



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.315.1

DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-74-80

В. И. ПАНТЕЛЕЕВ

А. В. МАЛЕЕВ

Сибирский
федеральный университет,
г. Красноярск

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ИНТЕНСИВНОСТИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Повышение надежности и экономичности электроснабжения путем уменьшения аварий в электрических сетях, вызванных интенсивными гололедно-ветровыми нагрузками, является важной комплексной задачей. Решение данной задачи состоит из нескольких основных этапов: своевременного обнаружения начала гололедообразования, воздействия на устройства удаления гололедно-изморозевых отложений и контроль эффективности удаления гололеда. В статье рассматривается система обнаружения гололедообразования на основе принципиально новой методики с использованием технологии «машинного зрения». Разработанная система гололедообразования позволяет определить толщину стенки гололеда и косвенно, по углу отклонения провода относительно горизонтального положения, определить массу гололедных отложений и стрелу провеса провода. Рассматриваемая система мониторинга размещается на опоре в непосредственной близости от провода и состоит из следующих основных элементов: электронного блока, оптического сенсора, солнечной панели и GSM антенны.

Ключевые слова: гололедообразование, системы мониторинга воздушных линий электропередачи, машинное зрение, раннее обнаружение гололедообразования.

В настоящее время существует огромное количество систем анализа гололедной обстановки на проводах воздушных линий электропередачи, тем не менее задача создания новых систем мониторинга остается актуальной [1]. Это обусловлено

тем, что существующие системы, например, использующие тензометрические датчики, характеризуются высокой стоимостью и требуют отключения существующих ЛЭП на время монтажа, а системы, реализованные на основе погодных станций, харак-

теризуются невысокой вероятностью правильного обнаружения.

Гололедные наросты возникают на проводах воздушных линий преимущественно в холодное время года, когда потепление сменяется похолоданием и температура колеблется в районе нулевых значений. При сильном ветре и повышенной влажности воздуха возможно возникновение толщины стенки гололеда на проводе до 90 мм и более, что влечет повреждение воздушной линии и огромные издержки восстановления нормального электроснабжения. Своевременное обнаружение гололеда позволит вовремя применить меры по борьбе с ним и, как следствие, уменьшит экономический ущерб от данного погодного явления [2].

Авторами статьи разработана система мониторинга гололедообразования на основе принципиально новой методики обнаружения с использованием технологии «машинного зрения». Разработанная система гололедообразования позволяет определить толщину стенки гололеда и косвенно, по углу отклонения провода относительно горизонтального положения, определить массу гололедных отложений и стрелу провеса провода. Рассматриваемая система мониторинга гололедообразования на проводах ВЛ состоит из следующих основных элементов: электронного блока, оптического сенсора, солнечной панели, GSM антенны (рис. 1). Структурная схема рассматриваемой системы мониторинга интенсивности гололедообразования представлена на рис. 2.

Система мониторинга монтируется на опоре ВЛ, в процессе монтажа линия может находиться под напряжением. В непосредственной близости в горизонтальной плоскости от провода (с учетом допустимых изоляционных расстояний) размещают оптический сенсор. Оптических сенсоров может быть несколько, например, при одновременном обнаружении гололеда на грозозащитном тросе. В качестве оптического сенсора используется видеочкамера с возможностью работы в темное время суток в специальном, защищенном от внешних погодных условий, боксе. В поле зрения видеочкамеры должен попадать провод, на котором анализируется наличие гололеда. Оптический сенсор располагается в непосредственной близости от провода, поэтому на получаемое им изображение провода практически не влияют погодные условия.

Принцип работы устройства заключается в следующем: с определенной периодичностью, заданной диспетчерским пунктом, или текущей температурной обстановкой, система визуально производит проверку провода, попадающего в поле зрения оптического сенсора на предмет наличия на нем гололеда. При наличии гололедообразования диаметр провода будет фактически отличаться от первоначального диаметра, являющегося эталонным, для принятия решения. Система искусственного интеллекта, реализованная программно на микрокомпьютере, на фоне общего изображения выделяет провод и фиксирующую провод арматуру, определяет средний его диаметр, учитывая расстояние от оптического сенсора до провода, рассчитывает угол провеса провода и массу гололедных отложений. Для принятия решения о наличии гололедообразования обобщаются результаты всех предыдущих замеров.

При превышении предельного значения диаметра гололеда, учитывая угол провеса и марку провода, или при превышении уставки скорости увеличения диаметра гололеда на проводе (интенсивности нарастания гололеда) посредством моде-

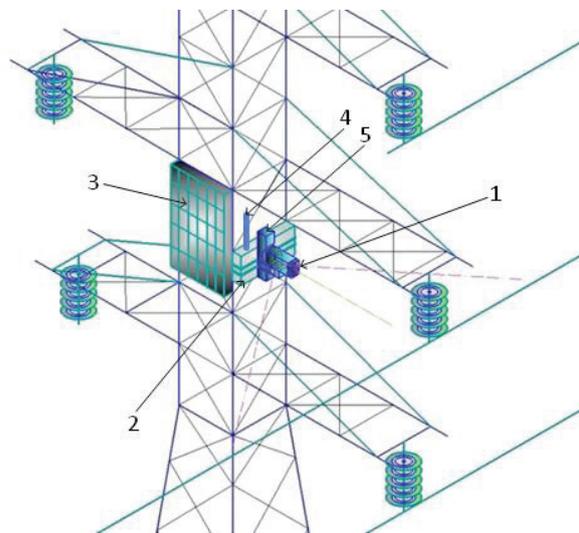


Рис. 1. Размещение разработанного устройства на опоре ВЛ (1 — оптический сенсор; 2 — бокс с электронными компонентами; 3 — солнечная панель; 4 — передающая антенна; 5 — датчик температуры)

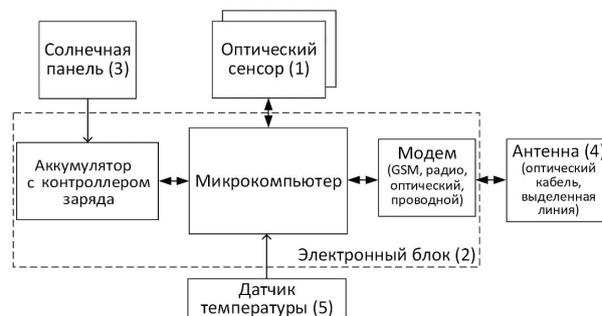


Рис. 2. Структурная схема абонентского устройства мониторинга

ма происходит передача информации о гололедной ситуации в диспетчерский центр. К отправленному сообщению прикрепляется изображение провода, эквивалентный диаметр гололеда или провода (при его отсутствии), погодная обстановка в месте контроля гололедообразования. По запросу диспетчера возможна передача видеопотока с оптического сенсора.

Помимо самого устройства важным моментом является применение адаптивной системы искусственного интеллекта, принимающей решение о наличии гололедообразования. Данная система автоматически определяет наличие гололедообразования и интенсивность его образования, что позволяет сократить объем передаваемой информации и разгрузить диспетчерский персонал от рутинной работы по расшифровке изображений. Упрощенная блок-схема алгоритма работы устройства представлена на рис. 3.

Разработка и тестирование программного обеспечения для выделения целевого объекта (провода) на изображении реализовано с применением программно-вычислительного комплекса MATLAB [3]. Сетевые протоколы взаимосвязи разрозненных абонентских систем мониторинга, а также получение и обработка дополнительной информации от внешних сенсоров и функции самодиагностики

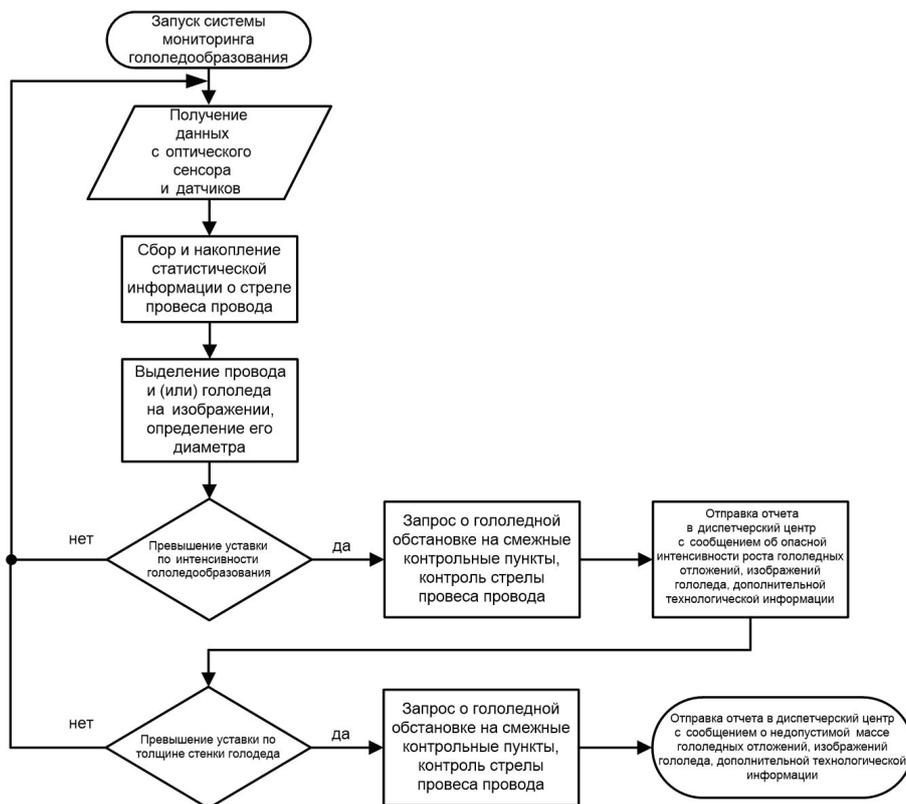


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы устройства

реализованы в среде MATLAB. Откомпилированный исполняемый файл интегрируется с операционной системой микрокомпьютера и не требует программного обеспечения, используемого для разработки программы.

Основой программного функционирования рассматриваемой системы мониторинга гололедообразования является алгоритм обработки изображения с применением пакета расширения Image Processing Toolbox [4], реализующий выделение границ на изображении и адаптивное удаление лишних границ, не относящихся к объекту.

Для практической адаптации алгоритма выделения провода и гололеда на изображении был создан имитационный макет фрагмента линейной арматуры линии электропередачи, включающий провод, часть гирлянды изоляторов, гасители вибрации.

В качестве провода для макета применен провод марки АС70/11 внешним диаметром 11,4 мм. Известный диаметр провода позволил протестировать эффективность алгоритма распознавания провода и гололеда на различном фоне изображении (табл. 1). Для выделения провода ВЛ на изображении выбран метод выделения границ, как наиболее универсальный и наименее всего зависимый от условий освещения [5].

Принцип выделения границ основан на анализе перепадов яркости соседних пикселей на полутоновом изображении. При превышении порога перепада яркости на результирующем изображении появляется граница. Результатом работы функции фильтрации является черно-белое изображение (бинарное) с выделенными границами. Оптимальным способом для выделения провода и гололеда на нем после проведения серии опытов является фильтрация по методу Собеля [6] и обработка линейным фильтром. Другие фильтры, например, Канны и Превитта выделяют существенно меньше

границ, а фильтр Робертса слишком слабо выделяет границы целевого объекта [7].

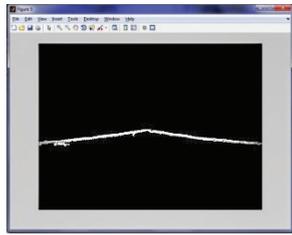
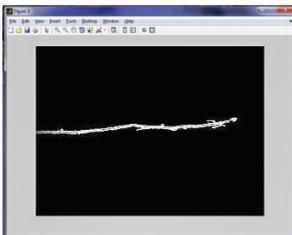
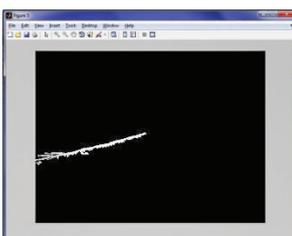
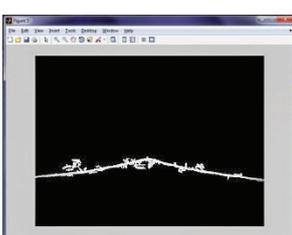
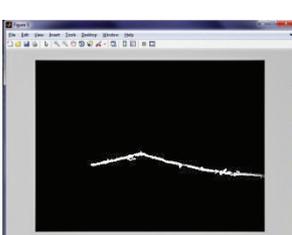
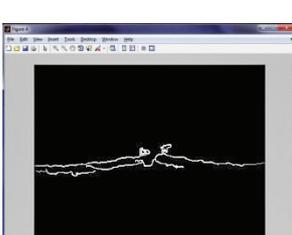
Следует отметить, что выделение всего провода на изображении не является обязательным условием. Для получения информации о его диаметре достаточно выделить часть провода. Если провод или гололед идентифицировать не удастся, программа автоматически понижает порог яркости и повторяет процедуру снова.

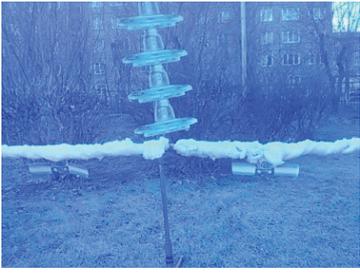
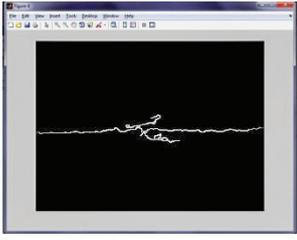
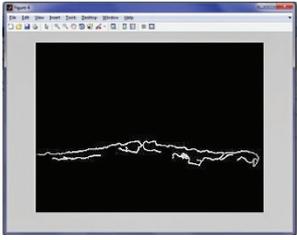
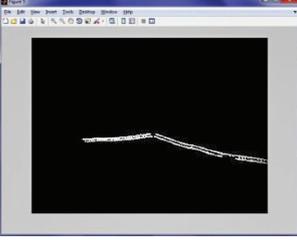
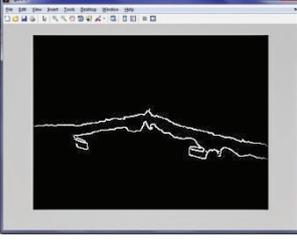
Следующей задачей программной обработки является определение диаметра провода по полученным границам и принятие решения о наличии или отсутствии гололеда. Для этого циклической функцией проводится определенное количество вертикальных сечений, определяется начальный и конечный элемент изображения провода на каждом из сечений, результат вносится в массив с вычислением среднего значения. Подпрограмма обнаружения определяет диаметр провода или гололеда на изображении в пикселях и производит его пересчет в миллиметры на основании дистанции до провода и фокусного расстояния объектива камеры.

Тесты, проведенные многократно, свидетельствуют об обнаружении провода или гололеда в 99,8 % случаев, средний процент выделения провода на изображении составляет 73,31 %, средний удельный вес лишних выделенных границ составляет 5,64 %. Относительная погрешность программного определения диаметра провода в проведенных тестах не превышает 3 %. Работоспособность устройства проверена и в ночное время, при этом выделение провода становится более эффективным за счет подсветки провода и затемнения фона. Не влияют на результаты выделения провода интенсивные осадки в виде дождя и снега.

Результаты программного детектирования гололедных отложений на проводе ВЛ, а также связь с удаленным диспетчерским центром осуществля-

Результаты тестов программного выделения провода

№ теста	Тестируемое изображение	Результат программной обработки	Средний диаметр провода, мм	Процент выделения провода, %	Удельный вес лишних границ, %
1			11,44	100	4
2			11,10	87	5
3			11,62	50	13
4			10,88	100	15
5			11,21	80	1
6			48,35	80	7

7			50,38	60	11
8			49,69	90	3
9			11,74	68	4
10			51,75	87	13

ется с помощью GSM-модема по беспроводному каналу связи. С помощью модема программно-вычислительный комплекс MATLAB может обмениваться данными с сервером диспетчера по протоколам HTTP/HTTPS, TCP/IP или с помощью SMTP для отправки сообщений с отчетами по EMAIL [8]. В разрабатываемой системе мониторинга отчеты могут быть отправлены двумя путями:

- диспетчеру энергосетевой компании;
- через протокол HTTP при реализации POST-запроса на сайте диспетчерской службы, который обрабатывается серверным скриптом, с возможностью просмотра отчетов с контрольных пунктов через веб-сайт и программу управления.

Рассмотрим названные пути подробнее. Первый путь наиболее простой и не требует наличия серверного программного обеспечения для работы системы. Отчеты посылаются на EMAIL диспетчеру, который может просмотреть их на любом устройстве. MATLAB позволяет отправлять письма на любой EMAIL по протоколу SMTP с возможностью прикрепления файлов к сообщению, в частности, изображений [9]. Второй способ заключается в от-

правке данных с результатами на веб-сервер диспетчерской службы через POST-запрос по протоколу HTTP. Изображение загружается на веб-хост диспетчера по протоколу FTP [10]. Поступающие запросы обрабатываются серверным веб-скриптом и заносятся в базу данных. Программным обеспечением диспетчеру реализуется доступ к базе данных и вывод информации в удобном виде на дисплей монитора. Также программой допускается возможность отправки команд на контрольный пункт с диспетчерского центра.

Система мониторинга для программно-оптического определения гололедных отложений на проводах ВЛ может представлять обособленную аппаратно-программную единицу, а также может входить в более крупную и взаимосвязанную сеть анализаторов и диспетчерского центра. Все приборы, размещенные на контрольных пунктах, радиально связаны с диспетчерским центром и способны взаимодействовать с ним. Кроме того, обособленные анализаторы могут взаимодействовать с соседними контрольными точками для получения информации о наличии гололеда на смежных участках линии.

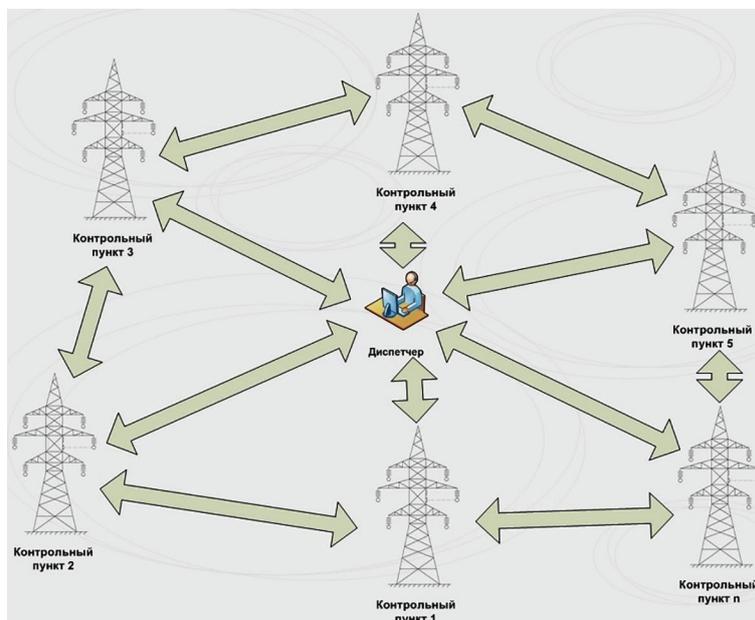


Рис. 4. Схема взаимосвязанной сети устройств раннего обнаружения гололеда

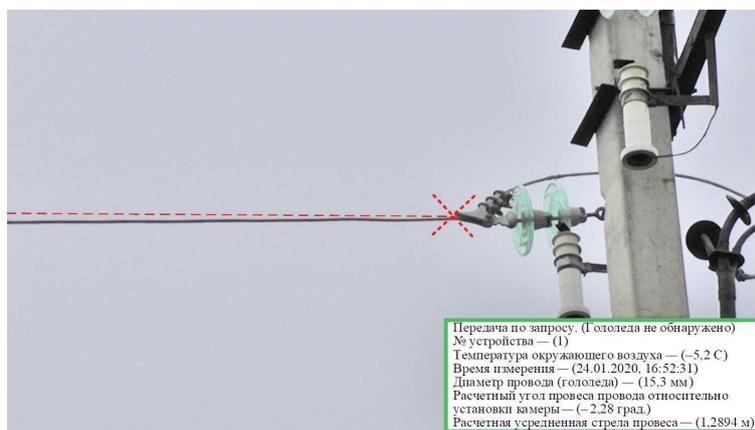


Рис. 5. Изображение с оптического сенсора с прикрепленной технологической информацией, переданное с разработанного устройства

В свою очередь, на дисплее диспетчера отображается актуальная информация о гололедной обстановке на всех контролируемых участках линии. Структурная схема интеграции устройств в единую сеть представлена на рис. 4.

Каждый прибор, входящий в сеть, имеет связь с диспетчерским центром посредством GSM-модема. С определенной периодичностью прибор-анализатор отправляет в диспетчерский центр отчеты с результатами анализа гололеда с каждого контрольного пункта.

Прибор также может выполнить внеочередную проверку провода на наличие гололеда в любое время по команде из диспетчерского центра. В случае обнаружения гололеда на проводе устройство может дать команду для проверки состояния провода на смежном участке соседнему прибору и получить результаты от него. После сбора информации о гололеде со смежных устройств анализатор отправляет полный отчет в диспетчерский центр с сообщением об обнаружении гололеда на проводе и прикрепленной дополнительной технологической информацией (рис. 5).

В теплый период года система может находиться в активном состоянии и контролировать стрелу провеса провода в ответственных контрольных пунктах, например, в местах перехода воздушных линий электропередачи через автомобильные и железные дороги, трубопроводы и т.п.

Включение, отключение, а также перевод в режим энергосбережения обособленных точек контроля возможно дистанционно с диспетчерского пункта.

Полученная совокупность приборов создает взаимосвязанную сеть-систему мониторинга, которая позволяет более эффективно обмениваться информацией между устройствами и диспетчерским центром, а также повысить своевременность обнаружения опасной гололедной ситуации.

Заключение. Создание системы раннего обнаружения гололедных отложений на проводах ВЛ, основанной на концепции «машинного зрения», является инновационной и весьма перспективной идеей. Система позволяет с высокой точностью определять наличие или отсутствие гололедных образований на проводах ВЛ.

Разработанная система способна определить диаметр гололедных образований с вероятностью правильного обнаружения более 98 %, при этом погрешность определения геометрических размеров составляет не более 5 % от анализируемого участка провода. Помимо определения диаметра гололедных образований рассчитываются масса гололедных отложений и стрела провеса провода.

Автономные абонентские пункты компактны в размерах и неприхотливы в обслуживании, способны взаимодействовать с диспетчерским центром и смежными пунктами, своевременно предоставляя актуальную информацию о состоянии гололедной информации диспетчеру энергетической компании.

Система может контролировать процесс плавки гололеда, оперативно предоставляя диспетчеру текущую информацию о гололедной обстановке, контролируя диаметр гололедообразования и стрелу провеса провода.

Монтаж системы возможно произвести без отключения воздушной линии на любой тип опор, марку провода и поддерживающую арматуру.

Библиографический список

1. Панасенко М. В., Брыкин Д. А. Обзор используемых устройств обнаружения отложений для систем мониторинга воздушных линий электропередачи // Воздушные линии. 2012. № 3. С. 79–82.
2. Минуллин Р. Г. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Изд-во КГЭУ, 2010. 207 с. ISBN 978-5-89873-297-4.
3. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М.: Солон-Пресс, 2005. 581 с. ISBN 5-98003-209-6.
4. Image Processing Toolbox. Информация о релизах. URL: <https://docs.exponenta.ru/images/release-notes.html> (дата обращения: 16.08.2020).
5. Тропченко А. Ю., Тропченко А. А. Методы вторичной обработки и распознавания изображений. СПб.: Изд-во университета ИТМО, 2015. 215 с.
6. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. Л. И. Рубанова, П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1072 с. ISBN 5-94836-028-8.
7. Польский С. В. Компьютерная графика. М.: Изд-во МГУЛ, 2008. 38 с.
8. Riabov V. V. Simple mail transfer protocol // Handbook on Information Security. Vol. 1: Key Concepts, Infrastructures, Standards and Protocols / Ed. H. Bidgoli. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. P. 878–900.
9. Send Email — MATLAB & Simulink. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/import_export/sending-email.html (дата обращения: 02.09.2020).
10. MATLAB Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab.net.http.requestmessage.send.html> (дата обращения: 02.09.2020).

ПАНТЕЛЕЕВ Василий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы». AuthorID (РИНЦ): 507607
AuthorID (SCOPUS): 57205124847

МАЛЕЕВ Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы». SPIN-код: 2583-4688
AuthorID (РИНЦ): 743816
Адрес для переписки: vpanteleev@sfu-kras.ru

Для цитирования

Пантелеев В. И., Малеев А. В. Система мониторинга интенсивности гололедообразования на проводах воздушной линии электропередачи // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 74–80. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-74-80.

Статья поступила в редакцию 01.10.2020 г.
© В. И. Пантелеев, А. В. Малеев