OF SYSTEM ELECTRIC PROVIDE

S.I. Bogomolov, U.N. Tilichko

In article effective methods for diagnose of system electric provide are describe. e. s. as infrared and heat-vision control, the methods of analysis gas, acoustic methods. Vision inspect of airline are effective with use unpiloted flying apparat.

Key words: methods for diagnose of system electric, infrared, heat-vision and acoustic methods.

Bogomolov Sergey Ivanovich, candidate of technical science, oldest science worker, vka@mil.ru, Russia, Saint-Peterburg, Mozhaisky Military Aero Space Academy,

Tilichko Uryi Nikolaevich, science worker, vka@mil.ru, Russia, Saint-Peterburg, Mozhaisky Military Aero Space Academy

УДК 621.311.22

DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-588-596

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ ВЛ ПО КАНАЛУ ПРОГНОЗА ГОЛОЛЕДОБРАЗОВАНИЯ НА ЭЛЕМЕНТАХ ВЛ

В.О. Акуличев, С.Ю. Захаров, И.А. Роднионов, С.Г. Висич, В.М. Степанов, М.В. Панарин, А.А. Маслова

Рассмотрена математическая модель цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ, которая реализуется на модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании. Цифровая метеостанция ВЛ в процессе работы формирует ряд метеорологических параметров, которые являются наиболее важными с точки зрения воздействия на состояние и работы ВЛ электропередач. Полученное матричное описание цифровой математической модели цифровой метеостанции ВЛ в сочетании с ранее разработанными математическими моделями модулей дистанционного мониторинга проводов ВЛ и расчетными данными позволяет проводить оценку и моделирование процесса пляски проводов ВЛ при гололедных отложениях.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, воздушная линия электропередач, диспетчерский пункт, гололедообразование, прогноз, метеостанция.

Цифровая трансформация – ключевое условие для повышения конкурентоспособности российской экономики на глобальном уровне. В настоящее время объективно созрела необходимость масштабных преобразований в сфере электроэнергетики и, как следствие, общего развития промышленности нашей страны. Стратегическая задача по цифровизации энергетических секторов поставлена и Президентом РФ в рамках программы «Цифровая экономика» [1-5].

ООО «СервисСофт» совместно с филиалом «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья» разрабатывается серия модулей интеллектуальной диагностики воздушных линий электропередач воздушных линий (ВЛ) 6-220 кВ. В том числе ведется разработка математических моделей цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ и каналу прогноза пляски проводов ВЛ.

Цифровая математическая модель цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ. Цифровая метеостанция ВЛ в процессе работы формирует ряд метеорологических параметров, которые являются наиболее важными с точки зрения воздействия на состояние и работы ВЛ электропередач [6, 7].

Цифровая метеостанция ВЛ через установленные интервалы времени Δt вырабатывает информационные сигналы, пропорциональные мгновенным значениям температуры окружающего воздуха. Последовательность измеренных цифровой метеостанцией значений температуры окружающего воздуха представлена в виде

$$\vartheta_m(k), \vartheta_m(k-1), \vartheta_m(k-2), \dots, \vartheta_m(k-N+1), \vartheta_m(k-N), \quad (1)$$

где $\vartheta_m(k)$ – значение температуры окружающего воздуха, °С; k – порядок отсчета значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании; n – номер отсчета значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании; N – количество отсчетов значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании.

Для исключения возможных ошибочных отсчетов в последовательности измеренных цифровой метеостанцией значений температуры окружающего воздуха воспользуемся неравенством

$$\vartheta_{\text{допмин.т}} < \vartheta_m(k) < \vartheta_{\text{допмакс.т}} \quad (2)$$

где $\vartheta_{\text{допмин.т}}$ – минимально возможно допустимое значение температуры окружающего воздуха для региона, в котором установлена цифровая метеостанция ВЛ, °С; $\vartheta_{\text{допмакс.т}}$ – максимально возможное допустимое значение температуры окружающего воздуха для региона, в котором установлена цифровая метеостанция ВЛ, °С.

Если для k отсчета неравенство (2) не соблюдается, то формируется сообщение об ошибке считывания значения температуры окружающего воздуха и запускается счетчик ошибочных значений температуры.

Значение счетчика ошибочных значений температуры окружающего воздуха на интервале N отсчетов определяется по формуле

$$n\vartheta_m = n\vartheta_m + 1, \quad (3)$$

где $n\vartheta_m$ – значение счетчика температуры окружающего воздуха на интервале N отсчетов; N – количество отсчетов значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании.

Значение счетчика ошибочных значений температуры окружающего воздуха на интервале N отсчетов (3) сравнивается с максимальной установленной величиной допустимых ошибочных значений посредством неравенства

$$n\vartheta_m > N\vartheta_{m,\text{max}} \quad (4)$$

где $N\vartheta_{m,\text{max}}$ – максимально установленная величина допустимых ошибочных значений измерений.

Если неравенство (4) выполняется, то формируется сообщение о неисправности в канале считывания температуры окружающего воздуха цифровой метеостанции ВЛ. Это сообщение передается в диспетчерский пункт электросетевой компании.

Если при подсчете ошибочных значений на любом отсчете k до достижения $N\vartheta_m$ неравенство (4) не соблюдается, то счетчик ошибочных значений температуры окружающей среды сбрасывается, и очередное значение температуры $\vartheta_m(k)$ окружающего воздуха записывается в формируемую последовательность под своим номером в порядке отсчета k значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании. На интервале считывания $\vartheta_m(k+1)$ до $\vartheta_m(k+n\vartheta_m)$ ошибочных значений ϑ_m заполняются величинами

$$\vartheta_m(k+(1..n\vartheta_m)) = \frac{1}{n\vartheta_m} \left(\sum_{k+\frac{n\vartheta_m}{2}}^{k+n\vartheta_m} \vartheta_m(k) + \sum_{k+\frac{n\vartheta_m}{2}}^{n\vartheta_m+1} \vartheta_m(k+n\vartheta_m) \right). \quad (5)$$

В результате получаем внутреннюю последовательность отсчетов значений температуры окружающей среды от последнего измеренного значения k на интервале считывания $\vartheta_m(k+1)$ до $\vartheta_m(k+n\vartheta_m)$ ошибочных значений ϑ_m , которая является составной частью ранее приведенной последовательности на полном интервале N отсчетов значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании

$$\vartheta_m(k), \vartheta_m(k-1), \vartheta_m(k-2), \dots, \vartheta_m(k-N+1), \vartheta_m(k-N) \quad (6)$$

Цифровая метеостанция ВЛ вырабатывает информационные сигналы, пропорциональные мгновенным значениям относительной влажности окружающего воздуха $RH_m, \%$ с интервалом времени Δt . Последовательность значений относительной влажности окружающего воздуха $RH_m, \%$, измеренных цифровой метеостанцией ВЛ представлена в виде

$$RH_m(k), RH_m(k-1), RH_m(k-2), \dots, RH_m(k-N+1), RH_m(k-N), \quad (7)$$

где RH_m – значение относительной влажности окружающего воздуха по данным метеостанции, %; k – порядок отсчета значений переменных цифровой метеостанцией при квантовании.

Цифровая метеостанция ВЛ также вырабатывает информационные сигналы, пропорциональные значениям количества осадков на периоде передачи данных с интервалом времени Δt .

Последовательность значений количества осадков по данным метеостанции на периоде передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ, представлена в виде

$$H_m(k), H_m(k-1), H_m(k-2), \dots, H_m(k-N+1), H_m(k-N), \quad (8)$$

где H_m – значение количества осадков по данным метеостанции на периоде передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ, $\frac{мм}{ч}$.

Аналогично цифровой метеостанция ВЛ также вырабатывает информационные сигналы, пропорциональные значениям скорости и направления движения воздушных потоков.

Последовательность значений скорости ветра на периоде передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ, представлена в виде

$$V_m(k), V_m(k-1), V_m(k-2), \dots, V_m(k-N+1), V_m(k-N), \quad (9)$$

где V_m – значение скорости ветра по данным метеостанции, $\frac{м}{с}$.

Последовательность значений направления ветра на периоде передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ, представлена в виде

$$\alpha_m(k), \alpha_m(k-1), \alpha_m(k-2), \dots, \alpha_m(k-N+1), \alpha_m(k-N), \quad (9)$$

где α_m – значение направления ветра по данным метеостанции, град.

Объединяя полученные последовательности значений параметров данных цифровой метеостанции, получим матричное представление метеорологической ситуации в районе пролегания контролируемой ВЛ электропередач

$$\begin{bmatrix} \vartheta_m \\ RH_m \\ H_m \\ V_m \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_m(k), \vartheta_m(k-1), \vartheta_m(k-2), \dots, \vartheta_m(k-N+1), \vartheta_m(k-N) \\ RH_m(k), RH_m(k-1), RH_m(k-2), \dots, RH_m(k-N+1), RH_m(k-N) \\ H_m(k), H_m(k-1), H_m(k-2), \dots, H_m(k-N+1), H_m(k-N) \\ V_m(k), V_m(k-1), V_m(k-2), \dots, V_m(k-N+1), V_m(k-N) \\ \alpha_m(k), \alpha_m(k-1), \alpha_m(k-2), \dots, \alpha_m(k-N+1), \alpha_m(k-N) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Полученная матрица (10) отражает метеорологические параметры цифровой метеостанции ВЛ в районе пролегания контролируемой линии электропередач.

Для построения цифровой математической модели прогноза гололедообразования на элементах ВЛ дополним полученные данные цифровой метеостанции ВЛ данными других модулей дистанционной диагностики работы ВЛ, а именно модуля дистанционной диагностики проводов ВЛ по каналу измерения температуры провода

$$\vartheta_{\text{прд}}(k), \vartheta_{\text{прд}}(k-1), \vartheta_{\text{прд}}(k-2), \dots, \vartheta_{\text{прд}}(k-N+1), \vartheta_{\text{прд}}(k-N), \quad (11)$$

где $\vartheta_{\text{прд}}(k)$ – значение температуры провода воздушной линии электропередач, °С.

Объединяя полученные последовательности значений (10) и (11) параметров данных цифровой метеостанции, получим матричное представление

$$\begin{bmatrix} \vartheta_m \\ RH_m \\ H_m \\ V_m \\ \alpha_m \\ \vartheta_{\text{прд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_m(k), \vartheta_m(k-1), \vartheta_m(k-2), \dots, \vartheta_m(k-N+1), \vartheta_m(k-N) \\ RH_m(k), RH_m(k-1), RH_m(k-2), \dots, RH_m(k-N+1), RH_m(k-N) \\ H_m(k), H_m(k-1), H_m(k-2), \dots, H_m(k-N+1), H_m(k-N) \\ V_m(k), V_m(k-1), V_m(k-2), \dots, V_m(k-N+1), V_m(k-N) \\ \alpha_m(k), \alpha_m(k-1), \alpha_m(k-2), \dots, \alpha_m(k-N+1), \alpha_m(k-N) \\ \vartheta_{\text{прд}}(k), \vartheta_{\text{прд}}(k-1), \vartheta_{\text{прд}}(k-2), \dots, \vartheta_{\text{прд}}(k-N+1), \vartheta_{\text{прд}}(k-N) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

На основе матричного представления (12) определим интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ.

Интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на длине 1 метр в единицу времени в начальной стадии гололедообразования при ветре, направленном вдоль продольной оси провода, характеризуется уравнением [3]

$$\Delta P = 100 \cdot 2\lambda \cdot H \cdot V_k \cdot \sin \beta, \quad (13)$$

где ΔP – интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на длине 1 метр, кг/час; 2λ – полоса потока обтекания провода ВЛ, см; H – содержание капель в единице объема воздуха (г/см³); V_k – скорость движения капель, см/с; β – угол отклонения продольной оси провода ВЛ от направления ветра, град.

Полоса потока обтекания провода ВЛ определяется соотношением

$$2\lambda = ad, \quad (14)$$

где a – коэффициент захвата капель; d – диаметр провода, см.

Скорость движения капель определяется через скорость ветра в районе пролегания трассы ВЛ электропередач

$$V_k = V_m / 100, \quad (15)$$

где V_m – значение скорости ветра по данным метеостанции, $\frac{M}{C}$.

Угол отклонения [8] продольной оси провода ВЛ от направления ветра определяется следующим выражением

$$\beta = \text{mod}(\alpha_m - \beta_{вл}), \quad (16)$$

где α_m – значение направления ветра по данным метеостанции, град; $\beta_{вл}$ – проектный угол отклонения продольной оси провода ВЛ от направления на север, град; mod – функция вычисления модуля выражения.

Для определения вида обледенения в виде гололедно-изморозевых отложений используем принятые условия, приведенные в [9-11].

В соответствии с классификацией гололедно-изморозевых отложений, проявляющихся на поверхности конструкций, в том числе на проводах и опорах ВЛ, сооружений и наземных предметов, приняты следующие виды отложений:

гололед (стекловидный или матовый), плотность 0,6-0,9 г/см³;

зернистая (плотная) изморозь, плотность 0,4 г/см³;

кристаллическая изморозь (инеевидный осадок), плотность 0,2 г/см³;

отложения мокрого снега, плотность 0,4 г/см³;

различные смеси этих осадков (сложное отложение), плотность 0,25 - 0,5 г/см³.

Гололед образуется при таких атмосферных явлениях, как дождь, туман, морось и при соблюдении следующих условий

$$\left\{ \begin{array}{l} -4 \leq \vartheta_m(k) < 0 \\ 0 \leq V_{т.средняя}(k) < 15 \\ V_{т.макс}(k) < 40 \end{array} \right\}, \quad (17)$$

где $\vartheta_m(k)$ – значение температуры окружающего воздуха, °C; V_m – значение скорости ветра по данным метеостанции, $\frac{M}{C}$; $V_{т.средняя}$ – среднее значение скорости ветра по данным метеостанции, $\frac{M}{C}$; $V_{т.макс}$ – максимальное значение скорости ветра по данным метеостанции, $\frac{M}{C}$.

Зернистая изморозь образуется при таких атмосферных явлениях, как туман, морось и при соблюдении следующих условий

$$\left\{ \begin{array}{l} -20 \leq \vartheta_m(k) < -3 \\ 1 \leq V_{т.средняя}(k) < 15 \\ V_{т.макс}(k) < 40 \end{array} \right\}. \quad (18)$$

Кристаллическая изморозь образуется при таких атмосферных явлениях, как дымка, туман и при соблюдении следующих условий

$$\left\{ \begin{array}{l} -30 \leq \vartheta_m(k) < -5 \\ 0 \leq V_{т.средняя}(k) < 3 \\ 5 \leq V_{т.макс}(k) < 7 \end{array} \right\}. \quad (19)$$

Отложения мокрого снега образуются при налипающем мокром снеге и соблюдении следующих условий

$$\left\{ \begin{array}{l} -2 \leq \vartheta_m(k) < +1 \\ 0 \leq V_{т.средняя}(k) < 10 \\ 20 \leq V_{т.макс}(k) < 30 \end{array} \right\}. \quad (20)$$

Сложное отложение из различных смесей этих осадков образуется при таких атмосферных явлениях, как морось, дождь, мокрый снег, туман и при соблюдении следующих условий

$$\left\{ \begin{array}{l} -20 \leq \vartheta_m(k) < 0 \\ 1 \leq V_{т.средняя}(k) < 15 \\ 30 \leq V_{т.макс}(k) < 40 \end{array} \right\}. \quad (21)$$

При температуре провода ВЛ, измеряемой модулем дистанционного мониторинга проводов, разработанным на этапе два данной научно-исследовательской работы, выше 0 градусов и влажности воздуха, измеряемой цифровой метеостанцией ВЛ, менее 80%, условия для проявления гололеда не образуются

$$\left\{ \begin{array}{l} \vartheta_{прд}(k) > 0 \\ RH_m(k) < 80\% \end{array} \right\}, \quad (22)$$

где $\vartheta_{прд}(k)$ – значение температуры провода воздушной линии электропередач, °C; RH_m – значение относительной влажности воздуха, %.

В результате получаем последовательность расчетных значений интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ по данным цифровой метеостанции и модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ [12]

$$\Delta P(k), \Delta P(k-1), \Delta P(k-2), \dots, \Delta P(k-N+1), \Delta P(k-N),$$

где $\Delta P(k)$ – интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на длине 1 метр, кг/час.

Динамика интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ по данным цифровой метеостанции и модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ на соседних отсчетах определяется соотношением

$$\Delta P(k, k-1) = \frac{3600 \cdot [\Delta P(k) - \Delta P(k-1)]}{T_{мп}}, \quad (23)$$

где $\Delta P(k, k-1)$ – динамика интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ по данным цифровой метеостанции и модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ на соседних отсчетах, кг; $T_{мп}$ – период передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ (время между соседними послылками при штатных параметрах мониторинга), с.

Аналогично динамика интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ по данным цифровой метеостанции и модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ на N отсчетах определяется соотношением

$$\Delta P(k, k-N) = \frac{3600 \cdot [\Delta P(k) - \Delta P(k-N)]}{N \cdot T_{мп}}, \quad (24)$$

где N – количество отсчетов значений переменных цифровой метеостанции ВЛ при квантовании.

Для прогноза гололедообразования на элементах ВЛ дополнительно к данным цифровой метеостанции применяются прогнозные данные [13-14], принятые диспетчерским центром электросетевой компании от Гидрометцентра в районе пролегания контролируемой ВЛ электропередач, представленные в виде

$$\begin{bmatrix} \vartheta_{mg} \\ RH_{mg} \\ H_{mg} \\ V_{mg} \\ \alpha_{mg} \\ \vartheta_{прдг}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_{mg}(k + ng) \\ RH_{mg}(k + ng) \\ H_{mg}(k + ng) \\ V_{mg}(k + ng) \\ \alpha_{mg}(k + ng) \\ \vartheta_{прдг}(k + ng) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где ϑ_{mg} – прогнозируемое значение температуры окружающего воздуха по данным Гидрометцентра, °C; RH_{mg} – прогнозируемое значение относительной влажности окружающего воздуха по данным Гидрометцентра, %; H_{mg} – прогнозируемое значение количества осадков по данным Гидрометцентра на период прогнозирования, $\frac{MM}{M^2}$; V_{mg} – прогнозируемое значение скорости ветра по данным Гидрометцентра, $\frac{M}{C}$; α_{mg} – прогнозируемое значение направления ветра по данным Гидрометцентра, град; $\vartheta_{прдг}$ – значение температуры провода воздушной линии электропередач, °C; $(k + ng)$ – прогнозируемый отсчет данных Гидрометцентра относительно текущего отсчета значений переменных цифровой метеостанции ВЛ при квантовании; k – порядок отсчета значений переменных цифровой метеостанции ВЛ при квантовании; ng – период прогнозирования данных Гидрометцентром в количестве отсчетов значений переменных цифровой метеостанции ВЛ при квантовании.

Период прогнозирования данных Гидрометцентром в количестве отсчетов значений переменных цифровой метеостанции ВЛ при квантовании определяется следующим соотношением

$$ng = \frac{T_{mg}}{T_{mp}}, \quad (26)$$

где T_{mg} – период времени прогнозирования данных Гидрометцентром, с; T_{mp} – период передачи данных от цифровой метеостанции ВЛ (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с.

Полученная матрица отражает прогнозные значения метеорологических параметров в районе пролегания контролируемой линии электропередач.

На основе прогнозных данных определим интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на длине 1 метр в единицу времени

$$\Delta Pmg = 100 \cdot 2\lambda \cdot Hmg \cdot Vkmg \cdot \sin \beta mg, \quad (27)$$

где ΔPmg – прогнозная интенсивность приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на длине 1 метр, кг/час; 2λ – полоса потока обтекания провода ВЛ, см; Hmg – прогнозное содержание капель в единице объема воздуха ($г/см^3$); $Vkmg$ – прогнозная скорость движения капель, см/с; βmg – прогнозный угол отклонения продольной оси провода ВЛ от направления ветра, град.

Скорость движения капель определяется через скорость ветра в районе пролегания трассы ВЛ электропередач

$$Vkmg = Vmg / 100, \quad (28)$$

где Vmg – прогнозируемое значение скорости ветра, $\frac{M}{C}$.

Прогнозируемый угол отклонения продольной оси провода ВЛ от направления ветра βmg определяется следующим выражением

$$\beta mg = \text{mod}(\alpha_{mg} - \beta_{вл}), \quad (29)$$

где α_{mg} – прогнозируемое значение направления ветра, град.

Процесс обледенения в виде гололедно-изморозевых отложений производится в соответствии с соотношением (27) приведенным выше, используя прогнозные значения метеопараметров.

При температуре провода ВЛ, измеряемой модулем дистанционного мониторинга проводов, разработанным на этапе два данной научно-исследовательской работы, превышающей +3 градуса по Цельсию, гололед не образуется.

В результате получаем прогнозируемое значение интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на период времени прогнозирования

$$\Delta Pmg(k + ng). \quad (30)$$

593

Прогноз динамики интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ на период времени прогнозирования данных Гидрометцентром записывается в виде

$$\Delta Pmg(k + mg, k) = \frac{2600 \cdot (\Delta Pmg(k + mg) - \Delta P(k))}{T_{mg}}, \quad (31)$$

где $\Delta Pmg(k + mg, k)$ – прогнозируемое значение динамики интенсивности приращения веса гололедного отложения на проводе ВЛ за период времени прогнозирования, кг/С; $\Delta Pmg(k + mg)$ – прогнозируемое значение интенсивности приращения веса гололедного отложения в конце периода времени прогнозирования, кг; $\Delta P(k)$ – текущее значение интенсивности приращения веса гололедного отложения, кг; T_{mg} – период времени прогнозирования данных Гидрометцентром, С.

Полученное матричное описание цифровой математической модели цифровой метеостанции ВЛ в сочетании с ранее разработанными математическими моделями модулей дистанционного мониторинга проводов ВЛ и расчетными данными позволяет проводить оценку и моделирование процесса пляски проводов ВЛ при гололедных отложениях.

Математическая модель цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ реализуется на микропроцессоре модуля дистанционного мониторинга фундаментов опор и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Список литературы

1. Правила Устройства электроустановок. 7-е издание п.2.5.38-2.5.45 Климатические условия и нагрузки.
2. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007 – 29.240.056-2010 Методические указания по определению региональных коэффициентов при расчете климатических нагрузок. Дата введения: 2010-08-09 ОАО «ФСК ЕЭС», 2010.
3. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 29.240.55.113-2012. Методические указания по применению сигнализаторов гололеда (СГ) и прогнозированию гололедоопасной обстановки Стандарт организации Дата введения: 27.01.2012.
4. ПУЭ-7 Раздел 2. Канализация электроэнергии Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ.
5. Правила Устройства электроустановок. 7-е издание п.2.5.46-2.5.74 Климатические условия и нагрузки.
6. Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35 - 750 кВ РД 34.20.182-90.
7. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередач. г. Москва, 2003, 416 с.
8. РД 34.20.184-91. Методические указания по районированию территорий энергосистем и трасс ВЛ по частоте повторяемости и интенсивности пляски проводов. Разработано Всеобщим научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ). Утверждено управлением эксплуатации, ремонта и технического перевооружения электросетей 15.11.91.
9. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601, CIGRE, 2014, 95 p.
10. Mo Y., Zhou X., Wang Ya., Liang L. Study on operating status of overhead transmission lines based on wind speed variation. Progress In Electromagnetics Research M, 2017, vol. 60. P. 111-120.
11. Методические указания по применению сигнализаторов гололеда (СГ) и прогнозированию гололедоопасной обстановки РД3420.510-82, Москва, 1982.
12. Яковлев Л.В. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и способы борьбы с ней. М., НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2002.
11. Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Дудин А.Д., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Маслова А.А. Математическая модель измерения тока в системе дистанционной диагностики проводов ВЛ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып.12. С.405-410.
12. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения механических воздействий на провод воздушной линии // Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Панарин М.В., Маслова А.А. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 2. С. 41-45.

594

компьютера.

13. Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Панарин В.М., Маслова А.А. Математическая модель дистанционного мониторинга изоляторов вл по каналу измерения тока утечки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 159-165.

14. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии/ Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Панарин М.В., Маслова А.А. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 3. С. 46-51.

Акуличев Виталий Олегович, первый заместитель генерального директора, директор по развитию, Akulichev.VO@mrsk-1.ru, Россия, Калининград, ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Захаров Сергей Юрьевич, и.о. первого заместителя директора - Главного инженера, Zaharov.SY@tl.mrsk-cp.ru, Россия, Тула, филиал «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Родионов Игорь Александрович, заместитель главного инженера по управлению производственными активами, Rodionov.IA@tl.mrsk-cp.ru, Россия, Тула, филиал «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Висич Сергей Геннадьевич, ведущий инженер, Visich.SG@tl.mrsk-cp.ru, Россия, Тула, ПАО «МРСК Центра и Приволжья».

Степанов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, energy@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

Панарин Михаил Владимирович, канд. техн. наук, директор, pmv@ssoft24.com, Россия, Тула, ООО «СервисСофт Инжиниринг».

Маслова Анна Александровна, д-р техн. наук, доцент, anna.zuykova@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

MATHEMATICAL MODEL OF A DIGITAL WEATHER STATION VL ON THE CHANNEL FOR HUNDRED FORECAST ON THE ELEMENTS OF VL

V.O. Akulichev, S.Yu. Zakharov, I.A. Rodionov, S.G. Visich, V.M. Stepanov, M.V. Panarin, A.A. Maslova

A mathematical model of a digital meteorological station of an overhead line based on the channel for forecasting ice formation on overhead line elements, which is implemented on the module and on the server of the dispatching office of the power grid company, is considered. The digital meteorological station of the overhead line in the process of operation forms a number of meteorological parameters, which are the most important from the point of view of the impact on the state and operation of overhead power transmission lines. The obtained matrix description of the digital mathematical model of the digital meteorological station of the overhead line in combination with the previously developed mathematical models of the modules for remote monitoring of the overhead line wires and calculated data makes it possible to assess and simulate the process of dancing overhead lines with ice deposits.

Key words: remote diagnostics, overhead power line, control room, ice formation, forecast, weather station.

Akulichev Vitaly Olegovich, first deputy general director, director for development, Akulichev.VO@mrsk-1.ru, Russia, Kaliningrad, IDGC of Center and Volga Region, PJSC,

Zakharov Sergey Yurievich, acting first deputy director - chief engineer, Zaharov.SY@tl.mrsk-cp.ru, Russia, Orel, Tulenergo branch of IDGC of Center and Volga Region, PJSC, Tulenergo branch of IDGC of Center and Volga Region, PJSC,

Rodionov Igor Alexandrovich, deputy chief engineer for production assets management, rodionov.IA@tl.mrsk-cp.ru, Russia, Tula, Tulenergo branch of IDGC of Center and Volga Region, PJSC,

Visich Sergey Gennadievich, leading engineer, Visich.SG@tl.mrsk-cp.ru, Russia, Tula, IDGC of Center and Volga Region PJSC,

Stepanov Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, energy@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Panarin Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences, director, pmv@ssoft24.com, Russia, Tula, ServiceSoft Engineering LLC,

Maslova Anna Aleksandrovna, doctor of technical sciences, docent, anna.zuykova@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 662.642:621.926.7

DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-596-603

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.В. Костюков

В современном мире технологий большое внимание уделяется вопросам охраны труда и техники безопасности при выполнении всех видов производственных работ. В статье проведен анализ электротравматизма в энергетических хозяйствах предприятий, даны выводы и рекомендации по снижению несчастных случаев на производстве. Предложена облачная система диагностики и мониторинга опасных и вредных производственных факторов, в рамках этой системы апробирована подсистема компьютерного зрения при использовании искусственной нейронной сети Tiny-YOLO-v3.

Ключевые слова: опасные и вредные производственные факторы, электротравматизм, энергетическое хозяйство, система мониторинга и диагностики, средства индивидуальной защиты, нейронная сеть.

Для решения проблем по обеспечению безопасных условий эксплуатации энергоустановок и электрооборудования на промышленных предприятиях используют новые инновационные подходы, внедряют современные технические средства, которые позволяют осуществлять контроль за производственными процессами, соблюдением требований охраны труда и техники безопасности, а также в режиме реального времени контролировать нахождение людей в опасных зонах.

С развитием современных компьютерных технологий стало возможно использовать и управлять большими базами данных, использовать технологии машинного обучения для решения глобальных задач, которые стоят перед предприятиями различных сфер деятельности. «Большие данные» дают возможность применять более сложные методы анализа информации для развития предприятий и регионов в целом. В работе рассматриваются вопросы по обеспечению безопасных условий обслуживания и эксплуатации электрооборудования энергетических хозяйств промышленных предприятий и использование машинного зрения для контроля и сопровождения работ, с учётом выполнения требований охраны труда и техники безопасности [1-3].

компьютера.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Коднянко В.А., Суворов А.В., Строк Л.В., Гоголь Л.В., Белякова С.А., Григорьева О.А. Нелинейный анализ переходных процессов в ступенчатом гидростатическом подпятнике	546
Житный М.В., Синельников Э.Г., Аневалов И.В. Уточнение параметров модели разрушения сплава амгб при высокоскоростном ударе	556
Перегородов А.А., Решетникова О.П., Васин А.Н., Изнаилов Б.М., Финогеев Д.Ю. Экспериментальные исследования механических характеристик тел качения нормируемой жесткости	561
Губарев П.В., Шапшал А.С., Зинченко Н.Н. Повышение надежности преобразователей тягового подвижного состава в условиях эксплуатации	570
Гончаров П.С., Шуневич Н.А., Копейка А.Л., Бабин А.М. Система измерения силы тяги электрического ракетного двигателя	573

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Греков Э.Л., Безгин А.С., Сорокин В.А. Способ модернизации электропривода планшайбы токарно-карусельного станка модели 1516	578
Костяшин Н.Д. Расчет диэлектрических характеристик неоднородного изоляционного материала – лакоткань шелковая ЛШМ	583
Богомолов С.И., Гилчико Ю.Н. Комплексное диагностирование систем электроснабжения	585
Акуличев В.О., Захаров С.Ю., Родионов И.А., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Маслова А.А. Математическая модель цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ	588
Костюков А.В. Обеспечение безопасных условий труда работников энергетических хозяйств предприятий	596
Сластухин Н.С. Мощность вибромашин при вынужденных колебаниях силового возбудителя	603

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Богомолов М.Н. Экспериментальное определение распределения деформации втулки по длине фрезерной оправки	608
Волгин В.М., Сидоров В.Н., Кабанова Т.Б., Давыдов А.Д. Влияние формы импульсов напряжения на электрохимическую обработку	611
Богомолов И.С., Клейменова Н.Л., Котылов М.В. Разработка оборудования для обеззараживания, кондиционирования и инактивации антипитательных веществ зерна	619

Новиков В.Г. Оценка и специфика быстрорежущих, высоколегированных и конструкционных сталей	622
---	-----

Волгин В.М., Кабанова Т.Б., Давыдов А.Д. Электрохимическая обработка при анодном растворении металла с участием анионов раствора	625
---	-----

Даниленко Е.А. Модернизация технологического процесса механической обработки коробчатых корпусов из листоштампованных заготовок	635
--	-----

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Фам Туан Ань, Жукова Н.А., Евневич Е.Л. Распознавание опасного состояния водителя на основе факторной модели характеристик лица человека	640
---	-----

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

Гончаров П.С., Копейка А.Л., Шуневич Н.А., Аневалов И.В. Прецизионное устройство передачи движения в вакууме	646
---	-----

Ефанов С.А., Борискин С.И., Гнуттов С.А. Анализ и оптимизация «поворотного кулака» как детали машины BRAVOEGO	651
--	-----

Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Кобыльский Р.Э., Синицын Н.Г., Мусллова Л.А. Верификация нагрузки, действующей на манжетное цилиндропоршневое уплотнения, работающего без смазки	658
--	-----

Дашкова С.В., Иванин А.Н., Колесникова Т.В., Мещанин В.Ю., Румянцев И.О. Модель системы технического обслуживания цифровой автоматической телефонной станции	667
--	-----

Кочеткова А.С. Анализ деформаций в звене цепи горнодобывающей машины	674
---	-----

Мартынов В.В., Гончаров П.С., Цыбин О.Ю., Гуляев М.Д. Использование энергии теплового излучения электрического ракетного двигателя	677
---	-----

Поляков П.А. Влияние профиля рабочих поверхностей тормозного диска на распределение температурного поля	682
--	-----

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – Б.С. Яковлев

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 24.11.21. Дата выхода в свет 29.11.21.

Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 113,26

Тираж 500 экз. Заказ 154

Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95