

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль) / специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Методы предотвращения гололедных аварий на воздушных линиях 110 кВ  
Жигулевского ПО

Обучающийся

П.А. Шевченко

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Ю.В. Черненко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Анализ особенностей возникновения гололедных образований на проводах воздушных линий. ....	6
1.1 Причины возникновения гололеда на воздушных линиях.....	6
1.2 Методы мониторинга образования гололеда на воздушных линиях .....	10
1.3 Последствия образования гололеда на ВЛ.....	17
Глава 2 Методы удаления и плавки гололеда на воздушных линиях .....	20
2.1 Классификация способов плавки и удаления гололеда на проводах ВЛ .....	20
2.2 Плавка гололеда, основанная на термическом воздействии.....	21
2.3 Плавка гололеда, основанная на термодинамическом воздействии .....	33
2.4 Удаление гололеда электромеханическим воздействием.....	34
2.5 Удаление гололеда механическим воздействием.....	35
Глава 3. Разработка решений по предотвращению гололедных аварий на ВЛ 110 кВ Жигулевского ПО. ....	39
3.1 Выбор установки плавки гололеда.....	39
3.2 Техническое обеспечение плавки гололеда на ПС Жигулевская. .	41
3.3 Общие положения. ....	49
3.4 Организация взаимодействия по согласованию и утверждению программ плавки гололеда. ....	50
3.5 Мероприятия, выполняемые перед началом гололедного сезона. .	52
3.6 Порядок проведения пробных плавков гололеда. ....	53
3.7 Порядок организации контроля за гололедообразованием на участках ЛЭП, подверженных частому обледенению. ....	55
3.8 Порядок проведения плавки гололеда. ....	56

3.9 Требования к расчетным параметрам режима плавки гололеда, приведенным в ППГ. ....	61
3.10 Описание схем плавки гололеда и методов плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП.....	62
Заключение .....	66
Список используемой литературы .....	67

## Введение

Одним из основных требований к электроснабжению потребителей электрической энергии является надежность. Для ее обеспечения необходимо проводить множество мероприятий, в том числе предупреждение и устранение аварийных ситуаций.

В теплое время года к аварийным ситуациям относятся в основном грозы, сильные порывы ветра, обрыв проводов питающей сети или возникновения искрения, а как следствие, и возникновения пожара из-за соприкосновения деревьев с незаизолированными проводами. Способы борьбы с данными видами аварийных ситуаций уже известны, хорошо изучены и успешно применяются повсеместно.

В холодное же время года к аварийным ситуациям относят те же порывы ветра, а также снегопады, которые могут приводить к налипанию мокрого снега на провода воздушных линий, образуя гололед. Это может приводить к катастрофическим последствиям, большим убыткам для энергоснабжающих компаний, и даже к угрозе жизни людей. Исходя из этого, выявляется необходимость эффективной борьбы с гололедообразованием на проводах ВЛ.

Опасность образования гололеда на токоведущих частях воздушных линий электропередач и грозозащитных тросов обуславливается обрывом проводов, их схлестом вследствие пляски, разрушением гирлянд изоляторов и самих опор. Обрыв питающих проводов ВЛ 110 кВ может приводить к обесточиванию большого числа потребителей, что не допустимо особенно в зимнее время года.

Однако, практика показывает, что методов борьбы с обледенением проводов не много и не все из них достаточно эффективны. Данный вид аварий является самым распространенным в зимнее время года, и эта проблема остается актуальной и по сей день.

«В качестве пассивной меры борьбы с гололёдом могут использоваться различные провода повышенной прочности. Следует также отметить провод с Z-образным сечением проволок верхних повивов, который состоит из одного или нескольких концентрических слоев круглых проволок (внутренние слои) и проволок сечением в виде «Z» (внешние слои). Каждый слой провода имеет скрутку по длине, выполненную с определенным шагом. Гладкая поверхность снижает ветровые нагрузки на 30-35 % и препятствует налипанию снега и льда. Однако провод с Z-образным сечением проволок верхних повивов имеет ограничение на плавку гололёда, поскольку не допускает длительного повышения температуры свыше 80 °С» [1].

В целом же практическая реализация пассивных методов борьбы с гололёдом возможна только при проектировании и введении в строй новых линий электропередач. Реконструкция «старых» ВЛ связана со значительными затратами.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является снижение аварийности ВЛ 110 кВ.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

- Анализ особенностей возникновения гололедных образований на проводах воздушных линий.
- Рассмотрение методов удаления и плавки гололеда на воздушных линиях.
- Разработка решений по предотвращению гололедных аварий на ВЛ 110 кВ Жигулевского ПО.

Решение поставленных задач позволит определить наиболее эффективный метод борьбы с авариями, связанными с образованием гололеда на ВЛ 110 кВ на примере Жигулевского ПО, а также эти методы могут быть использованы в других регионах, где существует данная проблема.

# **Глава 1 Анализ особенностей возникновения гололедных образований на проводах воздушных линий**

## **1.1 Причины возникновения гололеда на воздушных линиях**

«Гололёд, то есть плотная ледяная корка, образуется при намерзании переохлаждённых капель дождя, мороси или тумана при температуре от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$  на поверхности земли и различных предметов, в том числе проводах высоковольтных линий электропередач. Толщина гололёда на них может достигать 60–70 мм, существенно утяжеляя провода. Простые расчеты показывают, что, например, провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм километровой длины имеет массу 846 кг; при толщине гололёда 20 мм она увеличивается в 3,7 раза, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз [1]. При этом общая масса линии электропередачи из восьми проводов километровой длины возрастает соответственно до 25, 60 и 115 тонн, что приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор» [7].

«Выявлено, что в случаях, когда в околосземном слое температура воздуха близка к нулю, а на высоте до 1,5 км выше нуля, то осадки выпадают в виде дождя, а не снега. Капли дождя на поверхности земли соприкасаются с переохлаждёнными предметами и замерзают (в том числе и на проводах ВЛ). В результате образуется ледяная корка, именуемая гололёдом. Синоптиками доказано, что такое явление наблюдается при температуре воздуха вблизи поверхности земли от  $+3$  до  $-4^{\circ}\text{C}$ . Обычно при гололёде в воздушном слое высотой около 1,5 км наблюдается почти стопроцентная относительная влажность воздуха [4]. В этом случае начинается процесс лавинообразного роста наледи, который продолжается в течение всего времени выпадения переохлаждённых осадков. Отложившийся гололёд значительно увеличивает массу проводов и может сохраняться на них много суток, что является потенциальной опасностью для возникновения аварий. Кроме гололёда, на воздушный ЛЭП может возникать зернистая изморозь в виде снеговидного и

рыхлого льда, которая также образуется в туманную и ветреную погоду. Изморозь налипает на провода и может нарастать довольно долго, причём толщина слоя также может достигать десятков сантиметров» [22].

На рисунке 1 отчетливо видно различие диаметра провода и корки льда на нем.



Рисунок 1 – Образование гололеда на ВЛ

После образования гололёда и изморози на проводах ВЛ холодный атмосферный фронт зачастую меняется на более тёплый, что сопровождается порывистыми движениями воздушных масс, аэродинамическое воздействие которых на провода приводит их в состояние «резонансной пляски». Данные природные явления в совокупности и вызывают гололёдные аварии в электрических системах» [22, 19]. Согласно ПУЭ «При расчете ВЛ и их элементов должны учитываться климатические условия ветровое давление, толщина стенки гололеда, температура воздуха, степень агрессивного воздействия окружающей среды, интенсивность грозовой деятельности, пляска проводов и тросов, вибрация.

Определение расчетных условий по ветру и гололеду должно производиться на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ с уточнением при необходимости их параметров в сторону увеличения или уменьшения по региональным картам и материалам многолетних наблюдений гидрометеорологических станций и

метеопостов за скоростью ветра, массой, размерами и видом гололедно-изморозевых отложений. В малоизученных районах для этой цели могут организовываться специальные обследования и наблюдения» [15].

«Районирование по гололеду производится по максимальной толщине стенки отложения гололеда цилиндрической формы при плотности  $0,9 \text{ г/см}^3$  на проводе диаметром 10 мм, расположенном на высоте 10 м над поверхностью земли, повторяемостью 1 раз в 25 лет» [15, 27].

В идеализированном представлении гололед на проводах, образуя цилиндрическую форму с толщиной стенки  $b$  (рисунок 2).

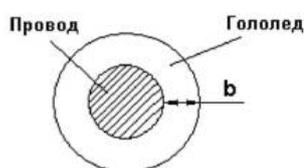


Рисунок 2 – Идеализированное представление гололеда на проводах

Существует разделение по толщине стенки гололеда на 8 районов (таблица 1).

Таблица 1 – Районирование по гололеду

Район	Толщина стенки $b$ , мм
I	15
II	20
III	25
IV	30
VI	35
VII	40
Особый	>45

На рисунке 3 изображена карта России с районированием по гололеду.

Самарская область относится к IV району по гололеду. Соответственно, образование гололеда на проводах ВЛ в нашем регионе явление частое.

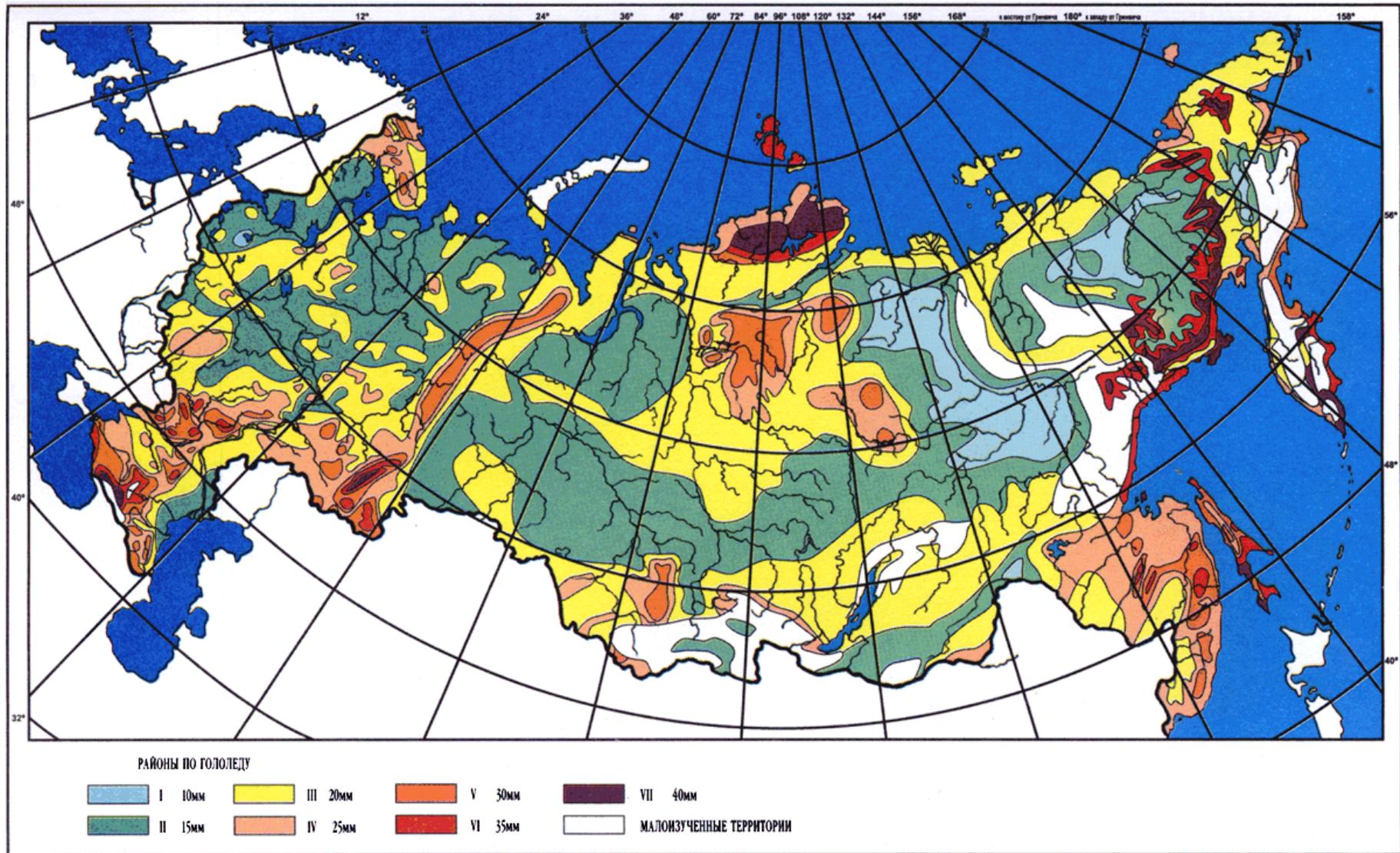


Рисунок 3 – Районы по гололеду

## **1.2 Методы мониторинга образования гололеда на воздушных линиях**

В настоящее время применяются следующие методы мониторинга образования гололеда на проводах ВЛ:

- органолептический (визуальный осмотр ВЛ);
- инструментальный;
- аналитический.

Самым распространенным способом является визуальный осмотр линий. С наступлением холодного времени года оперативно-выездные бригады периодически выезжают на осмотр ВЛ на предмет образования на них гололеда (рисунок 4). В те моменты, когда погодные условия ухудшаются, при метели, температуре воздуха в пределах от 0 до -10 градусов или при мокром снеге и резкой смене температуры, количество бригад и временной промежуток мониторинга может увеличиваться.

Такой способ применяется повсеместно, даже если на ВЛ применяются специализированные датчики гололедообразования, однако, при таком способе невозможно своевременно получать информацию обо всех участках ВЛ, особенно, если линии электросети имеют большую протяженность, так как скорость передвижения бригад ограничена.

Так же при таком методе информация о гололеде является недостаточно достоверной, так как точность определения толщины и структуры льда достаточно мала.



Рисунок 4 – Визуальный осмотр ВЛ

Вторым распространенным способом является инструментальный мониторинг гололедообразования на ВЛ.

Для данного способа применяются различные инструменты и датчики образования гололеда. К таким инструментам относят: датчики гололедной нагрузки на проводах и грозозащитных тросах, тяжения провода, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, температуры провода. Также применяется специальное программное обеспечение для визуализации всех этих параметров [23].

«Все механические устройства содержат датчик гололедной нагрузки, реагирующий на механическую нагрузку от образовавшегося гололеда, силы тяжести провода, а также ветровую нагрузку. Датчик подвешивается между траверсой и гирляндой изоляторов и может быть выполнен, как правило, в виде динамометра (обычно пружинного типа) или же с использованием упругого чувствительного элемента, преобразующего нагрузку от гололедных отложений в выходной сигнал» [26].

С развитием технологий появляются новые возможности и в сфере электроэнергетики. Одной из таких новых технологий является применение беспилотных летающих аппаратов для выявления дефектов в электрооборудовании. БПЛА представляют собой летательный аппарат с прикрепленной к его основанию камерой, который управляется и передает

информацию об объекте с помощью глобальных навигационных систем, таких как ГЛОНАСС и GPS. На рисунке 5 представлен один из вариантов исполнения БПЛА.



Рисунок 5 – Беспилотный летающий аппарат

В России для мониторинга ЛЭП используются БПЛА самолетного и мультироторного типов [17]. Среди беспилотников самолетного типа (рисунок 6) следует отметить следующие: Геоскан 101 и Геоскан 201 (ГК «Геоскан», Санкт-Петербург), Суперкам 100F, Суперкам 250F и Суперкам 350F («Финко», Ижевск) и Птеро\_G0 («АФМ-Серверс»), а среди БПЛА мультироторного типа (рисунок 7) — Геоскан 401 (ГК «Геоскан»), Суперкам X8 («Финко») и Форпост X6.



Рисунок 6 – БПЛА самолетного типа, используемые в России для диагностики ЛЭП: а) Птеро G0; б) Суперкам 350F; в) Геоскан 201



Рисунок 7 – БПЛА мультироторного типа, используемые в России для диагностики ЛЭП: а) Геоскан 401; б) Суперкам X8; в) Форпост X6.

В таблице 2 приведены основные технические характеристики БПЛА самолетного и мультироторного типов и стоимость беспилотных авиационных систем на их основе, включая программное обеспечение (ПО) для обработки материалов аэрофотосъемки [21, 25].

Таблица 2 – Основные характеристики БПЛА

Класс	Название	Макс. скорость полета, км/ч	Тип авиадвигателя	Дальность действия, км	Диапазон цен за комплекс с ПО для обработки и фотокамерой 24 Мп, тыс. руб.
мультироторные	Геоскан 401	50	электрический	10	1500–2000
	Суперкам X8M	60			
	Форпост X6	200	поршневой		
самолетные малого радиуса действия	Геоскан 101	130	электрический	35	1000–1400
	Суперкам 100F	125			
самолетные среднего радиуса действия	Геоскан 201	130	электрический	100	1400–2000
	Суперкам 250F	120			
самолетные большого радиуса действия	Суперкам 350F	120	электрический	135	От 2000
	Птеро G0	125	поршневой	300	От 4000

В таблице 3 приведены сравнительные эксплуатационные и тактико-технические характеристики БПЛА самолетного и мультироторного типа.

Таблица 3 - Эксплуатационные и тактико-технические характеристики БПЛА самолетного и мультироторного типа

Эксплуатационные характеристики	БПЛА мультироторного типа	БПЛА самолетного типа
Количество применений, раз	-	100
Количество операторов, чел	1	2
Время разворачивания, мин	5	30
Время подготовки к повторному пуску, мин	5	30
Метод запуска	Вертикальный	С катапульты
Метод посадки	Вертикальный	Автоматический с парашютом, автоматический на шасси
Площадь площадки запуска/посадки, м <sup>2</sup>	5x5	70x70
Тактико-технические характеристики		
Максимальная масса полезной нагрузки, кг	3	4
Диапазон скоростей полета, км/ч	0-54	65-120
Максимальная продолжительность полета, мин	90	480
Тип двигателя	Электрический	Электрический, ДВС
Навигационная система	ГЛОНАСС/ GPS	ГЛОНАСС/ GPS

Беспилотный летающий аппарат может быть оснащен фотокамерой, а также тепловизионной и ультрафиолетовой камерами для определения дефектов изоляции. Также это позволяет производить тепловизионную съемку теплотрасс на обнаружение дефектов теплосетей, таких как нарушение теплоизоляционного слоя и появления коррозии еще на начальной стадии.

Способ мониторинга линий электропередачи при помощи БПЛА заключается в следующем: съемку аппарат может производить как в автоматическом, так и в ручном режиме, при этом данные и изображения с камер либо загружаются на программное обеспечение, либо транслируются на пульт управления оператору в режиме реального времени (рисунок 8).

БПЛА может передавать изображение на расстоянии не более 30 км. Съемку аппарат совершает с безопасного расстояния от опоры примерно 3-5 м, из-за чего не требуется отключать обследуемое оборудование. С помощью одного БПЛА можно обследовать до 200 км ЛЭП в день, что значительно превышает возможности человека.



Рисунок 8 – Управление БПЛА оператором

С помощью БПЛА возможно получить следующую информацию: метрические данные воздушных линий, включая габариты и высоту подвеса проводов, фотографии опор, проводов и изоляторов ЛЭП, а также прилегающих охранных зон, тепловизионные снимки с возможностью точного определения температуры элемента.

Также наличие инфракрасной камеры у БПЛА позволяет проводить тепловизионную диагностику элементов ЛЭП [25, 1]. Данный вид диагностики позволяет в любое время и без отключения оборудования выявить повреждения на начальном этапе, когда они не нанесли значительный ущерб оборудованию. В таком случае тепловизор делает снимки теплового инфракрасного излучения, улавливая даже самые

минимальные различия в температуре. Оператор получает снимки элемента ЛЭП в приложении или на дисплее (рисунок 9).



Рисунок 9 – Снимок с тепловизора БПЛА

Тепловизионная съемка также позволяет в холодное время года своевременно предотвращать гололедные аварии на линиях электропередачи. Диагностику данным способом можно проводить на наиболее подверженных отложению гололеда участках линии и, при необходимости предупреждать образование слишком толстого слоя льда, включением устройств плавки гололеда.

Такой способ является наиболее современным и достоверным, однако, как и у любого технического способа, присутствует риск выхода из строя какого-либо датчика, либо потери связи с данными устройствами, вследствие различных аварийных ситуаций.

Третий способ основан на сборе и анализе информации о наиболее подверженных образованию льда участках ВЛ. Гололед образовывается не равномерно, например, в местностях с повышенной влажностью воздуха гололед образовывается с большей вероятностью. Поэтому, можно заранее спрогнозировать, в какой местности вероятнее всего образуется гололед, и

направить туда бригаду для визуального осмотра, чтобы своевременно устранить наледь и исключить возможность аварийной ситуации.

Однако, недостатками такого способа является возможная несвоевременность обнаружения гололедных отложений в случае, если погодные условия резко изменятся, а также условия могут измениться, пока оперативно-выездная бригада добирается до места, следовательно, имеют место значительные временные затраты на обнаружение и устранение гололеда на ВЛ.

### **1.3 Последствия образования гололеда на ВЛ**

Образование гололеда на токоведущих частях ВЛ и грозозащитных тросах может привести к таким нежелательным последствиям как: обрыв проводов, разрушение гирлянд изоляторов, обрыв грозозащитного троса, пляска проводов, повреждение опоры, схлест проводов из-за резкого сброса льда, приводящий к междуфазному замыканию в сети.

«По статистике в энергосистемах по причине гололеда происходит от 6 до 8 крупных аварий в год. Так, по материалам фирмы «ОГРЭС», крупные аварии по причине гололёда за период с 1971 по 2001 год многократно происходили в 44 энергосистемах России. Только одна авария из-за гололедно-ветровых воздействий в Сочинских электрических сетях ОАО «Кубаньэнерго» в декабре 2001 года привела к повреждению 2,5 тыс. км воздушных линий напряжением 0,4...220 кВ, прекращению подачи электроэнергии в коммунально-бытовой сектор с населением 320 тыс. человек, длительному ограничению электроснабжения огромного района.

В 2008 году убытки от разрушения десяти километров ЛЭП на о. Сахалин составили свыше 200 млн руб. В декабре 2010 года большой ущерб от «ледяного дождя» был причинен энергосистемам Центральной России и Поволжья. Только в Московской области без электроснабжения в 24 районах осталось 455 населенных пунктов с населением до 200 тыс. человек. Под

отключение попали до 150 социально значимых объектов, 14 больниц. В Московской области обесточены 86 линий электропередач и 27 электроподстанций. Часть населенных пунктов оставалась без электроэнергии больше недели.

В декабре 2014 года по Татарстану, как и по некоторым другим регионам России, прошли ледяные дожди. В результате обледенения и обрывов проводов электропередачи были обесточены 72 населенных пункта республики. В соответствии с информацией ОАО «Сетевая компания» г. Казани по гололёдообразованию осенне-зимний период 2010-2011 годов на территории Республики Татарстан проходил в сложных погодных условиях.» [18].

На рисунке 10 видно, насколько может гололед на проводах утяжелять провод и приводить к сильному провису. Так как лед на фазных проводах может образовываться неравномерно, стрелы провиса проводов могут отличаться на несколько метров.



Рисунок 10 – Провис провода из-за льда

На рисунке 11 изображено повреждение опоры вследствие образования гололеда на проводах. Гололедные массы могут значительно утяжелять конструкцию, из-за чего даже железные опоры могут не выдержать такой нагрузки.



Рисунок 11 – Повреждение опоры вследствие образования наледи

Аварии, связанные с обледенением проводов, могут повлечь за собой огромные экономические убытки. Связанно это как с недоотпуском электроэнергии, так и со значительными затратами на устранение последствий этих аварий, а именно: замена опор, замена оборванных проводов, изоляторов, а также того оборудования, которое повредилось из-за данной аварии.

Выводы по главе 1.

Наледь на проводах ЛЭП образуется в результате оседания влаги на поверхности проводов при окружающей температуре воздуха от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Корка льда при этом может достигать существенной величины, что значительно утяжеляет провод, а также усиливающийся ветер может раскачивать провода, что в свою очередь может привести к аварийной ситуации.

Чтобы своевременно выявить и устранить намерзание льда на проводах ЛЭП существуют такие методы мониторинга как: визуальный осмотр ВЛ, инструментальный способ и аналитический.

Обледенение ЛЭП может приводить к следующим последствиям: обрыв проводов, разрушение изоляторов, обрыв грозозащитного троса, повреждение опоры, схлест проводов, приводящий к короткому замыканию.

## **Глава 2 Методы удаления и плавки гололеда на воздушных линиях**

### **2.1 Классификация способов плавки и удаления гололеда на проводах ВЛ**

На сегодняшний день существует несколько способов борьбы с образованием гололеда на проводах ВЛ.

Однако, каждый из этих способов имеет ряд преимуществ и недостатков, которые необходимо учитывать при выборе необходимого способа для конкретного предприятия.

К числу традиционных активных методов можно отнести плавку гололёда на проводах ВЛ переменным током путём искусственного создания коротких замыканий или постоянным током с использованием неуправляемых или управляемых выпрямительных блоков.

Новые средства борьбы с гололёдными отложениями на проводах ВЛ предусматривают использование комбинированных преобразовательных установок, способных при необходимости осуществлять плавку гололёда, а всё остальное время – компенсацию реактивной мощности.

Также на небольших участках ВЛ возможно удаление гололедных отложений механическим способом.

Ниже приведена общая классификация способов борьбы с гололедом, в зависимости от вида воздействия:

- термическое воздействие;
- термодинамическое воздействие;
- электромеханическое воздействие;
- механическое воздействие.

Далее рассмотрим каждый из методов и их достоинства и недостатки.

## 2.2 Плавка гололеда, основанная на термическом воздействии

«Плавка гололёда переменным током применяется на ВЛ напряжением ниже 220 кВ с проводами сечением менее 240 мм<sup>2</sup>. Источником питания служат, как правило, шины 6 – 10 кВ подстанций или отдельный трансформатор. Схема плавки гололёда должна выбираться таким образом, чтобы обеспечить протекание по проводам ВЛ тока в 1,5 – 2 раза превышающего длительно допустимый ток. Такое превышение оправдано кратковременностью процесса плавки (примерно 1 ч), а также более интенсивным охлаждением провода в зимний период. Для сталеалюминиевых проводов типа АС сечением 50 – 185 мм<sup>2</sup> ориентировочный уровень одночасового тока плавки гололёда лежит в пределах 270 – 600 А, а тока, предупреждающего образование гололёда на проводах, – в пределах 160 – 375 А» [16].

Необходимый уровень тока короткого замыкания зачастую невозможно подобрать только за счёт выбора схемы плавки гололёда. Повышение тока плавки сверх указанных значений может привести к прожиганию проводов, что в свою очередь послужит причиной необратимой потери их прочности. Однако меньшей величины тока короткого замыкания однократного пропускания для полного удаления гололёда может оказаться недостаточно. Это в свою очередь повлечет за собой многократное пропускание токов короткого замыкания, что может привести к худшим последствиям.

Чтобы избежать негативных последствий для ВЛ, можно использовать тиристорный регулятор переменного напряжения, схема которого представлена на рисунке 12 [25, 29].

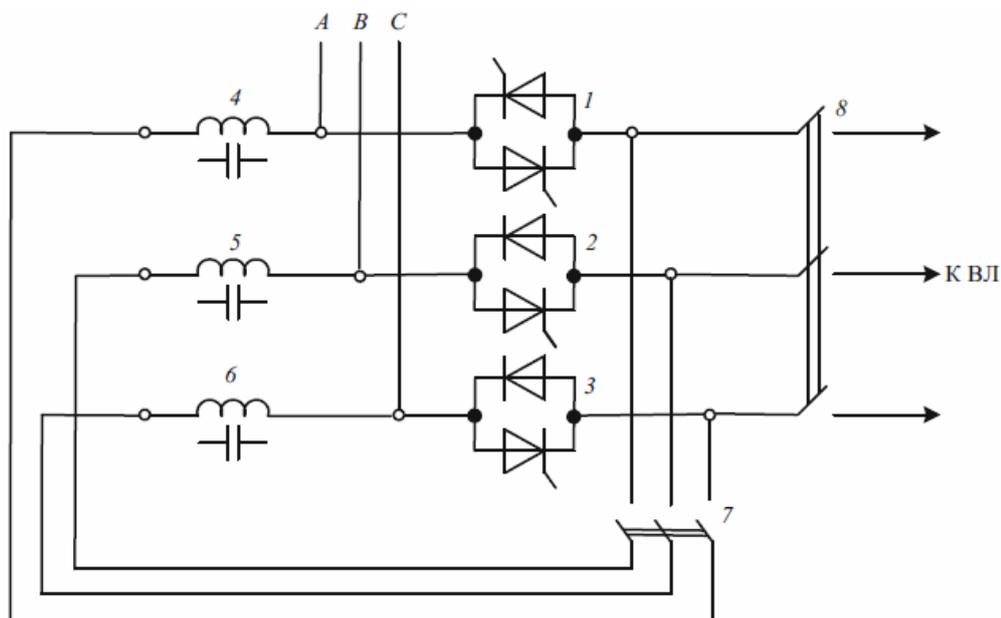


Рисунок 12 - Установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда

«В режиме плавки гололёда выключатель 7 выключен, выключатель 8 включен. Возможные способы регулирования тока плавки — импульсно-фазовый посредством изменения углов включения силовых тиристоров 1 – 3 или широтно-импульсный — посредством изменения числа периодов подачи напряжения» [9].

«В режиме компенсации реактивной мощности выключатель 7 включен, а выключатель 8 выключен.

В этом случае силовые тиристоры 1 – 3 и реакторы 4 – 6 образуют тиристорно-реакторную группу, соединённую в треугольник, которая представляет собой элемент статического тиристорного компенсатора.

Допускается также возможность использования конденсаторов вместо реакторов. В этом случае компенсация реактивной мощности будет осуществляться с помощью регулируемой конденсаторной батареи» [10].

Однако стоит отметить, что независимо от способа регулирования, процесс плавки гололёда осуществляется переменным током промышленной частоты, что требует больших значений мощностей источника питания

(десятки МВА), так как индуктивное сопротивление проводов воздушной линии значительно больше активного сопротивления.

Большая реактивная нагрузка обуславливает увеличение полной мощности источника.

Чтобы повысить эффективность плавки, необходимо использовать продольную ёмкостную компенсацию индуктивного сопротивления в случае использования конденсаторов в составе установки.

Заслуживает внимания комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололёда, схема которой представлена на рисунке 13.

«В режиме плавки гололёда выключатель 7, шунтирующий реактор 6, включён, выключатель 9 отключает конденсаторную батарею 8, выключатель 10 включён.

При этом возможна плавка на всех проводах воздушной линии одновременно» [20, 28].

«В режиме компенсации реактивной мощности выключатели 7 и 10 отключены, а выключатель 9 включён.

В результате образуется типовая схема статического компенсатора на базе транзисторных модулей 1 – 3, реакторов 5, 6 на стороне переменного тока и конденсаторной батареи 8 на стороне постоянного тока.

Такая структура может работать как в режиме генерации, так и в режиме потребления реактивной мощности» [20].

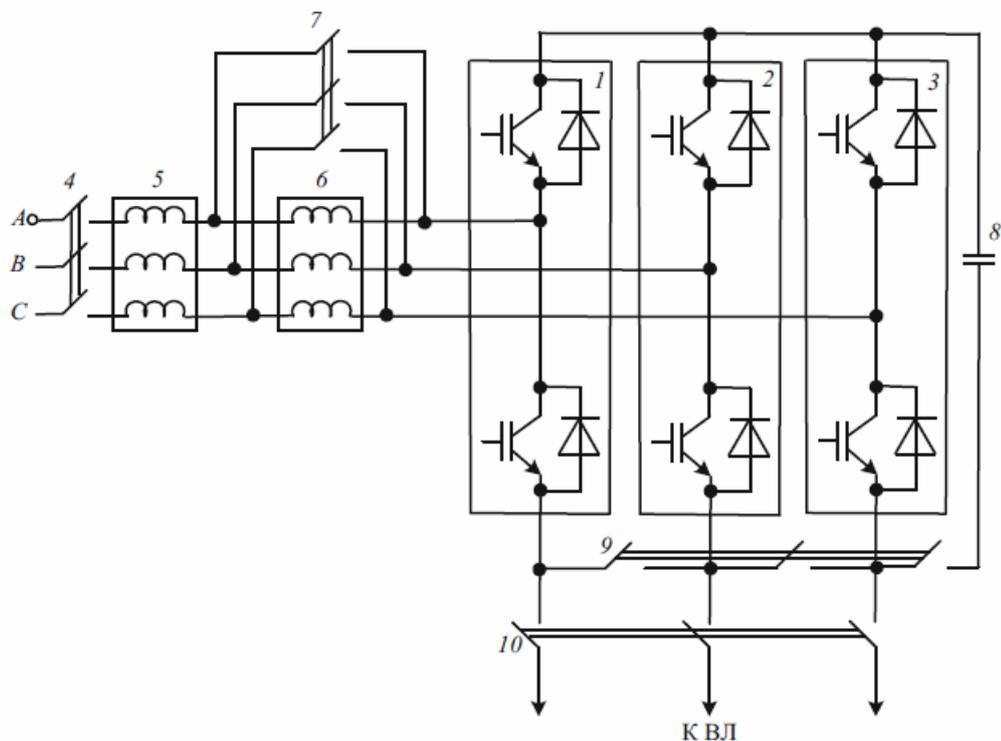


Рисунок 13 - Комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда

«Существенный недостаток такой установки – неполное использование вентильной части в режиме плавки. Это объясняется тем, что ток плавки протекает только через «нижние» ключи фаз 1 – 3 преобразовательного моста. Для преобразования мостовой схемы в три ключа переменного тока потребуется дополнительное коммутационное оборудование и существенное усложнение силовой схемы» [9].

Рассмотрим термическое воздействие постоянным током. «К числу первых серийных установок плавки гололёда постоянным током можно отнести преобразователи ВУКН-16800-14000, выполненные по схеме Ларионова на базе кремниевых неуправляемых вентилях ВК-200 с выпрямленным напряжением 14 кВ, выпрямленным током 1200 А и выходной мощностью 16 800 кВт» [9]. Схемы плавки гололёда выпрямленным током детально рассмотрены в [17].

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. Плавка гололеда осуществляется от стационарной системы плавки гололеда или от передвижной мобильной системы плавки гололеда [12].

В 2009 году ОАО «НИИПТ» был разработан управляемый выпрямитель для плавки гололеда (ВУПГ) на проводах и грозозащитных тросах ВЛ [11]. Как наиболее эффективное средство предупреждения гололедных аварий ОАО «НИИПТ» предлагает ряд управляемых выпрямителей, перечень которых приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Основные параметры управляемых выпрямителей для плавки гололеда постоянным током

Обозначение	Номинальная мощность выпрямителя, МВт	Номинальное выпрямленное напряжение, кВ	Диапазон изменения выпрямленного тока, А	Конструктивное исполнение
ВУПГ-10/1000	10	10	100-1000	Контейнерное
ВУПГ-14/1200	16,8	14	100-1200	Контейнерное
ВУПГ-14/1400	19,6	14	200-1400	Контейнерное
ВУПГ-50/1200	60	50	100-1200	В специальном помещении площадью примерно 50 м <sup>2</sup>

«Наиболее универсальным вариантом установки является ВУПГ-14/1200, которая обеспечивает необходимый ток плавки для проводов ВЛ классов 110, 220 кВ в районах с умеренным гололедообразованием. ВУПГ-14/1200 получил аттестацию ОАО «ФСКЕЭС» и ОАО «Холдинг МРСК», соответствует всем требованиям и рекомендован на объектах ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Холдинг МРСК»» [11].

Исходя из вышесказанного, можно определить следующие недостатки электротермического способа:

- большие энергозатраты (на плавление льда на проводах тратится много времени (может достигать полутора часов), и энергии сети (ток плавки льда в 1,5 раз больше максимально допустимого для линии электропередачи));
- необходимость отключать ВЛ;
- выпрямительный блок большую часть календарного года не используется (поскольку необходимость плавки гололёда возникает только в зимний период).

«Можно отметить предложение плавки гололёда пульсирующим током без отключения ВЛ. Выпрямительный блок включается в рассечку обогреваемого провода таким образом, чтобы постоянный ток не протекал по обмоткам силовых трансформаторов и трансформаторов тока. Обогрев проводов осуществляется пульсирующим током, содержащим переменную составляющую, определяемую нагрузкой ВЛ, и постоянную составляющую, определяемую выпрямленным напряжением и активным сопротивлением контура плавки [13]. Однако такое предложение не увеличивает степень использования выпрямительных блоков, а для практической реализации требует дополнительного коммутационного оборудования» [4, 9, 30].

В связи с вышесказанным, определяется необходимость расширения функциональных возможностей используемого оборудования за счет совмещения в одной установке выпрямительного блока для плавки гололёда и устройства для компенсации реактивной мощности. Это позволит

круглогодично эксплуатировать оборудование, что положительно сказывается на его экономической эффективности.

В ОАО «НИИПТ» разработано преобразовательное устройство контейнерного типа для комбинированной установки плавки гололеда и компенсации реактивной мощности (рисунок 14) [3].

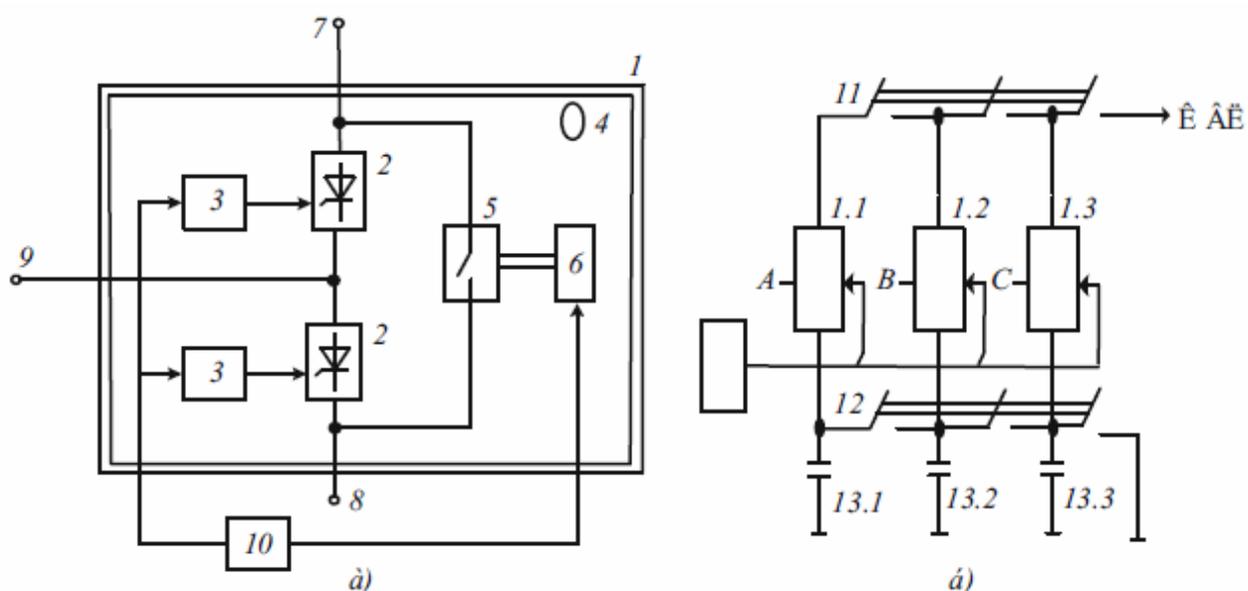


Рисунок 14 - Схема преобразовательного устройства контейнерного типа (а) и комбинированной установки (б) плавки гололеда и компенсации реактивной мощности

«В состав преобразовательного устройства входят: транспортный контейнер 1; тиристорные модули 2 с блоками управления 3; система принудительного воздушного охлаждения 4; разьединитель 5 с электромеханическим приводом 6; анодный 7, катодный 8 и фазный 9 выводы преобразовательного моста; система управления, регулирования, защиты и автоматики 10; разьединители 11, 12 и конденсаторные батареи 13.1, 13.2 и 13.3» [3].

Силовое оборудование имеет исполнение УХЛ 1 и, оно размещается на открытой части подстанции в закрытом стальном контейнере, Питание оборудования осуществляется от обмотки 10 кВ выделенного



«В состав комбинированной установки входят питающий трансформатор 1, трёхфазные разъединители 2 и 16, трёхфазные реакторы 3 и 15, высоковольтный мостовой преобразователь 4, конденсаторная батарея постоянного тока 5, однофазные разъединители 6 и 7, система управления 8, сборки 9 – 14 полностью управляемых приборов с обратными диодами и резонансный трансформатор 17» [2].

«В режиме плавки гололёда разъединители 6, 7 и 16 включены. Плавка осуществляется постоянным током. Регулирование тока плавки ведётся способом высокочастотной ШИМ. Например, при прохождении тока нагрузки через диоды сборок 13 и 10 полностью управляемый прибор из сборки 9 или 14 подключается в режиме ШИМ. При этом кратковременно образуется контур двухфазного короткого замыкания 9 – 10 или 13 – 14. Нагрузка шунтируется, и ток плавки регулируется. Скорость нарастания тока короткого замыкания ограничивается реактором 3. За счёт выбора частоты и коэффициента модуляции ШИМ запираение тиристора происходит раньше увеличения тока короткого замыкания до опасного уровня. При этом интервал проводимости тиристора меньше, чем в режиме компенсации реактивной мощности. В названном режиме разъединители 6, 7 и 16 выключены. Высоковольтный мостовой преобразователь 4 работает в режиме «СТАТКОМ»» [2].

Как показывает практика электроснабжающих организаций, покрыто гололедом лишь от 7 до 30 % длины нагреваемого провода во время плавки. Так происходит за счёт различных углов поворота и непредсказуемости направления ветра в момент образования гололёда, таким образом, участки ВЛ оказываются в различных климатических условиях. Соответственно, при плавке гололеда, большая часть электроэнергии расходуется впустую. В этой связи, имеет смысл применения мобильной установки плавки гололеда, которая позволяет локально ликвидировать обледенение на участках ВЛ [19].

«Мобильный генератор для плавки гололёда на проводах ВЛ выполняется на автомобильной платформе, питание (0,4 кВ) трёхфазного

выпрямительного моста осуществляется от двух дизель-генераторов ADV320 мощностью 320 кВт каждый. Предусмотрены проводники с клеммами для подключения к проводам ВЛ и электрические шины для соединения проводов на пролёте между опорами по схеме плавки гололёда» [31]. Рассмотренное техническое решение обеспечивает плавку гололёда на длине двух пролётов воздушной линии на фазных проводах и грозозащитном тросе.

«Общим недостатком всех устройств, реализующих термическое воздействие постоянным током, представляется необходимость применения схемы плавки гололёда «провод – провод» или «провод – два провода». В любом случае увеличивается время плавки и соответственно затраты электроэнергии. Для уменьшения времени плавки предпочтение следовало бы отдать схеме плавки «три провода — земля», однако заземляющие устройства подстанций не рассчитаны, как правило, на сравнительно длительное протекание постоянного тока, достигающего 2000 А» [9], [27].

Рассмотрим термическое воздействие током ультранизкой частоты. Обеспечение данного способа заключается в проведении плавки гололёда током низкой частоты, который формируется трёхфазным автономным инвертором напряжения, а изменением напряжения питания задают и поддерживают эффективное значение тока плавки на требуемом уровне.

Когда частота выходного напряжения автономного инвертора составляет десятые доли Гц и менее, ток в проводах линии ограничивается только активным сопротивлением. Исходя из этого, увеличивается допустимая длина воздушной линии по сравнению с плавкой переменным током промышленной частоты, а также упрощается организации плавки, сокращается продолжительность процесса плавки гололёда, уменьшается количество дополнительного коммутационного оборудования [25].

Схема комбинированной установки для плавки гололёда и компенсации реактивной мощности, реализующей предложенный способ, представлена на рисунке 16.

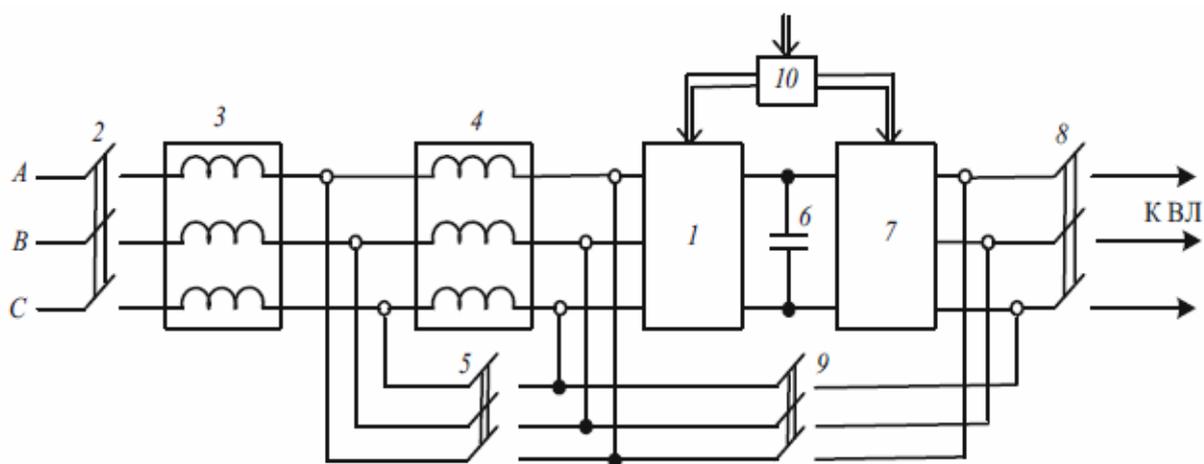


Рисунок 16 - Комбинированная установка для плавки гололеда током ультранизкой частоты и компенсации реактивной мощности

«В состав комбинированной установки входят трёхфазные мостовые преобразователи на полностью управляемых полупроводниковых ключах 1 и 7, трёхполюсные выключатели 2, 5, 8, 9, трёхфазные дроссели 3, 4, конденсаторная батарея 6 и система управления 10» [9].

«В режиме плавки гололёда выключатели 5 и 8 включены, а выключатель 9 отключен. Мостовой преобразователь 1 функционирует в режиме управляемого выпрямителя, а мостовой преобразователь 7 — в режиме трёхфазного автономного инвертора напряжения. Плавка осуществляется одновременно на трёх проводах воздушной линии. В режиме компенсации реактивной мощности выключатели 5 и 8 выключены, а выключатель 9 включен. Мостовые преобразователи 1 и 7 работают параллельно» [9].

«Угол включения  $\alpha$  выбирается несколько меньше  $180^\circ$ . Из сети потребляется активная мощность, необходимая для поддержания напряжения на конденсаторной батарее 6. На стороне мостовых преобразователей 1 и 7 переменного тока формируется переменное напряжение. Фаза первой гармоники сдвинута по отношению к фазным напряжениям источника питания на угол  $\beta = (180^\circ - \alpha)$ . Если амплитуда первой гармоники формируемого напряжения превышает амплитуду напряжения источника

питания, то мостовые преобразователи 1 и 7 генерируют реактивную мощность, а если меньше — то потребляют реактивную мощность. Изменением коэффициента модуляции высокочастотной ШИМ регулируют амплитуду первой гармоники формируемого напряжения, а, следовательно, величину и направление реактивной мощности» [9].

Рассмотрим термическое воздействие током высокой частоты. Метод заключается в том, что без отключения потребителей на фазные провода через согласующее устройство и высоковольтные конденсаторы связи подаётся от генератора ток частотой 50 – 500 МГц [8].

«В однородном проводнике переменный ток концентрируется в поверхностном слое, утонение которого с ростом частоты ведёт к увеличению сопротивления той части проводника, по которой проходит ток. Это означает, что при одинаковом токе, протекающем по проводу, чем выше значение частоты сигнала, тем больше рассеиваемая на проводнике тепловая мощность. Например, при  $f \geq 100$  МГц сопротивление алюминиевых проводов возрастает в 600 раз и даже более» [30].

Нагрев провода на 10 – 20 °С возможен при мощности высокочастотного генератора в несколько десятков киловатт, что должно предотвратить образование гололёда на проводах. Однако, для плавки уже образовавшегося гололёда потребуется, нагрев провода до температуры 100 – 180 °С. Это в свою очередь приведёт к значительному увеличению затрат электроэнергии и увеличению длительности процесса плавки. Поэтому данный способ наиболее целесообразно применять только в профилактических целях для предотвращения гололёдообразования, так как данный способ не подразумевает отключения потребителей. Однако использование генераторов с диапазоном частот 87,5 – 108 МГц, необходимого для данного способа, чревато опасностью создания интенсивных радиопомех в ультракоротковолновом диапазоне.

## 2.3 Плавка гололеда, основанная на термодинамическом воздействии

Подогрев провода током высокой частоты позволяет препятствовать образованию гололёдных отложений на ВЛ, а также облегчать процесс удаления уже образовавшихся гололедных отложений.

Данный способ представляет собой предварительный разогрев провода и последующее воздействие мощного импульса тока. Провод разогревается до момента подтопления гололеда между проводом и ледяной прослойкой, а затем провода «встряхиваются» мощным импульсом тока, который вызывает механический резонанс. Это, в частности использовано в устройстве, схема которого представлена на рисунке 17 [24].

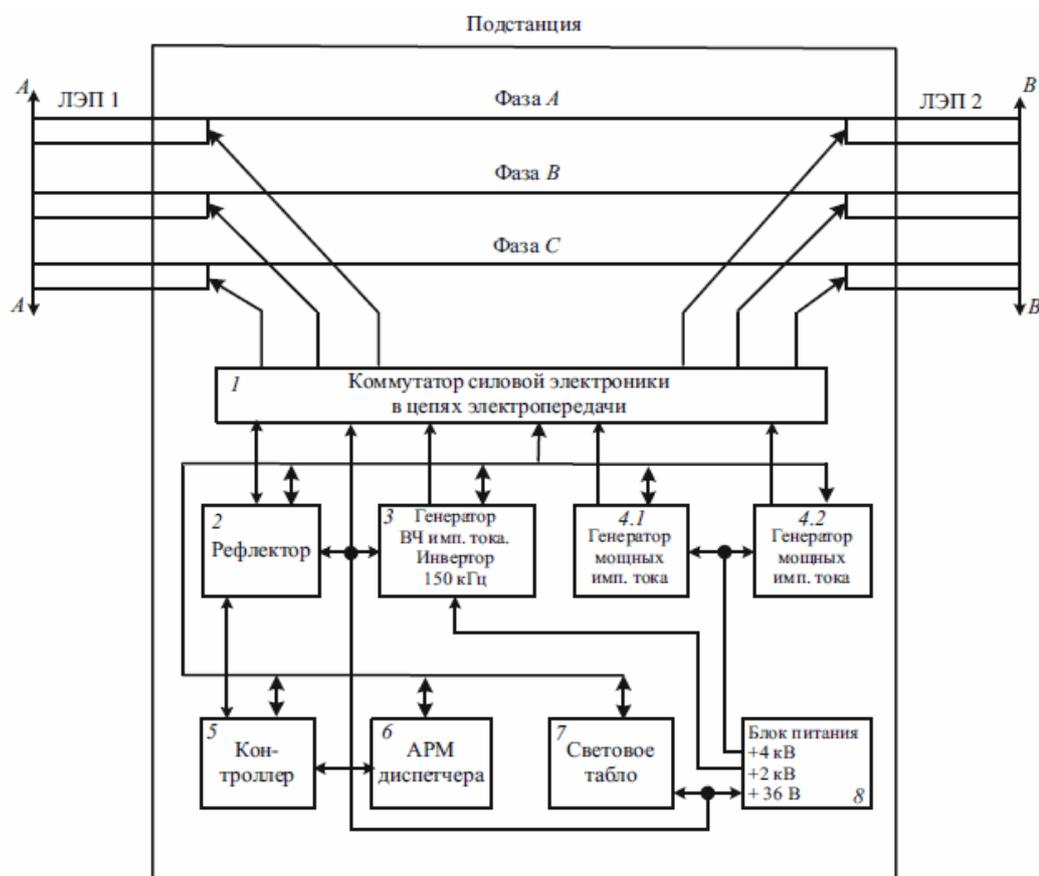


Рисунок 17 - Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередачи

«Автоматизированное рабочее место АРМ диспетчера 6 и контроллер 5 обеспечивают бесперебойную работу подстанции с отображением оперативной информации на световом табло 7» [23].

## 2.4 Удаление гололеда электромеханическим воздействием

Под действием возникающей силы Ампера, при протекании тока параллельные провода притягиваются или отталкиваются. Если периодически пропускать импульсы тока по проводам ВЛ, они будут совершать механические колебания, которые позволят разрушить гололёдно-изморозевые отложения. «Частота импульсов тока должна быть близкой к механическому резонансу с амплитудой, достаточной для преодоления внешних и внутренних сил трения. Изменение пропускаемого тока может быть строго периодическим, иметь качающуюся частоту, изменяться по гармоническому закону, иметь форму пачек импульсов с заданными законами изменения частоты, амплитуды и скважности» [5]. «На рисунке 18 приведён один из возможных вариантов реализации автоматизированной системы удаления гололёда, реализующих предлагаемый способ» [9].

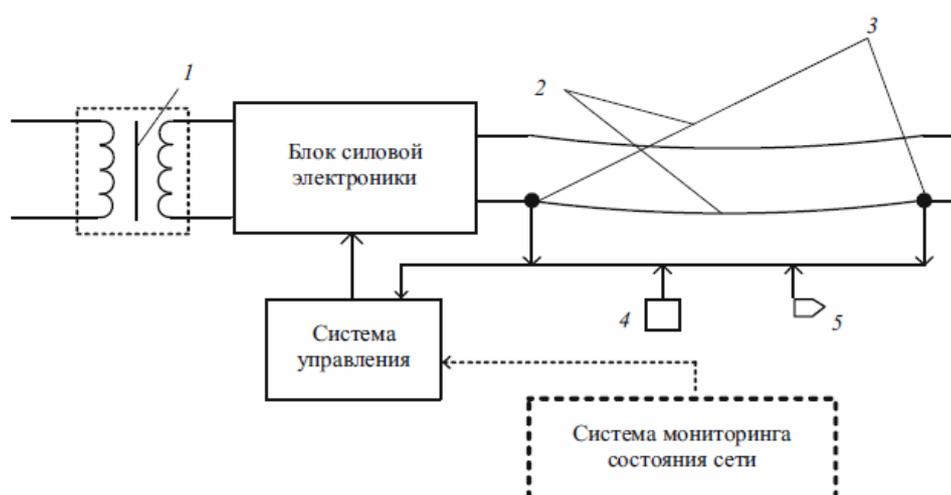


Рисунок 18 - Система электромеханического воздействия на провода воздушной линии для удаления гололеда.

«Силовой трансформатор 1 преобразует питающее напряжение до необходимого уровня. Блок силовой электроники выпрямляет полученное от силового трансформатора 1 напряжение и формирует импульсы тока требуемой величины, формы и частоты, пропускаемые через провода 2 воздушной линии. Система управления, представляющая собой программируемый логический контроллер, обрабатывает информацию с внешних датчиков гололедно-ветровых нагрузок 3, влажности 4 и температуры 5, задаёт требуемую форму и частоту импульсов тока для блока силовой электроники и управляет работой системы в целом» [5].

На практике, чтобы избежать возможных негативных последствий резонанса, необходим тщательный и точный расчет уровня и частоты импульсов тока. Пропускать импульсы следует по проводам, лежащим на разных уровнях, чтобы повысить эффективность разрушения гололеда. Дополнительным разрушающим фактором выступают сила тяжести и инерция льда, при его опадении.

К недостаткам данного способа можно отнести необходимость отключения ВЛ. Однако положительной стороной данного метода является меньшая продолжительность затрачиваемого времени, по сравнению с плавкой. Соответственно, затраты электроэнергии сравнительно меньше.

## **2.5 Удаление гололеда механическим воздействием**

Механический способ подразумевает применение специальных инструментов, которыми ледяные отложения сбиваются с проводов. Самый простой способ механического удаления гололеда – сбивание при помощи длинных шестов. Обивка осуществляется боковыми ударами, вызывающие волнообразное колебание провода. Однако для этого способа необходим доступ к ВЛ, а значит, часть потребителей будет отключено.

Удаление гололедных отложений механическим способом может осуществляться с земли или вышек и площадок, установленных на

механизмах или транспортных средствах. Для обивки используются деревянные, бамбуковые, стеклопластиковые или бакелитовые шесты. Шест для обивки с земли должен иметь длину от 5 до 8 м на верхнем конце на длине 2 м, начиная от верхнего среза, должен быть оплетен виток к витку алюминиевой проволокой диаметром от 2 до 3 мм. Шест для обивки с механизмов может иметь длину от 1,5 до 2 м и оплетается алюминиевой проволокой весь, за исключением участка, предназначенного для его удержания. Обивка осуществляется боковыми ударами, вызывающими волнообразное колебание провода, при этом гололедные образования ломаются и осыпаются [28].

«Удаление гололеда с проводов шестами практически неосуществимо без большого количества рабочих. Этот метод требует много времени и применяется только на коротких участках линий, из-за чего в большинстве случаев признается нецелесообразным.

Поэтому в настоящее время наиболее распространенным способом борьбы с гололедом на проводах ЛЭП является плавка гололеда переменным или постоянным током большой величины в течение продолжительного периода времени (около 100 минут и более). При этом расходуется значительное количество энергии и требуется отключение линии от потребителей на длительный срок» [11].

«Известен способ перемещения по проводам воздушных линий электропередачи средств для удаления льда – роликов-ледорезов, основанный на использовании трактора, связанного с роликами-ледорезами посредством штанги.

Устройство для осуществления этого способа содержит установленные на транспортном средстве штанги по числу очищаемых проводов с закрепленными на них средствами для удаления льда, а именно роликами-ледорезами. Штанги, закрепленные на транспортном средстве – тракторе, перемещают под проводами вдоль линии электропередачи. При этом ролики-ледорезы, накатываясь на участки проводов, покрытых гололедом,

последовательно приподнимают и перегибают их, разрушая гололедные отложения на проводах и очищая их.

Недостатком таких решений является низкая производительность и возможность повреждения и деформации проводов в процессе удаления гололеда, что приводит к обрывам сети и сопровождается ускоренным износом проводов, невысокая эффективность удаления льда вследствие использования трактора.

Кроме использования традиционных механических методов борьбы с гололедом в настоящее время активно разрабатываются различные механические и робототехнические системы для определения появления льда и его удаления с проводов ЛЭП» [29].

К недостаткам механического способа можно отнести высокие трудозатраты, невозможность осуществлять очистку ВЛ без отключения потребителей, а также тот факт, что такой способ эффективен только для удаления уже образовавшегося гололеда на проводах, а не его предупреждение, а следовательно, для своевременной обивки необходимо осуществлять непрерывный мониторинг за образованием гололеда, что требует привлечения большего количества персонала и техники, либо применения специальных гололедных датчиков, которые будут своевременно предоставлять информацию для принятия решения о необходимости удалить отложения.

При этом также существует риск обрыва проводов, при несвоевременном удалении льда.

К достоинствам данного способа можно отнести невысокую стоимость и возможность быстрого удаления гололедных отложений при их неравномерном налипании на ВЛ.

Выводы по главе 2.

Существует несколько методов удаления гололеда, они основываются на таких типах воздействия как: термическое; термодинамическое; электромеханическое и механическое.

Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков. Например, методы, включающие механическое воздействие, подразумевают обесточивание ВЛ, что является недостатком, т.к. это может повлечь за собой материальный ущерб от недоотпуска электроэнергии.

Метод, основанный на термодинамическом воздействии, заключается в предварительном разогреве провода с последующим термодинамическим ударом, из-за которого происходит сброс льда с проводов.

Следовательно, в случае частого образования гололедной муфты, недостатком такого способа является ускоренное изнашивание провода из-за частого воздействия термодинамических ударов.

Наиболее действенным методом является плавка, основанная на термическом воздействии, осуществляемая переменным или постоянным током, а также током ультранизкой и высокой частоты.

## **Глава 3 Разработка решений по предотвращению гололедных аварий на ВЛ 110 кВ Жигулевского ПО**

### **3.1 Выбор установки плавки гололеда**

Наиболее эффективным способом борьбы с гололедными отложениями на ВЛ является плавка постоянным током. Для этой цели используются установки типа ВУПГ (выпрямитель управляемый плавки гололеда), которые имеют ряд преимуществ:

- возможность регулирования тока плавки, в том числе и по сигналам с датчиков гололеда;
- плавный пуск и отключение выпрямителя, что позволяет избежать перенапряжений и облегчает работу коммутационной аппаратуры;
- 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;
- минимальный монтаж на объекте (требуются только легкий фундамент под контейнер и кабельный канал между МВ и шкафом СУРЗА);
- возможность транспортировки непосредственно на железнодорожной платформе или иным видом транспорта (контейнер является одновременно и корпусом ВУПГ, и тарой).

Выбор установки плавки гололеда проводится по основным параметрам линии, на которой будет производиться плавка. Для примера рассмотрим линию ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное (таблица 5).

Таблица 5 – Основные параметры линии ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное и номинальные значения принимаемой ВУПГ

Параметр	Значение	Номинальное значение принимаемой ВУПГ
$U_{н.вх}$ , кВ	6	10
$U_{н.вых.ВУПГ}$ , кВ	13,95	14
$I_{к.ВУПГ}$ , А	974	1200
$P_{н}$ , МВт	15,48	16,8

Исходя из приведенных данных, выбираем к установке ВУПГ с номинальным током 1200 А,  $U_{н.вх}=10$  кВ,  $U_{н.вых}=14$  кВ,  $P_{н.установки}=16,8$  МВт разработки ОАО «НИИПТ», которая удовлетворяет всем необходимым параметрам при подключении её к сети  $U_{н}=6$  кВ.

Основные технические характеристики ВУПГ-14/1200 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные технические характеристики ВУПГ-14/1200

Тип установки	ВУПГ-14/1200
номинальное входное напряжение, кВ	10
номинальное выпрямленное напряжение, кВ	до 14
номинальная мощность, МВт	16,8
номинальный выпрямленный ток, А	1200
максимально допустимый выпрямленный ток, А	1400
диапазон измерения выпрямленного тока, А	100-1200
тип тиристора	T273-1250-44
напряжение питания собственных нужд, В	~380, 3 фазы
температура хранения, °С	-45 - +45
температура эксплуатации, °С	-10 - +10
охлаждение	воздушное принудительное, замкнутое
габаритные размеры контейнера, мм	не более 6060×2440×2590
габаритные размеры блока сурза, мм	не более 600×760×350
масса контейнерной установки, т	не более 4
масса блока сурза, кг	не более 25

### 3.2 Техническое обеспечение плавки гололеда на ПС Жигулевская

«На ПС 110 кВ Жигулевская организовывается система плавки гололеда из четырех ВУПГ и двумя кабельными линиями заводится на пункт плавки гололеда Жигулевская ГЭС (ППГ). Пункт плавки гололеда состоит из шести комплектов трехполюсных разъединителей 110 кВ через которые подается ток плавки в линии ВЛ-110 кВ Александровка-2; ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное; ВЛ 110 кВ Жигулевская-1; ВЛ 110 кВ Жигулевская-2; ВЛ 110 кВ Цементная-1; ВЛ 110 кВ Цементная-2» [6].

На ПС 110 кВ Жигулевская нейтрали силовых трансформаторов Т1 и Т2 заземлены. На ПС 110 кВ Жигулевская организовывается система плавки гололеда из четырех ВУПГ и сопутствующего оборудования в соответствии со схемой электрической принципиальной. Установки ВУПГ имеют следующие характеристики:  $I_n = 1200$  А,  $U_{н.вх} = 10$  кВ,  $U_{н.вых} = 14$  кВ,  $P_n = 16,8$  МВт. Резервная ВУПГ не устанавливается по причине отсутствия места для установки ячейки 6 кВ для питания оборудования. В случае выхода из строя одного из четырех ВУПГ одновременная плавка гололеда будет выполняться через два ВУПГ для тех линий, где необходимы две установки и через одно ВУПГ для тех линий, где необходима одна установка.

При проведении плавки гололеда положительный полюс ВУПГ (либо средняя точка при одновременной работе двух ВУПГ) должны быть заземлены через трансформатор тока с разрезанным магнитопроводом и при этом сеть 6,3 кВ с изолированной нейтралью превращается в сеть с заземленной нейтралью, в связи с чем все потребители, работа которых не возможна в сети с заземленной нейтралью должны быть отключены на время плавки. Также в случае пробоя плеча ВУПГ в пробитой фазе возникнет постоянная составляющая, величина которой составит 10,2 кВ. В случае возникновения аварийной ситуации с пробоем плеча ВУПГ сигнал СУРЗА на отключение должен воздействовать на выключатель 6 кВ ячейки ВУПГ.

В существующем здании ЗРУ-6 кВ установлены четыре ячейки 6 кВ с выключателями, трансформаторами тока, заземляющими ножами и ограничителями перенапряжений. Все ячейки запитаны посредством кабельных линий, через кабельные вставки и установлены вдоль стены ЗРУ напротив существующих ячеек. Ячейки применяются одностороннего обслуживания типа КРУ-СВЭЛ производства ЗАО «СВЭЛ».

Для питания двигателей приводов разъединителей и обогрева шкафов приводов разъединителей и шкафов наружной установки в непосредственной близости от оборудования системы плавки гололеда установлены шкафы питания и обогрева, питание которых собирается в "кольцо" и подключается к разным системам шин щита собственных нужд с установкой новых аппаратов защиты.

Силовые кабели 6 кВ от вновь устанавливаемых ячеек 6 кВ в помещении ЗРУ-6 кВ выходят на улицу по кабельным каналам, далее проложены в земле в траншее. Силовые кабели 10 кВ от системы плавки гололеда ПС Жигулевская до переключательного пункта плавки гололеда ППГ 110 кВ, проложены в земле в траншее.

В таблице 7 представлена ведомость основного электротехнического оборудования ПС Жигулевская.

Таблица 7 – Ведомость основного электротехнического оборудования

Наименование	Краткая техническая характеристика	Ед. измерения	Количество
Ячейка КРУ-6 кВ одностороннего обслуживания	U <sub>ном</sub> = 6 кВ; I <sub>ном.</sub> = 1600 А; I <sub>тер.ст.</sub> = 20 кА; I <sub>дин.ст.</sub> = 50 кА	шт	4
Ограничитель перенапряжений 6 кВ	U <sub>н</sub> =6 кВ U <sub>макс</sub> =7,2 кВ	шт	12
Реактор токоограничивающий	U <sub>н</sub> =6 кВ I <sub>н</sub> =1600 А L <sub>p</sub> =0.56 Ом	шт	12
Блок измерения напряжения	U <sub>н</sub> =6 кВ	шт	4

Продолжение таблицы 7

Наименование	Краткая техническая характеристика	Ед. измерения	Количество
Регулируемая выпрямительная установка плавки гололеда	U <sub>н</sub> =10 кВ I <sub>н</sub> =1200 А	шт	4
Разъединитель однополюсный горизонтально поворотный с двумя комплектами заземляющих ножей	U <sub>ном</sub> = 35 кВ; I <sub>ном.</sub> = 2000 А; I <sub>тер.ст.</sub> = 31,5 кА; I <sub>дин.ст.</sub> = 80 кА	шт	12
Разъединитель однополюсный горизонтально поворотный с одним комплектом заземляющих ножей	U <sub>ном</sub> = 35 кВ; I <sub>ном.</sub> = 2000 А; I <sub>тер.ст.</sub> = 31,5 кА; I <sub>дин.ст.</sub> = 80 кА	шт	2
Разъединитель однополюсный горизонтально поворотный с без заземляющих ножей	U <sub>ном</sub> = 35 кВ; I <sub>ном.</sub> = 2000 А; I <sub>тер.ст.</sub> = 31,5 кА; I <sub>дин.ст.</sub> = 80 кА	шт	8
Выносной блок управления разъединителями		шт	22
Трансформатор тока с разрезанным магнитопроводом	U <sub>ном</sub> = 35 кВ; I <sub>ном.</sub> = 1500 А; I <sub>тер.ст.</sub> = 63 кА; I <sub>дин.ст.</sub> = 157,5 кА	шт	2
Шкаф питания и обогрева двигателей приводов и шкафов наружной установки	-	шт	4
Клеммный шкаф	-	шт	4
Гирлянда изоляторов натяжная одноцепная	U <sub>н</sub> =35 кВ	шт	16
Провод сталеалюминиевый (постоянный ток)	АС 400/64	м	1000
Провод сталеалюминиевый (переменный ток)	АС 330/30	м	240
Кабель из сшитого полиэтилена ПвПу-1х300/35-6 (от сш 6 кВ до ячеек)	U <sub>н</sub> =6 кВ	м	1440

Продолжение таблицы 7

Наименование	Краткая техническая характеристика	Ед. измерения	Количество
Кабель из сшитого полиэтилена ПвПу-1х185/35-6 (от ячеек 6 кВ до реакторов)	U <sub>н</sub> =6 кВ	м	1500
Кабель с бумажной пропитанной маслом изоляцией ЦАСБ2л 3х150-10	U <sub>н</sub> =10 кВ	м	1800
Изолятор опорно-стержневой	U <sub>н</sub> =35 кВ	шт	20

Для защиты оборудования от ударов молнии установлены два молниеотвода. Минимально допустимое сечение заземляющего проводника по термической стойкости определяется по формуле 1:

$$S_{min} = \frac{I\sqrt{t}}{k} = \frac{14142 \cdot \sqrt{0.1}}{82} = 54.53 \text{ мм}^2, \quad (1)$$

где  $S_{min}$  - минимально допустимое сечение защитного проводника,

$I$  – наибольшее значение установившегося тока короткого замыкания, А,

$t$  - время наибольшей выдержки основной релейной защиты, с (принимается 0,15 с),

$k$  – коэффициент, зависящий от материала проводника (для стали  $k=82$ ).

Контур заземления выпрямительных установок плавки гололеда не должен быть связан с контуром заземления ПС 110 кВ Жигулевская. Сетка заземления выполнена из горизонтальных заземлителей в виде стальной оцинкованной полосы сечением 5х40 мм и вертикальных заземлителей в виде оцинкованной круглой стали диаметром 18 мм и длиной 5 м.

На территории под устанавливаемое оборудование предусматривается новое заземляющее устройство (ЗУ), которое спроектировано с соблюдением требований к его сопротивлению и не должно превышать сопротивление 0,5 Ом с учетом сопротивления искусственных и естественных заземлителей в любое время года. На глубине 0,7 м от земли и на расстоянии 0,8-1,0 м от фундаментов или оснований оборудования прокладывается сетка ЗУ из горизонтальных и вертикальных заземлителей.

ППГ 110 кВ состоит из секционирующего разъединителя 35 кВ и шести комплектов трехполюсных разъединителей 110 кВ, через которые подается ток плавки в линии:

- ВЛ 110 кВ Александровка-2;
- ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное;
- ВЛ 110 кВ Жигулевская-1;
- ВЛ 110 кВ Жигулевская-2;
- ВЛ 110 кВ Цементная-1;
- ВЛ 110 кВ Цементная-2.

Система плавки гололеда организовывается на ПС 110 кВ Жигулевская и двумя кабельными линиями заводится на ППГ 110 кВ (рисунок 19). Ток плавки подается в линии через разъединители плавки гололеда. В соответствии со схемой электрической принципиальной две кабельные линии заходят на ППГ 110 кВ, «шлейфом» обвязывают вновь устанавливаемые разъединители плавки гололеда. Полученное кольцо секционируется разъединителем 35 кВ с двумя ЗН. Ток плавки с вновь установленных разъединителей плавки гололеда подается непосредственно в линию по гибкой ошиновке.

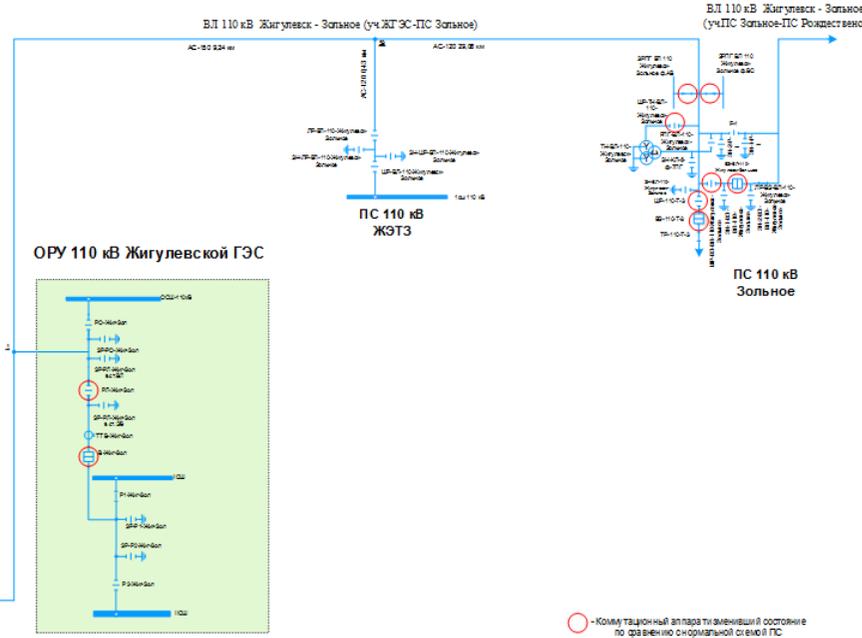
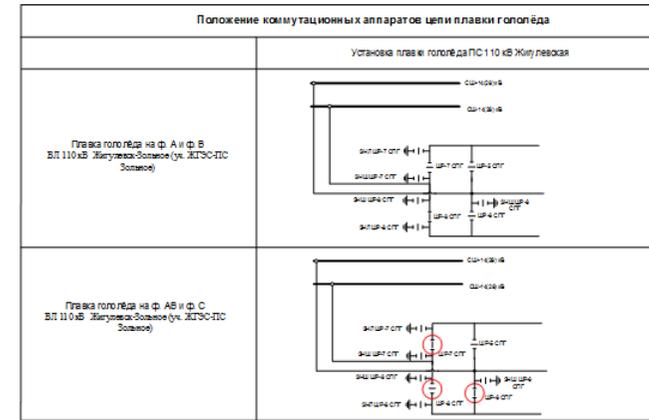
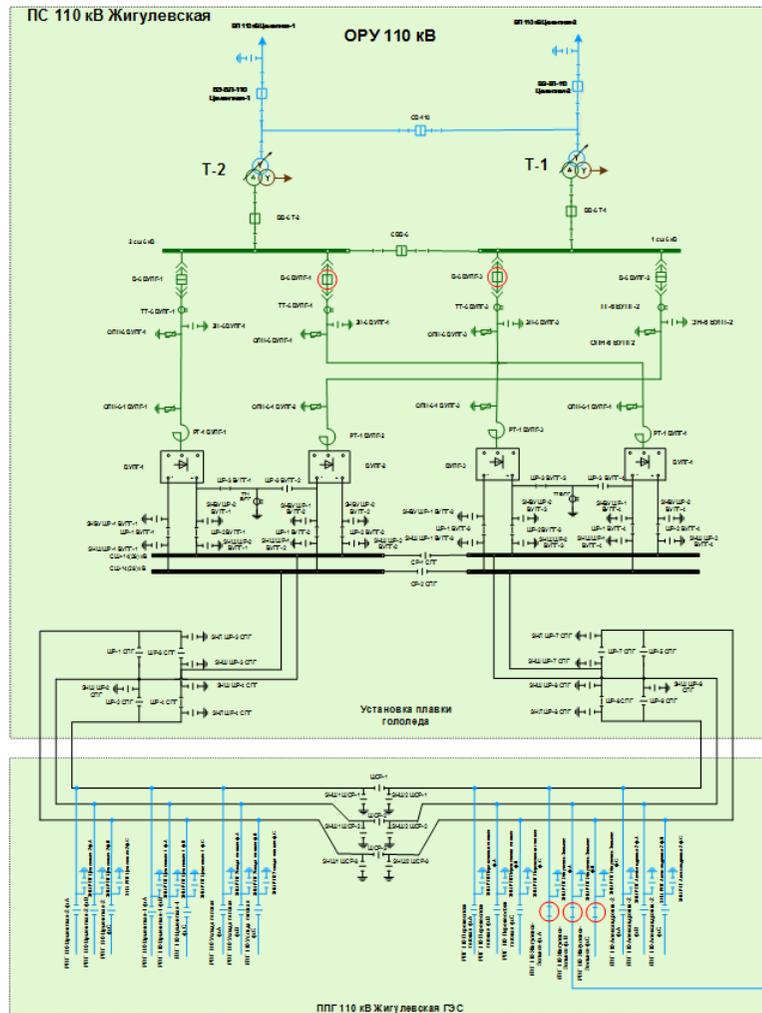


Рисунок 19 – Схема плавки гололеда на проводах ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное постоянным током от ВУПГ 3,4

Плавка гололёда на ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (участок ЖГЭС-ПС Зольное) производится постоянным током за два цикла.

В первом цикле осуществляется плавка гололёда на фазах «А» и «В» по схеме «фаза – фаза двумя ВУ на одной ПС», во втором цикле на фазе «С» по схеме «фаза – 2 фазы двумя ВУ на одной ПС».

Подача напряжения осуществляется от ВУПГ-3, 4 ПС 110 кВ Жигулевская по проводам ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное(уч. ЖГЭС-ПС Зольное) на ЗРПГ, включенные на ПС 110 кВ Зольное. В таблице 8 представлены расчетные параметры режима лавки гололеда на ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное.

Таблица 8 - Расчетные параметры режима плавки гололеда ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное

Наименование ЛЭП (участка ЛЭП)	Напряжение источника плавки до ВУПГ, кВ	Ток плавки, А		I <sub>макс.</sub> , А (максим. допустимый ток по проводу и оборудованию при ТНВ - 5°/0°С)	Расчетное время плавки, мин	
		При нормальных условиях охлаждения (V= 5 м/с поперек трассы ЛЭП при Т=-5°С)	При наихудших условиях охлаждения (V= 2 м/с вдоль трассы ЛЭП при Т=0°С)		При нормальных условиях охлаждения (V= 5 м/с поперек трассы ЛЭП при Т=-5°С)	При наихудших условиях охлаждения (V= 2 м/с вдоль трассы ЛЭП при Т=0°С)
ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (уч. ЖГЭС-ПС Зольное) (плавка по первому циклу на фазах А-В)	6,0 кВ	787	478	982/598 (провод)	18	46
ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (уч. ЖГЭС-ПС Зольное) (плавка по второму циклу на фазе С)		786	478		18	45

В таблице 9 представлены параметры плавки гололеда в соответствии с требованиями по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи (утверждены Приказом Минэнерго России от 19.12.2019 г. №1185).

Таблица 9 - Параметры плавки гололеда в соответствии с требованиями по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи

Наименование ВЛ 110 кВ	Марка провода	Район по гололеду	Нормативная толщина стенки гололеда (R)	Высота расположения приведенного центра тяжести проводов и тросов над поверхностью земли, м	Коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте над поверхностью земли (K1)	Коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра провода (K2)	Расчет величины стенки гололеда, м	Ток плавки гололеда для наилучших условий охлаждения с учетом отстройки от максимально допустимого тока плавки	Время плавки гололеда для наилучших условий охлаждения	Максимальная мощность плавки гололеда	Количество ВУПГ, необходимых для обеспечения тока плавки
ВЛ 110 кВ Александровка-2	АС-150/24	IV	25	25	1	1	10	565,1/565,9	31,3/30,7	1,28	1
ВЛ 110 кВ Цементная-1,2	АС-185/29	V	30	25	1	1	12	636,8/643,7	37,9/36,5	0,62	1
ВЛ 110 кВ Жигулевск Зольное	АС-150/24	VII	40	25	1	1	16	477,9/478,2	59,5/57,8	4,07	2
	АС-120/19							46,3/45,3	4,07	2	

### 3.3 Общие положения

Наиболее эффективным средством борьбы с ГИО является плавка гололеда. Она позволяет в короткий срок удалить ГИО.

Согласно региональным картам климатического районирования по максимальной толщине стенки гололеда в зоне ответственности Самарских РС имеются с I по VII и особый районы. Районами с наибольшей фактической интенсивностью гололёдообразования являются Приволжская возвышенность, район водохранилища Жигулёвской ГЭС и район города Сызрань.

По статистическим данным период гололедообразования (гололедного сезона) в зоне ответственности Жигулевского ПО длится с ноября по март.

В таблице 10 приведена классификация ГИО и соответствующие им метеорологические условия, характерные для зоны ответственности Жигулевского ПО

Таблица 10 – Классификация ГИО

Вид гололедно-изморозевых отложений	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	
			средняя	макс.
1	2	3	4	5
Гололед	0,6-0,9	0...-4	0-15	40
Зернистая изморозь	0,4	-3...-20	1-15	40
Кристаллическая изморозь	0,2	-5...-30	0-3	5-7
Мокрый снег	0,4	+1...-2	0-10	20-30
Смеси	0,25-0,5	0...-20	1-15	30-40

Жигулевское ПО должно вести статистику гололедообразования и учет проведенных плавков с фиксацией параметров (температура воздуха, ток плавки, продолжительность плавки, место образования, размеры, плотность, структура гололеда) и сохранять указанную информацию.

### **3.4 Организация взаимодействия по согласованию и утверждению программ плавки гололеда**

Плавка гололеда осуществляется по программам плавки гололеда (ППГ), утвержденным техническим руководителем организации – владельцем ЛЭП и согласованным с субъектами электроэнергетики, ЛЭП или оборудованием ПС которых задействовано в схемах плавки гололеда (СПГ), а также с диспетчерским центром (ДЦ), задействованные в схемах плавки гололеда.

Программы и схемы плавки гололеда на ЛЭП должны соответствовать «Требованиям по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи», утвержденных приказом Минэнерго от 19.12.2018 № 1185 [12, 13].

Схемы плавки гололеда по Филиалу должны быть разработаны в соответствии с П-МР6/121-33.02-54 «Положение о порядке оформления и согласования электрических схем объектов электросетевого хозяйства и сетей 6-10, 35 кВ и выше в филиале ПАО «МРСК Волги» - «Самарские РС» и Положением о порядке оформления и согласования нормальных (временных нормальных) схем электрических соединений подстанций дочерних зависимых обществ ПАО «Россети» требующих согласования с диспетчерскими центрами АО «СО ЕЭС».

Последовательность операций при производстве переключений для осуществления плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи приводится в ППГ, применяемой оперативным персоналом ЦУС (ПО) Самарских РС и (или) диспетчерским персоналом диспетчерского центра субъекта оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике.

Для ЛЭП Жигулевского ПО, на проводах или грозозащитных тросах которых предусмотрена плавка гололеда, Жигулевским ПО должны разрабатываться и утверждаться программы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП.

Программа плавки гололеда должна содержать ссылки на программы ( типовые программы) переключений по выводу из работы и вводу в работу ЛЭП для осуществления плавки гололеда, разрабатываемые Самарским РДУ для ЛЭП, находящихся в диспетчерском управлении Самарского РДУ, или центром управления сетями сетевой организации для ЛЭП, находящихся в его технологическом управлении.

На основе ППГ должны разрабатываться бланки ( типовые бланки) переключений по подготовке СПГ, плавке гололеда (включая операции с выключателями плавки гололеда, разъединителями плавки гололеда, заземляющими разъединителями плавки гололеда) и восстановлению схемы объектов электроэнергетики.

ППГ на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП согласовываются всеми субъектами электроэнергетики (потребителями электрической энергии), оборудование которых задействовано в операциях по производству переключений для осуществления плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП.

ППГ на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП согласовываются с диспетчерским центром, которые непосредственно участвуют в процессе производства переключений по данной программе плавки гололеда. Согласование ППГ с ДЦ, которые участвуют только в подготовке электроэнергетического режима путем выполнения схемно-режимных и режимно-балансовых мероприятий на время производства переключений и отключенного состояния соответствующей ЛЭП, не требуется.

ППГ должны соответствовать рекомендуемой форме Типовой программы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередач, разработанной Самарским РДУ в соответствии с Требованиями по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи, утвержденные приказом Минэнерго России от 19.12.2018 № 1185.

### **3.5 Мероприятия, выполняемые перед началом гололедного сезона**

Жигулевское ПО ежегодно перед началом гололедного сезона разрабатывают и утверждают графики проведения пробных плавков на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП.

Перед началом гололедного сезона в Жигулевском ПО должны быть выполнены следующие организационно-технические мероприятия:

- разработаны графики проведения пробных плавков гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП;
- проведены инструктажи персонала, осуществляющего координацию переключений для плавки гололеда по ППГ, участвующего в переключениях для осуществления плавки гололеда и наблюдениях за гололедообразованием, в тематику которых включены вопросы по подготовке и осуществлению плавки гололеда, и учебные противоаварийные тренировки (для диспетчерского, оперативного и оперативно-ремонтного персонала);
- проверена исправность автоматизированной информационной системы контроля гололедообразования (АИСКГ);
- проведены пробные плавки гололеда для разработанных или реконструированных (модернизированных) схем плавки гололеда на проводах ЛЭП;
- проведены пробные плавки гололеда на всех грозозащитных тросах ЛЭП;
- опробованы под нагрузкой все установки плавки гололеда (УПГ) постоянным током для одной из схем плавки гололеда (ежегодно разные схемы для разных ЛЭП);
- опробованы под нагрузкой все трансформаторы (фазы трансформаторов) плавки гололеда, которые в нормальном режиме находятся без напряжения;
- уточнен перечень ЛЭП с указанием участков ЛЭП, проходящих в

- особо опасных гололедных зонах;
- укомплектованы документацией по гололеду (перечни ЛЭП оборудованных СПГ, инструкции, СПГ, ППГ на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП);
  - проведена ревизия выключателей, используемых для создания СПГ;
  - проверены наличие и состояние закороток, шунтирующих перемычек и т.д.;
  - проведен тщательный осмотр всех элементов электрической цепи, разъединителей и ошиновки, участвующих в проведении плавки гололеда;
  - своевременно организованы ремонт оборудования и устройств, используемых в СПГ;
  - проверены и приведены в рабочее состояние все имеющиеся средства связи.

### **3.6 Порядок проведения пробных плавков гололеда**

Проведение пробных плавков гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП должно быть начато после окончания периода интенсивной грозовой активности (только для грозозащитных тросов) и завершено до начала отопительного сезона в соответствии с согласованными графиками проведения пробных плавков гололеда [14].

Жигулевское ПО должны учитывать проведение пробных плавков гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП в предложениях по включению ЛЭП и электросетевого оборудования, отнесенных к объектам диспетчеризации Самарского РДУ, в сводный годовой график ремонтов и сводный месячный график ремонтов, направляемых в Самарское РДУ.

Разземление глухозаземленных грозозащитных тросов ЛЭП перед началом гололедного сезона для проведения пробных плавков гололеда на них должно проводиться после окончания периода интенсивной грозовой

активности (по данным метеорологических служб) по решению технического руководителя ПО.

Средние даты начала грозовой активности в Самарской области 18-23 апреля, окончание грозовой активности 5-11 сентября.

Выполнение пробных плавки гололеда должно осуществляться с использованием разработанных и согласованных программ плавки гололеда для каждой разработанной схемы плавки гололеда.

Для проведения пробных плавки гололеда на грозозащитных тросах Жигулевского ПО, эксплуатирующее ЛЭП, должно подать плановую оперативную (диспетчерскую) заявку на выполнение опробования СПГ в соответствии со сроками, разрешенными Самарским РДУ в сводном месячном плане ремонтов ЛЭП и сетевого оборудования. При этом в оперативной (диспетчерской) заявке следует указывать номер ППГ, по которым предполагается проведение пробной плавки гололеда.

Выполнение пробной плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП, должно осуществляться по разрешенной диспетчерской заявке. Подача напряжения в схему плавки гололеда выполняется на 1-3 минуты, если иное время не указано в диспетчерской заявке и/или программе плавки гололеда.

При выполнении пробной плавки гололеда эксплуатирующей организацией должен осуществляться контроль тока плавки, напряжения источника плавки, времени плавки, температуры окружающей среды и (при наличии соответствующих приборов) температуры провода (грозозащитного троса). Информация о начале плавки гололеда, токе плавки и напряжении должна быть доведена до диспетчерского (оперативного) персонала, осуществляющего координацию плавки гололеда.

При выполнении пробной плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП, отнесенных к объектам диспетчеризации Самарского РДУ, эксплуатирующей организацией до диспетчерского персонала Самарского РДУ должна быть доведена следующая информация:

- ток плавки;
- напряжение источника плавки;
- длительность пробной плавки;
- погодные условия (температура воздуха и скорость ветра);
- температуры провода или грозозащитного троса (при наличии соответствующих приборов);
- номер ППГ, по которой осуществлялась пробная плавка гололеда.

При исчезновении или резких изменениях тока плавки гололеда пробная плавка гололеда на проводах или грозозащитных тросах ЛЭП должна быть прекращена.

### **3.7 Порядок организации контроля за гололедообразованием на участках ЛЭП, подверженных частому обледенению**

Для своевременного обнаружения на ЛЭП ГИО организуется специальное наблюдение на гололедоопасных участках линий силами персонала электросетевых участков, РЭС, СВЛ и дежурных ПС.

Для решения задач раннего обнаружения гололеда применяется передача информации на диспетчерский пункт о ветровой и гололедной нагрузки с постов контроля гололедной нагрузки, установленных на ЛЭП.

Для передачи информации о гололедообразовании должны использоваться все имеющиеся средства связи.

Электромонтеры по оперативным переключениям РЭС оперативно передают диспетчеру Жигулевского ПО информацию о гололедной обстановке в районе электрических сетей.

Диспетчеры Жигулевского ПО оперативно передают диспетчеру ЦУС Самарских РС информацию о гололедной обстановке в ПО.

Информация от Гидрометцентра о гололедообразовании доводится диспетчером Жигулевского ПО до руководства Жигулевского ПО и диспетчеров ЦУС Самарских РС.

При появлении гололедной обстановки, ЭОП РЭС, диспетчер Жигулевского ПО систематически, с периодичностью не менее 1 раза в 2 часа, проверяют работоспособность каналов связи, и при наличии неполадок в работе связи, сообщают в службу СДТУ Жигулевского ПО.

### **3.8 Порядок проведения плавки гололеда**

Решение о необходимости проведения плавки гололеда принимается эксплуатирующей организацией.

Главный инженер Жигулевского ПО зависимости от размеров и интенсивности нарастания гололедных отложений:

- организует наблюдение на всех участках возможного гололедообразования;
- принимает решение о вызове на диспетчерский пункт оперативно-диспетчерской службы необходимых специалистов, и назначают ответственных дежурных по предприятию с постоянным пребыванием на рабочих местах.

При появлении на ЛЭП ГИО, угрожающих целостности линии, начальником службы воздушных линий подается заявка диспетчеру Жигулевского ПО на вывод из работы соответствующей ЛЭП для проведения плавки гололеда.

Последовательность операций при производстве переключений для осуществления плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи должен соответствовать утвержденной программе плавки гололеда.

Переключения для плавки гололеда на грозозащитных тросах ЛЭП должны осуществляться с разрешения диспетчерского центра, в ведении которого находятся указанные ЛЭП.

Для проведения плавки гололеда на ЛЭП находящейся в диспетчерском управлении или ведении диспетчера Самарского РДУ, диспетчер

Жигулевского ПО подает неотложную диспетчерскую заявку в Самарское РДУ на «Плавку гололеда» (ПГ) с указанием наименования, номера и даты утверждения ППГ, по которой осуществляется плавка гололёда.

В диспетчерской заявке в поле «Оперативные указания» должен быть указан номер и дата утверждения ППГ, по которой осуществляется плавка гололёда.

При передаче сообщения в ДЦ о необходимости плавки гололеда (при подаче диспетчерской заявки на проведение плавки гололеда) организация, эксплуатирующая ЛЭП, должна сообщить:

- место образования ГИО (номера опор, в пролетах которых наблюдается ГИО);
- характер и вид ГИО в соответствии с Таблицей;
- вес ГИО (при наличии на ВЛ датчиков автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки);
- погодные условия (температура воздуха и скорость ветра) в районе образования ГИО по трассе ЛЭП.

Информация о начале плавки гололеда, токе плавки и напряжении должна быть доведена до диспетчерского (оперативного) персонала, осуществляющего координацию плавки гололеда. Сразу после включения ВПГ, оперативный персонал объекта электроэнергетики, откуда осуществляется плавка гололеда, должен сообщить о начале плавки гололеда (время начала, ток и напряжение плавки гололеда), ЭОП РЭС, ОДС Жигулевского ПО, диспетчеру ЦУС Самарских РС, диспетчеру Самарского РДУ (только в случае, если ДД Самарского РДУ является координатором переключений). ОДС Жигулевского ПО передает информацию о начале плавки гололеда линейному персоналу, ведущему наблюдение за плавкой гололеда.

Переключения для плавки гололеда на грозозащитных тросах ЛЭП, относящихся к объектам диспетчеризации, должны осуществляться с разрешения диспетчерского центра, в ведении которого находятся указанные

ЛЭП. Плавка гололеда на остальных ЛЭП производится оперативным персоналом Жигулевского ПО.

Трансформаторы напряжения, установленные на шинах, к которым подключена УПП постоянным током, должны быть выведены из работы (отключены по стороне высокого напряжения) на время проведения плавки гололеда.

Руководство сборкой схем и плавкой гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП осуществляет оперативный (диспетчерский) персонал в чьем технологическом (диспетчерском) управлении находится ВЛ, если другой порядок не оговорен в программе плавки.

Оперативный персонал субъектов электроэнергетики, задействованный в переключениях, выполняет команды ЭОП РЭС, диспетчера Жигулевского ПО, диспетчера ЦУС Самарских РС, диспетчера Самарского РДУ, проводящих плавку гололеда на проводах и грозозащитных тросах, согласно неотложным диспетчерским заявкам, ПППГ и (или) технологическим картам.

Жигулевское ПО должно осуществлять контроль тока плавки, напряжения источника плавки, времени плавки, температуры окружающей среды и (при наличии соответствующих приборов) температуры провода (грозозащитного троса).

При передаче сообщения в ДЦ после окончания плавки гололеда организация, эксплуатирующая ЛЭП, должна также сообщить:

- время начала и окончания плавки гололеда;
- ток плавки;
- напряжение источника плавки;
- температура провода или грозозащитного троса (при наличии соответствующих приборов);
- номер ПППГ, по которой осуществлялась плавка гололеда.

Включение разъединителя, ВПП, закорачивающего разъединителя плавки гололеда должно выполняться по команде диспетчерского или

оперативного персонала, осуществляющего координацию переключений для плавки гололеда по ППГ.

Если при истечении расчетного времени плавки гололеда гололед не проплавлен, то момент прекращения плавки гололеда определяется техническим руководителем Жигулевского ПО (в соответствии с балансовой принадлежностью).

ОДС Жигулевского ПО должна проводить анализ причин отклонений расчетного и фактического времени плавки гололеда и с учетом его результатов принимать решение о необходимости разработки новой СПГ.

Информация о прекращении плавки из-за опадания гололеда должна сообщаться оперативному персоналу объекта электроэнергетики, на котором расположен выключатель плавки гололеда.

При отсутствии связи с персоналом, осуществляющим наблюдение за плавкой гололеда, выключатель плавки гололеда должен отключаться оперативным персоналом объекта электроэнергетики самостоятельно по истечении расчетного времени плавки гололеда.

При опадании гололеда (сообщение от линейного персонала) оперативный персонал Жигулевского ПО информирует об этом диспетчера Самарского РДУ (в том случае если ДД Самарского РДУ является координатором плавки).

В случае повреждения ЛЭП на место повреждения незамедлительно прибывают бригады Жигулевского ПО для выполнения аварийно-восстановительных работ. После завершения аварийно-восстановительных работ плавка на проводах (грозозащитных тросах) продолжается до полного «сброса» ГИО.

При угрозе возникновения или возникновении ситуаций, вызванных последствиями гололеда созывается комиссия по чрезвычайным ситуациям и обеспечению пожарной безопасности. Персональный состав комиссии назначается приказом заместителя генерального директора - директора Самарских РС.

В Жигулевском ПО, исходя из местных условий, должна быть разработана схема оповещения и организации наблюдений за гололедом на проводах и тросах ВЛ 6-110 кВ подверженных частому обледенению с указанием конкретных мероприятий по оповещению и организации наблюдений (наименование ВЛ, маршрут объезда, пункт наблюдения (участки ВЛ, по которым можно оценивать опасность гололедообразования, № опоры) средства связи, средства передвижения, персонал осуществляющий наблюдение).

При получении прогноза о возможности выпадения «ледяного дождя», или фактических неблагоприятных метеоусловиях, способствующих выпадению «ледяного дождя» (дождь, мокрый снег, морось при отрицательной температуре воздуха с возможностью образования ГИО, в том числе с возникновением «крыла», налипанием мокрого снега на провода, порывистого ветра) организовать сбор информации:

- с мест базирования оперативного персонала;
- от районных ЕДДС;
- от подразделений МЧС;
- с объектов ТСО, ФСК, филиала Россети Волга – Самарских РС и ПО, РЭСов, объектов генерации;
- от крупных потребителей (железная дорога, газо-, нефте-, аммиакопроводы);
- от дорожных служб;
- от администрации районов и поселений;
- от других источников информации.

При получении указанной информации незамедлительно организовать осмотр ЛЭП, расположенных в местах выпадения «ледяного дождя».

Необходимо ежегодно актуализировать схемы наблюдения и оповещения (перечней контрольных точек наблюдения) за гололедообразованием, не связанных с прохождением ледяных дождей, по результатам фактических ГИО в осенне-зимний период.

### **3.9 Требования к расчетным параметрам режима плавки гололеда, приведенным в ППГ**

Расчеты параметров режима плавки гололеда выполняются в соответствии с условиями гололедообразования:

- для наихудших условий охлаждения провода (грозозащитного троса): температура воздуха 0 град С, скорость ветра 2 м/с вдоль провода;
- для нормальных условий охлаждения провода (грозозащитного троса): температура воздуха -5 град С, скорость ветра 5 м/с поперёк провода.

При отклонении фактических погодных условий от расчетных во время плавки гололеда следует учитывать следующее влияние погодных условий на длительность плавки гололеда и на величину тока плавки:

- с увеличением скорости и угла атаки ветра к трассе ЛЭП увеличивается длительность и ток плавки гололеда;
- со снижением температуры наружного воздуха увеличивается длительность и ток плавки гололеда.

В программах плавки гололеда приведены параметры режима плавки гололеда (расчетные ток плавки, напряжение на шинах плавки, время плавки гололеда) для толщины стенки гололеда, принимаемой по максимальному гололедному району, по которому проходит ЛЭП, умноженной на коэффициент 0,4, а также на коэффициенты, учитывающие изменение толщины стенки гололеда при максимальной плотности гололедных отложений (0.9 г/см<sup>3</sup>). При ином характере гололедных отложений расчетное время плавки гололеда:

- увеличивается при большей толщине стенки гололеда;
- уменьшается при гололедных образованиях меньшей плотности (зернистая или плотная изморозь, кристаллическая изморозь, смешанные отложения, мокрый снег).

### **3.10 Описание схем плавки гололеда и методов плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП**

Плавка гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП Жигулевского ПО осуществляется:

- переменным током методом трехфазного короткого замыкания;
- переменным током методом двухфазного короткого замыкания;
- переменным током методом однофазного короткого замыкания;
- постоянным током;
- механическое освобождение проводов от гололеда.

На ВЛ 110 кВ Жигулевского ПО плавка гололеда осуществляется постоянным током, за исключением участков ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное, на этих участках плавка осуществляется переменным током трехфазного КЗ.

Остальные методы плавки, указанные выше, применяются для ВЛ более низкого напряжения (6(10)-35 кВ).

Описание схем плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах ЛЭП Жигулевского ПО, а также допустимые величины тока плавки гололеда с учетом возможных перегрузок по величине и длительности для оборудования СПГ, приведены в таблице 11.

Таблица 11- Описание схем плавки гололеда на ВЛ 110 кВ Жигулевского ПО

№ ППГ	Наименование ЛЭП, участвующей в схеме плавки гололеда	Источник плавки	Марка провода участка ЛЭП	Схема плавки	Наименование ПС, оборудование которой задействовано в схеме ПГ	Ошиновка		Ином оборудования, А			Идоп провода, А		I <sub>max</sub> , А		
						Марка провода	Идоп шин, А		ТТ	Разъединители	АТ (Т)	0 °С	-5 °С	0 °С	-5 °С
							0 °С	-5 °С							
№110	ВЛ 110 кВ Цементная-1	ВУПГ-1,2 ПС 110 кВ Жигулевская	АС-185/29	постоянным током по схеме «фаза-фаза» в первом цикле на фазах «А»-«В» и по схеме «фаза-2фазы» во втором цикле на фазе «С»	ПС 110 кВ Жигулевская	АС-400/64	1296	2101	1500	2000	1200 ВУПГ	796	1300	796	1300
№111	ВЛ 110 кВ Цементная-2	ВУПГ-1,2 ПС 110 кВ Жигулевская	АС-185/29	постоянным током по схеме «фаза-фаза» в первом цикле на фазах «А»-«В» и по схеме «фаза-2фазы» во втором цикле на фазе «С»	ПС 110 кВ Жигулевская	АС-400/64	1296	2101	1500	2000	1200 ВУПГ	796	1300	796	1300
№112	ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (уч. ЖГЭС-ПС Зольное)	ВУПГ-1,2 ПС 110 кВ Жигулевская	АС-120/19	постоянным током по схеме «фаза-фаза» в первом цикле на фазах «А»-«В» и по схеме «фаза-2фазы» во втором цикле на фазе «С»	ПС 110 кВ Жигулевская	АС-400/64	1296	2101	1500	2000	1200 ВУПГ	598	982	598	982

Продолжение таблицы 11

№ ППГ	Наименование ЛЭП, участвующей в схеме плавки гололеда	Источник плавки	Марка провода участка ЛЭП	Схема плавки	Наименование ПС, оборудование которой задействовано в схеме ПГ	Ошиновка			Ином оборудования, А			Идоп провода, А		I <sub>max</sub> , А	
						Марка провода	Идоп шин, А		ТТ	Разъединители	АТ (Т)	0 °С	-5 °С	0 °С	-5 °С
							0 °С	-5 °С							
№113	ВЛ 110 кВ Александровка-2	ВУПГ-1,2 ПС 110 кВ Жигулевская	АС-150/24	постоянным током по схеме «фаза-фаза» в первом цикле на фазах «А»-«В» и по схеме «фаза-2фазы» во втором цикле на фазе «С»	ПС 110 кВ Жигулевская	АС-400/64	129 6	210 1	150 0	200 0	1200 ВУПГ	704	114 9	704	114 9
№85а	ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (участок ПС Зольное – ПС Рождествено)	2 сш 6 кВ ПС 110 кВ Зольное	АС-120/19	Переменным током трехфазного КЗ	ПС 110 кВ Зольное	-	-	-	600	-	1400	595	972	595	972
№88а	ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное (участок ЖГЭС – ПС Зольное)	2 сш 6 кВ ПС 110 кВ Зольное	АС-120/19	Переменным током трехфазного КЗ	ПС 110 кВ Зольное	-	-	-	600	-	1400	595	972	595	972

Выводы по главе 3.

Наиболее эффективным методом борьбы с гололедными отложениями на ВЛ является плавка постоянным током. Для этой цели используются установки типа ВУПГ. Выбор такой установки осуществляется по основным параметрам линии, на которой будет производиться плавка. Для примера выбора рассмотрена линия ВЛ 110 кВ Жигулевск- Зольное (основные параметры представлены в таблице 5). Исходя из приведенных данных выбрана установка ВУПГ-14/1200 производства ОАО «НИИПТ», с номинальным током 1200 А, входным напряжением 10 кВ, выходным напряжением 14 кВ и мощностью установки 16,8 МВт.

Система плавки гололеда организовывается на ПС 110 кВ Жигулевская и двумя кабельными линиями заводится на ППГ 110 кВ (рисунок 18). Ток плавки подается в линии через разъединители плавки гололеда. В соответствии со схемой электрической принципиальной две кабельные линии заходят на ППГ 110 кВ, «шлейфом» обвязывают разъединители плавки гололеда. Полученное кольцо секционируется разъединителем 35 кВ с двумя ЗН. Ток плавки с вновь установленных разъединителей плавки гололеда подается непосредственно в линию по гибкой ошиновке.

Плавка гололёда на ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное производится постоянным током за два цикла. В первом цикле осуществляется плавка гололёда на фазах «А» и «В» по схеме «фаза – фаза двумя ВУ на одной ПС», во втором цикле на фазе «С» по схеме «фаза – 2 фазы двумя ВУ на одной ПС». Подача напряжения осуществляется от ВУПГ-3, 4 ПС 110 кВ Жигулевская по проводам ВЛ 110 кВ Жигулевск-Зольное(уч. ЖГЭС-ПС Зольное) на ЗРПГ, включенные на ПС 110 кВ Зольное. В таблице 8 представлены расчетные параметры режима лавки гололеда на ВЛ 110 кВ Жигулевск – Зольное.

## Заключение

Наледь на проводах ЛЭП образуется в результате оседания влаги на поверхности проводов при окружающей температуре воздуха от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Корка льда при этом может достигать существенной величины, что значительно утяжеляет провод, что в свою очередь может привести к аварийной ситуации.

Существует несколько методов удаления гололеда, они основываются на таких типах воздействия как: термическое; термодинамическое; электромеханическое и механическое.

Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков. Например, методы, включающие механическое воздействие, подразумевают обесточивание ВЛ, что является недостатком, т.к. это может повлечь за собой материальный ущерб от недоотпуска электроэнергии. Метод, основанный на термодинамическом воздействии, заключается в предварительном разогреве провода с последующим термодинамическим ударом, из-за которого происходит сброс льда с проводов.

Следовательно, в случае частого образования гололедной муфты, недостатком такого способа является ускоренное изнашивание провода из-за частого воздействия термодинамических ударов.

Наиболее эффективным методом борьбы с гололедными отложениями на ВЛ является плавка постоянным током.

Для этой цели используются установки типа ВУПГ. Выбор такой установки осуществляется по основным параметрам линии, поэтому в работе рассмотрена линия ВЛ 110 кВ Жигулевск- Зольное (основные параметры представлены в таблице 5).

Исходя из приведенных данных выбрана установка ВУПГ-14/1200 производства ОАО «НИИПТ», с номинальным током 1200 А, входным напряжением 10 кВ, выходным напряжением 14 кВ и мощностью установки 16,8 МВт.

## Список используемой литературы

1. Валиев А. Эксплуатация беспилотников в электросетевом комплексе России// «Электроэнергия», № 6, 2011 г. [электронный ресурс]. URL: <https://eepir.ru/article/jekspluatacija-bespilotnikov-v-jelekt/> (дата обращения: 15.11.21).
2. Гуревич М. К. Патент РФ 2376692 МКИ H02G7/16, H02J3/18. Комбинированная установка для плавки гололёда и компенсации реактивной мощности. Бюл. Изобретения. 2009. № 35.
3. Гуревич М. К. Патент РФ 2390895 МКИ H02G7/16, H02J3/18. Преобразовательное устройство контейнерного типа для комбинированной установки плавки гололёда и компенсации реактивной мощности. Бюл. Изобретения. 2010. № 15.
4. Елизарьев А.Ю., Валиев А. Р. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей// «Вестник УГАТУ», № 4, 2015 г. [электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plavka-gololeda-na-vozdushnyh-liniyah-elektroperedachi-bez-otklyucheniya-potrebiteley/viewer> (дата обращения: 20.11.21).
5. Ефимов А. В. Патент РФ 2166826 МКИ H02G7/16, B60M1/12. Способ удаления гололёда с проводов контактной сети и линий электропередачи. Бюл. Изобретения. 2001. № 14.
6. Инструкция по предупреждению возникновения гололеда и осуществлению плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи в Жигулевском производственном отделении филиала ПАО «Россети Волга» - «Самарские РС». И-МР6/121.04-01.01-1460.01-21. Жигулевск, 2021 – 38 с.
7. Каганов В. И. Как расплавить лёд на проводах ЛЭП. Журнал «Наука и жизнь». Электронный ресурс. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/14553/> (дата обращения: 12.12.21).

8. Каганов В. И. Патент РФ 2356148 МКИ H02G7/16. Способ и устройство для борьбы с гололёдом на линиях электропередачи. Бюл. Изобретения. 2009. № 14.

9. Кувшинов А.А. Современные методы борьбы с гололедными отложениями на проводах воздушных линий электропередачи средствами силовой электроники. Журнал «Энергетик», 2018. Электронный ресурс. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35306431> (дата обращения: 18.12.21).

10. Козлов А. В. Патент РФ 2522423 МКИ H02G7/16. Мобильный генератор тока для плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередач. Бюл. Изобретения. 2014. № 19.

11. Никитина И.Э. Способы удаления льда с проводов линии электропередачи. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело, 2015. Электронный ресурс. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23767034> (дата обращения: 18.12.21).

12. Приказ Министерства энергетики РФ от 19 декабря 2018 г. N 1185 "Об утверждении требований по плавке гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи" [Электронный источник] / <https://base.garant.ru/72156056> (дата обращения: 15.11.21).

13. Приказ Министерства энергетики РФ от 12 июля 2018 г. N 548 "Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики" [Электронный источник] / <https://base.garant.ru/72024756/> (дата обращения: 15.11.21).

14. Приказ Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. N 229 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации" [Электронный источник] / <https://base.garant.ru/186039/> (дата обращения: 15.11.21).

15. ПУЭ издание 7. Раздел 2. Канализация электроэнергии. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ. Климатические условия и нагрузки. 2003. – 552с. ISBN 978-5-392-29900-3.
16. РД 34.20.511 (МУ 34-70-028–82). Методические указания по плавке гололёда переменным током. Ч. 1. М.: Союзтехэнерго, 1983.
17. РД 34.20.511 (МУ 34-70-028–82). Методические указания по плавке гололёда постоянным током. Ч. 2. М.: Союзтехэнерго, 1983.
18. Санакулов А.Х. Проблемы обледенения электрических и контактных сетей. Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация, 2016. 19 стр. Электронный ресурс. URL: <https://kpfu.ru/portal/docs/F83065962/Sanakulov.pdf> (дата обращения: 18.11.21).
19. Соловьев В.А., Черный С.П., Сухоруков С.И. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач// «ЭСиК», № 1, 2014 г. [электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-effektivnosti-borby-s-gololednymi-obrazovaniyami-na-provodah-liniy-elektroperedachi/viewer> (дата обращения: 18.12.21).
20. Сташинов Ю. П., Конопелько В. В. Патент РФ 2505903 МКИ H02J3/18, H02G7/16. Комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололёда. Бюл. Изобретения. 2014. № 3.
21. СТО 56947007- 29.200.10.235-2016. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. ПАО «ФСК ЕЭС», 2016 г. [электронный ресурс]. URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.200.10.235-2016.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf) (дата обращения: 15.11.21).
22. Фурсанов М.И., Горудко П.С.. Гололедные аварии на ЛЭП – причины появления и способы предотвращения. 2017 г. Электронный ресурс. URL:

[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:O22xmUArd0YJ:https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/54232/Gololednye\\_aviarii\\_na\\_LEHP\\_prichiny\\_poyavleniya\\_i\\_sposoby\\_predotvrashcheniya.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ru](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:O22xmUArd0YJ:https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/54232/Gololednye_aviarii_na_LEHP_prichiny_poyavleniya_i_sposoby_predotvrashcheniya.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ru) (дата обращения: 09.01.22).

23. Шевченко П.А. Влияние параметров режима плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи на потребление электрической энергии/ Студенческие Дни науки в ТГУ – 2022: научно-практическая конференция (Тольятти, 5–30 апреля 2022 года): сборник студенческих работ. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2022. 1 оптический диск.

24. Шелковников Н. Д. Патент РФ 2520581 МКИ H02G7/16. Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередачи. Бюл. Изобретения. 2014. № 18.

25. Энерговестник. Использование беспилотных летательных аппаратов в ТЭК. [электронный ресурс]. URL:[https://www.ruscable.ru/article/Ispolyzovanie\\_bespilotnykh\\_letatelynykh\\_apparatomov\\_v\\_TEK/](https://www.ruscable.ru/article/Ispolyzovanie_bespilotnykh_letatelynykh_apparatomov_v_TEK/) (дата обращения: 15.11.21).

26. Ярославский Д.А. Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода, диссертация, 2017 – 135 стр. URL: <https://www.dissercat.com/content/sistema-avtomatizirovannogo-monitoringa-gololednykh-otlozhenii-vozdushnykh-linii-elektropere> (дата обращения: 15.11.21).

27. Huang Q., Y. Tan, X. Mao, S. Zhu and X. Zhou. Study on Melting Ice Current Characteristics under Low Temperature and High Wind Speed. 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Taiyuan, China, 2021, pp. 4382-4385, doi: 10.1109/EI252483.2021.9713437.

28. Li R., W. Chen, W. Huang, C. Shen, X. Yan and F. Yin. Mechanical Characteristics of Ice-melting and Ice-shedding under Conductor Galloping. 2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Haikou, China, 2021, pp. 2200-2204, doi: 10.1109/POWERCON53785.2021.9697491.

29. Peng S., W. Hao and Y. Zhai. Review of the research on icing mechanism of transmission lines and ice-melting technologies. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, China, 2015, pp. 1648-1652, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432515.
30. Shchurov A., S. Shovkoplyas and A. Zasytkin. Efficiency Ensuring of Ice Melting in Power Networks Region. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602806.
31. Zhu Y., Y. Tan, Q. Huang, F. Huang, S. Zhu and X. Mao. Research on Melting and De-icing Methods of Lines in Distribution Network. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Changsha, China, 2019, pp. 2370-2373, doi: 10.1109/EI247390.2019.9062235.