**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ**

**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ЭСИС

Доклад на тему:

«Методы прогнозирования гололедообразование на проводах  
воздушных линий электропередачи»

Выполнил: ст.гр. ЭС-3-16

Нусамиев Н.Ш

Преподователь:

Сабитов А.Х

Казань 2019

**Содержание**

Введение…………………………………………………………………….3

1. Прогнозирование гололедообразования………………………………4

2.Контроль процесса гололедообразования с помощью датчиков…….7

2.1 **.** Метод взвешивания проводов …..………………….……………..7

Заключение………………………………………………………………..14

Список литературы……………………………………………………….15

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

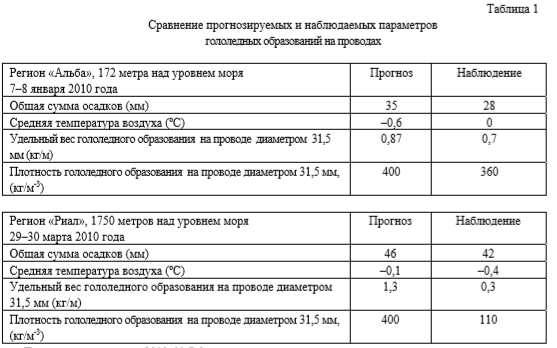
**Введение**

Рассматриваются способы обнаружения гололедных отложений на проводах линий электропередачи: методы прогнозирования гололедообразования и взвешивания проводов, а также локационный метод (во второй части статьи). Способ прогнозирования вероятности образования гололеда является косвенным и основывается на метеорологических данных, применяется при отсутствии диагностической аппаратуре или в дополнение к ней. Непосредственно величина гололедной нагрузки определяется методом взвешивания проводов при отсутствии и при наличии гололедных отложений с использованием весовых датчиков. Датчик монтируется на опоре линии электропередачи, где наиболее вероятно гололедное образование, при этом контролируют один пролет линии. Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, гололедно-изморозевые отложения на проводах, метод прогнозирования вероятности гололедообразования, контроль гололедообразования методом взвешивания проводов, экспериментальные данные, анализ эффективности методов обнаружения гололеда.

Гололедные аварии являются одними из самых тяжелых и трудноустранимых аварий на воздушных линиях. Их ликвидация затруднена из-за зимнего бездорожья, мерзлого грунта и разбросанности по линии одновременно пораженных участков. Гололедные аварии на воздушных линиях, как правило, имеют массовый характер и приносят большой ущерб. 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]. Гололедные отложения на проводах, в том числе и сверхнормативные, обычно образуются на территории нескольких энергосистем. Происходящие вследствие этого аварии парализуют систему энергоснабжения потребителей на территории нескольких административных областей. При этом возникают массовые провисания и обрывы проводов, разрушения арматуры, поломки опор воздушных линий электропередачи. 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, высоты их подвеса, жесткость их крепления, исключающая 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 линии электропередачи; 2) непосредственный контроль процесса гололедообразования на проводах с помощью датчиков гололеда, что позволяет достаточно точно определять момент начала его плавки. На сегодняшний день имеется огромное количество патентов, которые предлагают методы и датчики для обнаружения гололеда за счет изменения при его появлении физических параметров среды, окружающей провода, или электрических характеристик проводов [3, 4]. Но практическое применение для обнаружения гололеда нашли: метод взвешивания проводов и метод локационного зондирования линий электропередачи. Рассмотрим особенности указанных направлений более подробно.

**1. Прогнозирование гололедообразования**

Прогнозирование гололедообразования на основе метеорологических данных воздушной среды применяют во многих странах, где обледенение линий электропередачи является актуальной проблемой, чтобы смягчить или избежать его влияние 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 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 линии электропередачи, высота над уровнем моря, а также климатические и погодные условия. Прогноз осуществляется применительно к техническим параметрам воздушной линии. Необходимо достоверное предсказание явлений обледенения проводов на несколько дней вперед. Известны работы чешских специалистов по прогнозированию обледенения проводов воздушных линий [5, 6]. Методы моделирования с прогнозом погоды и отложений снега на проводах воздушных линий с учетом рельефа горной местности были развиты специалистами Исландии [7]. Разработанные в Великобритании объединенные модели погоды и отложений снега на проводах были проверены в 1990 году в центральных областях страны при аномальном гололедообразовании и были рекомендованы для использования на территории всей страны [13]. В Венгрии после тестирования ряда погодных моделей остановились на модели гололедообразования, которая сравнивалась с данными наблюдений гололедных отложений [12]. Наиболее интересные результаты по прогнозированию гололедообразования получены в Италии [16]. При этом обрабатываются выходные данные прогноза погоды, такие как температура воздуха, уровень осадков, интенсивность и направление ветра. На их основе определяются области потенциального риска из-за гололедообразования для линий электропередачи. После этого, с использованием модели гололедных отложений вычисляется ожидаемая нагрузка ледяной муфты для проводов с различными диаметрами. Эта система прогноза в состоянии предсказывать опасность обледенения проводов по целой стране и выдавать информацию о состоянии линий электропередачи. Каждый день уровень опасности возникновения ледяной муфты отображается на карте заданного региона Италии. Система помогает диспетчеру управлять энергетической сетью. Некоторые основные достоинства этой система прогноза: интерактивность и доступность через Интернет, простота в использовании для людей неметеорологов, предоставление информации о возможной аварийной ситуации в реальном времени. Есть различные виды образования обледенения, но в этой системе рассматривается только влажный снег, из-за его сильного влияния на линии электропередачи в Италии. Нет точного диапазона температур для условий выпадения влажного снега, но самый известный интервал, проверенный многими наблюдениями в разных странах, лежит в пределах 0-2°C и типичное содержание жидкой воды лежит в пределах диапазона 15–40 % от полной массы. Типичная продолжительность осадков в виде влажного снега составляет 18–24 часа. За это время диаметр муфты снега на проводах может достигать 15 см и создавать дополнительную нагрузку на проводах до 8–10 кг/м. Основными данными при прогнозе являются: температура воздуха, количество осадков, выраженное в водном эквиваленте, высота изотерм 0°C и 2°C, направление и интенсивность ветра на высоте 10 м [6, 9–11, 13]. Предполагается, что если количество осадков меньше, чем 10 мм, то образующийся при этом гололед не может создать серьезную перегрузку на провода, ведущую к аварии линии электропередачи. По этой причине такие случаи не рассматриваются. Для проверки правильности параметризации микрофизических процессов в модели гололедообразования было проведено сравнение между данными прогноза и наблюдениями гололеда на проводах для положительной температуры воздуха, близкой к 0°C. Результаты сравнения прогнозируемых и наблюдаемых параметров при гололедообразовании для двух регионов Италии представлены в табл. 1. Эти данные приблизительно совпадают для региона «Альба», но резко отличаются для региона «Риал». Таблица 1 Сравнение прогнозируемых и наблюдаемых параметров гололедных образований на проводах

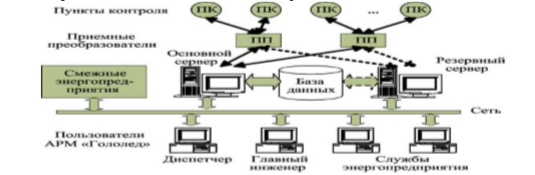


Обледенения проводов наблюдались также и при отрицательной температуре воздуха, но в этом случае результаты модельных расчетов не совпали с данными наблюдений, и этот недостаток прогностической модели должен быть устранен. В настоящее время нет никакой определенной модели гололедных отложений, которая может достоверно учитывать все физические и механические процессы, участвующие при обледенении. Поэтому грубая модель, все еще используемая сегодня, может быть улучшена только после сбора более подробных данных реальных наблюдений. Важным фактором, который должен быть принят во внимание в модели, является нагревание провода за счет эффекта Джоуля, вызванное протекающим электрическим током. Некоторые измерения последствий этого эффекта были выполнены во время экспериментов на линиях электропередачи. Влияние омического нагрева проводов в начале процесса образования гололеда будет учтено в следующей версии прогноза. Необходимо подчеркнуть, что достоверность данного метода прогнозирования появления гололеда на проводах воздушных линий не очень высока. Предупреждения прогноза являются «потенциальными предупреждениями», при этом принимаются во внимание только такие погодные условия, которые способствуют отложению влажного снега на проводах. Сочетания других обстоятельств и причин, ведущих к гололедообразованию, не рассматриваются. Поэтому количество ложных тревог может быть высоким. К сожалению, данные рассматриваемого способа прогноза являются предупреждением о возможном возникновении гололедообразования и не могут быть конкретным указанием о начале плавки гололеда, образовавшегося на проводах воздушных линий электропередачи.

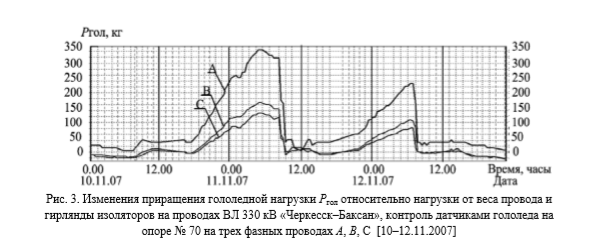
**2. Контроль процесса гололедообразования с помощью датчиков**

Датчики гололеда на линиях электропередачи 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. 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: • фиксация начала процесса гололедообразования; • достоверная и надежная регистрация динамики процесса гололедообразования. Несвоевременная и недостоверная информация о гололедообразовании ведет к авариям и громадным убыткам.

**2.1. Метод взвешивания проводов**

Наиболее объективным методом измерения величины гололедной нагрузки на проводах воздушной линии является метод измерения веса одного или нескольких пролетов 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 весовых датчиков. Показания весового датчика передаются на диспетчерский пункт с использованием канала связи. В данном разделе используются материалы работы [17]. В настоящее время в «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), которая разработана и внедрена творческим коллективом сотрудников ЮРГТУ (НПИ) и СКБПиСА (г. Невинномысск). В упомянутой системе обнаружения гололеда для взвешивания проводов используются тензометрические датчики. Так как это точечные датчики, определяющие вес гололедных отложений только около одной опоры ЛЭП, то для расширения зоны контроля применяются устройства видеонаблюдения. А общая гололедная ситуация на ЛЭП характеризуется 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, как было описано выше в разделе 1. 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. В качестве каналов связи могут использоваться: • радиоканал в УКВ диапазоне; • канал сотовой связи (GSM); • спутниковый канал; • волоконно-оптический канал связи; • каналы телемеханики. В настоящее время 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. На рис. 1 показана схема подсистемы 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). Глубина хранения данных контроля может достигать нескольких лет. В случае срабатывания одного из двух датчиков несанкционированного доступа в шкаф пункта контроля производится передача аварийного сигнала на диспетчерский пункт. Стратегия борьбы с гололедом на проводах 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. 5. Расчет времени плавки гололеда на ВЛ при текущих и прогнозируемых климатических условиях. Определение рекомендуемой очередности плавки гололеда на ВЛ энергорайона с учетом скорости нарастания гололеда и ответственности линии. Реализация стратегии осуществляется персоналом и автоматическими системами на ВЛ. На первом этапе с помощью программного обеспечения решаются следующие задачи: • организация циклического сбора данных с пунктов контроля; • отображение на карте местности схемы сети и расположения пунктов контроля; • отображение текущих данных с пунктов контроля; • ведение архива данных; • защита данных от несанкционированного доступа; • организация работы в сети по принципу «клиент – сервер». На втором этапе решается задача определения момента начала гололедообразования. При этом необходимо разделить ветровую Pветр (рис. 2) и гололедную Pгол (рис. 3) нагрузки на датчик.  

Так как эти нагрузки по величине могут быть соизмеримы, как это видно из сравнения графиков рис. 2 и рис. 3, то ветровая нагрузка может быть по ошибке принята за гололедную нагрузку, особенно при автоматических измерениях, если критерием является только величина нагрузки. Их можно различать по характеру изменения нагрузки во времени. Нерегулярные колебания нагрузки Pветр происходят при сильных порывах ветра в результате подпрыгивания провода, в некоторых случаях может возникнуть опасная пляска проводов. Определяется Pгол при условии, что Pветр равно нулю. Затем рассчитывается толщина стенки гололеда b, приведенная к его плотности 0,9 г/см3. Если b превышает некоторое пороговое значение (обычно 0,2–0,4 см), то наблюдение продолжается, но при этом автоматически может быть уменьшен интервал времени опроса датчиков (1–10 мин). Когда расчетная толщина стенки гололеда три раза подряд превысит пороговое значение, делается вывод, что это связано с возникновением гололедообразования, а не с нерегулярными колебаниями под действием ветра. В этот момент включается звуковая и световая сигнализация и в автоматическом режиме начинается выполнение следующих этапов. Значительную помощь при этом может оказать видеонаблюдение за гололедом с помощью видеокамер, входящих в состав пункта контроля. На третьем этапе для прогноза изменения гололедной нагрузки используются методы математической статистики с применением трендовых моделей [18]. Временной тренд показаний датчика гололедной нагрузки (ДГН) можно представить в виде: ,)t(fP εДГН += ε,ДГН += )t(fP где ) t(f – детерминированная составляющая (тренд); ε – случайная составляющая (колебания показаний ДГН). Величина колебаний показаний ДГН зависит от гололедной нагрузки. При увеличении толщины стенки гололеда амплитуда колебаний может сначала увеличиться, например, при одностороннем отложении гололеда, а затем амплитуда снижается практически до нуля. Однако приближенно можно считать математическое ожидание случайной составляющей ε равным нулю, что вполне согласуется с опытными данными изменения Pветр (рис. 2). Прогнозируемое значение нагрузки на временной интервал τ определяется по формуле

Введение в трендовую модель значений температуры и влажности воздуха, определяющих величину гололедных отложений и измеряемых АИСКГ, позволит повысить точность прогноза и, кроме того, прогнозировать возможность начала гололедообразования. С использованием рассмотренных выше методов прогнозируется не только величина гололедной нагрузки и толщина стенки гололеда, но и время достижения критической нагрузки в пролете, где установлен датчик кр τ=t . Критической считается нагрузка, при которой максимальное тяжение провода в пролете равно половине величины разрывного усилия провода, регламентируемого ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи». На четвертом этапе для оценки опасности гололедообразования необходимо определить следующие механические параметры пролета ВЛ: • максимальное тяжение провода; • максимальное напряжение в проводе; • минимальный габарит до земли, препятствия или пересечения; • максимальную стрелу провеса; • расчетную толщину стенки гололеда (приведенной к гололеду круглого сечения плотностью 0,9 г/см3). Для расчетов механических параметров линии разработана математическая модель [17], которая представляет провод в пролете в виде гибкой нити и позволяет производить расчеты: • для горных линий с большой разностью высот подвеса провода; • для датчиков, установленных в подвесные и натяжные гирлянды изоляторов; • для различного профиля трассы; • с учетом наличия препятствий и пересечений. Постановка задачи расчета приведенной толщины стенки гололеда, механического напряжения в проводе и стрелы провеса по показаниям ДГН отличается от классической [19, 20], так как заранее неизвестно значение погонной нагрузки на провода ВЛ, но известна нагрузка на гирлянду изоляторов при гололеде и ветре. Расчеты осложняются тем, что ДГН часто устанавливаются в труднодоступных горных условиях, а следовательно может быть значительная разность в высотах подвеса провода. Исходя из этого, расчет толщины стенки гололеда, приведенной к заданной плотности, можно производить только численными методами. В данном случае можно воспользоваться методом спуска с фиксированным шагом. При этом толщина стенки гололеда подбирается таким образом, чтобы реальная нагрузка на ДГН PДГН совпадала с расчетной PДГН р. Начальное значение толщины стенки гололеда bг задается равным нулю и затем увеличивается на каждом шаге, пока не будет выполняться условие: ,PP δ<− p ДГНДГН где δ – заданная точность расчета. Нагрузки рассчитываются по методике [20, 21]. На пятом этапе расчеты нормальных режимов плавки гололеда производятся с использованием математической модели, основу которой составляют нелинейные дифференциальные уравнения теплового баланса, в которых учитываются зависимости сопротивления провода и коэффициента теплоотдачи от температуры провода [22]. Различные климатические условия по длине воздушной линии отражаются путем разбиения ее на участки.

Время плавки определяется путем численного интегрирования дифференциальных уравнений теплового баланса. Интегрирование ведется до тех пор, пока δ (текущая толщина стенки гололеда) не станет равной нулю. Очередность плавки гололеда на ВЛ энергорайона определяется в зависимости от скорости нарастания гололеда и ответственности линии. Известна американская система раннего обнаружения гололеда «САТ-1» [23], основанная на измерении напряжения (тяжения) проводов в анкерном пролете и вспомогательных параметров (температура окружающей среды, направление и скорость ветра). Система включает в себя следующие блоки: 1) датчики измерения напряжения проводов; 2) основной модуль САТ-1 (рис. 4, а); 3) дополнительный модуль САТРАС (рис. 4, б); 4) датчик измерения температуры (рис. 4, в); 5) датчик излучения линии NRS (рис. 4, г); 6) анемометр; 7) базовую станцию САТMaster; 8) программный комплекс IntelliCAT.

 Блоки 1-6 располагаются на опоре ЛЭП, что требует дополнительных работ по монтажу и обслуживанию системы. Масса полного комплекта около 30 кг и каждый основной модуль (рис. 4, а) контролирует участки только одной фазы линии в обе стороны от опоры. Для мониторинга участка ЛЭП используется столько основных модулей, сколько фаз необходимо контролировать. К сожалению, одним устройством вес провода с гололедными отложениями измеряется на одном пролете воздушной линии, в то время как гололед может образоваться и на других неконтролируемых пролетах линии электропередачи, где он не будет обнаружен. Поэтому для повышения достоверности измерений необходимо увеличивать количество датчиков и устройств, передающих их показания на пункт управления. Другой недостаток весовых датчиков заключается в том, что они не являются универсальными. Они не могут быть использованы без настройки для любого типа ЛЭП, которые имеют различные параметры в зависимости от мощности самой линии (длина пролета между опорами, диаметр и количество проводов в фазе, количество и габариты изоляторов).

**Заключение**

Применение сети на базе гибридных нейроподобных элементов в сочетании с генетическим алгоритмом для оптимизации ее структуры позволило с высокой точностью спрогнозировать динамику гололедной нагрузки на ЛЭП, что подтверждено экспериментальной проверкой на реальных данных. Повышение точности прогнозирования наиболее актуально для ситуаций с бурным нарастанием гололедо-изморозевых отложений на проводах и опорах ЛЭП, когда промедление в принятии контрмер может иметь значительные технические и материальные последствия. В этом отношении целесообразно повысить интервал упреждения для более раннего оповещения дежурного персонала о возможности возникновения аварийной ситуации. Анализ графиков прогнозов также показывает, что максимальные ошибки прогнозирования возникают, когда происходит резкое изменение погодных условий. Поскольку при данной постановке задачи используются только текущие и прошлые измерения метеофакторов, то модель не может учесть будущие изменения в них. Кроме того, при наличии надежного внешнего источника метеопрогноза эту информацию целесообразно использовать при прогнозировании, что и будет сделано в наших дальнейших разработках.

**Литература**

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждений 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: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008. 202 с.

4. Минуллин Р.Г. и др. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 207 с.

5.Сацук Е.И. Программные и технические средства систем мониторинга гололедообразования и предотвращения гололедно-ветровых аварий // Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Высокочастотная связь, электромагнитная совместимость, обнаружение и плавка гололеда на линиях электропередачи». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. С. 208–222.

6. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1991. 19. Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. М. Л.: Госэнергоиздат, 1956.

7. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). 8-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2002.

8. Левченко И.И., Сацук Е.И. Программное обеспечение информационной системы контроля гололедообразования // Электрические станции. 2004. №10. С. 15–18.

9. 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.: Изд. дом МЭИ, 2007.

10. Костиков И. Система мониторинга «САТ-1» – эффективная защита ВЛЭП от гололёда // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. №1(4). С. 32–35.