



УДК 621.315.1, 621.372.2

*Р.Г. Минуллин, В.А. Касимов, Т.К. Филимонова, М.Р. Яруллин***ЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГОЛОЛЕДА  
НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.  
ЧАСТЬ 1. СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДА***R.G. Minullin, V.A. Kasimov, T.K. Filimonova, M.R. Yarullin***LOCATION DETECTION OF GLAZE ICE  
ON OVERHEAD ELECTRIC POWER LINES.  
PART 1. METHODS OF GLAZE ICE DETECTION**

Описаны реализованные на практике способы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Подробно рассмотрен метод локационного обнаружения гололеда. Приведены примеры локационного обнаружения гололеда в результате многолетних исследований на действующих линиях электропередачи. Дана оценка преимуществ локационного способа обнаружения гололеда перед другими способами.

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; ГОЛОЛЕД НА ПРОВОДАХ; СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ; ЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ; МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДА.

The paper presents practically implemented methods of detection of glaze ice on wires, such as overhead electric power lines. The paper describes in detail the method of location detection of glaze ice. Authors give several examples of glaze ice detection resulting from multiannual investigations of the active electric power lines. Authors discuss the advantages of the location detection over other methods of glaze ice detection.

ELECTRIC POWER LINES; GLAZE ICE ON WIRES; DETECTION METHODS; LOCATION PROBING; GLAZE ICE DETECTION TECHNOLOGY.

Гололедные отложения на проводах воздушных линий электропередачи (ЛЭП) обычно образуются на территории нескольких энергосистем. При этом возникают массовые провисания и обрывы проводов, разрушения арматуры, поломки опор воздушных линий электропередачи. Гололедные аварии на ЛЭП имеют массовый характер и приносят огромный материальный ущерб из-за недоотпуска электроэнергии потребителям и необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

Эти аварии составляют для территории России около 25 % от общего количества повреждений на воздушных линиях, а их продолжительность — около 40 % от общей продолжительности всех аварийных отключений [1]. При гололедных нагрузках

ниже нормы в результате аэродинамического воздействия могут возникать колебания (пляска) проводов при одностороннем отложении гололеда или вибрации при цилиндрической форме гололеда [2].

Многочисленные аварии показали, что оптимально спроектировать линию (сведя этот процесс только к расчету и определению геометрических параметров линии) без использования различных способов и устройств, ограничивающих и предупреждающих атмосферные воздействия на нее, невозможно.

Процесс образования гололеда на проводах воздушных линий зависит от климатического района и подчиняется определенным метеорологическим закономерностям: зависит от влажности и температуры окружающего воздуха, ветрового режима.

На образование гололеда влияют также размеры диаметра проводов, высота их подвеса, жесткость их крепления, исключая закручивание, величина протекающего нагрузочного тока.

Поэтому в настоящее время существуют два направления обнаружения гололеда:

1) прогнозирование вероятности возможного гололедообразования на основе метеорологических данных воздушной среды, окружающей провода, с учетом технических параметров ЛЭП;

2) непосредственный контроль процесса гололедообразования на проводах с помощью датчиков и устройств обнаружения гололеда [3, 4], что позволяет достаточно точно определять момент начала его необходимой плавки.

Прогнозирование гололедообразования на основе метеорологических данных воздушной среды применяют во многих странах, где обледенение линий электропередачи является актуальной проблемой, чтобы смягчить или избежать его влияния на работоспособность этих линий.

Работы по прогнозированию гололедообразования на проводах воздушных линий ведутся в исследовательских центрах Чехии [5, 6], Исландии [7, 8], Канады [9, 10], Франции [11], Венгрии [12], Великобритании [13–15], Италии [16] и др. Основой прогноза являются модельные закономерности таких метеорологических явлений, как влажность и температура окружающего воздуха, ветровые давления, их изменения с высотой от поверхности земли. При этом учитываются рельеф местности, где проходит трасса воздушной ЛЭП, высота трассы над уровнем моря, а также климатические и погодные условия. Прогноз осуществляется применительно к техническим параметрам воздушной линии.

В применяемых моделях гололедообразования делается ряд допущений, т. к. неизвестны точный диапазон температур для условий выпадения влажного снега, продолжительность осадков, содержание жидкой воды в обледенении. Все это снижает прогностические возможности модели. Кроме того, важным фактором, который должен быть принят во внимание в моде-

ли, является нагревание провода за счет эффекта Джоуля, вызванное протекающим электрическим током.

В настоящее время нет определенной модели возникновения гололедных отложений, которая может достоверно учитывать все физические и механические процессы, участвующие при обледенении, поэтому количество ложных тревог высоко.

К сожалению, данные прогноза являются предупреждением о возможной угрозе возникновения гололедообразования и не могут служить конкретным указанием о начале плавки гололеда, образовавшегося на проводах воздушных линий электропередачи.

На сегодняшний день имеется огромное количество патентов, предлагающих методы и датчики для обнаружения гололеда [4].

Датчики при появлении гололеда на ЛЭП реагируют на изменения:

- физических параметров среды, окружающей провода;
- электрических характеристик проводов;
- веса или натяжения проводов;
- условий распространения высокочастотных и импульсных сигналов по проводам воздушных линий.

Практическое применение для обнаружения гололеда нашли метод взвешивания проводов [17–20] и метод локационного зондирования линий электропередачи [4, 21, 22].

Известно, что нарастание гололеда до аварийных пределов может произойти за считанные часы. Подготовка к действию устройства для плавки гололеда требует времени от одного часа и более (зависит от схемы плавки, потребителя, протяженности ЛЭП и т. д.). Поэтому для эффективной борьбы с гололедом важны два фактора: раннее обнаружение начала гололедообразования и достоверная и надежная информация о динамике гололедообразования.

Несвоевременная и недостоверная информация о гололедообразовании ведет к авариям и громадным убыткам.

Наиболее объективным методом измерения величины гололедной нагрузки на проводах воздушной линии является метод измерения веса одного или нескольких про-



летов провода воздушной линии. Величина натяжения провода при этом определяется нагрузками от гололеда и ветра, а также температурой окружающей среды. Оценка степени напряженного состояния провода и сравнение ее с предельно допустимым значением осуществляется с помощью весового (тензометрического) датчика. Показания датчика передаются на диспетчерский пункт с использованием канала связи [17–20].

В настоящее время в ОАО «МЭС Юга», а также в ряде энергосистем России – «Ростовэнерго», «Ставропольэнерго», «Кубаньэнерго», «Волгоградэнерго», «Башкирэнерго», «Сахалинэнерго» находится в эксплуатации автоматизированная информационная система контроля гололедообразования на воздушных линиях (АИСКГ), в которой используются весовые датчики и которая разработана и внедрена творческим коллективом сотрудников ЮРГТУ (НПИ) и СКБПиСА (г. Невинномысск) [19].

За рубежом используется подобная система обнаружения гололеда «САТ-1», разработанная в 1991 г. В настоящее время «САТ-1» производится концерном NEXANS [20].

В упомянутой системе АИСКГ для обнаружения гололеда используются весовые точечные датчики, определяющие вес гололедного отложения только около одной опоры ЛЭП. Для расширения зоны контроля применяются устройства видеонаблюдения. Общая гололедная ситуация на ЛЭП определяется путем прогнозирования опасных гололедных отложений на основе текущих метеорологических данных (температура и влажность окружающей среды, направление и скорость ветра), а также данных о температуре токонесущего провода.

АИСКГ состоит из пунктов контроля, расположенных на линиях электропередачи в местах наиболее вероятного гололедообразования, и приемных пунктов, расположенных в диспетчерских центрах.

Пункты контроля включают:

микропроцессорный линейный преобразователь;

датчики гололедной нагрузки на проводах и грозозащитных тросах,

устройства видеонаблюдения;

автоматические метеопосты с датчиками температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра;

датчики температуры провода;

устройства передачи и приема данных через каналы связи (радиоканал в УКВ диапазоне, канал сотовой связи, спутниковый канал, волоконно-оптический канал связи или каналы телемеханики).

В состав АИСКГ входят пункты контроля с выдачей до 30 параметров с каждого пункта. Приемные пункты обеспечивают циклический опрос пунктов контроля с заданной дискретностью (1–30 мин) и передачу информации в подсистему сбора данных АИСКГ.

Данные с пунктов контроля могут отображаться различными способами в зависимости от решаемой задачи: на карте местности, где нанесена схема сети (позволяет оценить картину распространения гололеда); в виде таблицы с текущими данными по всем пунктам контроля; в виде графиков по каждому пункту контроля за любой период времени (позволяет увидеть эволюцию гололедообразования).

Стратегия борьбы с гололедом на проводах аппаратурными методами состоит из нескольких этапов.

1. Сбор и отображение данных о гололедообразовании и о метеопараметрах.

2. Раннее обнаружение гололедообразования, определение направления его развития, сигнализация на диспетчерский пункт.

3. Прогноз изменения гололедной нагрузки после его образования.

4. Расчеты механических параметров линии с учетом их запаса прочности.

5. Определение необходимости плавки гололеда на ЛЭП при текущих и прогнозируемых климатических условиях. Определение длительности и рекомендуемой очередности плавки гололеда на ЛЭП энергорайона с учетом скорости нарастания гололеда и ответственности линии.

Реализация стратегии осуществляется техническим персоналом и автоматическими системами на ЛЭП.

К сожалению, вес провода с гололедными отложениями измеряется на отдельных

пролетах воздушной линии, в то время как гололед может образоваться и на других неконтролируемых пролетах линии, где он не будет обнаружен. Поэтому для повышения достоверности измерений необходимо увеличивать количество датчиков и устройств, передающих их показания на пункт управления, что является сложной технической задачей.

Другой недостаток весовых датчиков заключается в том, что они не являются универсальными. Они не могут использоваться без настройки для любого типа ЛЭП, имеющих различные параметры в зависимости от мощности самой линии (длина пролета между опорами, диаметр и количество проводов в фазе, количество и габариты изоляторов).

Но, несмотря на недостатки, этот метод из-за отсутствия других промышленно разработанных методов используется в ряде энергорайонов, как было показано в начале статьи.

Исследования по локационным методам обнаружения на линиях электропередачи гололедных отложений [4, 21, 22] и повреждений [3, 22–24] ведутся в Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ) более 15 лет с 1998 г. Как показывает анализ научно-технической литературы, ни в России, ни за рубежом подобные локационные устройства обнаружения гололеда на воздушных проводах ЛЭП не применяются.

Метод локационного зондирования за-

ключается в подаче импульсного сигнала в линию и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлениях после отражения от конца линии либо от высокочастотного (ВЧ) заградителя.

При локационном способе обнаружения гололеда информацию о появлении гололеда несут импульсы, отраженные от любой неоднородности волнового сопротивления линии (реперной точки), имеющейся на ней. Неоднородностями являются концы линий или ответвлений от них, ВЧ заградители, места присоединения ответвлений к линии электропередачи, места соединения воздушных линий с кабельными вставками и т. д.

При образовании гололедных отложений увеличивается время прохождения  $\Delta t$  отраженным импульсом заданного участка линии с одновременным уменьшением его амплитуды  $U$ .

Локационное устройство, осуществляющее зондирование ЛЭП, называется *рефлектометром*, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

С генератора импульсов рефлектометра импульсы подаются в линию. Отраженные импульсы поступают с линии в приемник. С выхода приемника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки рефлектометра функционируют по сигналам блока управления. На графическом индикаторе воспроизводится рефлектограмма линии – изображения от-

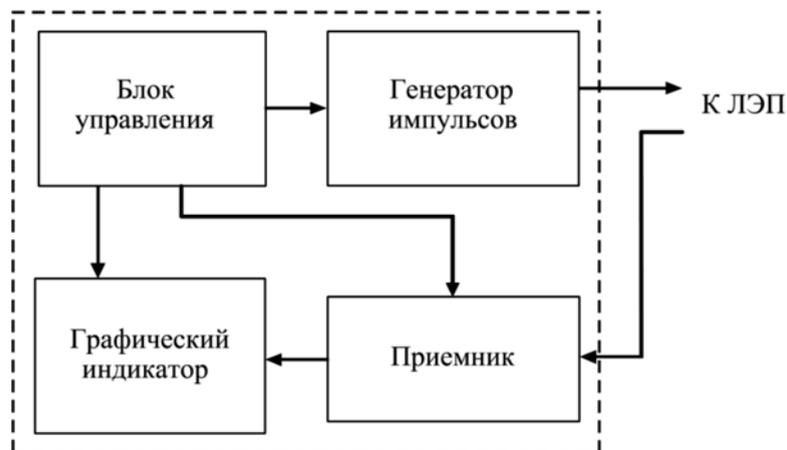


Рис. 1. Функциональная схема локационного устройства

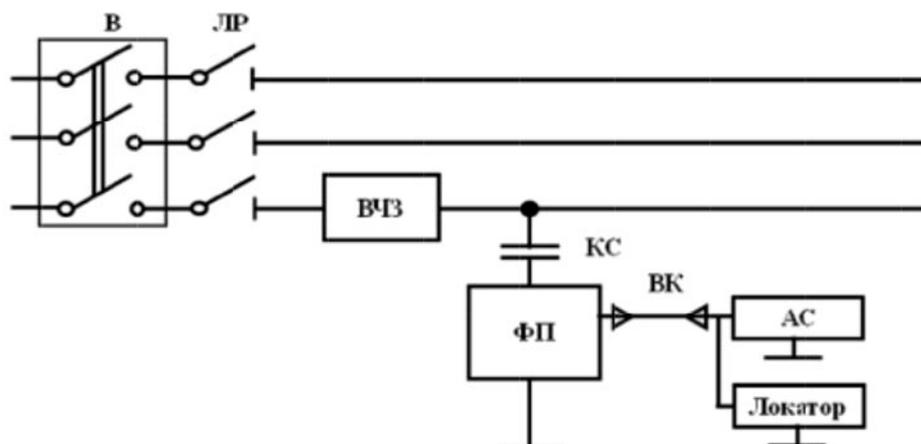


Рис. 2. Схема подключения локационного устройства к линии, имеющей элементы высокочастотной обработки

раженных импульсов на временной оси как реакция неоднородностей линии на зондирующий импульс.

Схема подключения локационного устройства (локатора) к фазному проводу ЛЭП с использованием оборудования высокочастотного тракта показана на рис. 2 [25]. На рисунке следующие обозначения: В – выключатель; ЛР – линейный разъединитель; ВЧЗ – высокочастотный заградитель; КС – конденсатор связи; ФП – фильтр присоединения; ВК – высокочастотный кабель; АС – аппаратура связи; локатор – локационное устройство.

Гололедные образования на проводах представляют собой неоднородный диэлектрик, уменьшающий скорость распространения сигнала вдоль линии и вызывающий его дополнительное затухание, обусловленное диэлектрическими потерями энергии электромагнитной волны, которая расходуется на нагрев слоя гололедного покрытия. Локационный метод позволяет определить появление гололедных образований на проводах ЛЭП путем сравнения времени распространения отраженных сигналов или их амплитуд при наличии и при отсутствии гололедных образований.

При зондировании линии импульсным локатором, упрощенная схема подключения которого к линии показана на рис. 3 а, совокупность отраженных импульсов образует рефлектограмму, изменяющуюся при появлении гололедных отложений на линии.

Если из штатной (эталонной) рефлектограммы (рис. 3 б – сплошная линия) вычесть текущую рефлектограмму (рис. 3 б – пунктирная линия), то разностные изменения надежно обнаруживаются по появлению сигнала, соответствующего концу линии в точке Б (рис. 3 в). Чем больше волновое сопротивление линии будет изменяться под действием толщины гололедных отложений из-за изменения диэлектрической проницаемости между проводами линии, тем больше будет разность между рефлектограммами, тем больше будут увеличение задержки импульса  $\Delta t$  и уменьшение амплитуды импульса  $\Delta U$  (рис. 3 б).

При появлении гололедных отложений величины  $U$  и  $\Delta t$  изменяются синхронно, как это видно на рис. 4 (отмечено штрихпунктирными овалами). Использование двух критериев повышает надежность обнаружения гололеда на проводах ЛЭП.

На отсчеты амплитуды  $U$  и запаздывания  $\Delta t$  отраженного импульса кроме гололедных отложений могут влиять погодные условия, изменения температуры окружающей среды (пунктирная линия на рисунке, шкала температур с правой стороны), ветровые воздействия и т. д.

Для изучения особенностей обнаружения гололеда на ЛЭП сотрудниками КГЭУ разработан исследовательский автономный локационный комплекс для автоматического обнаружения гололедных отложений на ЛЭП по двум критериям: задержка импуль-

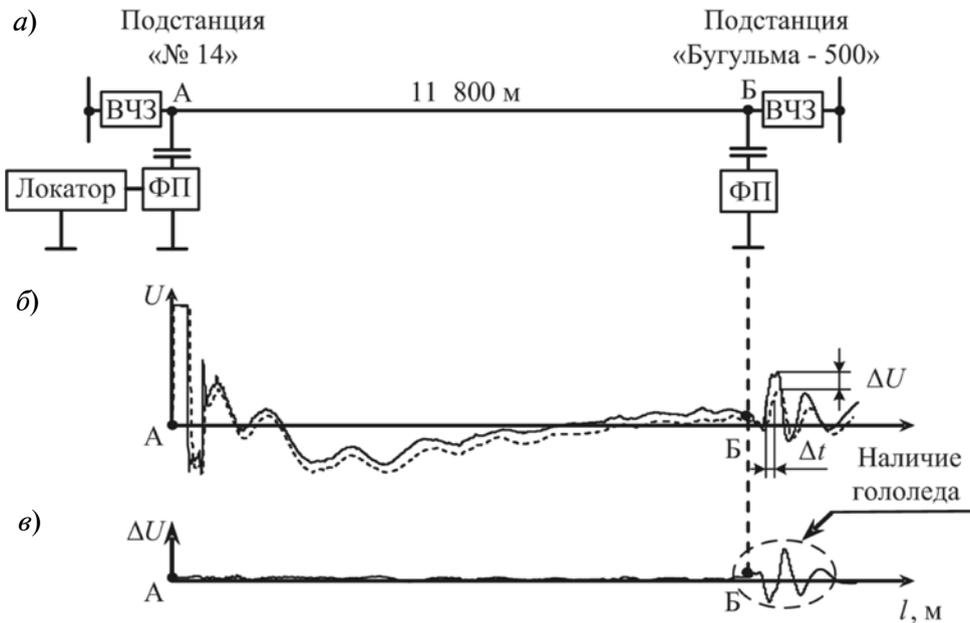


Рис. 3. Режим обнаружения гололеда на воздушной линии 110 кВ длиной 11 800 м между подстанциями «№ 14» и «Бугульма-500»:  
а – схема линии; б – рефлектограммы линии без гололеда (—) и при наличии гололеда (· · · · ·); в – разность рефлектограмм линии без гололеда и при наличии гололеда с колебаниями сигнала в точке Б, обусловленными наличием гололедных отложений

са  $\Delta t$  и уменьшение амплитуды импульса  $\Delta U$ , как это показано на рис. 4.

Комплекс системы мониторинга гололеда осуществляет следующие операции [4, 21, 22]:

- 1) генерирование и ввод в линию зондирующих импульсов длительностью 1–10 мкс с напряжением 20–50 В;
- 2) прием импульсов, отраженных от конца линии;
- 3) выделение отраженных импульсов на

фоне случайных помех и помех, вызванных работой систем связи, телемеханики, релейной защиты и автоматики;

- 4) определение толщины стенки гололедного отложения по задержке и уменьшению амплитуды отраженного импульса;
- 5) передачу информации на сервер оператора.

Измерения на линии производятся с периодичностью в 30 мин. Полученные данные передаются на центральный сервер, разме-

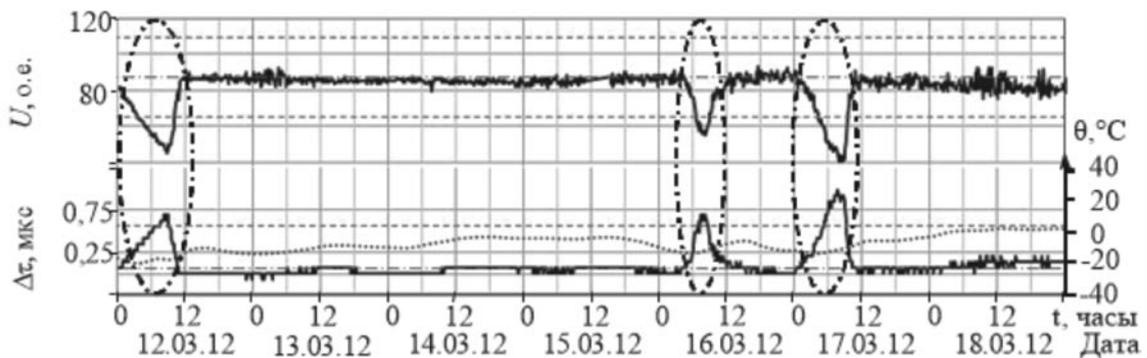


Рис. 4. Суточные изменения амплитуды  $U$  (верхний график) и запаздывания  $\Delta t$  (нижний график) отраженных импульсов на ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода»; овалами обозначены регистрации гололедных образований

щенный на территории КГЭУ. Установленная на компьютере сервера программа снимает данные с центрального сервера КГЭУ и отображает графики зависимости измеренных значений  $\Delta t$  и  $\Delta U$  от времени. При образовании опасной массы гололеда на экране дисплея появляется предупреждающее сообщение, которое сопровождается звуковой сигнализацией. Программа, установленная на пункте управления (подстанция), также сигнализирует о появлении гололеда с указанием номера линии, если в составе комплекса имеется коммутатор линий.

Исполнительная часть комплекса осуществляет регистрацию и архивацию полученных сведений в виде протокола измерений. Протокол содержит в себе информацию о времени и дате измерений, о состоянии окружающей среды, изменении значений запаздывания  $\Delta t$  и затухания  $\Delta U$  импульса. Полная информация может быть представлена за разные периоды времени (сутки, неделя, месяц, квартал, год) в виде графиков зависимости исследуемого параметра от времени.

Для передачи и хранения данных с локационного комплекса на сервер КГЭУ (FTP сервер) используются модемы сотовой связи (GSM).

В настоящее время в автоматическом режиме круглосуточно функционируют четыре локационных комплекса для обнаружения гололеда, контролируемые:

- с 29 октября 2009 г. ЛЭП 110 кВ длиной 10 800 м «Бугульма №14–Бугульма-500», входящую в состав филиала ОАО «Сетевая компания» Бугульминские электрические сети;

- с 8 декабря 2009 г. ЛЭП 110 кВ длиной 40 300 м «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода», входящую в состав филиала ОАО «Сетевая компания» Приволжские электрические сети;

- с 1 февраля 2013 г. ЛЭП 330 кВ длиной 63 800 м «Баксан–Прохладная 2», входящую в состав ОАО «МЭС Юга»;

- с 1 марта 2013 г. ЛЭП 110 кВ длиной 14 270 м «Шкапово–Чегодаево», входящую в состав ОАО «Башкирэнерго».

Все четыре системы обнаружения гололеда, упомянутые выше, передают информацию о состоянии ЛЭП на Центр управления в КГЭУ и образуют один общий комплекс обнаружения гололедных отложений, осуществляющий сбор, хранение и дополнительную обработку рефлектограмм.

Пример обнаружения изморозевых образований на проводах линии 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» по запаздыванию  $\Delta t$  отраженных импульсов показан на рис. 5.

Результаты более длительных наблюдений в течение января 2013 г. за изменениями толщины стенки гололедных образований на проводах ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» представлены на

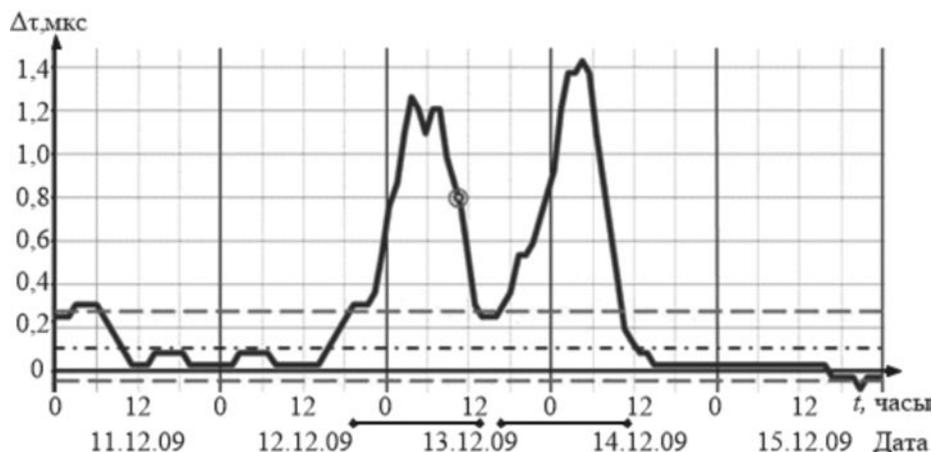


Рис. 5. Обнаружение изморозевых отложений на проводе линии электропередачи 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» по увеличению запаздывания отраженного импульса ( $\Delta t > 0,3$  мкс) 11–15 декабря 2009 г.

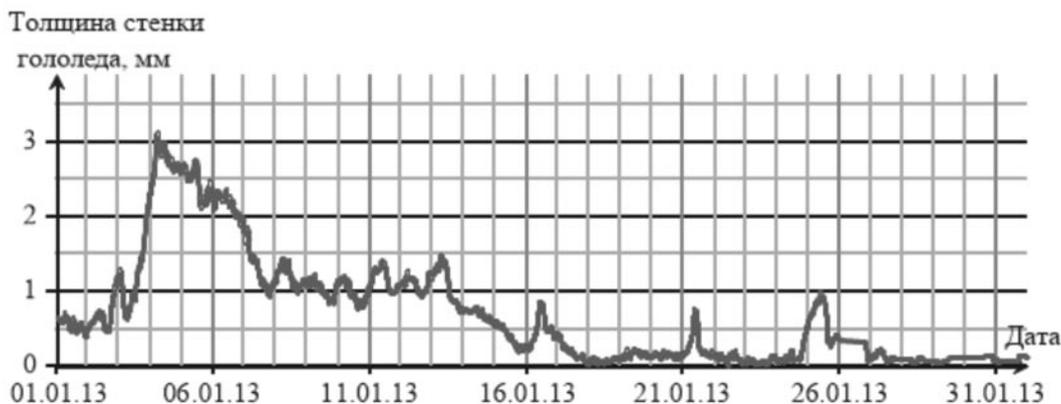


Рис. 6. Контроль локационным методом в течение месяца толщины стенки гололедных образований на проводах ЛЭП 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода»

рис. 6. Максимум гололедного образования толщиной в 3 мм наблюдался 4 января 2013 г. Данные гололедные отложения не представляли угрозы целостности проводам воздушных линий, поэтому их плавка не производилась.

Итак, приведенные примеры убедительно характеризуют возможности локационного метода обнаружения гололедных отложений на проводах ЛЭП и подтверждают его высокую чувствительность, обеспечивающую раннее обнаружение гололеда, начиная с толщины стенки 0,5 мм и ниже, как это видно на рис. 6.

Недостатком классического локационного метода является невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололедного образования на большой длине воздушной линии от опасной концентрации льда в отдельных ее пролетах. В этом случае применяется метод разбиения воздушной линии на отдельные локационные участки, для них определяется удельная толщина стенки гололедного отложения, по наибольшей величине которого принимается решение о необходимости плавки гололеда [26].

С 1 февраля 2013 г. проводились совместные сравнительные эксперименты по обнаружению гололеда локационным методом и методом взвешивания на ЛЭП 330 кВ «Баксан–Прохладная 2» (ОАО «МЭС Юга», Северный Кавказ) [27].

При локационном зондировании все возникшие на линии гололедные отложе-

ния были четко зафиксированы. Три тензодатчиков, установленных на этой линии, обнаружили гололедные образования только вблизи от места их установки [27].

Можно считать, что локационный метод обнаружения гололеда является объективнее и информативнее метода взвешивания проводов. Определение места гололедного отложения, ведущего к аварии ЛЭП, осуществляется с использованием специальных мер, как было указано выше [26].

Аппаратура локационного зондирования обычно устанавливается около стойки высокочастотной связи, т. к. подключается к его выходной клемме параллельно с высокочастотным кабелем.

Локационный метод позволяет надежно следить в реальном времени за динамикой обледенения проводов и четко определять начало необходимой плавки гололедных отложений для предотвращения обрыва проводов электролиний и обусловленный этим недоотпуск электроэнергии потребителям. Метод позволяет следить за эффективностью плавки гололеда и дает возможность определять момент его своевременного прекращения при исчезновении опасности разрушения линии и обрыва проводов. Оптимизация времени плавки гололеда способствует энергосбережению и позволяет экономить значительные финансовые средства, т. к. плавка гололеда требует дорогостоящих энергетических затрат.

В то же время в некоторых ситуаци-



ях можно избежать плавки гололеда, если вес отложений будет меньше нормативной величины и начнется естественный сброс гололеда с проводов. При этом будет исключен недоотпуск электроэнергии потребителям из-за отключения линии на время плавки гололеда и сэкономлена электроэнергия, которая была бы израсходована для его плавки токами повышенного значения.

Локационный метод обнаружения гололеда имеет следующие преимущества перед методом взвешивания проводов:

1) вся аппаратура располагается около начала или конца линии электропередачи в производственных помещениях подстанции и не требует вмешательства в конструкцию ЛЭП, т. к. зондирующий импульсный сигнал одновременно выполняет функции датчика и носителя информации о гололедном отложении на проводе;

2) обеспечивается контроль всей линии, а не только одного пролета;

3) используется меньший, более простой и дешевый состав аппаратуры;

4) отсутствует угроза вандализма, т. к. локационное устройство располагается в помещении подстанции;

5) ввод в действие аппаратуры локационного зондирования занимает несколько минут, если ЛЭП имеет высокочастотную обработку;

6) имеется возможность периодического контроля с помощью коммутатора одним локационным устройством всех линий, входящих с подстанции.

Локационное зондирование может осуществляться на ЛЭП, находящихся под напряжением и на отключенных линиях, а также на грозотросах, т. е. на любых металлических проводниках. Локационное устройство может функционировать при аварийном отключении питающего напряжения на ЛЭП за счет наличия собственного генератора зондирующих импульсов, на что не способны системы релейной защиты и автоматики.

Сигналы локационного зондирования не влияют на работу аппаратуры релейной защиты, противоаварийной автоматики, телемеханики и связи. В то же время при определенной цифровой обработке эти сиг-

налы перестают быть помехами сигналам локационного зондирования.

Данные о повреждениях и гололедных отложениях могут передаваться через GSM канал или Интернет на рабочее место диспетчера без ограничения расстояния, обеспечивая в удобном интерфейсе наблюдение за динамикой гололедообразования на проводах ЛЭП и за динамикой освобождения проводов от гололедных покрытий при их плавке. Комплекс позволяет четко определять по времени начало необходимой плавки гололедных отложений. Своевременное обнаружение появления гололедно-изморозевых отложений является весьма актуальной проблемой для электроэнергетики нашей страны при решении задач энергосбережения.

Таким образом, разработан и введен в опытную эксплуатацию локационный комплекс по обнаружению гололедных образований на воздушных линиях электропередачи 110–330 кВ.

После рассмотрения трех используемых в настоящее время способов обнаружения гололедных отложений на проводах линий электропередачи можно утверждать, что способ прогнозирования является самым ненадежным и может применяться только из-за отсутствия диагностической аппаратуры с целью примерной оценки возможного появления гололедных образований.

Метод взвешивания проводов позволяет контролировать гололедные образования в пролетах той опоры, у которой установлен датчик. Этот участок линии должен быть характерным для всей линии электропередачи. Если гололед образуется на других участках линии, где нет датчиков, то он не будет обнаружен. Чтобы контролировать линию по всей длине необходимо установить датчики гололеда у каждой опоры. Такая задача, к сожалению, технически невыполнима.

Локационный метод дает возможность контролировать всю линию электропередачи и в реальном времени наблюдать процесс нарастания гололедных отложений и их сброс при плавке гололедной муфты. Метод является самым надежным и информативным из рассмотренных в данной статье.

В настоящее время аппаратура системы мониторинга линий электропередачи имеет несколько вариантов исполнения: настенный, мобильный, настольный и стоечный. Сотрудниками КГЭУ и ОАО «НПО «Радиоэлектроника» имени В.И. Шимко» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» разработан, изготовлен и испытан опытный образец системы мониторинга гололеда на 16 каналов. Намечены предприятия, готовые его тиражировать.

На сегодняшний день метод локационного обнаружения гололеда согласно информационному поиску с глубиной в 40 лет и прошедшей в июне 2013 г. в Канаде XV конференции IWAIS [28] нигде в мире не реализован, наши исследования и их результаты не имеют аналогов в мире и являются уникальными.

В данной статье рассмотрены методы и принципы обнаружения гололеда на проводах воздушных ЛЭП. Особое внимание уделено методу локационного зондирования, как наиболее перспективному из них. Но остались не исследованными вопросы предельной чувствительности локационного метода и временной стабильности параметров высокочастотного канала ЛЭП, определяющие процедуру выбора уставок (порога срабатывания) по амплитуде и запаздыванию отраженных сигналов при раннем обнаружении гололедных отложений на проводах ЛЭП. Результаты этих исследований описаны во второй части данной статьи.

Исследования и разработка аппаратуры обнаружения гололеда на линиях электропередачи выполнены при финансовой поддержке ОАО «Сетевая компания» (Татарстан), АН Республики Татарстан и ОАО «ФСК ЕЭС».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсным методом. М.: Энергия, 1968. 216 с.
2. Яковлев Л.В. Комплексные методы и устройства для защиты проводов и грозозащитных тросов воздушных линий от вибрации, «пляски» и гололедообразования // Энергетик. 2004. № 3. С. 15–17.
3. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Локационная диагностика воздушных линий электропередачи. Казань: Изд-во КГЭУ, 2008. 202 с.
4. Минуллин Р.Г. и др. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Изд-во КГЭУ, 2010. 207 с.
5. System for prediction and monitoring of ice shedding, antiicing and de-icing for overhead lines. CIGRE Working Group B2.29, 2009.
6. Olafsson H., Eliasson A.J., Thorsteins E. Orographic influence on wet-snow icing. Part 2: Downstream of mountains // Proc. 10th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Brno, Check Republic. 2002. Paper 2-3.
7. Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Science, 2008.
8. Olafsson H., Eliasson A.J., Thorsteins E. Orographic influence on wet-snow icing, Part 1: Upstream of mountains // Proc. 10th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Brno, Check Republic. 2002. Paper 2-2.
9. Fikke S. Cost Action 727. Measuring and forecasting atmospheric icing on structures // Proc. 11th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Montreal, Canada. 2005. Paper IW64.
10. Fikke S. Modern meteorology and atmospheric icing // Proc. 11th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Montreal, Canada. 2005. Paper IW73.
11. Gland H., Admirat P. Meteorological conditions for wet snow occurrence in France. Calculated and measured results in a recent case study on March 5th, 1985 // Proc. 3rd Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Vancouver, Canada. 1986.
12. Toth K., Lakatos M., Kollath K., Fulop R., Simon A. Climatology and forecasting of severe wet snow icing in Hungary // Proc. 13th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Andermatt, Switzerland. 2009.
13. Wareing B.J., Nygaard, B.E. WRF Simulation of wet snow and rime icing incidents in the UK // Proc. 13th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Andermatt, Switzerland. 2009.
14. Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet-snow on structures // Phil. Trans. R. Soc. London, UK. 2000. No. A358. Pp. 2913–2939.
15. Sakamoto Y. Snow accretion on overhead wires // Phil. Trans. R. Soc. London, UK. 2000. No. 358(1776). Pp. 2941–2970.
16. Bonelli P., Lacavalla M. Experimental activity and investigation of wet-snow accretion on

overhead power lines in Italy // Proc. 13th Internat. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Andermatt, Switzerland. 2009.

17. **Дьяков А.Ф., Левченко И.И., Засыпкин А.С. и др.** Информационная система контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи // Энергетик. 2005. № 11. С. 20–25.

18. **Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И.** Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. Учеб. пособие. М.: ИД МЭИ, 2007. 445 с.

19. **Левченко И.И., Сацук Е.И.** Система прогнозирования и контроля гололедообразования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 1. С. 14–18.

20. **Костиков И.** Система мониторинга «САТ-1» – эффективная защита ВЛЭП от гололеда // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 1. С. 32–35.

21. **Минуллин Р.Г., Губаев Д.Ф.** Критерии и индикаторы обнаружения гололеда на линиях электропередачи при локационном зондировании // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. № 4 (82). С. 191–197.

22. **Минуллин Р.Г.** Обнаружение гололеда и повреждений на воздушных линиях электропередачи локационным методом // Энергетика Татарстана. 2011. № 2 (22). С. 15–17.

23. **Минуллин Р.Г., Закамский Е.В.** Опреде-

ление мест повреждения в электрических сетях напряжением 6–35 кВ импульсным методом // Доклады Российского национального симп. по энергетике, III Междунар. симп. по энергетике, окружающей среде и экономике. Казань: Изд-во КГЭУ, 2001. Т. 2. С. 62–64.

24. **Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш.** Зондирование воздушных линий электропередачи локационным методом // Электротехника. 2008. № 7. С. 42–50.

25. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Лукин Э.И. и др.** Особенности подключения рефлектометра к линиям электропередачи при локационном зондировании // Электротехника. 2008. № 2. С. 34–43.

26. **Касимов В.А., Минуллин Р.Г., Яруллин М.Р.** Методы расчета толщины стенки гололеда на проводах линий электропередачи при локационном зондировании // Научные труды IV Междунар. науч.-технич. конф. Энергетика глазами молодежи. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2013. Т. 1. С. 488–492.

27. **Минуллин Р.Г., Касимов В.А., Яруллин М.Р., Аскарлов Р.Р., Губаренко В.П.** Сравнение систем обнаружения гололеда на линиях электропередачи, использующих методы взвешивания проводов и локационного зондирования // Научные труды IV Междунар. науч.-технич. конф. Энергетика глазами молодежи. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2013. Т. 1. С. 514–518.

28. Proc. 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. St. John's, Canada. 2013.

## REFERENCES

1. **Shalyt G.M.** *Opredeleniye mest povrezhdeniy linii elektropredachi impulsnym metodom.* Moscow: Energiya Publ., 1968, 216 p. (rus)

2. **Yakovlev L.V.** Kompleksnyye metody i ustroystvadlyazashchityprovodovigrozozashchitnykh trosov vozdushnykh liniy ot vibratsii, «plyaski» i gololedoobrazovaniya, *Energetik*, 2004, No. 3, Pp. 15–17. (rus)

3. **Minullin R.G., Fardiyev I.Sh.** *Lokatsionnaya diagnostika vozdushnykh liniy elektropredachi.* Kazan: KGEU Publ., 2008, 202 p. (rus)

4. **Minullin R.G. i dr.** *Obnaruzheniye gololednykh obrazovaniy na liniyakh elektropredachi lokatsionnym zondirovaniyem.* Kazan: KGEU Publ., 2010, 207 p. (rus)

5. *System for prediction and monitoring of ice shedding, antiicing and de-icing for overhead lines.* CIGRE Working Group B2.29, 2009.

6. **Olafsson H., Eliasson A.J., Thorsteins E.** Orographic influence on wet-snow icing. Part 2:

Downstream of mountains, *Proc. 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Brno, Check Republic, 2002, Paper 2-3.

7. **Farzaneh M.** *Atmospheric Icing of Power Networks*, Springer Science, 2008.

8. **Olafsson H., Eliasson A.J., Thorsteins E.** Orographic influence on wet-snow icing, Part 1: Upstream of mountains, *Proc. 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Brno, Check Republic, 2002, Paper 2-2.

9. **Fikke S.** Cost Action 727. Measuring and forecasting atmospheric icing on structures, *Proc. 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, 2005, Paper IW64.

10. **Fikke S.** Modern meteorology and atmospheric icing, *Proc. 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Montreal, Canada, 2005. Paper IW73.

11. **Gland H., Admirat P.** Meteorological

conditions for wet snow occurrence in France. Calculated and measured results in a recent case study on March 5th, 1985, *Proc. 3rd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Vancouver, Canada, 1986.

12. **Toth K., Lakatos M., Kollath K., Fulop R., Simon A.** Climatology and forecasting of severe wet snow icing in Hungary, *Proc. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Andermatt, Switzerland, 2009.

13. **Wareing B.J., Nygaard, B.E.** WRF Simulation of wet snow and rime icing incidents in the UK, *Proc. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Andermatt, Switzerland, 2009.

14. **Makkonen L.** Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet-snow on structures, *Phil. Trans. R. Soc.*, London, UK, 2000, No. A358, Pp. 2913–2939.

15. **Sakamoto Y.** Snow accretion on overhead wires, *Phil. Trans. R. Soc.*, London, UK, 2000, No. 358(1776), Pp. 2941–2970.

16. **Bonelli P., Lacavalla M.** Experimental activity and investigation of wet-snow accretion on overhead power lines in Italy, *Proc. 13th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Andermatt, Switzerland, 2009.

17. **Dyakov A.F., Levchenko I.I., Zasyplin A.S. i dr.** Informatsionnaya sistema kontrolya gololedoobrazovaniya na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi, *Energetik*, 2005, No. 11, Pp. 20–25. (rus)

18. **Levchenko I.I., Zasyplin A.S., Alliluyev A.A., Satsuk Ye.I.** *Diagnostika, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya vozdushnykh liniy elektroperedachi v gololednykh rayonakh*, Ucheb. posobiye, Moscow: ID MEI Publ., 2007, 445 p. (rus)

19. **Levchenko I.I., Satsuk Ye.I.** Sistema prognozirovaniya i kontrolya gololedoobrazovaniya, *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*, 2011, No. 1, Pp. 14–18. (rus)

20. **Kostikov I.** Sistema monitoringa «SAT-1» – effektivnaya zashchita VLEP ot gololeda, *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*, 2011, No. 1, Pp. 32–35. (rus)

21. **Minullin R.G., Gubaev D.F.** Kriterii i

indikatory obnaruzheniya gololeda na liniyakh elektroperedachi pri lokatsionnom zondirovanii, *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika Telekommunikatsii. Upravleniye*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2009, No. 4 (82), Pp. 191–197. (rus)

22. **Minullin R.G.** Obnaruzheniye gololeda i povrezhdeniy na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi lokatsionnym metodom, *Energetika Tatarstana*, 2011, No. 2 (22), Pp. 15–17. (rus)

23. **Minullin R.G., Zakamskiy Ye.V.** Opredeleniye mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh napryazheniyem 6–35 kV impulsnym metodom, *Doklady Rossiyskogo natsionalnogo simpoziuma po energetike, III Mezhdunarodnogo simpoziuma po energetike, okruzhayushchey srede i ekonomike*, Kazan: KGEU Publ., 2001, Vol. 2, Pp. 62–64. (rus)

24. **Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiyev I.Sh.** Zondirovaniye vozdushnykh liniy elektroperedachi lokatsionnym metodom, *Elektrotehnika*, 2008, No. 7, Pp. 42–50. (rus)

25. **Minullin R.G., Fardiyev I.Sh., Lukin E.I. i dr.** Osobennosti podklyucheniya reflektometra k liniyam elektroperedachi pri lokatsionnom zondirovanii, *Elektrotehnika*, 2008, No. 2, Pp. 34–43. (rus)

26. **Kasimov V.A., Minullin R.G., Yarullin M.R.** Metody rascheta tolshchiny stenki gololeda na provodakh liniy elektroperedachi pri lokatsionnom zondirovanii, *Nauchnyye trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii Energetika glazami molodezhi*, Novocheboksaysk: YuRGPU (NPI), 2013, Vol. 1, Pp. 488–492. (rus)

27. **Minullin R.G., Kasimov V.A., Yarullin M.R., Askarov R.R., Gubarenko V.P.** Sravneniye sistem obnaruzheniya gololeda na liniyakh elektroperedachi, ispolzuyushchikh metody vzveshivaniya provodov i lokatsionnogo zondirovaniya, *Nauchnyye trudy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii Energetika glazami molodezhi*, Novocheboksaysk: YuRGPU (NPI) Publ., 2013, Vol. 1, Pp. 514–518.

28. *Proc. 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, St. John's, Canada, 2013.

---

**МИНУЛЛИН Ренат Гизатуллович** – заведующий научно-исследовательской лабораторией локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Minullin@mail.ru

**MINULLIN, Renat G.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Minullin@mail.ru



**КАСИМОВ Василь Амирович** – аспирант научно-исследовательской лаборатории локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: VasilKasimov@yandex.ru

**KASIMOV, Vasil A.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: VasilKasimov@yandex.ru

**ФИЛИМОНОВА Тамара Константиновна** – доцент кафедры инженерной кибернетики Института экономики и информационных технологий Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Filimonova.Tamara@bk.ru

**FILIMONOVA, Tamara K.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Filimonova.Tamara@bk.ru

**ЯРУЛЛИН Марсель Рашитович** – аспирант научно-исследовательской лаборатории локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Marsel.Jarullin@gmail.com

**YARULLIN, Marsel R.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Marsel.Jarullin@gmail.com