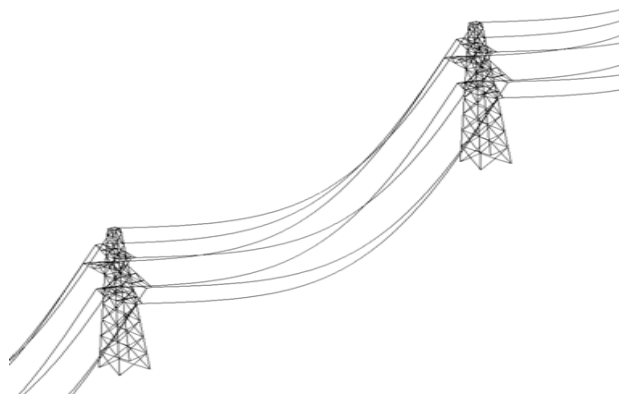


**Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И., Козин В.М**  
**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УДАЛЕНИЯ ЛЬДА С ПРОВОДОВ**  
**ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

**Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет**  
**Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН**

*Введение*

В настоящее время для передачи энергии на большие расстояния, благодаря относительно небольшой стоимости широко применяют воздушные линии электропередачи (ЛЭП) (рисунок 1). Одним из основных элементов ЛЭП являются провода.



**Рис. 1 «Эскиз воздушной линии электропередач»**

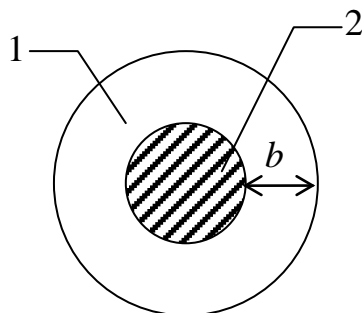
При эксплуатации воздушных линий электропередач в ряде северных и горных регионов возникает проблема обледенения проводов и других конструкций в зимний период. Высокая влажность, ветры, резкие перепады температуры воздуха способствуют образованию наледи на проводах воздушных линий. При этом вес обледеневших проводов возрастает в несколько раз, а толщина слоя льда достигает иногда до 100 мм. Наличие гололеда обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы воздушных линий.

При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор воздушных линий. Гололед может откладываться по фазным проводам достаточно неравномерно. Стрелы провеса проводов с гололедом и без гололеда могут отличаться на

несколько метров. Неравномерность отложения льда на фазных проводах, приводящая к различным значениям стрел провеса, а также неодновременный сброс гололеда при его таянии, вызывающий «подскок» отдельных проводов, могут привести к перекрытию воздушной изоляции. Гололед является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию [1].

В результате сетевые энергокомпании и потребители несут крупные убытки, а восстановление оборванных проводов – дорогостоящий и трудоемкий процесс. Среднее время ликвидации гололедных аварий превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз. Поэтому во всем мире целым рядом компаний и организаций активно ведутся исследования и разработка способов и устройств для борьбы со льдом на линиях электропередач. Вопросам исследования гололедообразования и борьбы с ним посвящено большое количество научных публикаций [23-29,31-33, 35,38, 40-44, 48, 50, 54-58, 60-63, 65, 66].

Анализ технических источников и систем мониторинга эксплуатации ЛЭП ряда сетевых компаний показывает, что гололедные отложения на проводах и тросах высоковольтных линий происходят при температуре воздуха около  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра  $5\text{...}10\text{ м/с}$ . Как правило, полная масса гололедно-изморосевых отложений оценивается для упрощенного случая, когда весь намерзший лед на проводе приводится к форме полого цилиндра льда с толщиной стенки, равной  $b$  (рис. 2) [1].



1 – гололед; 2 – провод;  $b$  – толщина стенки гололеда

**Рис. 2 «Идеализированное представление гололеда на проводах»**

Допустимая толщина стенки гололеда для линий с различным номинальным напряжением зависит от климатического района.

В таблицах 1 и 2 приведены нормативные значения стенки гололеда для различных климатических районов и гололедные районы для некоторых городов России [2].

**Таблица 1**

**Нормативная толщина стенки гололеда, мм, для высоты 10 м над  
поверхностью земли**

Климатический район по толщине стенки гололеда	Номинальное напряжение линии		
	до 3	6-330	500, 750
I	5	5	На основе данных наблюдений, но не менее 10
II	5	10	
III	10	15	
IV	15	20	
Особый	20 и более с уточнением по данным наблюдений	22 и более с уточнением по данным наблюдений	

**Таблица 2**

**Гололедные районы некоторых городов России**

Город	Район по гололеду	Город	Район по гололеду
Москва	I	Красноярск	I
Санкт-Петербург	I	Магадан	V(особый)
Екатеринбург	II	Мурманск	II
Волгоград	III	Ростов-на-Дону	III
Владивосток	IV	Хабаровск	II
Комсомольск-на-Амуре	III	Южно-Сахалинск	II
Краснодар	IV	Якутск	I

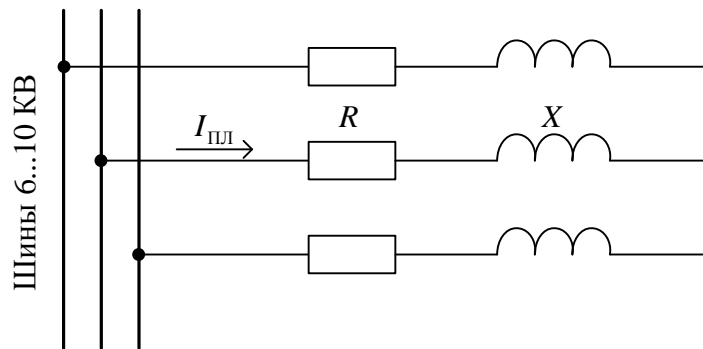
*1 Обзор существующих способов, устройств и систем для борьбы с гололедом на проводах линий электропередач*

Основным методом борьбы с гололедом при эксплуатации протяженных воздушных линий является его плавка за счет нагревания проводов протекающим по ним током. Существует достаточно большое количество схем плавки гололеда, определяемых схемой электрической сети, нагрузкой

потребителей, возможностью отключения линий и другими факторами [1, 40,41, 61, 62].

Плавка гололеда переменным током применяется только на линиях с напряжением ниже 220 кВ с проводами сечением меньше, чем 240 мм<sup>2</sup> [1, 40].

Схема плавки гололеда переменным током искусственного короткого замыкания показана на рисунке 3.



$I_{пл}$  – ток плавки;  $R$  – активное сопротивление линии;  $X$  – реактивное сопротивление линии

**Рис. 3 «Принципиальная схема плавки гололеда переменным током»**

Воздушная линия (ВЛ) одним концом подключается к источнику питания, которым, как правило, служат шины 6 - 10 кВ подстанций или отдельный трансформатор, провода на другом конце ВЛ замыкаются. Напряжение и мощность источника выбираются таким образом, чтобы обеспечить протекание по проводам ВЛ тока в 1,5...2 раза превышающего длительно допустимый ток. Такое превышение допустимого длительного тока оправдано кратковременностью процесса плавки (~1 ч), а также более интенсивным охлаждением провода в зимний период. Следует помнить, что допустимые длительные токи приводятся в справочной литературе для температуры воздуха 25 °С [2, 33, 36, 47].

Ориентировочные величины токов при различной продолжительности плавки гололеда переменным током приведены в таблице 3, в последнем столбце которой указан ток, предупреждающий образование гололеда на проводах.

**Таблица 3**

## Ориентировочные величины токов плавки гололеда

Марка провода	Ток плавки, А, при продолжительности, мин			Ток предупреждения, А
	30	60	100	
АС 50	330	270	240	160
АС 70	410	330	290	205
АС 95	510	400	350	245
АС 120	565	450	400	275
АС 150	660	525	460	325
АС 185	750	600	520	375

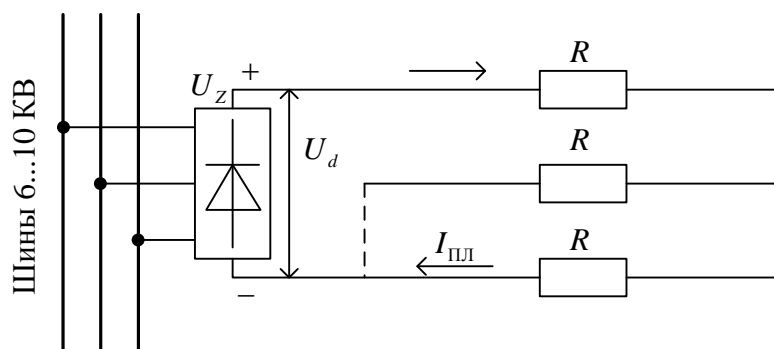
Для ВЛ напряжением 220 кВ и выше с проводами сечений 240 мм<sup>2</sup> и более плавка гололеда переменным током требует значительно больших мощностей источника питания (десятки МВ\*А). Для проводов ВЛ такого класса справедливо соотношение:

$$R \ll X, \quad (1)$$

где  $R$  – активное сопротивление линии, Ом;  $X$  – реактивное сопротивление линии, Ом.

Полная мощность источника увеличивается за счет большой и бесполезной для плавки гололеда реактивной нагрузки. На таких ВЛ плавка гололеда осуществляется выпрямленным током.

Принципиальная схема плавки гололеда выпрямленным током показана на рисунке 4.



$U_z$  – выпрямитель;  $U_d$  – выпрямленное напряжение;  $I_{пл}$  – ток плавки;

$R$  – активное сопротивление линии

**Рис. 4 «Принципиальная схема плавки гололеда постоянным током»**

Отечественной промышленностью для целей плавки гололеда выпускаются как нерегулируемые выпрямительные блоки, так регулируемые.

Ниже приведены параметры одного из наиболее распространенных, выпускаемых отечественной промышленностью нерегулируемых выпрямительных блоков, подключаемых к переменному напряжению 10 кВ:

- выпрямленное напряжение 14 кВ;
- выпрямленный ток 1200 А;
- мощность на выходе 16800 кВт.

Для получения большей мощности выпрямительные блоки можно включать последовательно или параллельно.

Придание выпрямительному блоку управляющих свойств (регулирования выходных параметров) обеспечивает повышение энергоэффективности процесса плавки.

В 2009 году ОАО «НИИПТ» был разработан управляемый выпрямитель для плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ВЛ [3].

Выпрямитель управляемый плавки гололеда (ВУПГ) состоит из выпрямительного моста и блока системы управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА). Силовое оборудование ВУПГ предназначено для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом (исполнение УХЛ 1) и размещено в закрытом стальном контейнере, устанавливаемом на фундаменте на открытой части подстанции. Силовое питание ВУПГ осуществляется от обмотки 10 кВ выделенного трансформатора.

Установки типа ВУПГ имеют следующие преимущества:

- возможность регулирования тока плавки, в том числе и по сигналам с датчиков гололеда;
- плавный пуск и отключение выпрямителя позволяют избежать перенапряжений и облегчают работу коммутационной аппаратуры;
- возможность использования вентильной части установки в составе компенсатора реактивной мощности;

- поддержание постоянства тока плавки, что особенно важно при плавке гололеда на грозозащитных тросах с оптическим кабелем;
- цифровая микропроцессорная система управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА);
- контейнерное исполнение с принудительной воздушной замкнутой системой охлаждения;
- измерительные трансформаторы тока и напряжения размещены внутри контейнера;

Параметры выпрямителя ВУПГ 14/1400:

- номинальное выпрямленное напряжение: 14 кВ;
- номинальный ток плавки: 1400 А;
- пределы регулирования выпрямленного тока: 200...1400 А.

В 2008 году доктор технических наук, профессор МИРЭА В. Каганов предложил новый способ борьбы с гололедом на проводах ЛЭП [4]. Способ заключается в том, что без отключения линии от потребителей, на токонесущие провода подается высокочастотный ток (в пределах от 50 до 500 МГц), разогревающий провод. Так как ток имеет достаточно высокую частоту, то возникает так называемый «скин-эффект» [5] (текущий по проводу ток вытесняется во внешний слой проводника). При этом, толщина слоя по которому течет ток определяется по формуле:

$$\delta(f) = 10^{-3} \sqrt{\frac{\sigma}{\pi \mu_0 \mu f}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – удельное сопротивление при постоянном токе, Ом\*мм<sup>2</sup>/м;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная 1,257\*10<sup>6</sup> В\*с/А\*м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $f$  – частота, МГц.

Утончение слоя  $\delta(f)$  с ростом частоты ведет к увеличению сопротивления той части проводника, по которой течет ток. Это означает, что при одинаковой величине тока, протекающего по проводу, чем выше значение частоты сигнала, тем больше рассеиваемая на проводнике тепловая мощность. Автором изобретения было рассчитано, что для предотвращения образования гололеда

на проводах при использовании такого подхода требует порядка 2 Вт мощности на 1 м провода.

Однако, к недостаткам такого способа можно отнести следующее:

- необходимость постоянного прогрева проводов для предотвращения гололедообразования;

- высокая стоимость источников высокочастотного тока необходимой мощности;

- для реализации способа предлагается использовать радиопередатчики с диапазоном частот 87,5...108 МГц, то использование данного способа может привести к созданию радиопомех в УКВ диапазоне.

Профессор и предприниматель из канадского города Дартмут (Dartmouth) Виктор Петренко вместе со своими коллегами по университету и специалистами американской компании Ice Engineering LLC (штат Нью-Хэмпшир) изобрели относительно дешёвый и эффективный способ предотвращения обледенения проводов линий электропередачи [6].

Новая технология получила название "система противообледенения на основе кабеля с переменным сопротивлением" (variable resistance cable (VRC) de-icing system). Система представляет собой незначительные модификации кабеля и сделанные из готовых компонентов электронные устройства, позволяющие путём переключения производить изменение электрического сопротивления стандартной линии электропередачи с низкого на высокое. Высокое сопротивление автоматически вызывает нагрев, благодаря которому происходит плавление образовавшегося инея или льда, либо, прежде всего, предотвращает нарастание льда на проводах.

По словам вице-президента компании Ice Engineering LLC г-на Мартинеза, возможна установка системы как часть регулярно проводимого процесса планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта, а также планируется обеспечение как ручного, так и автоматического управления системой.



Однако, хотелось бы отметить, что как и любой другой способ, использующий нагрев проводов, применение такой системы требует больших затрат энергии и обладает низкой энергетической эффективностью.

### *1.1 Применение композитных проводов повышенной прочности*

В качестве пассивной меры борьбы с гололедом на проводах линий электропередач, в районах с небольшим намерзанием льда, могут использоваться различные провода повышенной прочности. Повышение прочностных характеристик современных проводов происходит, в основном, за счет применения новых композитных материалов. Такие провода выдерживают большие нагрузки, по сравнению со стандартным сталь-алюминиевым проводом, и могут без фатальных последствий выдерживать образующийся на них гололед. Однако, следует помнить, что прочность таких проводов не бесконечна, вследствие чего применение таких проводов в регионах с интенсивным гололедообразованием может быть неэффективным, а иногда даже и невозможным [7].

Одним из наиболее известных типов проводов повышенной прочности являются провода и кабели с несущим сердечником из композитных материалов.

Как известно, стандартные стальные сердечники могут перегреться в условиях пиковых электрических нагрузок, что приводит к растяжению провода и провисанию его ниже допустимой нормы. В противоположность этому, провод с сердечником из композитов обладает более низким коэффициентом термического расширения и поэтому они менее подвержены тепловому расширению, чем проводники со стальными сердечниками. Заменяя провод со стальным сердечником на провод с композитными материалами можно увеличить пропускную способность линий. Производители провода утверждают, что можно удвоить величину тока в линии без риска провисания и разрушения провода.

Учитывая основные свойства композитных материалов – высокое отношение прочности к весу и малая величина провисания, можно обеспечить

увеличение длины пролетов между опорами, уменьшая количество опор в линии на 16 %. Реализация данного преимущества, очевидно, возможна только при проектировании и введении в строй новых линий электропередач. Реконструкция же старых ЛЭП связана со значительными затратами.

К данному типу проводов относятся провода АССС (Aluminum Conductor Composite Core) - Алюминиевый Проводниковый Провод с Композитным Сердечником компании Composite Technology Corp.'s, который представляет собой набор алюминиевых проводов вокруг углеволоконного и стекловолоконного эпоксидного ядра и провода АССР (Aluminum Conductor Composite Reinforced) - Алюминиевый Проводящий Композитный Усиленный провод. В проводах АССР используется сердечник из металлокомпозита, в обертке из высокотемпературных алюминий-цирконидных (Al-Zr) проводов. Характерной особенностью этих проводов является то, что и конструкция и композитный сердечник, и наружные пучки AL-Zr вносят свой вклад в прочность кабеля и повышение проводимости [8].

Для оценки свойств провода АССС компания изготовитель проводила ряд испытаний. При испытании провод подвергали высоким напряжениям - сердечник размером 9.5 мм был испытан нагрузкой 18567 кг при температуре окружающей среды. В результате испытаний определилось, что кабельная система на проводах АССС может непрерывно работать при 180 °С и может выдерживать кратковременные скачки до 200 °С, с провисанием всего лишь 10 % от величины провисания кабеля со стальным сердечником. В отличие от обычных проводников со стальным сердечником, которые имеют относительно высокий коэффициент термического расширения, сердечник проводника АССС стабилен по размерам с коэффициентом термического расширения  $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (у стали коэффициент термического расширения  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) [8].

Хотя стоимость провода АССС за один километр приблизительно в три раза выше по сравнению с традиционными проводами, экономический эффект от их применения обеспечивает высокую окупаемость. В протяженной, многоцепной линии, провода с композитными сердечниками не только

передают в два раза больше мощности по сравнению с проводом со стальным сердечником такого же веса и напряжения, но и позволяют длительное время выдерживать высокую температуру, предотвращая образование гололеда.

Практическим примером использования композитных проводов стала ВЛ протяженностью в 60 км в провинции Фуджиан, Китай. В случае применения обычного провода для реконструкции линии (с увеличением сечения провода) потребовалось бы заменить 150 опор, чтобы удерживать возросший вес. Использование АССС кабеля позволило избежать замены всех опор, кроме семи штук, снижая материальные затраты и уменьшая полную стоимость проекта. Данных об эффективности реализации данного проекта пока нет.

В проводах повышенной прочности АССР композитный сердечник состоит из волокна алюминиевой керамики высокой чистоты (оксид алюминия  $Al_2O_3$ ). Каждый сердечник состоит из более чем 25000 сверхпрочных волокон  $Al_2O_3$ . Сердечники имеют диаметры от 1.9 мм до 2.9 мм, чтобы коррелировать со стандартными размерами стальных сердечников, в диапазоне от 21.84 мм до 28.19 мм.

Керамические волокна являются непрерывными, осевой ориентации, и полностью помещены в алюминиевую матрицу. Провод является стандартным крученым проводом, с оберткой состоящей из непрерывных прядей Al-Zr, изготавливаемых с использованием обычных методов кручения.

Наружные пряди Al-Zr являются температуростойким сплавом, который позволяет непрерывно работать при 210 °С, с пиковыми нагрузками до 240 °С. Хотя и являющиеся традиционным алюминием, провода с композитным сердечником приблизительно в 9 раз прочнее алюминия и в 3 раза жестче. Сердечник в половину легче соответствующего стального сердечника, обладает более высоким коэффициентом электропроводности, и имеет коэффициент теплового расширения в половину меньше, чем у стали.

Применение проводов с композитными сердечниками позволяет повысить пропускную способность ВЛЭП, сократить затраты на реконструкцию и за счет

более высокой проводимости композитного сердечника снизить электрические потери в ВЛ.

Для высоковольтных линий электропередач 110 – 1150 кВ электротехнические компании разработали и выставили на рынок новые высокотехнологичные провода. Эти провода, получившие название Aero-Z®, представляют собой полностью связанные между собой проводники, которые состоят из одного или нескольких концентрических слоев круглых проволок (внутренние слои) и проволок в виде буквы "Z" (внешние слои). Каждый слой провода имеет скрутку по длине, выполненную с определенным шагом.

Причинами для разработки этого типа провода стали:

- необходимость увеличения пропускной способности существующих линий;
- снижение механических нагрузок, прикладываемых к опорам ЛЭП, из-за пляски проводов;
- повышение коррозионной стойкости проводов и тросов;
- снижение риска обрыва провода при частичном повреждении нескольких внешних проволок из-за внешних воздействий, в том числе в результате удара молнии;
- улучшение механических свойств проводов при налипании снега или образовании льда.

Рассмотрим более подробно конструкцию провода Aero-Z®. Внутренняя часть провода аналогична обычному проводу типа АС за исключением того, что внутренние проводники могут быть изготовлены не только из стали, но и из алюминия или алюминиевых сплавов. Более того, один или несколько проводников могут быть полыми и содержать внутри оптические волокна. Внешние же слои провода выполняются из алюминиевых проводников, имеющих форму буквы "Z", причем проводники очень плотно прилегают друг к другу.

Таким образом, за счет более плотной скрутки проводников и более гладкой внешней поверхности возможно использование более тонких и более

легких проводов (без стального сердечника). Это, в свою очередь приводит к снижению электрических потерь в проводах (на 10 – 15 %), в том числе потери на корону, и повышению механической прочности конструкции.

Лабораторный тест на воздействие удара молнии показал, что при повреждении до пяти Z-образных проводников сохраняется полная механическая прочность данного провода.

Также, благодаря плотной скрутке практически исключается проникновение во внутренние слои воды и загрязнений, следовательно снижается коррозия внутренних слоев провода.

С точки зрения поведения проводов в условиях налипания снега можно утверждать, что провод Aero-Z®, обладая более высоким сопротивлением кручению, практически не поворачивается, что приводит к самосбросу излишнего снега под действием силы тяжести.

За счет более гладкой внешней структуры провода Aero-Z® имеют примерно на 30 – 35 % меньшее аэродинамическое сопротивление ветровым нагрузкам по сравнению с обычным проводом. Этот факт приводит к резкому снижению пляски проводов как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении, что в свою очередь значительно облегчает работу опор и гирлянд при сильных ветрах.

Таким образом, провода Aero-Z® имеют следующие основные преимущества по сравнению с обычными проводами:

- резкое снижение потерь при транспортировке электроэнергии по линиям электропередачи (особенно по магистральным);
- практически полное отсутствие внешней коррозии проводников;
- резкое снижение пляски проводов от ветровых нагрузок;
- уменьшение налипания снега и льда на проводах;
- уменьшение нагрузки на поддерживающие устройства ЛЭП, что приводит к возможному увеличению длин пролетов и экономии до 10 % числа опор;

- возможность организации каналов передачи информации по оптоволокну внутри проводов и молниезащитных тросов;

- при равных диаметрах в условиях постоянной нормальной эксплуатации имеется прирост допустимой нагрузки по току от 7 до 16 % и, как следствие, снижение тепловых джоулевских потерь на 13 – 26 %;

- коэффициент аэродинамического сопротивления компактных проводов снижается на 25 – 50 % по сравнению с обычными проводами при воздействии ветра с высокой скоростью.

Однако, кроме преимуществ, данный провод имеет и недостатки. К ним относятся: высокая цена (стоимость за один километр провода Aero-Z примерно в шесть раз выше стоимости провода АС) и ограничение на плавку гололеда (в проводе Aero-Z не допускается длительного повышения температуры свыше 80 °С) [7].

К пассивным методам борьбы с гололедом следует отнести и методы связанные с уменьшением адгезиционных свойств проводов. В [26,29] для достижения поставленной цели рекомендовано использовать специальные разработанные смазки, однако данный принцип борьбы не получил широкого распространения из-за сложности технического обслуживания и сравнительно низкой эффективности.

### *1.2 Механические системы для борьбы со льдом*

Кроме использования традиционных методов борьбы с гололедом в настоящее время активно разрабатываются различные механические и робототехнические системы для определения появления льда и его удаления с проводов ЛЭП.

Научно-исследовательский институт Канады Hydro-Québec начал робототехнический проект LineScout в 1998 году. Причиной запуска данного проекта была массовые отключения на несколько дней электричества у миллионов пользователей в результате ледяного шторма и обрыва линий электропередач из-за намерзания льда [9].

В связи с этим появилась идея создать небольшой мобильный робот, который мог бы перемещаться по проводам высоковольтных ЛЭП, и удалять с них лед. Первый прототип был небольшим роботом, который скалывал лед. Более поздняя версия робота была оборудована камерами и инфракрасными датчиками, а робот использовался для осмотра работающих линий высокого напряжения.

Сегодня робот LineScout может перемещаться по работающим линиям электропередач и давать информацию о состоянии линий. Специалисты управляют роботом дистанционно, находясь на земле, и таким образом они могут обнаружить повреждение, удалить лед с проводов и выполнить простой ремонт. А такой формат работы позволяет получить значительную экономию, так как для осмотра не нужно обесточивать линию электропередач, а также позволяет снижать риски, безаварийность работы и повышать безопасность работы людей.

Внешний вид робота LineScout представлен на рисунке 5.

Достоинством робота LineScout является возможность его управления оператором в режиме реального времени. К недостаткам робота можно отнести:

- необходимость ручной установки робота на провод и снятия его с провода, а также перевеса с одного провода на другой. Для этого необходима специальная техника (автовышка) и обслуживающий персонал, что повышает финансовые затраты на эксплуатацию робота и затрудняет его использование в труднодоступных районах;

- необходимость управления оператором. Это означает, что на каждый экземпляр такого робота необходимо подготовить и обучить квалифицированного специалиста. Кроме затрат на обучение оператора, затраты при эксплуатации робота возрастают за счет оплаты труда оператора;

- высокая стоимость самого робота. При большой протяженности линий необходимо большое количество таких роботов с обслуживающим персоналом, что может быть экономически невыгодным.



**Рис. 5 «Робот LineScout»**

В 2011 году началась коммерческая эксплуатация совместной разработки компании Japan's Kansai Electric Power Co с японской компанией HiBot робота Expliner, предназначенного для проверки и обслуживания высоковольтных линий электропередач. Робот подвешивается к проводам и медленно передвигается по ним с помощью колесного привода [10].

Внешний вид робота Expliner приведен на рисунке 6.

Снизу робота имеется манипулятор для осмотра линий, который также служит в качестве противовеса для баланса. Большой проблемой для данного робота является пересечение препятствий, которые возникают на линии: прокладки, которые удерживают провода (встречаются через 30 метров), и устройства, поддерживающие провод. Expliner обходит такие препятствия с помощью противовеса, сдвигая центр тяжести робота, что позволяет приподнять колеса или же сдвигать по отдельности каждую ось [11]. В случае сложного препятствия, например серии изоляторов, для перестановки робота требуется ручной перенос.





**Рис. 6 «Внешний вид робота Expliner»**

Основной задачей робота является мониторинг состояния линии. Для этого Expliner использует четыре комплекта лазерных датчиков – по одному датчику на каждый из четырех кабелей в линии, – с помощью которых робот может обнаружить места повреждений и коррозии, небольшие изменения диаметра кабеля.

Кроме того, Expliner имеет восемь камер высокого разрешения, что позволяет оператору визуально обнаружить механические повреждения (трещины, оплавленные участки и т.п.) на четырех линиях одновременно.

Одним из российских коллективов в 2009 году была разработана и запатентована полезная модель устройства для перемещения по проводу линии электропередачи средства для удаления льда с провода [12].

Устройство содержит корпус, выполненный с возможностью установки на проводе и снабженный средством передвижения и источником питания. Внутри корпуса содержится подвижный модуль, выполненный с возможностью перемещения относительно корпуса, и взаимодействующая с ним левистическую катушку, неподвижно закрепленная на корпусе. При этом подвижный модуль включает как минимум один постоянный магнит и средство фиксации подвижного модуля на проводе линии электропередачи. Элемент устройства, названный левистической катушкой, представляет собой электромагнит, жестко закрепленный в корпусе.

В качестве источника питания в устройстве используется тороидальный трансформатор тока.

Передвижение устройства осуществляется в пределах одного пролета линии электропередачи с запуском и остановкой с дистанционного пульта управления или с пульта управления диспетчером кодированным сигналом по высокочастотной связи, которой оборудуются почти все высоковольтные линии электропередачи.

Движение устройства вдоль провода осуществляется следующим образом: блок управления попеременно подает на левистическую катушку положительное и отрицательное напряжение. В зависимости от того, какое напряжение подано, постоянный магнит в подвижном модуле притягивается к катушке или отталкивается. В зависимости от требуемого направления движения, после притягивания или после отталкивания, подвижный модуль жестко фиксируется на проводе стопором. В следующий момент взаимное притяжение (или отталкивание) катушки и магнита заставляет смещаться вдоль провода уже само устройство.

Данная модель имеет следующие недостатки, затрудняющие ее применение на практике:

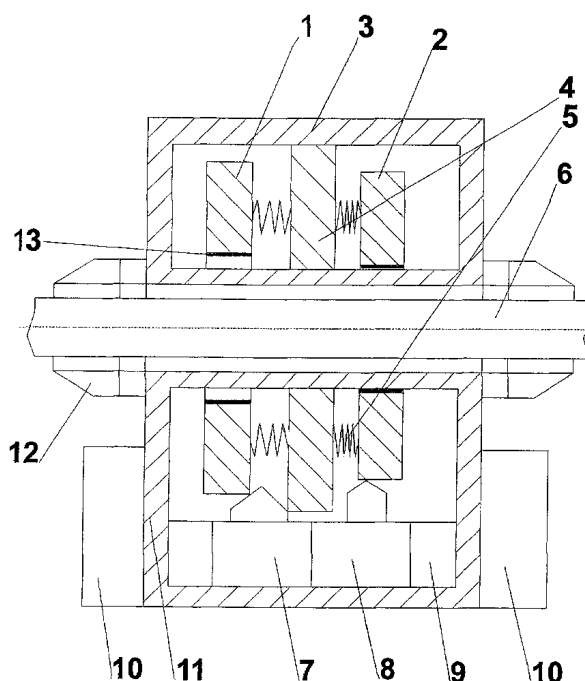
- низкий КПД (необходима достаточно высокая мощность катушки, чтобы компенсировать резкое снижение силы взаимодействия катушки с магнитом при увеличении расстояния между ними)

- конструктивная невозможность обеспечить равномерное передвижение устройства вдоль провода (движение при использовании такого принципа происходит рывками), что усложняет разработку системы управления таким устройством и делает невозможным применение устройства в условиях его вмерзания в слой льда.

К устройствам с механическим воздействием на ледовое покрытие проводов может быть отнесено и устройство с вибрационным принципом действия. Данное устройство, разработано отечественным коллективом, представляет собой электромеханический вибрационный двигатель с

использованием электромагнитного поля от тока в проводе линии электропередач. Движение происходит за счет периодического изменения переменного тока в проводе линии электропередачи [13].

Устройство содержит два кольца, подвижных относительно немагнитного герметичного корпуса и одно жестко закрепленное в корпусе кольцо. Каждое кольцо собрано из двух симметричных полуколец из ферромагнитного материала, внутренняя часть которых выполнена из наноструктурированного материала. Полукольца подвижных колец соединены между собой упругой связью, а полукольца неподвижного кольца скреплены немагнитными, непроводящими и неупругими вставками [14].



1,2 – подвижные кольца; 3 – корпус; 4 – неподвижное кольцо;  
5 – упругая связь между кольцами; 6 – провод; 7,8 – электромагниты;  
9 – блок питания; 10 – датчик гололеда; 11 – блок радиуправления;  
12 – кольцевые ледорезы; 13 – наноструктурированный материал

**Рис. 7 «Схема вибрационного устройства для очистки ЛЭП от гололедных отложений»**

Принцип действия данного устройства иллюстрируется рисунком 7. При возникновении гололеда блок радиуправления 11 включает блок питания 9 электромагнитов 7 и 8. При фиксации гололеда, например правым датчиком

гололеда 10, срабатывают электромагниты 7 и 8. Электромагнит 7 фиксирует кольца 1 и 4 таким образом, чтобы кольцо 1 не касалось провода и электромагнитная сила взаимодействия колец 1 и 4 равнялась нулю. Электромагнит 8 ограничивает движение полуколец кольца 2 так, чтобы кольцо 2 плотно прилегало к проводу 6. При этом наноструктурированный материал обеспечивает анизотропность [15] силы трения кольца 2 о провод. Переменный ток, протекая по проводу 6, возбуждает в магнитной цепи устройства переменный магнитный поток. Между кольцами 2 и 4 устройства возникает переменная сила притяжения, изменяющая свое значение от нуля до максимального. Когда электромагнитная сила больше силы упругости пружин кольца 2 и 4 начинает притягиваться. Так как сила трения кольца 2 о провод значительно больше силы трения кольца 4 о провод центр масс смещается в сторону кольца 2. Далее электромагнитная сила уменьшается и становится меньше силы упругости пружины, кольца 4 и 2 отталкиваются. Так как сила трения кольца 2 о провод значительно меньше силы трения кольца 4 о провод происходит движение центра масс в сторону кольца 2. Далее сила притяжения снова начнет возрастать и цикл повториться снова. Частота цикла устройства равна удвоенной частоте сети. Движение устройства в другую сторону происходит аналогично, при фиксации гололеда левым датчиком гололеда 10 и колебаниях колец 1 и 4.

## *2. Автоматизация процесса удаления намершего льда с проводов ЛЭП*

Эффективность работы того или иного устройства удаления льда с проводов ЛЭП во многом зависит от своевременного включения его в работу, которое определяется текущим состоянием линии. В качестве параметров оценивающих состояние ЛЭП используются не только величина ледяного покрова проводов или его масса, но и усилие ветровой нагрузки, температура окружающей среды, влажность и аэрозольность атмосферы. Отечественной промышленностью выпускаются как специальные датчики гололедно-ветровых нагрузок предназначенные для сигнализации о наличии гололеда на проводах ЛЭП, так и датчики для измерения массы либо толщины льда и ветровых

нагрузок на провод, температуры и т.п. [16, 67, 68]. Такие датчики используются как самостоятельно для наблюдения за состоянием линии, так и в составе автоматизированных систем.

В области создания различных типов датчиков гололеда или измерения толщины льда на проводах ЛЭП разрабатываются и изобретаются множество различных приборов, основанных на самых различных принципах действия.

Наиболее универсальными следует признать тензометрический датчики гололедно-ветровых нагрузок.

Например, тензометрический датчик типа ДГВН представляет собой двухканальный датчик с возможностью одновременного измерения нагрузок в двух плоскостях – вертикальной и горизонтальной [16].

Датчик предназначен для контроля гололедно-ветровых нагрузок, действующих на провода воздушных линий электропередач.

Устанавливается датчик на ВЛ взамен скобы подвески гирлянды изоляторов. Измерение нагрузки происходит независимо в двух плоскостях: вертикальной – масса образовавшегося льда, и горизонтальной – сила ветра. При этом взаимное влияние составляющих нагрузки практически полностью исключается. Нагрузка от массы провода компенсируется в момент установки датчика, а нагрузка от тяжения провода при изменении температуры (в горизонтальной плоскости, параллельной воздушной линии) датчиком не воспринимается.

Преимуществом данной системы является непосредственное измерение ветровой нагрузки на провод, покрытый гололедом, и гололедной нагрузки в любом пролете линии.

Датчик может применяться как для контроля статических нагрузок, так и для измерения динамических (колебательных) процессов нагруженных элементов.

Датчик имеет встроенный усилитель "токовая петля" по обоим каналам.

Точность датчика составляет  $\pm 0,2\%$ , систематическая составляющая погрешности не превышает  $\pm 0,2\%$ .

Необходимость системного подхода к вопросу борьбы с обледенением ЛЭП была продекларирована еще в 80 годах прошлого столетия [48,62]. действительно, в случае большой протяженности и разветвленности электрических сетей, практически невозможно производить наблюдение за состоянием сети вручную. Для этого разрабатывают и используют различные автоматизированные системы. Примером такой системы может служить автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки (АИСКГН) [17], представляющая собой единый комплекс программно–аппаратных средств, состоящих из:

- радиотелемеханических систем телеизмерения гололедных нагрузок (СТГН) на ВЛ, обеспечивающих совместно с устройствами радиосвязи, телемеханики передачу информации о гололедно-ветровых нагрузках и температуре воздуха из пунктов контроля (ПК) на ВЛ в пункты приема (ПП) и далее на пункт управления (ПУ) плавкой гололеда;

- технологического и прикладного программного обеспечения, включающего программы функционирования микропроцессорных устройств радиотелемеханических СТГН и программы обработки для автоматизированного рабочего места (АРМ) в ПП и ПУ.

АИСКГН является многоуровневой цифровой информационно-вычислительной системой, обеспечивающей непрерывный контроль гололедной нагрузки и температуры воздуха в пунктах контроля, удаленных на значительное расстояние от пунктов приема.

Архитектура АИСКГН является открытой, гибкой и модульной, что позволяет выполнять поэтапное развитие информационной системы с целью увеличения ПК и ПП и расширения ее границ до региональной системы.

Функциональная схема радиотелемеханической СТГН, приведенная на рисунке 8, состоит из:

1. ДГН – датчик гололедной нагрузки;
2. ДТ – датчик температуры;
3. МЛП – микропроцессорный линейный преобразователь;

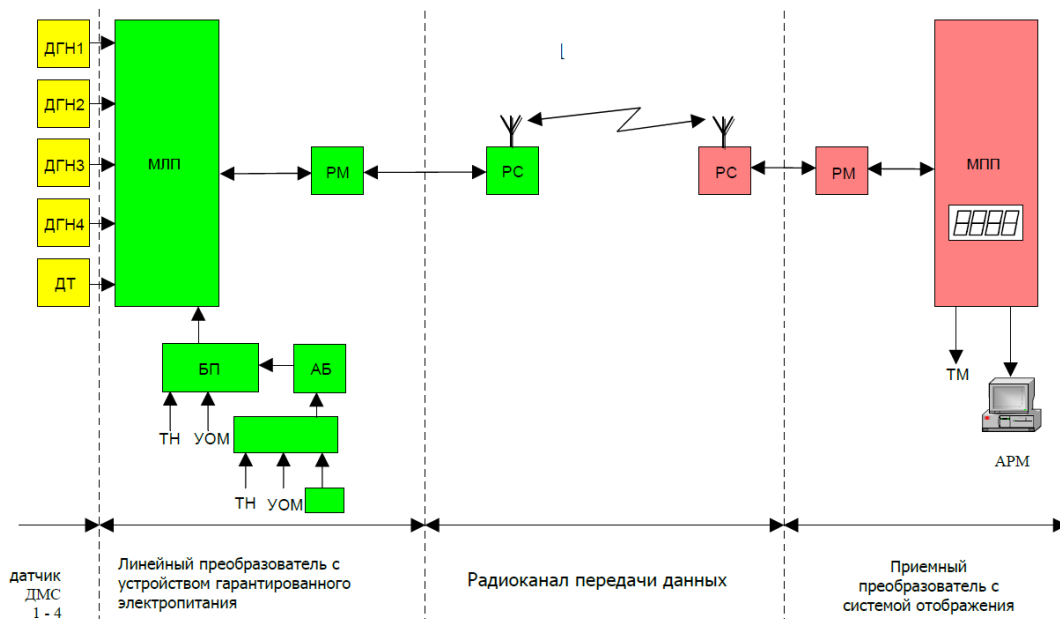
4. МПП – микропроцессорный приемный преобразователь;
5. РМ – радиомодем;
6. РС – радиостанция;
7. БП – блок питания;
8. АБ – аккумуляторная батарея;
9. СБ – солнечная батарея;
10. УОМ – устройство отбора мощности;
11. ТН – трансформатор напряжения;
12. АРМ – автоматизированное рабочее место.

В каждом пункте контроля, размещаемом на опоре ВЛ, устанавливаются:

- датчики гололедной нагрузки (ДГН) на трех фазах и тросе;
- датчик температуры (ДТ);
- преобразователь линейный микропроцессорный (МЛП);
- источник бесперебойного питания (БП).

Микропроцессорный линейный преобразователь, источник бесперебойного питания, аккумуляторная батарея и радиостанция размещаются в шкафу контроля, который крепится на опоре. Антенна устанавливается на траверсе.

Датчики гололедной нагрузки бесконтактные, обладают хорошей чувствительностью и обеспечивают непрерывный контроль нагрузки на провод ВЛ с достаточной точностью. Диапазон контролируемых нагрузок от 0 до 100 кН (0 – 10000 кг). Типоразмер датчика выбирается по максимальной нагрузке, зависящей от веса провода, ветра и гололеда. Датчик устанавливается на промежуточной опоре и крепится между траверсой и подвесной гирляндой. Для крепления используется стандартная линейная сцепная арматура. Датчик защищен от воздействия атмосферы и внешних электромагнитных полей, обеспечивает контроль температуры в диапазоне от -40 °С до +40 °С.



**Рис. 8 «Функциональная схема радиотелемеханической СТГН»**

Микропроцессорный линейный преобразователь обеспечивает считывание информации с четырех датчиков гололедной нагрузки и с датчика температуры, преобразовывает в цифровой сигнал для последующей передачи по каналу радиосвязи.

В состав пункта приема входит:

- преобразователь приемный микропроцессорный (МПП);
- радиостанция (РС) с антенной;
- сервер обработки и хранения данных;
- автоматизированные рабочие места диспетчера (АРМ) «Гололед»;
- источник бесперебойного питания.

Микропроцессорный приемный преобразователь обеспечивает прием сигналов из каждого пункта контроля и отображение информации на встроенном символьном табло.

Кроме этого микропроцессорный приемный преобразователь обеспечивает подключение стандартных систем телемеханики SMART, «Компас», «Гранит» и т.д., ПЭВМ и систем АСУТП по стандартным интерфейсам RS232/RS485.

Программное обеспечение АИСКГН состоит из:

- ✓ технологического программного обеспечения, обеспечивающего функционирование линейного и приемного преобразователей;



✓ прикладного программного обеспечения, состоящего из:

- программы формирования базы данных о всех контролируемых параметрах в реальном масштабе времени;

- программы обработки и предоставления данных о температуре воздуха и гололедно-ветровой нагрузке на фазные провода и грозозащитные тросы ВЛ в пунктах контроля;

- программы расчета режимов плавки гололеда на ВЛ постоянным и переменным током;

- программы прогнозирования развития событий.

Программы обработки и предоставления данных позволяет отображать гололедную обстановку в удобных для восприятия пользователей видах, а так же производить архивирование происходящих процессов.

Внедрение системы раннего гололедообразования на МЭС Юга позволило вести круглосуточный мониторинг за гололедообразованием на большой территории, повысить оперативность принятия решений о проведении плавки гололеда, вести дистанционный контроль за началом и окончанием плавки гололеда, сократить время проведения плавки гололеда, что позволило сократить расход электроэнергии на проведение плавки. Впервые появилась возможность проводить плавку без организации наблюдения персоналом на трассе ВЛ.

В качестве другого примера практического использования автоматизированной системы плавки гололеда можно указать на систему реализованную на базе АКСТ «Линия-Ц». Аппаратура каналов связи и телемеханики по ЛЭП с цифровым уплотнением каналов АКСТ «Линия-Ц» разработана и выпускается ОАО «Шадринский телефонный завод» [18]. Основное назначение аппаратуры – организация высокочастотных каналов связи по высоковольтным ЛЭП 35...1150 кВ в информационных структурах АСКУЭ, диспетчерского и технологического управления энергосистемами и энергообъектами.

Однако, кроме основных функций связи, система контролирует скорость изменения затухания ВЧ тракта с выдачей на внешний контроллер телеизмерений прецизионного токового сигнала пропорционального затуханию. Данная функция позволяет пользователю удаленно отслеживать начало обледенения провода ВЛ при неблагоприятных погодных условиях и автоматизировано включать его обогрев, предотвращая обрыв провода при обледенении. Автоматизированное управление включения обогрева осуществляется внешним контроллером телеизмерений, подключаемым к аппаратуре.

Токовый сигнал для автоматизированного включения обогрева провода ВЛ, пропорциональный затуханию ВЧ тракта выдается на разъем «МОДЕМЫ» блока БОС в диапазоне 0...5 мА или 4...20 мА. Стандартно току 0 мА соответствует затухание ВЧ тракта 0 дБ, току 5 мА соответствует затухание ВЧ тракта 60 дБ, аналогично для диапазона 4...20 мА. Соответствие токового сигнала уровню затухания ВЧ тракта может быть изменено в процессе эксплуатации аппаратуры через систему управления. Внешний контроллер телеизмерений подключается к контактам разъема «МОДЕМЫ» в зависимости от требуемого диапазона.

Аппаратура ведет автоматизированный мониторинг до 10 различных параметров. При включении одной из станций аппаратуры в локальную сеть, пользователь может удаленно контролировать с этой станции параметры всех станций, которые к ней подключены на других концах ВЛ. Контролируемые параметры сохраняются в виде записей на энергонезависимый носитель информации.

Проведенный анализ показывает, что наибольшая активность деятельности в области борьбы с гололедно-изморосевыми отложениями на ЛЭП приходится на период времени СССР. Интерес к данному направлению научные организации и промышленные предприятия РФ стали проявлять в последние 5 лет. В настоящее время основным принципом удаления гололеда с проводов

ЛЭП является плавка. Несмотря на простоту реализации данного принципа, ему присущ и ряд недостатков:

- большая длительность процесса плавки;
- большие затраты энергии на очистку проводов ото льда;
- необходимость отключения линии для проведения очистки;
- трудность применения для протяженных и разветвленных электрических сетей.

Использование для очистки проводов от ледяных отложений робототехнических систем позволяет устранить такой недостаток как отключение линии электропередачи, но вместе с тем приносит свои недостатки :

- необходимость управления оператором;
- необходимость многократно вручную устанавливать работа на линию и снимать с нее при каждой очистке;
- высокую стоимость систем для протяженных и разветвленных электрических сетей.

Наличие большого многообразия датчиков, контролирующих параметры ледообразования на проводах ЛЭП и современных микропроцессорных средств управления создают предпосылки создания автоматизированных систем по прогнозированию и удалению гололедно-изморозевых отложений на проводах ЛЭП. Однако, на сегодняшний день создание и использование автоматизированных систем ограничивается в основном системами контроля гололедной нагрузки, единичными образцами, находящимися в опытно-промышленной эксплуатации.

Таким образом, разработка автоматизированных систем по прогнозированию и удалению гололедно-изморозевых отложений на проводах ЛЭП, построенных базе энергоэффективных способов и устройств для удаления льда с проводов ЛЭП является актуальной задачей.

### 3. Новые способы и устройства для борьбы с гололедом на ЛЭП

Ориентируясь на ранее сформулированные требования, авторами был разработан и предложен способ удаления гололеда с проводов ЛЭП свободный от ряда недостатков, присущих плавке гололеда [19].

Удаление гололеда предлагается производить не с помощью термического воздействия от протекающего по проводам тока, а с помощью электромеханического воздействия на лед.

Известно, что при протекании по двум параллельным проводам тока эти провода притягиваются или отталкиваются под действием возникающей между ними силы Ампера (рисунок 9), в зависимости от направлений токов [20].

Численно сила Ампера, действующая на участок провода длиной  $dl$ , равна:

$$dF_A = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl, \quad 3)$$

где  $dF_A$  – сила Ампера, действующая на участок провода длиной  $dl$ , Н;

$dl$  – длина участка провода, м;

$I_1$  – ток, протекающий в первом проводе, А;

$I_2$  – ток, протекающий во втором проводе, А;

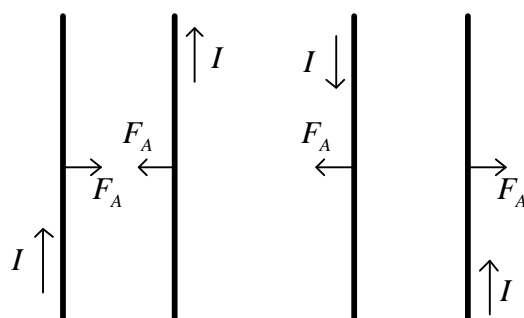
$R$  – расстояние между проводами, м;

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi * 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

Таким образом, при периодическом пропускании по двум проводам линии электропередач импульсов постоянного тока, провода будут совершать механические колебания под действием периодически появляющейся и исчезающей силы Ампера.

Под действием этих колебаний слой намерзшего на проводах льда будет разрушаться и отваливаться от проводов.



$I$  – ток;  $F_A$  – сила Ампера

**Рис. 9 «Действие силы Ампера на параллельные провода»**

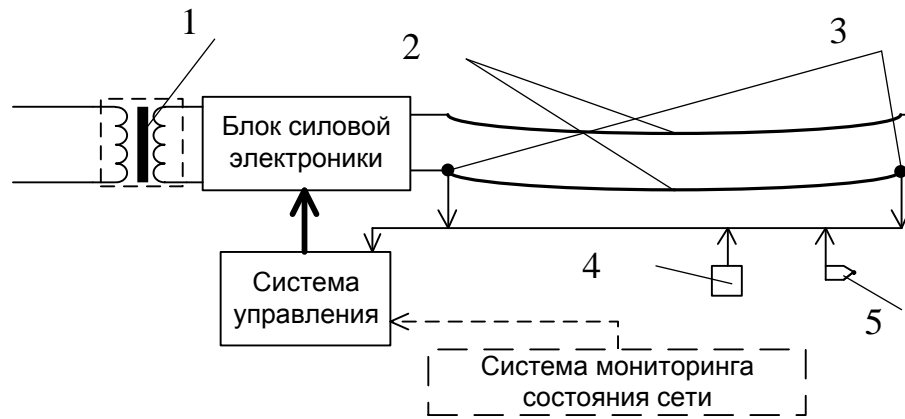
Для того чтобы повысить эффективность предлагаемого способа и снизить потребление энергии, необходимо, чтобы частота, с которой по проводам пропускаются импульсы тока, была равна (близка) или кратна собственной частоте колебаний обледеневших проводов, закрепленных на двух соседних опорах. При этом амплитуда колебаний, а, следовательно, и разрушающие воздействия на лед, будут возрастать из-за явления резонанса. Однако, при практическом использовании данного способа необходим тщательный и точный расчет величины и частоты импульсов тока, для исключения возможных негативных последствий резонанса.

Также, для повышения эффективности разрушения льда, следует пропускать импульсы тока по проводам, не лежащим в одной горизонтальной плоскости. Это позволит использовать инерцию льда и силу тяжести, как еще один разрушающий фактор.

Данный способ так же, как и плавка, требует отключения линии. Однако, так как производится именно механическое разрушение льда, то время, затрачиваемое на очистку будет существенно меньше времени, затрачиваемого на плавку.

Кроме того, затраты энергии на очистку будут ниже, чем при плавке, даже при большей мгновенной мощности, необходимой для создания колебаний.

На рисунке 10 приведен один из возможных вариантов реализации автоматизированной системы удаления гололеда, реализующего предлагаемый способ.



1 – трансформатор; 2 – провода; 3 – датчики гололедно-ветровых нагрузок;  
4 – датчик влажности; 5 – датчик температуры

**Рис. 10 «Планируемая схема устройства, реализующего предлагаемый способ удаления гололеда с проводов ЛЭП»**

Устройство работает следующим образом:

- трансформатор преобразует питающее напряжение до нужной величины;
- блок силовой электроники выпрямляет полученное от трансформатора напряжение и формирует импульсы тока требуемой величины, формы и частоты;
- система управления, представляющая собой программируемый логический контроллер, обрабатывает информацию с внешних датчиков, задает требуемую форму и частоту импульсов тока для блока силовой электроники и управляет работой системы в целом (осуществляет расчеты всех необходимых параметров, производит включение и отключение устройства);
- в устройстве предусматривается возможность подключения к системе мониторинга состояния сети, с целью обеспечения централизованного управления работой нескольких устройств внутри одной сети.

Для разветвленных сетей большой протяженности для борьбы с гололедными образованиями наиболее целесообразно использовать автоматизированные системы, построенные на базе автономно работающих устройств постоянно закрепленных на каждом проводе пролета ЛЭП. Очевидным требованием, предъявляемым к таким устройствам, будет являться относительная простота реализации, сравнительно низкая стоимость и высокая надежность.

Одним из возможных вариантов такого устройства может быть устройство предложенное в [21].

При разработке данного устройства в качестве прототипа принято устройство для перемещения по проводу ЛЭП средства для удаления льда с провода. Основным недостатком данного устройства является низкий его КПД, в связи с использованием в качестве двигателя двух магнитов – подвижного и неподвижного, попеременно притягивающихся и отталкивающихся. Кроме того, к недостаткам такого устройства следует отнести невозможность обеспечения плавного движения устройства вдоль провода, что также объясняется использованием в качестве двигателя двух магнитов.

Для устранения этих недостатков предлагается в качестве двигателя использовать не пару магнитов, а линейный асинхронный двигатель (ЛАД) [22].

Предлагаемое устройство содержит следующие основные конструктивные элементы, обеспечивающие одновременное передвижение устройства вдоль провода и очистку провода ото льда, а также возможность поворота устройства вокруг оси провода:

- корпус;
- источник питания;
- система управления;
- средство радиосвязи;
- цилиндрический линейный асинхронный двигатель;
- поворотный механизм со средством фиксации;
- шнеки с приводными двигателями.

На рисунке 11 приведена схема устройства.

Движение устройства вдоль провода обеспечивается с помощью линейного асинхронного двигателя, а очистка ото льда – с помощью шнеков, установленных с обеих сторон устройства. В результате, в связи с отсутствием в составе устройства большого количества сложных, высокотехнологичных

элементов, конечная стоимость такого устройства будет значительно ниже таких зарубежных робототехнических систем, как LineScout и Expliner.

Таким образом, становится возможной установка по одному устройству на каждый провод в каждом пролете линии электропередач и отсутствует необходимость каждый раз устройство устанавливать и снимать с провода. Управляется устройство дистанционно с помощью устройства радиосвязи. В результате, эксплуатация устройства сводится к его установке на провод, дистанционном (или автоматическом) включении в случае необходимости и периодической профилактике. Отключения линии для проведения очистки не требуется, что также является одним из достоинств предлагаемого устройства.

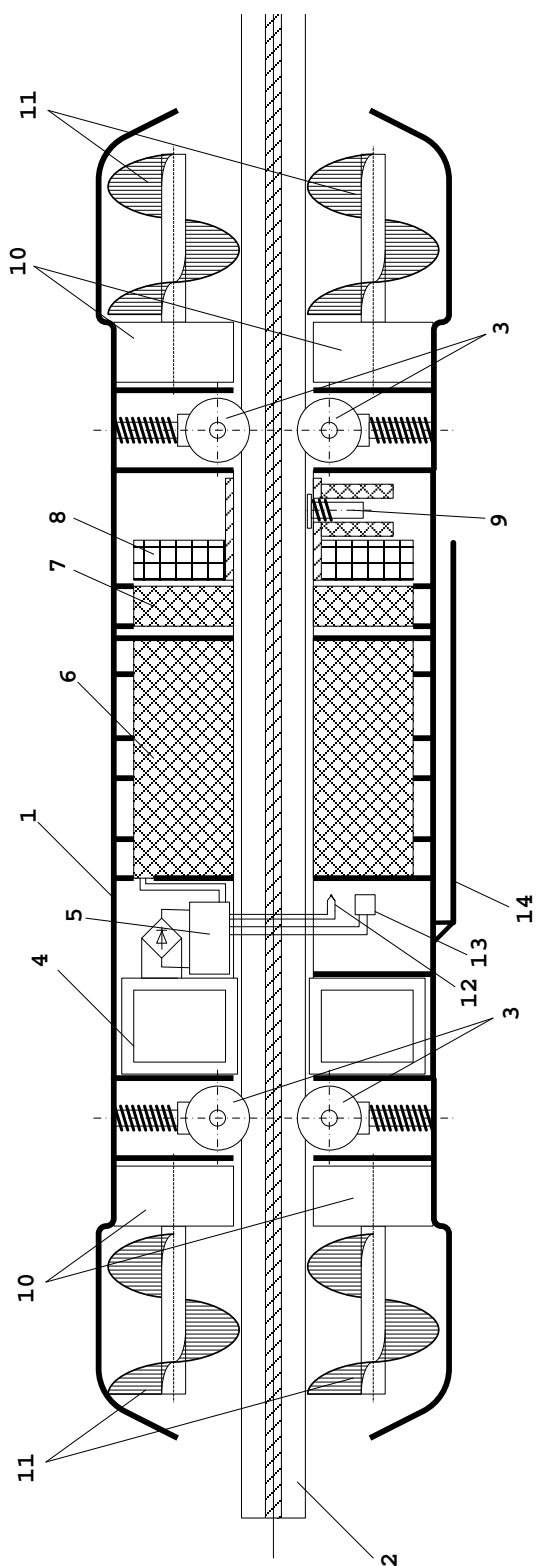
Рассмотрим подробнее основные элементы конструкции устройства.

*Корпус устройства* изготавливается из легкого, но достаточно прочного материала (на данном этапе планируется использование алюминия или его сплавов) для максимально возможного облегчения конструкции и снижения требуемой мощности двигателя и источника питания.

В корпусе необходимо наличие креплений под все конструктивные элементы, а также специальные отверстия (на рисунке 11 не показаны) для удаления изнутри корпуса счищенного с провода льда.

Корпус изготавливается разъемным, с возможностью установки на провод и последующего, возможного, снятия с провода. Обязательным требованием является наличие внутри корпуса специальных подпружиненных роликов, ограничивающих возможные смещения устройства поперек оси провода, чтобы предотвратить повреждение поверхности провода внутренними элементами конструкции (ребра жесткости, двигатель, источник питания и т.д.).





1 – корпус; 2 – провод; 3 – подпружиненные ролики; 4 – источник питания; 5 – система управления;

6 – линейный двигатель; 7 – неподвижная часть поворотного механизма;

8 – подвижная часть поворотного механизма; 9 – средство фиксации;

10 – приводные двигатели шнеков; 11 – шнеки; 12 – датчик температуры;

13 – датчик влажности; 14 – антенна

**Рис. 11 «Схема устройства для удаления льда с провода линии электропередач»**

На внешней стороне корпуса крепится антенна от устройства радиосвязи, для обеспечения дистанционного управления и мониторинга состояния устройства.

*Источник питания* устройства представляет собой тороидальный трансформатор тока, расположенный вокруг оси провода.

На выходе такого трансформатора получается переменное напряжение, используемое для питания линейного двигателя и приводных двигателей шнеков. Однако, для питания системы управления требуется постоянное напряжение, поэтому в источнике питания присутствует и выпрямитель.

Так как величина напряжения на выходе трансформатора зависит от тока, текущего в проводе, на котором установлено устройство, то в течение времени напряжение может значительно изменяться. Для компенсации этого недостатка предлагается обмотку трансформатора сделать многосекционной и, в зависимости от требуемой мощности подключать к работе то или иное количество секций. Определение порядка и количества секций осуществляется системой управления.

*Система управления* устройства строится на основе программируемого логического контроллера и осуществляет следующие функции:

- управление скоростью линейного двигателя в рабочем режиме;
- управление приводными двигателями шнеков;
- контроль параметров внешней среды (температура, влажность);
- формирование данных для отправки через средство радиосвязи, а также расшифровка и обработка информации, принятой средством радиосвязи;
- управление работой поворотного механизма и средством фиксации на проводе;
- автоматический запуск процесса очистки по результатам обработки информации о состоянии внешней среды;
- включение устройства в режиме прогрева (и управление линейным двигателем в режиме прогрева);
- расчет пройденного устройством расстояния по проводу и своевременная его остановка для предотвращения повреждения конструкций ЛЭП;
- контроль величины напряжения на выходе источника питания и управление подключением различных секций источника.

В состав системы управления обязательно входят датчики температуры и влажности для определения момента начала намерзания гололеда.

*Средство радиосвязи* обеспечивает возможность дистанционного управления устройством, а также мониторинга его состояния и диагностики. При этом, для связи на большие расстояния планируется использовать последовательную передачу информации от устройства к устройству. При таком способе отсутствует необходимость в большой мощности передатчика, так как расстояние между устройствами в соседних пролетах не может превышать двойной длины пролета, и, как правило, составляет не более 500-700 метров.

Подготовкой отправляемой и обработкой получаемой информации занимается система управления устройства.

Для передвижения устройства по проводу используется *цилиндрический линейный асинхронный двигатель* (ЦЛАД), в качестве вторичной части которого используется провод, по которому движется устройство.

Это позволяет получить более высокий КПД, чем в прототипе (расстояние между индуктором и вторичной частью составляет порядка миллиметра и оно постоянно), а также плавность хода устройства вдоль провода. Это, в свою очередь, существенно упрощает разработку системы управления таким устройством.

*Поворотный механизм со средством фиксации* предназначен для поворота устройства вокруг оси провода в случае застревания в связи с неравномерностью характеристик гололеда или иных факторов.

Поворотный механизм состоит из трех конструктивных элементов:

- неподвижная часть;
- подвижная часть;
- средство фиксации.

Неподвижная часть жестко закреплена в корпусе устройства и связана с подвижной частью либо силами электромагнитного взаимодействия (так

называемый, индукционный двигатель) или механически (например, шаговый двигатель связанный с подвижной частью зубчатым колесом).

Подвижная часть поворотного механизма может свободно вращаться вокруг оси провода, но при этом имеет специальное средство фиксации на проводе.

Средство фиксации представляет собой электромагнитный тормоз, состоящий из катушки, сердечника и тормозной колодки, подпружиненной к проводу. Для предотвращения повреждения провода колодкой, она обязана иметь мягкое основание.

Для удаления намерзшего на проводе слоя льда используются вращающиеся с помощью приводных двигателей *шнеки*. При этом шнеки расположены с обеих сторон устройства, что позволяет производить очистку при движении в любом направлении.

Для более эффективного удаления льда шнеки должны быть заточены с торца, но при этом не должны касаться провода, чтобы исключить вероятность его повреждения.

Предполагается работа устройства в четырех режимах.

Главным режимом является режим очистки.

В режиме очистки устройство перемещается по проводу и производит его очистку с помощью шнеков. При этом система управления автоматически вычисляет пройденное и оставшееся расстояние для предотвращения возможного удара о конструкции ЛЭП в районе опоры (изоляторы, различная арматура и т.д.).

Вторым режимом работы устройства является поворот вокруг оси провода.

Поворот осуществляется при необходимости и происходит следующим образом:

- устройство останавливается, либо, при необходимости, сдвигается на небольшое расстояние в обратную сторону;

- подвижная часть поворотного механизма фиксируется на проводе средством фиксации;

- подвижная и неподвижная части поворотного механизма поворачиваются относительно друг друга на требуемый угол. При этом, так как подвижная часть зафиксирована на проводе, а неподвижная – а корпусе, то все устройство поворачивается вокруг оси провода на тот же самый угол;

- отключается фиксация подвижной части поворотного механизма;

- устройство продолжает движение вдоль провода.

Третьим режимом работы является режим ожидания, в котором действуют только источник питания и система управления со средством радиосвязи.

При этом система управления принимает или отправляет информацию и команды через устройство радиосвязи и контролирует параметры внешней среды (температуру и влажность воздуха). При совпадении заранее заданных параметров внешней среды, при которых происходит образование гололеда, либо при получении соответствующей команды по радиоканалу, устройство переключается в соответствующий режим работы.

Четвертым режимом работы является частный случай режима ожидания, а именно – режим прогрева во время простоя. Этот режим предназначен для предотвращения намерзания льда внутри самого устройства, либо удаление уже намерзшего льда. При отрицательной температуре воздуха и достаточной влажности происходит включение режима прогрева.

Прогрев реализуется следующим образом. На ЦПАД на очень короткий период подается питание, обеспечивающее движение в одну сторону. Затем – на такой же малый период времени подается питание, обеспечивающее движение в обратную сторону. Далее цикл повторяется. В результате само устройство не перемещается вдоль провода на сколь-нибудь значительное расстояние, а вибрирует, стоя на одном месте. При этом, под действием протекающих внутри устройства токов, происходит его разогрев, а под действием вибрации – частичное разрушение льда как внутри, так снаружи рядом с устройством.

Режим работы системы управления в предлагаемом устройстве постоянный – система управления совместно со средством радиосвязи работает постоянно, вне зависимости от режима работы самого устройства.

### *Литература*

1. Борьба с гололедом - Эксплуатация воздушных линий электропередачи // Энергетика: оборудование, документация. URL: [http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatacii/vl/ekspluataciya-vozdushnyh-linii-elektroperedachi\\_4.html](http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatacii/vl/ekspluataciya-vozdushnyh-linii-elektroperedachi_4.html) (дата обращения 01.10.2011).

2. 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). – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 964с.

3. Управляемый выпрямитель для плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ВЛ // Информационная система iElectro: Все об электротехнике. URL: <http://www.ielectro.ru/news51718/index.html> (дата обращения 01.10.2011).

4. Пат. 2356148 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи / Каганов В.И.; заявитель и патентообладатель Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) (МИРЭА), Каганов Вильям Ильич – № 2008119101/09; заявл. 15.05.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14 ; 13 с. : 7 ил.

5. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Учебник. В 2т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 560 с.

6. Dartmouth engineers develop new power line de-icing system // Dartmouth News. URL: <http://www.dartmouth.edu/~news/releases/2009/01/07.html> (дата обращения 15.12.2012)

7. Высокотемпературные провода: повышение пропускной способности ВЛ // EnergyFuture.ru: Профессионально об энергетике будущего и настоящего. URL: <http://energyfuture.ru/vysokotemperaturnye-provoda-povyshenie-propusknoj-sposobnosti-vl> (дата обращения 10.10.2011).

8. Обзор новых технологий в энергетике – Выпуск 1– Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра», 2008. — 11с.

9. Робот LineScout на линиях электропередач // Мир роботов Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/1253-robot-linescout-na-liniyah-yelektroperedach.html> (дата обращения 12.10.2011).

10. Expliner – робот для обслуживания линий электропередач выходит на работу // Новости технологий. URL: <http://techvesti.ru/node/3807> (дата обращения 13.10.2011).

11. Робот Expliner инспектирует высоковольтные линии // Мир роботов Roboting.ru. URL: <http://roboting.ru/957-robot-expliner-inspektiruet.html> (дата обращения 13.10.2011).

12. Пат. 91230 U1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для перемещения по проводу линии электропередачи средства для удаления льда с провода (варианты) / Быстров И.В., Быстров Ю.В., Галеев Л.Р., Петаев В.В., Петаев В.В. ; заявитель и патентообладатель Быстров И.В., Быстров Ю.В., Галеев Л.Р., Петаев В.В., Петаев В.В. – № 2009126163/22; заявл. 07.07.2009; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3 (II ч.). 2 с. : ил.

13. Пат. 93184 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для очистки проводов линий электропередач / Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р., Алмаев М.А. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет". – № 2009142495/22; заявл. 17.11.09; опубл. 20.04.2010. Бюл. №11.

14. Алмаев, М.А. Электромеханическое вибрационное устройство очистки линий электропередачи от гололедных отложений / М.А. Алмаев, А.В.Трофимов // Сборник научно-исследовательских работ аспирантов

финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. г. Новочеркасск, октябрь 2010 г. / Мино образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.(НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2010. – С. 3-5.

15. Анизотропия // Википедия – свободная энциклопедия. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Анизотропность> (дата обращения 24.10.2011).

16. Тензометрический датчик тип ДГВН // Элна-Север плюс. URL: <http://elna-severplus.ru/produkcija/tenzometricheskie-datchiki/tip-dgvn-datchik-gololedno-vetrovyh/> (дата обращения 13.10.2011).

17. Опыт эксплуатации ЛЭП 330-500 кВ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий. Распределенная система автоматического наблюдения за гололедом. // Информационно-аналитический журнал ЭнергоINFO. URL: [www.energo-info.ru/images/pdf/mes4/15.pdf](http://www.energo-info.ru/images/pdf/mes4/15.pdf) (дата обращения 25.10.2011).

18. Аппаратура каналов связи и телемеханики по ЛЭП с цифровым уплотнением каналов АКСТ "ЛИНИЯ-Ц" со встроенным блоком РЗ и ПА. // ОАО «Шадринский телефонный завод» URL: [http://shtz.shadrinsk.net/pr\\_akst-s.htm](http://shtz.shadrinsk.net/pr_akst-s.htm) (дата обращения 15.12.2012).

19. Пат. 2442256 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Малых К.С. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет» – № 2010144485/07; заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4 ; 4 с. : ил.

20. Трофимова, Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.

21. Пат. 2449443 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Орлов Д.А., Сухоруков С.И. ; заявитель и патентообладатель Федеральное



государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет», Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» – № 2011106260/07; заявл. 17.02.2011 ; опубл. 27.24.2012, Бюл. № 12 ; 7 с. : 1 ил.

22. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

23. Абжанов Р.С. Исследование осаждения аэрозолей применительно к процессу гололедообразования на проводах ЛЭП / Дис. канд.техн.наук Алма-Ата,1973.

24. Андреев Ю. Н. К вопросу о физико-метеорологических условиях образования гололеда // Труды ГГО. 1947,2-вып.3.- с.23.

25. Банников Ю. И. Гололедно-изморозные образования на Южном Урале // Труды ЧИМЗСХ Челябинск,1978, N 143, с. 77-79.

26. Банников Ю.И. А.С. N 672897 С СССР). Противогололедная смазка ПГС-1. Зарегистрировано в государственном реестре СССР 15.03.79.

27. Банников Ю.И., Николаев Н.Я. К вопросу о борьбе с гололедным образованием на проводах линий электропередач // Научн. Тр. ЧИМЗСХ – Челябинск, 1973, вып.83, с.34-36.

28. Банников Ю. И., Николаев Н. Я. Влияние напряжения ВЛ электропередачи на процесс гололедообразования // Тр. ЧИМЭСХ – Челябинск, ВЫП. 123. 1977, с. 101-104.

29.Банников Ю. И., Николаев Н.Я. А.С. N 1275615 С СССР. Способ предупреждения образования гололеда на проводах воздушных линий электропередачи 35 кВ. Опубл. в Б.И. , 1986, N 45.

30. Банников Ю. И., Николаев Н.Я. Влияние электрического поля провода ВЛ электропередачи на процесс гололедообразования. Отчет ЧИМЭСХ – Челябинск, 1977. 157 с.

31. Банников Ю. И., Николаев Н.Я. Исследование процесса гололедно-изморозевого образования в электрическом поле с разработкой системы противогололедных мер. Отчет 78071239, инв. N Б 819048. ЧИМЭСХ – Челябинск, 1979. 230 с.

32. Банников Ю. И., Анеш И. П. Влияние напряжений линий электропередачи на процесс гололедообразования. // Тр. ЧИМЭСХ – Челябинск, выс. 106 - 1975. - с. 14-20.

33. Белоус И.М. Гололедно-изморозевые явления и обледенение проводов на территории Казахстана. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Алма-Ата, 1970.

34. Болога М. К. Процессы теплообмена и отрывные течения под воздействием электрических полей и токов. Дисс. док-т. техн. наук. М., 1972.

35. Будзко И.А. и др. Исследование нагрузок и стрел провеса при гололедообразовании в сельских электрических сетях // Докл. ВАСХНИЛ, 1974, N 2.

36. Бургсдорф В. В. О Физике гололедно-изморозевых явлений. // Труды ГГО / Вып. 3, 1947, М.: Гидрометиздат.

37. Бургсдорф В. С., Муретов Н.С. Расчетные климатические условия для высоковольтных линий электропередачи. М.: ВНИИЭ, 1960, ВЫП. 10, С. 39-43.

38. Бучинский В. Е. Гололед и борьба с ним. Л.: Гидрометиздат, 1960. 192 с.

39. Будзко И. А. , Пронникова М. И., Селивахин А. И. и др. Автоматизация контроля за гололедообразованием в сельских электрических сетях // Материалы II Всесоюзного совещания. Уфа, 1975.

40. Бургсдорф В. В. Плавка гололеда в электрических сетях как средство эффективного повышения надежности электрических сетей // Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи. Материалы II Всесоюзн. совещ. Уфа, 1975, с. 1-6.

41. Бургсдорф В. В. Плавка гололеда в энергетических системах как средство эффективного повышения надежности электрических сетей. М.: МИИСП, вып. 3, т. 1.

42. Базилевич В.В. Влияние микроструктуры тумана на обледенение проводов / Труды ГГО. 1947. - Вып. 3.

43. Бассапская Г. А., Руднева А. В. Гололедные нагрузки на провода. Л. : Гидрометеиздат, 1967.

44. Вексельман О.Г. О влиянии сечения провода на интенсивность гололедообразования // Электричество, 1954, N 2.

45. Воробьев А.А., Богданова Н.Б. Способ предохранения проводов линий электропередачи от обледенения. Класс 21 с.803 N 65618417/337527 ОТ 21 марта 1945.

46. Гапонов В.С. Температурные границы оседания гололеда и изморози из переохлажденных капель тумана // Изв. АН СССР. Серия географ, наук, 1939, N 2.

47. Глуков В.Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях // Труды ГГО Л. 1972, Вып. 311, 98 с.

48. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987.

49. Денисенко Г. И., Генрих Г. А., Никонец Л. А. Повышение надежности работы воздушных линий электропередачи за счет плавки гололеда на проводах и тросах. Львов: Львовский ПИ, 1969.

50. Долин П.В. Влияние высоты подвески проводов на величину гололедных отложений // Электрические станции, 1958, N 4.

51. Заварина М. В. Аэроклиматические факторы обледенения самолетов. Л.: Гидрометеиздат, 1960.

52. Заварина М. В., Ломилина Л.Е. Влияние холмистого рельефа на вес и толщину стенки гололеда // Труды ГГО 1976, вып.379, с.46-53.

53. Мазин И.П. Физические основы обледенения самолетов. М.: Гидрометеиздат, 1957.

54. Муретов Н.С. Гололедные образования на воздушных линиях связи и электропередачи. Л.: Гидрометеиздат, 1945.

55. Мейер Г. Авария и повреждение линий электропередачи из-за гололедной нагрузки. М.: Госэнергоиздат, 1956.

56. Море Г. Метод расчета гололедной нагрузки на провода. М.: Госэнергоиздат, 1956.

57. Никифоров Е.П. Влияние переменного электрического поля на вес отложения гололеда на проводе линий электропередачи // Электричество, 1962, N 6.

58. Никифоров Е.П. Влияние закручивания провода в процессе гололедообразования на вес отложения гололеда. М.: ВНИИЭ, 1963, вып.15.

59. Никифоров Е.П. Распределение веса гололедообразования на проводах различного диаметра. М.: ВНИИЭ, 1961, вып.11, с. 281-28.

60. Никифоров Е.П. Влияние высоты подвеса провода над поверхностью земли на вес отложения гололеда // Электрические станции, 1962.

61. Нейман А.А. Анализ эффективности внедрения плавки гололеда в воздушных линиях напряжением 35-500 кВ для повышения надежности их работы в гололедных условиях // Материалы 1 Всесоюзного совета по плавке гололеда. Львов, 1971.

62. Нейман А.А. и др. Оценка опыта эксплуатации и эффективности применения устройства плавки гололеда в энергосистемах // Материалы Всесоюзн. совещ. Уфа, 1975.

63. Николаев Н.Я. Снижение опасного гололедообразования на проводах ВЛ при эксплуатации сельских электрических сетей // Тр. ЧММЭСХ – Челябинск, 1989. с.

64. Панюшкин А.В., Швайштейн З.И., Сергачева Н.А. О некоторых термодинамических критериях при выборе материалов для построения покрытий, уменьшающих адгезию льда к конструкционным материалам //Тр. ААНИИ. 1979, с.51-58.

65. Рир В. Гололед и изморозь как дополнительная нагрузка на проводах линий электропередачи // Энергетика за рубежом, 1958.

66. Усманов Ф.Х. Борьба с гололедом в сельских сетях 6-10 кВ // Электрические станции, 1973, N 10.

67. Пат. 2080723 С1 Российская Федерация, МПК Н02G7/16 Сигнализатор начала обледенения /Рудакова Р.М.; Воронов Ю.А.; Фарвазов А.М.; заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет.- 95107566/07, 11.05.1995, опублик. 27.05.1997.

68. Пат. 2079944 (13) С1 С1 Российская Федерация, МПК Н02G7/16 Сигнализатор начала обледенения / Рудакова Р.М.; Гузаиров М.Б.; Асмандияров И.Г. ; заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет.- 95107564/07 , 1995.05.11, опублик. 1997.05.20.