

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

Институт энергетики и электротехники  
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»  
(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания,  
подстанций, сетей и систем  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Плавка гололеда на воздушных линиях электропередач  
напряжением 6-10 кВ в сельской местности»

Студент	<u>О.В. Федяй</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Д.А. Кретов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тольятти 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Условия ледообразования и методы борьбы с обледенением	5
1.1 Метеорологические условия образования отложений на ВЛ	5
1.2 Параметры ВЛ и их роль в образовании отложений	11
1.3 Методы борьбы с обледенением	13
1.4 Электротермические способы борьбы с отложениями на ВЛ	17
1.5 Выводы по первому разделу	27
2 Сети 6-10 кВ и мероприятия по плавке гололеда	28
2.1 Характеристика сетей напряжением 6-10 кВ	28
2.2 Характеристика воздушных линий электропередачи напряжением 6-10 кВ	29
2.3 Обоснование необходимости проведения мероприятий по плавке гололеда	32
2.4 Методы борьбы с обледенением в сетях 6-10 кВ проходящих в сельской местности	47
2.5 Выводы по второму разделу	52
3 Плавка гололеда в сетях 6-10 кВ в сельской местности	54
3.1 Описание исследуемого объекта	54
3.2 Плавка гололеда током короткого замыкания	54
3.3 Определение параметров режима плавки гололеда	62
3.4 Порядок проведения мероприятий по плавке гололеда	73
3.5 Релейная защита при плавке гололеда	75
3.6 Определение места повреждения ВЛ при плавке гололеда	76
3.7 Автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки	77
3.8 Выводы по третьему разделу	78
Заключение	79
Список используемых источников	81

## ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящается выбору наиболее эффективного способа плавки гололеда с целью снижения аварийности на воздушных линиях электропередачи напряжением 6-10 кВ в сельской местности.

В России на данный момент общая протяженность электрических сетей различных классов напряжений составляет примерно 3 млн. км, из них две трети - это воздушные линии электропередачи разных уровней напряжения.

В отличие от кабельных, воздушные линии более подвержены влиянию различных природных явлений. Эти явления не только снижают надежность электроснабжения потребителей, но и являются прямой причиной аварий, крупных ущербов предприятий и экономики в целом.

Проблема борьбы с обледенением проводов воздушных линий электропередачи общеизвестна. Высокая влажность воздуха, резкие перепады температуры, ветры являются факторами, из-за которых интенсивность обледенения проводов воздушной линии возрастает в разы. По причине обледенения проводов, вес которых увеличивается в несколько раз, все элементы воздушных линий подвергаются дополнительным механическим нагрузкам. При гололедных отложениях, превышающих критические значения для данной воздушной линии электропередачи возникает вероятность обрыва проводов и тросов, разрушение изоляторов и арматуры, а в самом худшем случае и разрушение опор. Часто гололед по проводам распределяется неравномерно. Вследствие этого наблюдается серьезный разброс величин стрел провеса проводов линии. Гололед - одна из причин "пляски" проводов. Она зачастую приводит к схлестыванию проводов ВЛ и как следствие к короткому замыканию.

«Аварии из-за гололеда на ВЛ, чаще всего проявляются массово и требуют больших экономических вложений. В результате сетевые энергокомпании и потребители несут крупные убытки, а ликвидация аварий – это дорогостоящий и трудоемкий процесс. Среднее время ликвидации

аварий, вызванных гололедообразованием, превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз» [18, с. 153, 154].

Целью диссертации является снижение аварийности на воздушных линиях электропередачи напряжением 6-10 кВ в сельской местности.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

1) Проанализировать факторы, оказывающие влияние на образование отложений и методы борьбы с ледообразованием на проводах воздушных линий электропередачи;

2) Обосновать необходимость проведения мероприятий по плавке гололеда и выбрать наиболее приемлемый метод плавки гололеда для воздушных линий электропередачи 6-10 кВ в сельской местности;

3) Определить параметры режима плавки гололеда и разработать порядок проведения мероприятий по плавке гололеда.

## 1 Условия ледообразования и методы борьбы с обледенением

### 1.1 Метеорологические условия образования отложений на ВЛ



Рисунок 1 – Классификация видов гололедных осадков

«Обледенение наземных предметов возникает в основном из воды, находящейся в атмосфере в парообразном и жидком состоянии при отрицательных температурах воздуха и увеличении его влажности до 60-100%, сопровождающихся следующими атмосферными явлениями: туман, морось, дождь, крупа, мокрый снег, дымка» [2, с. 9].

Образование атмосферного льда обусловлено двумя процессами: процесс сублимации пара и процесс кристаллизации.

Очень важным вопросом физики является исследование факторов, определяющих структуру отложений.

«Каждый гололедо-изморозевый период, представляющий собой промежуток времени от начала образования отложения до его полного разрушения, состоит из более мелких периодов нарастания и частичного испарения отложения, в результате чего вес, размеры и структура последнего непрерывно меняются и лишь в отдельные промежутки времени могут оставаться постоянными. Указанные изменения связаны с непрерывными колебаниями значений метеорологических параметров, определяющих характеристики отложения в каждый момент времени» [2, с. 11].

«Плотность любого вида гололедных отложений колеблется в широких пределах и зависит как от конкретных метеорологических условий процесса, так и от высоты и особенностей рельефа местности» [1, с. 13].

Далее представлены типичные плотности, характерные для каждого вида отложения.

*Отложения мокрого снега.* Значение средней плотности равно  $0,2 \text{ г/см}^3$ , но иногда может доходить и до  $0,6 \text{ г/см}^3$ .



Рисунок 2 – Отложения мокрого снега

*Гололед.* Значение средней плотности варьируется от  $0,6$  до  $0,9 \text{ г/см}^3$ , при этом для равнинной местности среднее значение объемного веса принимается равным  $0,9 \text{ г/см}^3$ , а для местности горной –  $0,6 \text{ г/см}^3$ .



Рисунок 3 – Гололед на проводах ВЛ

*Кристаллическая изморозь.* Её плотность мала по сравнению с другими типами отложений ( $0,01-0,09 \text{ г/см}^3$ , в среднем  $0,05 \text{ г/см}^3$ ) и с позиции веса серьезной опасности для воздушной линии не представляет, но при значительном количестве отложений, на линию начинают оказываться серьезные ветровые нагрузки.





Рисунок 4 – Кристаллическая изморозь

*Зернистая изморозь.* Значение плотности зернистой изморози колеблется в широких пределах от 0,1 до 0,6 г/см<sup>3</sup>. Также как и с гололедом, плотность на равнинной и горной территориях имеют некоторое различие. Для равнинной территории величина плотности равна 0,1 г/см<sup>3</sup>, для территории горной среднее значение объемного веса составляет 0,25-0,30 г/см<sup>3</sup>.



Рисунок 5 – Зернистая изморозь



Величина плотности *сложных отложений* изменяется в пределах 0,25-0,5 г/см<sup>3</sup>.

«Скорость замерзания капель зависит от их размера, температуры воздуха и поверхности предмета, на котором замерзают капли, т.е. все эти факторы влияют и на структуру образовавшегося осадка. Следует отметить, что интенсивность процесса гололедообразования зависит также от наличия уже отложившегося льда и температуры его поверхности» [2, с. 11].

Сам процесс образования гололеда может продолжаться от нескольких часов до нескольких месяцев с изменением интенсивности или временным прекращением.

«От температуры воздуха зависит не только образование того или иного вида обледенения, но и продолжительность процессов, что имеет большое значение. Понижение температуры воздуха в процессе обледенения способствует длительному сохранению льда на проводах, в результате чего при ветре возникает вибрация и пляска проводов, отмечаются случаи их обрыва» [2, с. 17].

«Температуру воздуха при гололеде для территорий с высотными отметками местности до 1000 м над уровнем моря следует принимать равной минус 5 °С, при этом для районов со среднегодовой температурой минус 5 °С и ниже температуру воздуха при гололеде следует принимать равной минус 10 °С. Для горных районов с высотными отметками выше 1000 м и до 2000 м температуру следует принимать равной минус 10 °С, более 2000 м – минус 15 °С. В районах, где при гололеде наблюдается температура ниже минус 15 °С, ее следует принимать по фактическим данным» [3].

На основании наблюдений было выявлено, в скольких процентах случаев и при каких температурах происходит образование того или иного вида отложения. В семидесяти процентах случаев образование гололёда происходит при температуре от 0 до -2°С. Отложение мокрого снега в большинстве случаев (78%) происходит при таких же температурах. Образование кристаллической измороси в сорока пяти процентах случаев

наблюдается при температуре минус 12°C – минус 16°C. Зернистая изморозь в подавляющем большинстве случаев (80%) образуется при температуре воздуха от 0 до -8°C. Семьдесят два процента случаев образования сложного отложения происходит при колебаниях температуры от 0 до -4°C.

«Большое влияние температура воздуха оказывает на плотность отложений. Время замерзания переохлажденных капель воды различного размера, образующих отложения на каком-либо объекте, определяется температурой поверхности этого объекта и температурой воздуха, а также размером самих капель. Следовательно, все указанные факторы влияют на структуру, а значит и на плотность образовавшегося осадка» [2, с. 18].

Важную роль в образовании структуры отложения играет ветер. «При определенных условиях он может способствовать слиянию мелких капель в более крупные и напротив, дроблению крупных капель на более мелкие» [1, с. 19].

На основании наблюдений было выявлено, при каких скоростях ветра происходит образование того или иного вида отложения. Образование гололеда и сложных отложений преимущественно происходит при сопоставимых скоростях ветра – 2-4 м/с. Мокрый снег и кристаллическая изморозь чаще всего образуются в затишье. Зернистая изморозь, в отличие от кристаллической, образуется при некотором ветре (1-8 м/с).

«Скорость ветра принимается по региональному районированию ветровых нагрузок при гололеде или определяется по данным наблюдений согласно методическим указаниям по расчету климатических нагрузок» [3].

«Поскольку зависимость процесса гололедообразования от ветра является весьма сложной, обнаружить зависимость объемного веса отложений от скорости ветра весьма затруднительно. Достаточно убедительных данных, подтверждающих эту зависимость, в настоящее время не имеется» [2, с. 19].

Таблица 1 - Метеорологические условия гололедообразования

Вид обледенения	Скорость ветра, м/с		Температура воздуха, °С	Атмосферные явления
	средняя	максимальная		
Мокрый снег	0-10	20-30	+1...-2	Налипающий мокрый снег
Гололед	0-15	40	0...-4	Морось, дождь, туман
Кристаллическая изморозь	0-3	5-7	-5...-30	Дымка, туман
Зернистая изморозь	1-15	40	-3...-20	Туман, морось
Смеси	1-15	30-40	0...-20	Морось, дождь, крупа, мокрый снег, туман

## 1.2 Параметры ВЛ и их роль в образовании отложений

Параметры воздушной линии, как и метеорологические условия, оказывают существенное влияние на процесс ледообразования. Поэтому выделяют следующие параметры ВЛ:

1. Диаметр проводов;
2. Высота подвеса проводов;
3. Закручивание проводов.

Влияние диаметра провода на образование гололеда необходимо рассматривать совместно с таким климатическим параметром как скорость ветра. «С увеличением диаметра провода в зависимости от скорости ветра масса гололедных отложений сначала возрастает, достигая максимума при  $d_{пр}=3-8$  см, и далее постепенно уменьшается. Возрастание выражено тем сильнее, чем больше скорость ветра  $v$ » [1, с. 21]. Также по результатам

исследований было установлено, что с увеличением диаметра провода увеличивается и плотность отложения.

Исходя из опытных данных, было установлено, что при увеличении высоты подвеса провода, происходит увеличение массы гололедных отложений в несколько раз.

Большинство марок неизолированных проводов, эксплуатируемые сейчас на ВЛ, выполнены многожильными посредством закручивания нескольких тонких проволок в один провод. Вследствие закручивания провода, происходит образование устойчивой гололедной муфты, которая растет при благоприятствующих этому процессу условиях. При этом закручивание провода также способствует увеличению стадии сохранения отложения на проводах ВЛ. Рост может происходить в течение продолжительного периода времени (от нескольких дней до нескольких месяцев), а масса гололедной муфты может достигать значительных величин.

«Большое влияние на гололедообразование на ВЛ оказывает режим работы энергосистемы. Действие электрического поля, возникающего вокруг цепи линий электропередачи высокого напряжения, сводится в основном к тому, что водяные капли, попадая в сферу его влияния, получают наведенный заряд, в силу чего притягиваются к заряженной поверхности и осаждаются на ней. Сила притяжения капли при этом пропорциональна квадрату приложенного напряжения и обратно пропорциональна кубу расстояния. Интенсивность гололедных отложений на проводах, находящихся под напряжением, оказывается примерно на 30% большей, чем на линиях без тока» [2, с. 21].

«При протекании нагрузочного тока по линии, вследствие выделения тепла пропорционально активному сопротивлению и квадрату тока, температура провода повышается тем больше, чем хуже теплоотвод от провода, зависящий от условий окружающей среды. При увеличении температуры провода выше  $+1^{\circ}\text{C}$  гололед на провод не прилипает. Если же гололедная муфта уже образовалась, то начинается проплавление в

гололедной муфте канавки шириной немного большей, чем диаметр провода» [1, с. 24, 25].

### 1.3 Методы борьбы с обледенением

#### **Метод удаления гололедных отложений с проводов ВЛ**

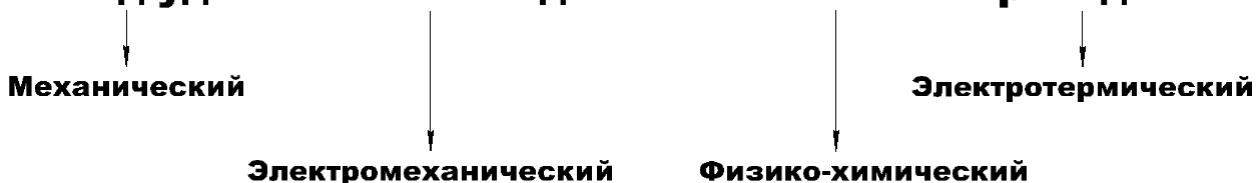


Рисунок 6 – Классификация методов удаления гололедных отложений с проводов ВЛ

#### 1.3.1 Механические методы

Одним из самых простых способов устранения отложений с проводов воздушных линий является механический способ. Традиционным способом механического удаления льда является его сбивание путем применения специальных устройств (шестов). Необходимо отметить, что данный способ не препятствует обледенению, а устраняет его. Применение механического способа ограничивается длиной линии электропередачи, так как для его реализации требуется большое количество времени и персонала [22].

«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» [4]. Наибольших успехов в этой области достигла Канада.

Этот метод применяется, если не представляется возможным провести плавку электрическим током, по причине ее экономической нецелесообразности, либо по техническим причинам.

### **1.3.2 Электротермические методы**

Электротермические способы устранения обледенения проводов ВЛ основаны на «термическом воздействии путем нагрева провода до температуры 120-130°C, при котором происходит расплавление гололедной муфты, или путем профилактического подогрева проводов на 10-20°C для предотвращения образования гололеда» [5].

При профилактическом подогреве ток в линии увеличивают искусственным путем до значения, при котором температура провода будет больше нуля, так как при положительных температурах отложение гололеда на проводе невозможно. «Профилактический подогрев необходимо начинать до образования гололеда на проводах при климатических условиях, когда его образование становится возможным» [4]. Для увеличения величины тока ВЛ надлежит использовать схемы, при которых потребители остаются в работе.

В случае если формирование гололедной муфты уже произошло, то необходимо проводить плавку. Также как и при профилактическом подогреве, необходимо повысить значение тока в линии, при котором «выделяемой в проводах теплоты достаточно для расплавления гололеда с нормативной толщиной стенки при нормативных значениях температуры окружающей среды и скорости ветра» [4]. Основное деление способов плавки осуществляют по роду тока и выделяют:

1. Плавку постоянным током;
2. Плавку переменным током.

### **1.3.3 Физико-химические методы**

Российские ученые работают над проблемой обледенения проводов воздушных линий электропередачи.

«В последние годы для борьбы с обледенением стали активно применять физико-химические методы, заключающиеся в нанесении на провода растворов специальных веществ, которые замерзают при температурах значительно более низких, чем вода. Последняя группа



методов предполагает получение покрытий с низкой адгезией к водным средам, снегу и льду. Одним из наиболее перспективных методов снижения адгезии является создание супергидрофобных покрытий. Специалисты Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН разработали и испытали супергидрофобные покрытия, которые помешают проводам обледенеть, а если такое всё же произойдет, ото льда будет несложно избавиться. Ими был разработан способ получения супергидрофобных покрытий, предназначенных для защиты алюминиевых проводов от обледенения. В рамках представляемой работы ими решались следующие задачи: отработка режимов получения текстурированных супергидрофобных покрытий с использованием электрохимических методов, анализ устойчивости супергидрофобных свойств при длительном контакте покрытия с водной средой, механическая стойкость покрытий, контактирующих с жидкой средой при циклической заморозке/разморозке, анализ противообледенительных свойств покрытия в условиях низких температур, высокой влажности и скорости ветра. Проведенные исследования показали, что разработанное супергидрофобное нанотекстурированное покрытие на основе нановолокон оксида алюминия выдерживает до 100 циклов заморозки/разморозки без существенной деградации текстуры и супергидрофобного состояния» [4].

Данный метод является перспективным и, возможно, найдет более широкое применение в будущем.

#### **1.3.4 Электромеханические методы**

Устранение обледенения проводов воздушных линий электромеханическим способом основано на «периодическом пропускании импульсов тока, вызывающих механические колебания проводов и разрушение гололедной муфты» [5]. При этом для достижения максимального эффекта «частота импульсов тока должна быть близкой к механическому резонансу, а амплитуда - достаточной для преодоления

внешних и внутренних сил трения» [6]. Очень важно при использовании данного способа выполнить точный и тщательный расчет частоты и величины импульсов тока для исключения негативных последствий резонанса. Существуют различные способы реализации данного метода на практике.

### **1.3.5 Прочие методы**

#### **1.3.5.1 Термическое воздействие током ультранизкой частоты**

Суть метода сводится к тому, что «управляемую плавку гололеда на ВЛ производят током низкой частоты, формируемым трехфазным автономным инвертором напряжения, а эффективное значение тока плавки задают и поддерживают на требуемом уровне изменением величины напряжения питания инвертора. Плавку производят одновременно на трех проводах ВЛ, подключенных к выходным зажимам трехфазного автономного инвертора напряжения и закороченных на противоположенном конце линий» [7].

«При частоте выходного напряжения автономного инвертора в десятые доли Гц и ниже величина тока в проводах линии ограничивается практически только активным сопротивлением. В результате увеличивается допустимая длина ВЛ по сравнению с плавкой переменным током промышленной частоты, упрощается организация плавки, сокращается продолжительность процесса плавки гололеда, уменьшается количество дополнительного коммутационного оборудования» [6].

#### **1.3.5.2 Термическое воздействие током высокой частоты**

Суть метода заключается в том, что «без отключения потребителей на токонесущие провода подают от внешнего источника ток, разогревающий провод, отличающийся тем, что подают между двумя проводами линии электропередачи напряжение высокой частоты в диапазоне 50-500 МГц» [8].

Дополнительно известно, что «переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а

преимущественно в поверхностном слое» [20]. Данное явление получило название поверхностного эффекта. При этом активное сопротивление той части проводника, по которой протекает ток, значительно возрастает. Из этого следует, что при равной величине протекающего тока в проводнике, чем выше его частота, тем больше будет и тепловая мощность, которая рассеивается в проводнике.

«Мощности ВЧ-генератора в несколько десятков кВт достаточно для нагрева провода на 10-20°C, что должно предотвратить образование гололедных отложений. Для устранения уже образовавшейся ледяной шубы потребуется нагрев не на 10-20°C, а до температуры 100-180°C, необходимой для плавки гололеда. Соответственно потребуются значительно большие затраты электроэнергии и более длительная процедура» [6]. Исходя из вышесказанного, эффективнее всего применять этот метод для профилактического подогрева проводов, а не для непосредственной плавки.

#### **1.4 Электротермические способы борьбы с отложениями на ВЛ**

В данный момент, очистка проводов ото льда осуществляется его плавкой. В подавляющем большинстве случаев удаление льда с проводов занимает не более часа времени [19].

Для обогрева проводов используется как переменный, так и постоянный ток. Выбор применяемого тока зависит от параметров сети: номинального напряжения, длины и сечения провода.

Переменный ток нашел применение в сетях среднего и высокого напряжения относительно малой протяженности. При использовании переменного тока плавки нет необходимости в дополнительной установке плавки гололеда, что в свою очередь ведет к уменьшению затрат.

Плавка гололеда постоянным током применяется преимущественно для линий значительной длины с большим сечением проводов. В этом случае

возникает необходимость в использовании выпрямительной установки, которая довольно-таки дорога.

#### **1.4.1 Плавка переменным током**

Для сетей напряжением 110 кВ и ниже в основном применяют системы плавки на переменном токе.

Таблица 2 – Соответствие длин обогреваемых линий напряжению источника

Длина линии, км	Номинальное напряжение, кВ
10...25	6
15...40	10
50...125	35
150...200	110

Разработаны и нашли применение следующие способы плавки гололеда:

1. Плавка гололеда коротким замыканием;
2. Плавка гололеда перераспределением нагрузок;
3. Плавка гололеда путем создания искусственного дополнительного потока реактивной мощности;
4. Плавка гололеда уравнительными токами;
5. Плавка гололеда наложением токов.

##### **1.4.1.1 Плавка гололеда коротким замыканием**

Для осуществления плавки гололеда способом короткого замыкания необходимо создать искусственное КЗ. Посредством специальных устройств, формируют устойчивое короткое замыкание на одном конце линии, с другого на нее подается напряжение, достаточное для обеспечения прохождения по проводам требуемого для плавки тока.

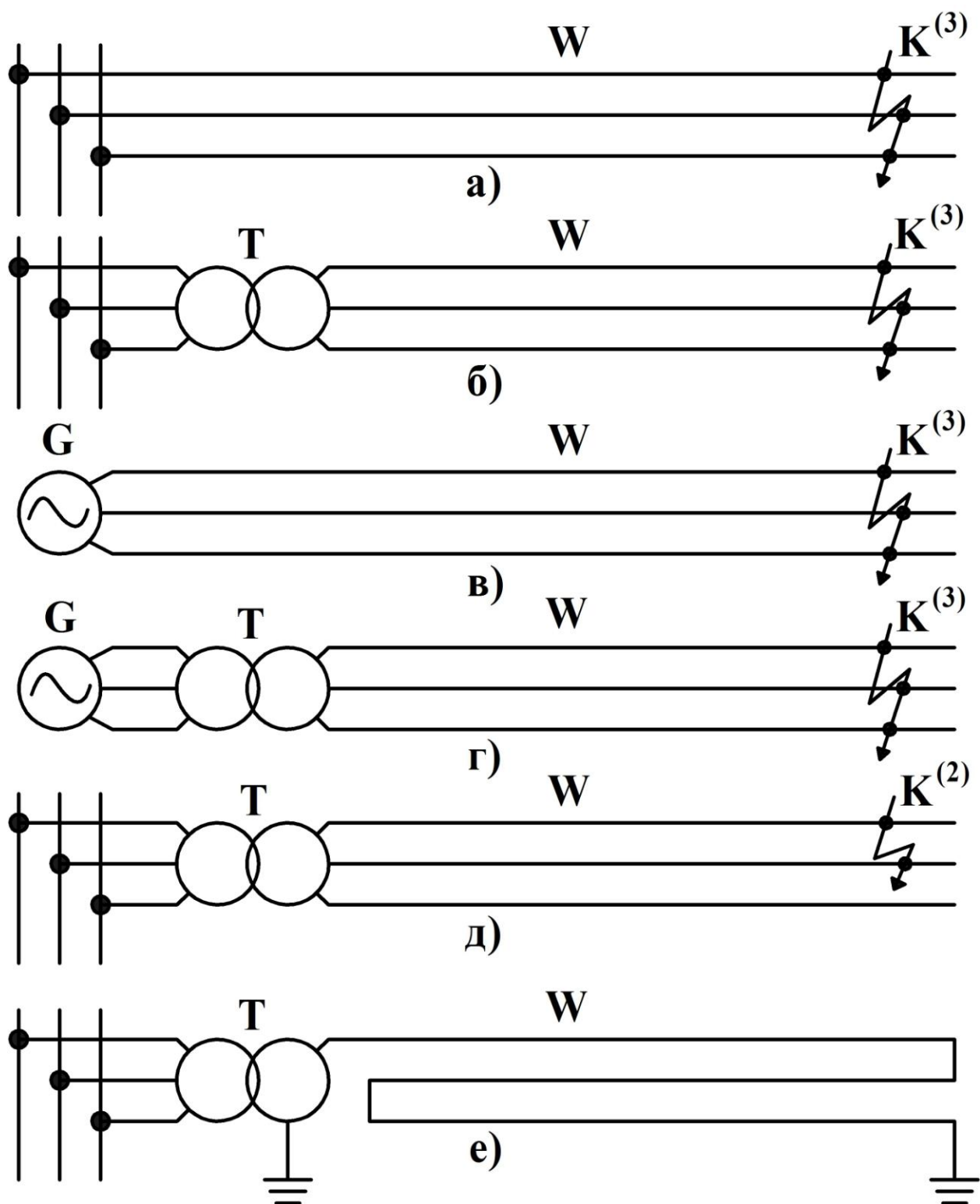


Рисунок 7 - Схемы плавки гололеда способом короткого замыкания

- а) Подключение ВЛ к шинам системы;
- б) Подключение ВЛ через силовой трансформатор;
- в) Подключение ВЛ к выделенному генератору;
- г) Подключение ВЛ к выделенному блоку генератор-трансформатор;
- д) Двухфазное короткое замыкание  $K^{(2)}$ ;

е) Однофазное короткое замыкание при последовательном соединении проводов всех фаз — «Змейка»;

«Достоинством плавки гололеда по способу короткого замыкания является простота схемы и минимальное количество оперативных переключений. Следовательно, не требуется значительных затрат времени на сборку и разборку схемы плавки» [1, с. 104].

«Метод трехфазного короткого замыкания является простым и удобным, поскольку плавка гололеда производится сразу на всех фазах. При применении способа двухфазного короткого замыкания плавку гололеда на линии следует производить сначала на двух фазах, а затем на третьей в сочетании с одним из освободившихся от гололеда проводов. Схему "змейка" следует применять на коротких линиях, когда имеющиеся напряжения слишком велики для плавки по методу трехфазного короткого замыкания» [2, с. 38].

Когда плавка гололеда производится от шин сети, изменение напряжения очень ограничено, соответственно и длина, на которую возможно эффективно прогреть линию, будет ограничена. В случае выделения для плавки отдельного силового трансформатора, возможна широкая регулировка напряжений. Если для плавки выделен специальный генератор, то это позволяет в широких пределах изменять ток и длину проплавления линии.

#### **1.4.1.2 Плавка гололеда перераспределением нагрузок**

Для проведения плавки гололеда данным способом необходимо провести повышение токовой нагрузки линии путем перераспределения нагрузки одним из следующих способов:

а) повышение нагрузки станций, передающих энергию через обогреваемую линию;

б) повышение нагрузки подстанции, питаемых по обогреваемой линии путем переключений в сети более низкого напряжения;



в) отключение части линий, в результате которого повышается передаваемая мощность по обогреваемой линии [21].

Способ позволяет проводить мероприятия по плавке гололеда с сохранением линии в работе при номинальном напряжении. Однако на практике зачастую не всегда удается произвести повышение токовых нагрузок до необходимого уровня. Часто необходимо производить отключение других линий, что в свою очередь снижает надежность электроснабжения потребителей.

Наибольший эффект данный способ дает если применять его для профилактического подогрева проводов. Поэтому в данном случае важно прогнозирование и мониторинг погодных условий, при которых происходит образование гололеда.

#### **1.4.1.3 Плавка гололеда путем создания искусственного дополнительного потока реактивной мощности**

«В сетях 6(10) кВ сельскохозяйственного назначения, как правило, линии (фидера) выполняются одноцепными с возможностью питания множества потребительских понижающих подстанций от магистрального участка линии при помощи так называемых отпаек (ответвлений), присоединяемых в различных точках этого магистрального участка» [10].

Применяя данный способ плавки, нет необходимости в отключении потребителей, получающих питание по данной линии. Это достигается увеличением тока в линии, путем создания искусственного дополнительного потока реактивной мощности, посредством подключения к концу линии электропередачи источника реактивной мощности (ИРМ). При этом линия из работы не выводится и одновременно с этим производится изменение положения регулятора напряжения трансформатора под нагрузкой на подстанции от которой отходит данная ЛЭП таким образом, чтобы уровень напряжения вдоль магистрали оставался допустимым для электроснабжения питаемых потребителей.

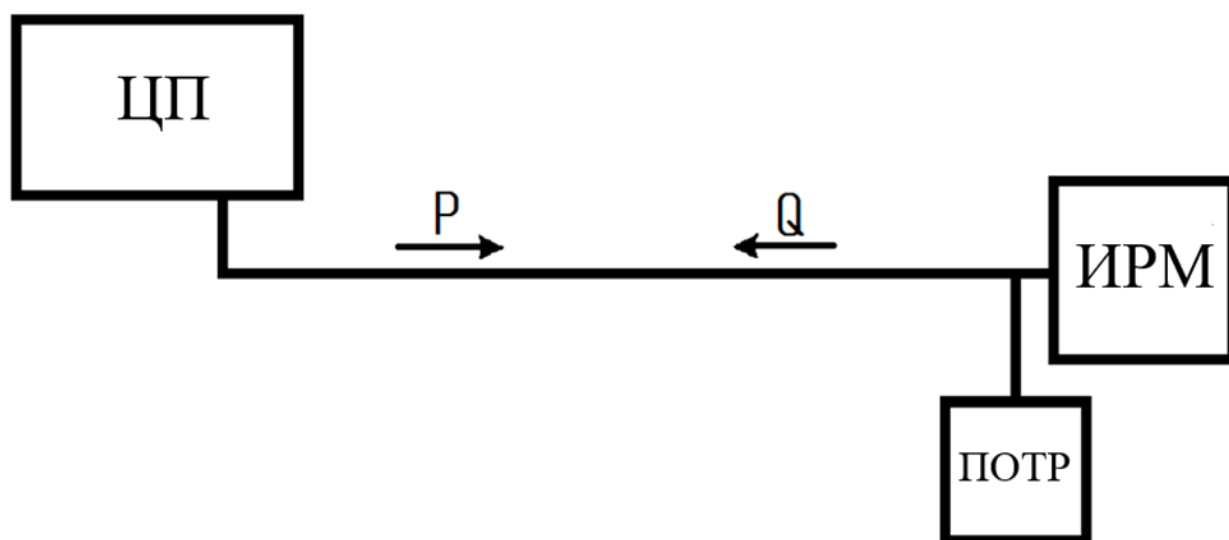


Рисунок 8 – Структурная схема сети

«В качестве ИРМ может выступать регулируемая или нерегулируемая батарея конденсаторов (БК), синхронный компенсатор или синхронный двигатель, статический тиристорный компенсатор. При таком режиме распределение напряжения вдоль линии является более равномерным при одном и том же токе, по сравнению с режимом одинакового направления активной и реактивной мощности» [10]. При этом ИРМ может быть и мобильным. В период ледообразования мобильный ИРМ используется в мероприятиях по плавке гололеда, а в остальное время по своему прямому назначению.

#### **1.4.1.4 Плавка гололеда уравнительными токами**

Работа этого способа основана на изменении фазировки линии электропередачи. При отсутствии тождественности фаз, в линии начинают протекать значительные уравнительные токи, которыми и будет производиться обогрев линии.

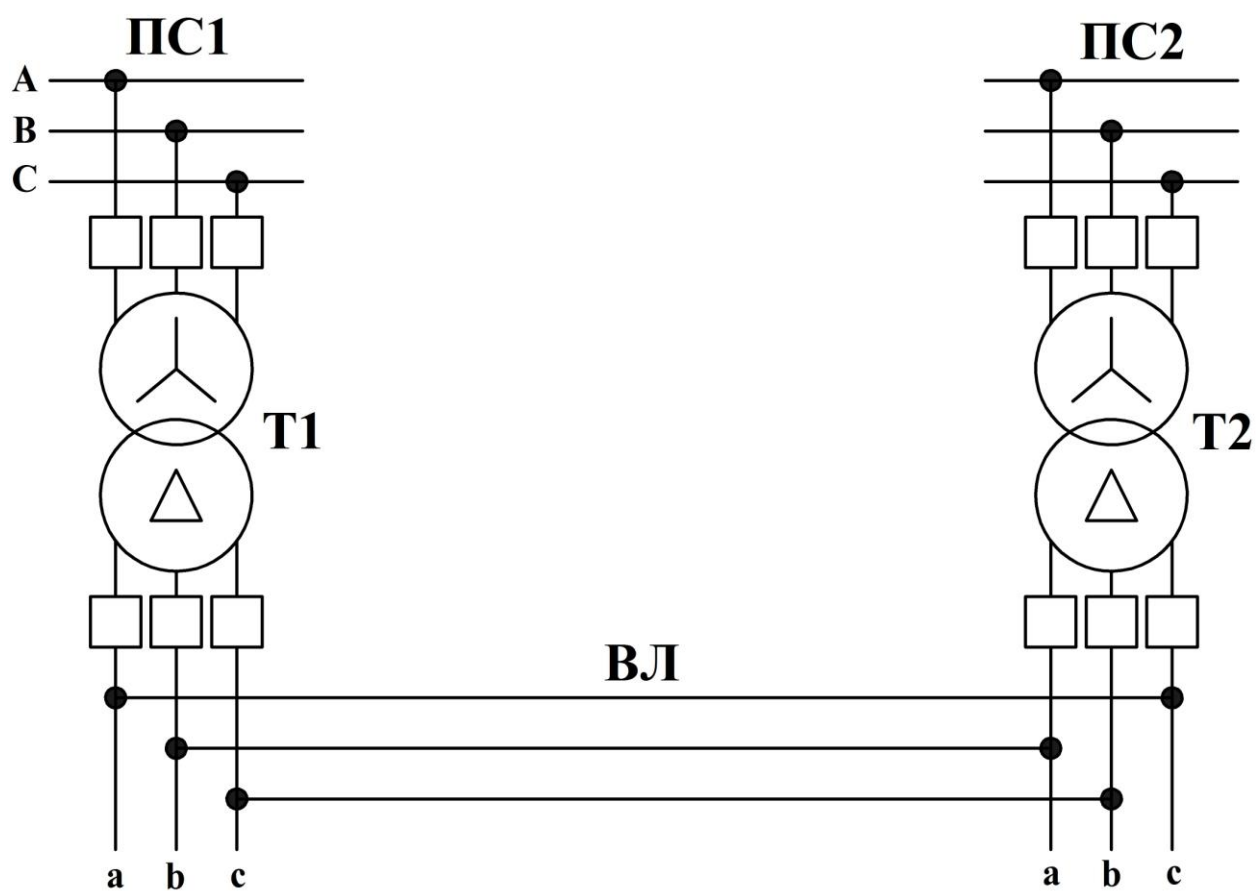
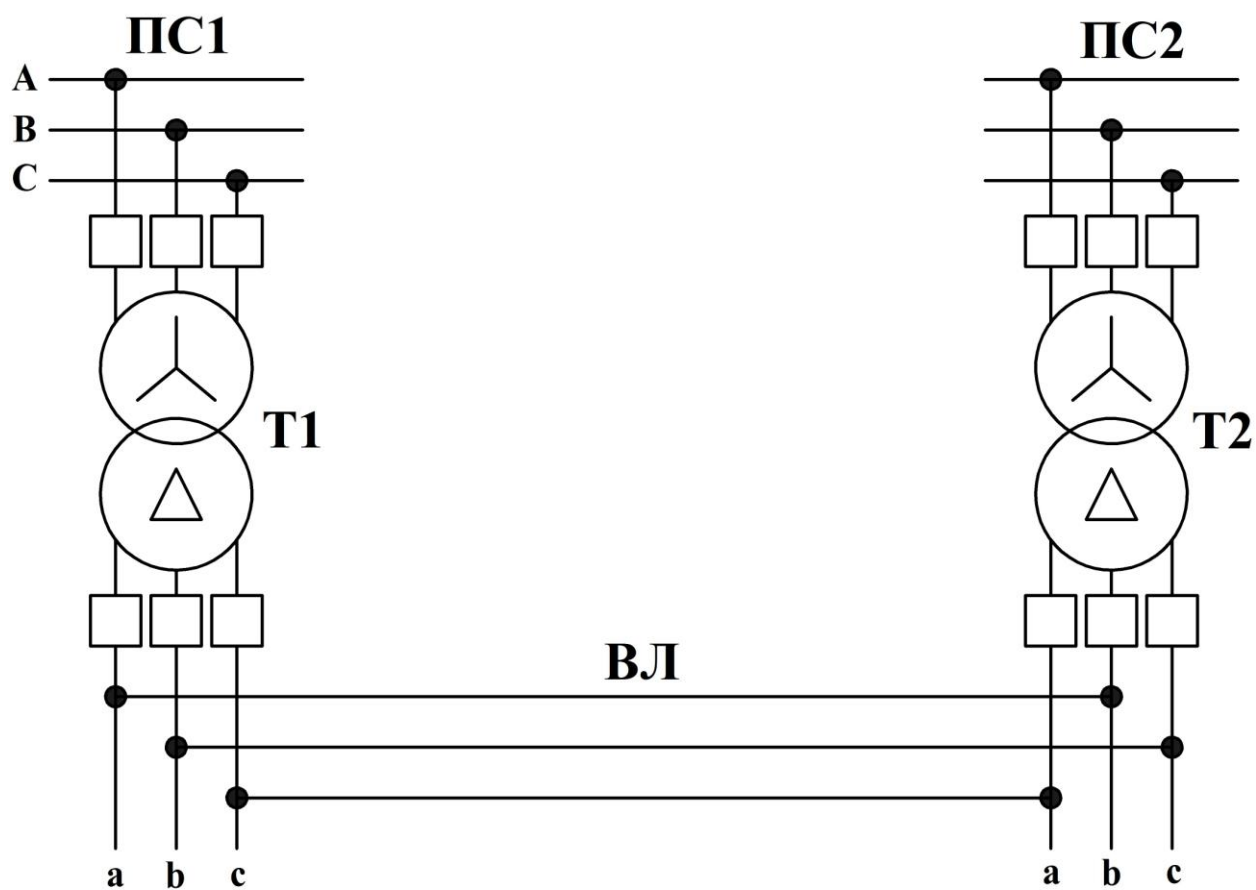


Рисунок 9 - Схема плавки гололеда по способу встречного включения фаз

Плавка способом встречного включения фаз нашла свое применение в кольцевых сетях, при параллельных линиях, а также для линий, расположенных между соседними подстанциями со связью по высокой стороне.

«С целью сохранения питания потребителей, подключенных к обогреваемой линии по всей ее длине, может быть применена схема встречного включения фаз, векторы напряжения которых сдвинуты на 60 эл. град. Для этого в кольцевой сети устанавливается секционирующий выключатель (В5), нормально отключенный» [9]. Линии Л1 и Л2 являются обогреваемыми.

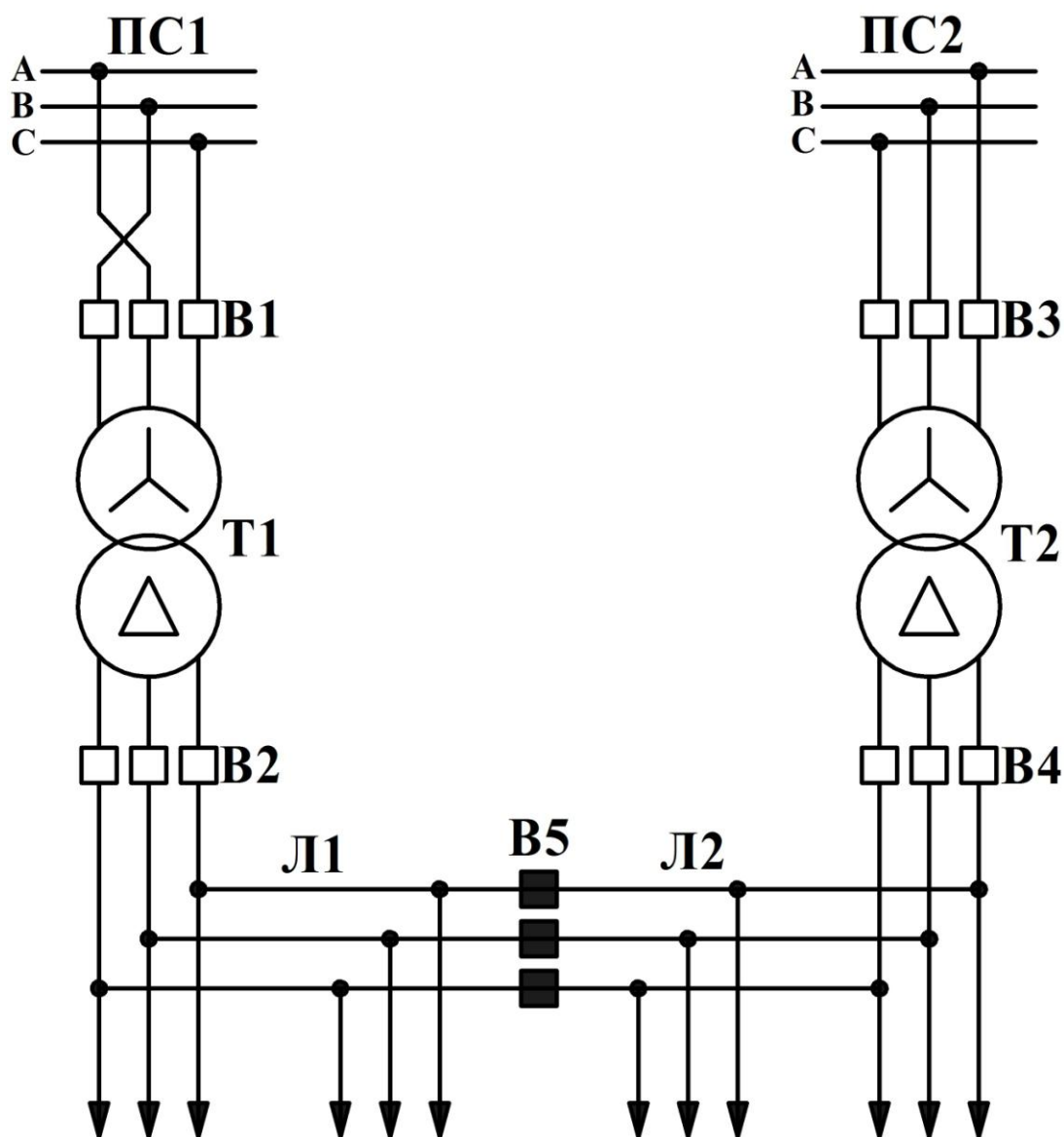


Рисунок 10 - Схема плавки гололеда по способу встречного включения без отключения нагрузки

«В качестве независимых источников питания могут использоваться либо шины разных подстанций, либо разные секции или системы шин одной» [9]. Выключатель В5 включается при проведении мероприятий по плавке гололеда.

#### 1.4.1.5 Плавка гололеда наложением токов

«При этом способе на рабочий ток накладывается дополнительный ток, создаваемый в контуре, частью которого является обогреваемая линия. Для этого в контур включается источник ЭДС, значение и фаза которой подбирается таким образом, чтобы увеличить ток до требуемого значения» [9].

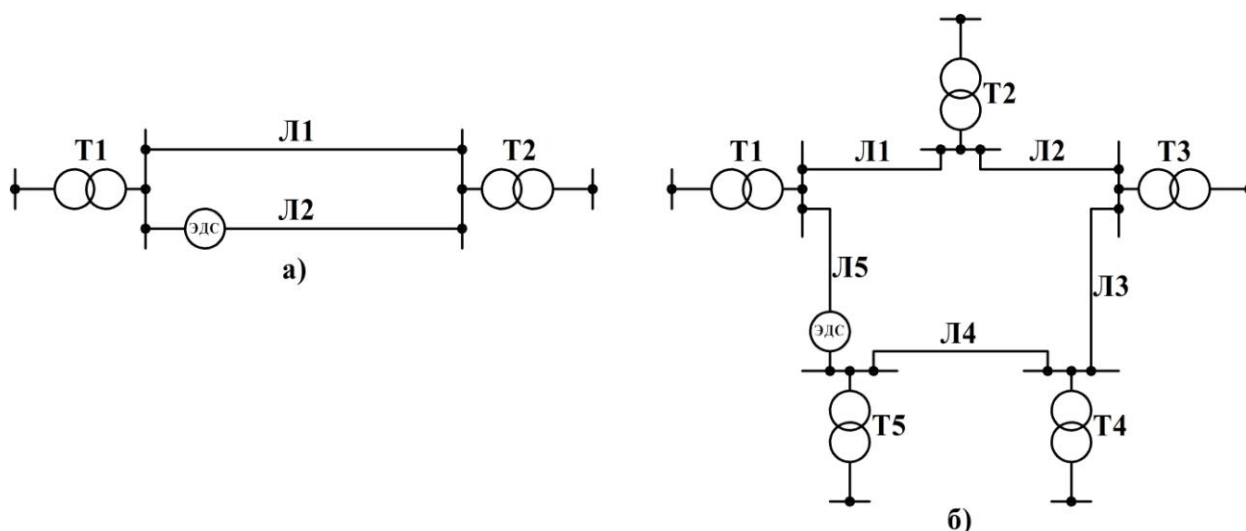


Рисунок 11 - Схемы плавки гололеда по способу включения ЭДС в контур:

а - при параллельных линиях; б – при кольцевой сети

Схемы плавки наложением тока нашли свое применение в кольцевых сетях и при параллельных линиях. Источником ЭДС может служить вольтдобавочный трансформатор. Включая ВДТ в рассечку кольца, имеется возможность производить регулировку поперечной и продольной ЭДС, создавая оптимальные условия плавки.

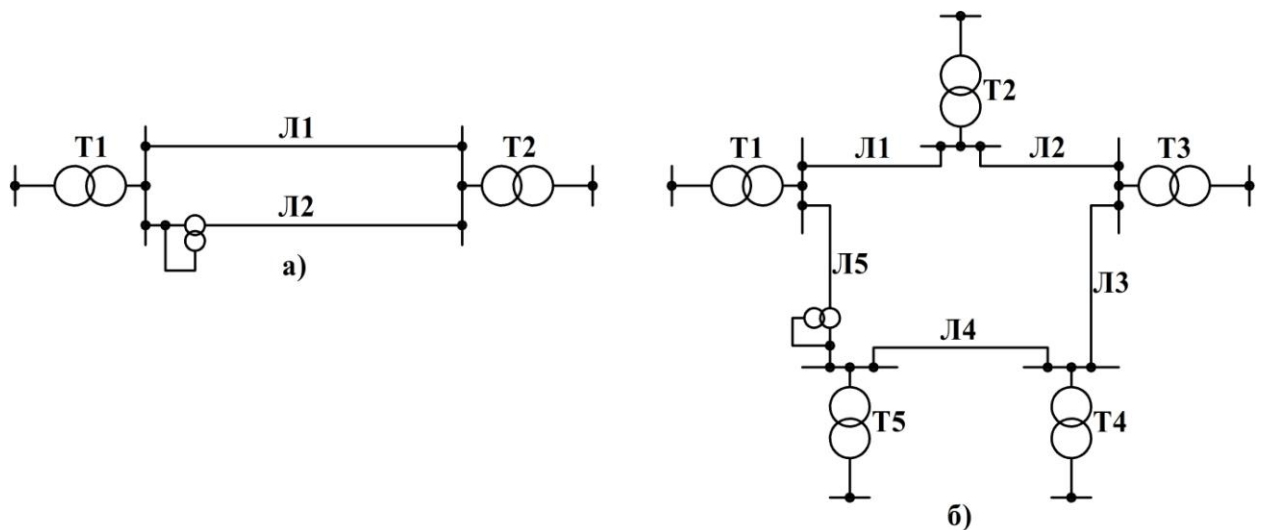


Рисунок 12 - Включение вольтодобавочного трансформатора в рассечку:  
 а - при параллельных линиях; б – при кольцевой сети

Негативным моментом является возникновение несимметрии напряжения и как следствие изменение токов нагрузки в фазах.

«Пофазная плавка токами наложения может применяться в сетях, работающих с незаземленной нейтралью. При использовании схем с пофазной плавкой гололеда необходимо проверить электромагнитное влияние на каналы связи» [9].

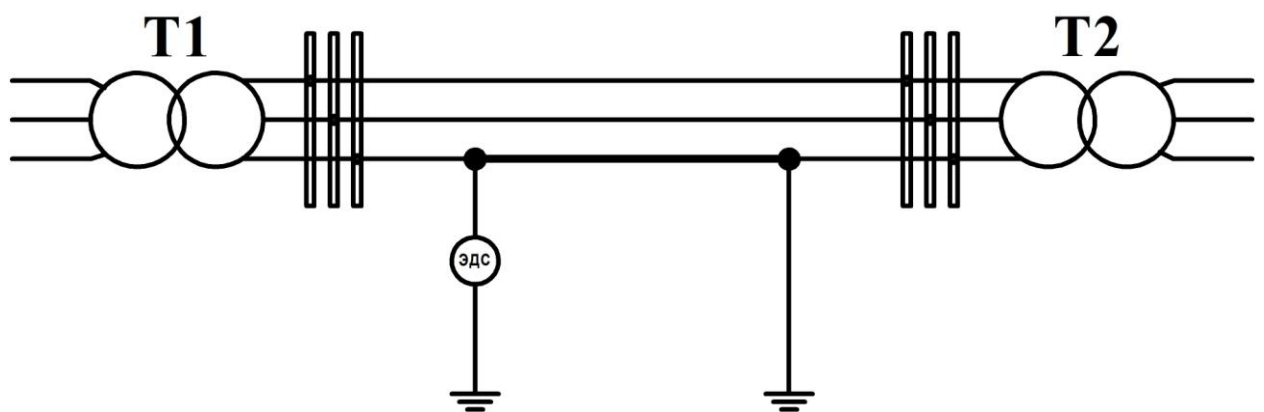


Рисунок 13 - Схема пофазной плавки токами наложения

«Ток наложения складывается с рабочим током линии геометрически. Подбирая угол вектора дополнительного напряжения, возможно, обеспечить близкое совпадение по фазе тока наложения и рабочего тока. Для повышения



эффективности плавки гололеда способ наложения токов можно сочетать с перераспределением нагрузок» [2, с. 44].

#### **1.4.2 Плавка постоянным током**

На протяженных линиях высокого и сверхвысокого напряжения с большим сечением проводов зачастую плавку гололеда осуществляют постоянным током.

Выбор подходящей схемы плавки гололеда производится исходя из параметров воздушной линии электропередачи, источника питания и электрической сети.

Так как установка плавки гололеда (УПГ) имеет высокую стоимость и сложна в эксплуатации, то применение схем плавки гололеда постоянным током, в сетях напряжением 6-10 кВ, зачастую не целесообразно.

#### **1.5 Выводы по первому разделу**

Проанализированы факторы, оказывающие влияние на образование отложений. К таким факторам относятся: температура воздуха, скорость ветра, параметры воздушной линии и др. Дан краткий, общий анализ методов борьбы с ледообразованием на воздушных линиях.

## **2 Сети 6-10 кВ и мероприятия по плавке гололеда**

### **2.1 Характеристика сетей напряжением 6-10 кВ**

«Электрическая сеть – совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии, состоящая из подстанций, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории» [3].

Начиная с 50-х годов прошлого века, велась усиленная электрификация сельского хозяйства СССР. «Массовое строительство электрических сетей за период 1960 — 1985 гг. позволило электрифицировать практически всех сельских потребителей. Почти все они обеспечены централизованным электроснабжением от энергосистем. Лишь незначительное количество мелких удаленных от сетей энергосистем потребителей снабжается электроэнергией от изолированных, мелких, в основном дизельных электростанций. Достигнутый уровень централизованного электроснабжения позволил довести годовое потребление электроэнергии сельским хозяйством в течение последнего десятилетия до 5—7 % общего электропотребления по стране» [12, с. 191].

Наиболее распространенными потребителями электрической энергии в сельской местности являются сельхоз потребители. Электрические нагрузки сетей создаются электроприемниками производственного и коммунально-бытового назначения. Электроприемники производственного назначения связаны с электрификацией технологических процессов в животноводстве и растениеводстве, производственных процессов на предприятиях по переработке продукции сельского хозяйства, ремонтных мастерских, а коммунально-бытового назначения — с электрификацией жилых и общественных зданий и сооружений.

Главной особенностью электрических сетей, проходящих в сельской местности, в первую очередь распределительных сетей напряжением 6—10

кВ, является их разветвленность и значительная протяженность магистральных участков линий электропередачи, обусловленная ограниченностью количества центров питания и необходимостью электроснабжения каждого населенного пункта. К каждой линии 6—10 кВ подключены, как правило, несколько, трансформаторных подстанций 6—10/0,4 кВ.

Еще одна особенность связана с тем, что электроснабжение сельскохозяйственных потребителей осуществляется в большинстве своем по воздушным ЛЭП. При этом, зачастую, отсутствуют хорошие подъездные пути и проезды вдоль трасс.

«На первом этапе электрификации, когда электроэнергия использовалась, главным образом, для освещения и привода некоторых вспомогательных процессов, большинство сельскохозяйственных потребителей по требованиям надежности относились к 3-й категории. По мере электрификации технологических процессов эти требования повышались» [12, с. 191].

Сейчас же, на современных сельскохозяйственных предприятиях находят применение новые потребители электрической энергии. Тем самым возрастает роль электроэнергии в сельском хозяйстве и становится значимым повышение надежности электроснабжения потребителей.

## **2.2 Характеристика воздушных линий электропередачи напряжением 6-10 кВ**

«Воздушная линия электропередачи выше 1 кВ – устройство для передачи электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным при помощи изолирующих конструкций и арматуры к опорам, несущим конструкциям, кронштейнам и стойкам на инженерных сооружениях (мостах, путепроводах и т.п.)» [3].

«Воздушные ЛЭП сооружаются и эксплуатируются в самых разнообразных климатических условиях и географических районах, подвержены атмосферному воздействию (ветер, гололед, дождь, изменение температуры). В связи с этим ВЛ должны сооружаться с учетом атмосферных явлений, загрязнения воздуха, условий прокладки (слабозаселенная местность, территория города, предприятия) и др.» [15, с. 22].

Воздушные линии электропередачи 6-10 кВ наиболее распространены в небольших городах и в сельской местности. Это связано с тем, что стоимость их сооружения по сравнению с кабельными линиями намного меньше, также в небольших городах и в сельской местности меньшая плотность застройки и т.д.

Основными элементами воздушных линий 6-10 кВ являются:

- опоры – поддерживают провода на определенной высоте над уровнем земли;
- провода – служат для передачи электроэнергии;
- изоляторы – изолируют провода от опоры;
- линейная арматура – необходима в основном для крепления элементов друг к другу.

На ВЛЭП применяют неизолированные (голые) одно- и многопроволочные сталеалюминевые или алюминиевые провода. В сталеалюминевых проводах, внутренний стальной провод обеспечивает необходимую механическую прочность. В исключительных случаях, при соответствующем технико-экономическом обосновании, применяются медные провода. На реконструируемых и вновь строящихся линиях применяют самонесущие изолированные провода (СИП).

«Сечения проводов нормированы государственным стандартом» [13, с. 27].

Провода подвешиваются на деревянных, от применения которых сейчас отходят, или железобетонных опорах. Железные опоры на напряжение 6-10 кВ применения не нашли, вследствие своей дороговизны.

«Древесина – наиболее дешевый материал для изготовления опор, но она подвержена гниению. Для увеличения срока службы деревянных опор их пропитывают антисептиками. Срок службы таких опор – до 20 лет» [13, с. 29].

«Использование изоляционных свойств древесины позволяет снизить число изоляторов и отказаться от грозозащитного троса. Кроме того, при необходимости допускается совместная подвеска линий 6-10 кВ и уличного освещения» [14, с. 21].

«Железобетонные опоры не подвергаются гниению и коррозии и просты в эксплуатации. Однако в стволах бетонных опор возможно появление глубоких трещин, которые могут дойти до железной арматуры, что приведет к усилению нагрузок на арматуру, ее коррозии и снижению механической прочности опор. Срок службы железобетонных опор – 30 лет» [13, с. 29].

Существуют следующие виды опор: промежуточные, анкерные, концевые и угловые. «По конструктивному исполнению опоры делятся на свободностоящие и на оттяжках с шарнирным креплением к фундаменту. Усиливающие конструкции опоры, оттяжки, могут быть и у свободностоящих опор. Могут применяться подкосы» [14, с. 38].

«Изоляторы предназначены для крепления проводов к опорам и создания необходимого промежутка между проводами, находящимися под напряжением и опорой. Линейные изоляторы изготавливаются из фарфора и стекла. В начале 2000-х годов стали широко применяться полимерные (композитные) изоляторы» [13, с. 30]. Также как и опоры, изоляторы имеют деление по конструктивному признаку. Они изготавливаются подвесными и штыревыми.

«Арматура применяется на строительстве воздушных линий электропередачи, открытых распределительных устройств подстанции. Она используется для комплектования изолирующих подвесок проводов и грозозащитных тросов, соединений проводов и тросов в пролетах и шлейфах, присоединения проводов к выводам электрических аппаратов, фиксирования расщепленных проводов в фазах, защиты проводов от воздействия вибрации и других колебаний» [14, с. 96].

### **2.3 Обоснование необходимости проведения мероприятий по плавке гололеда**

Объект исследования располагается в Самарской области, в Челно-Вершинском районе. Это линия электропередачи напряжением 10 кВ. Воздушная линия выполнена проводом марки АС 50/8.0. Линия располагается в третьем районе по толщине стенки гололеда и по ветровому давлению (рисунок 14 и 15).



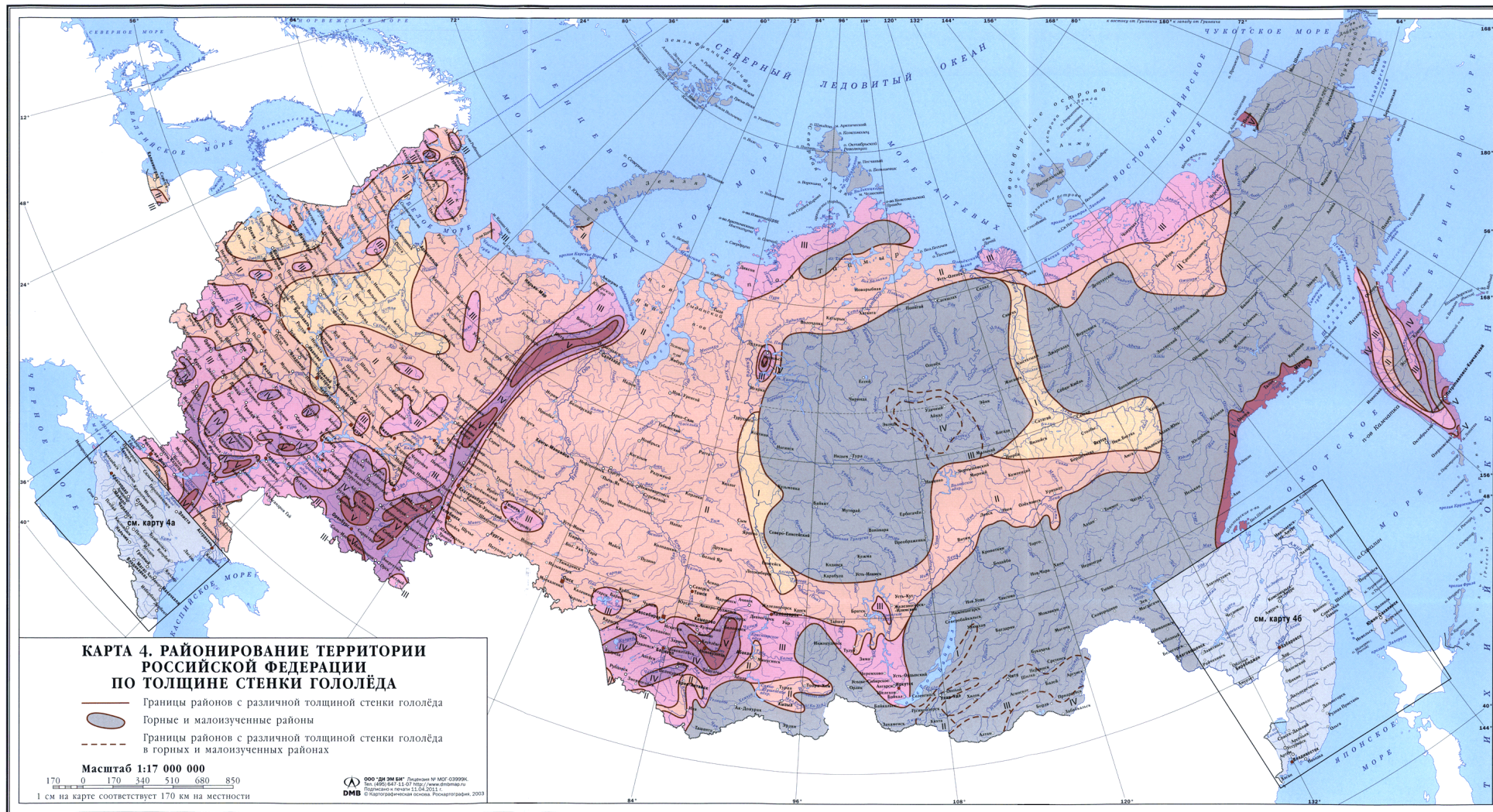


Рисунок 14 – Районирование территории Российской Федерации по толщине стенки гололеда



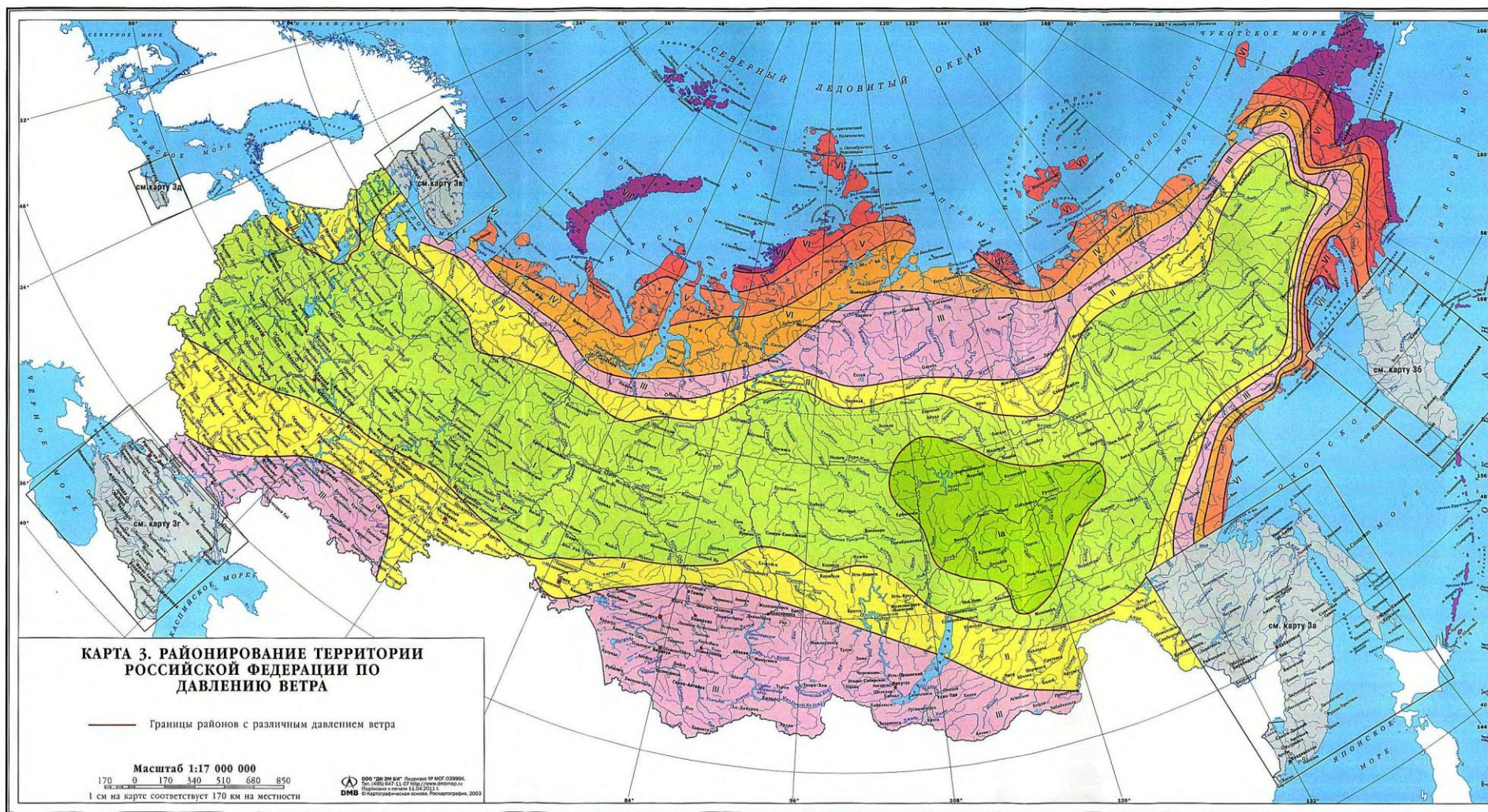


Рисунок 15 – Районирование территории Российской Федерации по давлению ветра



Проведем обоснование необходимости проведения мероприятий по плавке гололеда. Для этого определим механические напряжения провода воздушной линии 10 кВ при расчетных условиях и соответствующих удельных нагрузках.

Сведем данные для провода марки АС 50/8.0 в таблицу 3.

Таблица 3 - Данные провода АС 50/8.0

Коэффициент	Значение	Примечание
Расчетное сечение всего провода $F_{\text{п}}, \text{мм}^2$	56,29	Из [17]
Расчетный диаметр провода $d_{\text{пр}}, \text{мм}$	9,6	Из [17]
Масса провода $M_0, \text{кг/км}$	194	Из [17]

Определим отношение площадей поперечных сечений:

$$\frac{A}{C} = \frac{48,25}{8,04} = 11,94$$

В ПУЭ прописано, что допустимое напряжение при наибольшей нагрузке для сталеалюминевых проводов равно  $0,45 \cdot \sigma_p$ . Тогда для провода марки АС 50/8.0:

$$0,45 \cdot \sigma_p = 0,45 \cdot 240 = 108 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$$

где  $\sigma_p = 240 \text{ Н/мм}^2$  - предел прочности при растяжении, из [3], для отношения площадей поперечных сечений величиной 11,94.

Найдем высоту расположения проводов.

$$h_{np} = h_{cp} - \frac{2}{3} f_{np(+)} \quad (1)$$

Определим среднеарифметическое значение высоты крепления проводов к изоляторам:

$$h_{cp} = \frac{8,85 + 8,25 + 8,25}{3} = 8,45 \text{ м}$$

Рассчитаем длину провода в пролете при  $\vartheta_1 = +20^\circ\text{C}$ :

$$L = l + \frac{8 \cdot f_{np(+20)}^2}{3 \cdot l} \quad (2)$$

$$L = 66 + \frac{8 \cdot 1,23}{3 \cdot 66} = 66,05 \text{ м}$$

То же сделаем для высшей температуры  $\vartheta_+ = +40^\circ\text{C}$ :

$$L_+ = L \cdot (1 + \alpha(\vartheta_+ - \vartheta_1)) \quad (3)$$

$$L_+ = 66,05 \cdot (1 + 21 \cdot 10^{-6} \cdot (40 - 20)) = 66,08 \text{ м}$$

где  $\alpha = 21 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> - температурный коэффициент линейного удлинения, из [3], для отношения площадей поперечных сечений величиной 11,94.

Найдем величину искомой стрелы провеса:

$$f_{np(+)} = \sqrt{\frac{3 \cdot l \cdot (L_+ - l)}{8}} \quad (4)$$

$$f_{np(+)} = \sqrt{\frac{3 \cdot 66 \cdot (66,08 - 66)}{8}} = 1,41 \text{ м}$$

Подставим полученные выше значения в формулу (1):

$$h_{np} = 8,45 - \frac{2}{3} \cdot 1,41 = 7,51 \text{ м}$$

Далее перейдем к определению расчетных климатических нагрузок при расчетных условиях.

Вычислим расчётную линейную гололедную нагрузку в расчете на один метр провода.

$$P_{Г.П} = P_{Г}^H \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d \quad (5)$$

Величина нормативной линейной гололедной нагрузки в расчете на один метр провода определяется по формуле.

$$P_{Г}^H = \pi \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_{\text{э}} \cdot (d_{np} + K_i \cdot K_d \cdot b_{\text{э}}) \cdot \rho_{\text{э}} \cdot g \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Численные значения коэффициентов для формул (5) и (6) взяты из ПУЭ. Для удобства сведем их в таблицу 4.

Таблица 4 - Значения расчетных коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
$K_i$	1,0	При $h_{np} = 7,51 \text{ м}$
$K_d$	1,0	При $d_{np} = 9,6 \text{ мм}$
Нормативная толщина стенки гололеда $b_{\text{э}}$ , мм	20	Для III-го района по гололеду
Плотность льда $\rho_{\text{э}}$ , г/см <sup>3</sup>	0,9	По нормативным условиям
Ускорение свободного падения $g$ , м/с <sup>2</sup>	9,81	-

Продолжение таблицы 4

$\gamma_{nw}$	1,0	Для ВЛ 10 кВ
$\gamma_p$	1,0	На основании опыта эксплуатации
$\gamma_f$	1,6	Для III-го района по гололеду
$\gamma_d$	0,5	На основании условий работы

Подставим коэффициенты в формулы (5) и (6):

$$P_{\Gamma}^H = \pi \cdot 1 \cdot 1 \cdot 20 \cdot (9,6 + 1 \cdot 1 \cdot 20) \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} = 16,42 \frac{H}{м}$$

$$P_{\Gamma.П} = 16,42 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot 0,5 = 13,14 \frac{H}{м}$$

Вычислим расчётную ветровую нагрузку без гололеда в расчете на один метр провода.

$$\frac{P_{W0.П}}{l_{\text{см}}} = \frac{P_{W0}^H}{l_{\text{см}}} \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \quad (7)$$

Величина нормативной ветровой нагрузки без гололеда определяется по формуле.

$$\frac{P_{W0}^H}{l_{\text{см}}} = \alpha_w \cdot K_l \cdot K_w \cdot C_x \cdot W_0 \cdot (d_{np} + 2 \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_э) \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Численные значения коэффициентов для формул (7) и (8) взяты из ПУЭ. Для удобства сведём их в таблицу 5.

Таблица 5 - Значения расчетных коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
$\alpha_w$	0,7	Для III-го района по ветровому давлению
$K_l$	1,168	Для длины пролета 66 м
$K_w$	1,0	При $h_{пр} = 7,51$ м и местности типа А
$C_x$	1,2	Для провода диаметром меньше 20 мм
Нормативное ветровое давление $W_0$ , Па	650	Для III-го района по ветровому давлению
$\gamma_{nw}$	1,0	Для ВЛ 10 кВ
$\gamma_p$	1,0	На основании опыта эксплуатации
$\gamma_f$	1,1	На основании надежности по ветровой нагрузке

Величина нормативной толщины стенки гололеда  $b_э = 0$ , т.к. в данном случае расчет производится для линии без гололеда.

Подставим коэффициенты в формулы (7) и (8):

$$\frac{P_{W0}^H}{l_{эм}} = 0,7 \cdot 1,168 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 650 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 6,12 \frac{H}{м}$$

$$\frac{P_{W0.П}}{l_{эм}} = 6,12 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 6,73 \frac{H}{м}$$

Теперь необходимо вычислить расчётную ветровую нагрузку с гололедом в расчете на один метр провода.

$$\frac{P_{\text{вГ.П}}}{l_{\text{вГ}}} = \frac{P_{\text{вГ}}^H}{l_{\text{вГ}}} \cdot \gamma_{\text{нв}} \cdot \gamma_{\text{р}} \cdot \gamma_{\text{ф}} \quad (9)$$

Величина нормативной ветровой нагрузки с гололедом определяется по формуле.

$$\frac{P_{\text{вГ}}^H}{l_{\text{вГ}}} = \alpha_{\text{в}} \cdot K_l \cdot K_w \cdot C_x \cdot W_{\text{Г}} \cdot (d_{\text{нр}} + 2 \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_{\text{э}}) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Численные значения коэффициентов для формул (9) и (10) взяты из ПУЭ. Для удобства сведем их в таблицу 6.

Таблица 6 - Значения расчетных коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
$\alpha_{\text{в}}$	1,0	Для ветрового давления при гололеде
$K_l$	1,168	Для длины пролета 66 м
$K_w$	1,0	При $h_{\text{нр}} = 7,51$ м и местности типа А
$C_x$	1,2	Для всех проводов покрытых гололедом
Ветровое давление при гололеде $W_{\text{Г}}$ , Па	200	Для ВЛ напряжением до 20 кВ
Нормативная толщина стенки гололеда $b_{\text{э}}$ , мм	20	Для III-го района по гололеду
$K_i$	1,0	При $h_{\text{нр}} = 7,51$ м
$K_d$	1,0	При $d_{\text{нр}} = 9,6$ мм
$\gamma_{\text{нв}}$	1,0	Для ВЛ 10 кВ
$\gamma_{\text{р}}$	1,0	На основании опыта эксплуатации

Продолжение таблицы 6

$\gamma_f$	1,1	На основании надежности по ветровой нагрузке
------------	-----	--

Подставим коэффициенты в формулы (9) и (10):

$$\frac{P_{WT}^H}{l_{em}} = 1 \cdot 1,168 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 200 \cdot (9,6 + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 20) \cdot 10^{-3} = 13,91 \frac{H}{м}$$

$$\frac{P_{WT.П}}{l_{em}} = 13,91 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 = 15,3 \frac{H}{м}$$

Определим удельные нагрузки при расчетных условиях.

1. От собственной массы провода:

$$\gamma_1 = \frac{9,81 \cdot M_0 \cdot 10^{-3}}{F_{II}} \quad (11)$$

$$\gamma_1 = \frac{9,81 \cdot 194 \cdot 10^{-3}}{56,29} = 0,0338 \frac{H}{(м \cdot мм^2)}$$

2. От собственной массы провода и гололеда:

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \frac{P_{Г.П}}{F_{II}} \quad (12)$$

$$\gamma_3 = 0,0326 + \frac{13,14}{56,29} = 0,267 \frac{H}{(м \cdot мм^2)}$$

3. От массы провода и давления ветра без гололеда:

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \left( \frac{P_{W0.П}}{l_{эм} \cdot F_{II}} \right)^2} \quad (13)$$

$$\gamma_6 = \sqrt{0,0338^2 + \left( \frac{6,73}{56,29} \right)^2} = 0,124 \frac{H}{(м \cdot мм^2)}$$

4. От массы провода, гололеда и давления ветра при гололеде:

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \left( \frac{P_{WГ.П}}{l_{эм} \cdot F_{II}} \right)^2} \quad (14)$$

$$\gamma_7 = \sqrt{0,267^2 + \left( \frac{15,3}{56,29} \right)^2} = 0,381 \frac{H}{(м \cdot мм^2)}$$

Рассчитаем механические напряжения провода при расчетных условиях.

Найдем напряжение в проводе при стреле провеса  $f_{пр(+20)} = 1,23$  м и величине удельной нагрузки равной  $\gamma_1 = 0,0338$  Н/(м·мм<sup>2</sup>):

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot l^2}{8 \cdot f_{пр(+20)}} \quad (15)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,0338 \cdot 66^2}{8 \cdot 1,23} = 14,96 \frac{H}{мм^2}$$

Рассчитаем напряжение в проводе при наибольшей удельной нагрузке  $\gamma_7 = 0,381$  Н/(м·мм<sup>2</sup>) и температуре  $\vartheta_7 = -5$  °С.

Для этого необходимо решить уравнение состояния провода, которое записывается так:

$$\sigma_n^3 - A\sigma_n^2 - B = 0 \quad (16)$$



Определим коэффициенты А и В:

$$A = \sigma_1 - E \frac{\gamma_1^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_1^2} + \alpha \cdot E \cdot (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_7) \quad (17)$$

$$B = \frac{E \cdot \gamma_n^2 \cdot l^2}{24} \quad (18)$$

где  $E = 7,45 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup> - модуль упругости, из [3], для отношения площадей поперечных сечений величиной 11,94.

Подставив все данные в формулы (17) и (18), получим:

$$A = 14,96 - 7,45 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,0338^2 \cdot 66^2}{24 \cdot 14,96^2} + 21 \cdot 10^{-6} \cdot 7,45 \cdot 10^4 \cdot (20 + 5) = -14,95$$

$$B = \frac{7,45 \cdot 10^4 \cdot 0,381^2 \cdot 66^2}{24} = 47,11 \cdot 10^6$$

Определим напряжение в проводе, решив уравнение состояния:

$$\sigma_n = \sqrt[3]{\left(\frac{A}{3}\right)^3 + \frac{B}{2} + \sqrt{\left(\frac{A}{3}\right)^3 \cdot B + \left(\frac{B}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\left(\frac{A}{3}\right)^3 + \frac{B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A}{3}\right)^3 \cdot B + \left(\frac{B}{2}\right)^2}} + \frac{A}{3} \quad (19)$$

$$\sigma_7 = \sqrt[3]{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 + \frac{47,11 \cdot 10^6}{2} + \sqrt{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 \cdot 47,11 \cdot 10^6 + \left(\frac{47,11 \cdot 10^6}{2}\right)^2}} +$$

$$+ \sqrt[3]{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 + \frac{47,11 \cdot 10^6}{2} - \sqrt{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 \cdot 47,11 \cdot 10^6 + \left(\frac{47,11 \cdot 10^6}{2}\right)^2}} + \frac{-14,95}{3} =$$

$$= 356,47 \frac{H}{мм^2}$$

Найденное значение  $\sigma_7 = 356,47$  Н/мм<sup>2</sup> превышает предельно допустимое значение для АС 50/8.0 равное 108 Н/мм<sup>2</sup>. Это значит, что

необходимо проводить своевременную плавку гололеда, для снижения аварийности на рассматриваемой воздушной линии электропередачи, тем самым повышая надежность электроснабжения потребителей.

Далее рассчитаем напряжение от массы провода и давления ветра без гололеда при удельной нагрузке  $\gamma_6 = 0,124 \text{ Н}/(\text{м}\cdot\text{мм}^2)$  и температуре  $\vartheta_7 = -5$  °С. Для этого снова решим уравнение состояния провода (16).

Величина коэффициента А будет такой же, как и в первом случае, т.е.  $A = -14,95$ .

Определим величину коэффициента В, используя формулу (18):

$$B = \frac{7,45 \cdot 10^4 \cdot 0,124^2 \cdot 66^2}{24} = 20,79 \cdot 10^4$$

Определим напряжение в проводе, решив уравнение состояния (19):

$$\begin{aligned} \sigma_6 = & \sqrt[3]{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 + \frac{20,79 \cdot 10^4}{2} + \sqrt{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 \cdot 20,79 \cdot 10^4 + \left(\frac{20,79 \cdot 10^4}{2}\right)^2}} + \\ & + \sqrt[3]{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 + \frac{20,79 \cdot 10^4}{2} - \sqrt{\left(\frac{-14,95}{3}\right)^3 \cdot 20,79 \cdot 10^4 + \left(\frac{20,79 \cdot 10^4}{2}\right)^2}} + \frac{-14,95}{3} = \\ & = 55,86 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \end{aligned}$$

$\sigma_6$  (без гололеда) меньше допустимого механического напряжения, равного  $108 \text{ Н}/\text{мм}^2$ , а  $\sigma_3$  и  $\sigma_7$  (с гололедом) превышают максимально допустимое значение. Следовательно, если своевременно производить плавку гололеда на данной линии, то можно избежать недопустимого напряжения провода АС 50/8.0 и как следствие аварий из-за повышенного обледенения линии.

Также необходимо определить предельно допустимую толщину стенки гололеда. Это необходимо для того, чтобы своевременно проводить мероприятия по плавке гололеда, тем самым не допускать критических напряжений в проводах и как следствие, сокращать количество аварий, связанных с ледообразованием на воздушных линиях электропередачи. Для этого необходимо предварительно вычислить допустимую удельную нагрузку  $\gamma_{доп}$ , которая определяется по уравнению состояния (16).

Величина коэффициента А будет такой же, как и в предыдущем расчете, т.е.  $A = -14,95$ .

Определим величину коэффициента В, используя формулу (18):

$$B = \frac{7,45 \cdot 10^4 \cdot \gamma_{доп}^2 \cdot 66^2}{24} = 13,52 \cdot 10^6 \cdot \gamma_{доп}^2$$

Вычислим значение  $\gamma_{доп}$ , выразив ее из формулы (16):

$$\gamma_{доп} = \sqrt{\frac{108^3 + 14,95 \cdot 108^2}{13,52 \cdot 10^{-6}}} = 0,326$$

Найдем допустимую линейную гололедную нагрузку без ветра и допустимую нормативную линейную гололедную нагрузку.

$$P_{Г.П.,доп} = (\gamma_{доп} - \gamma_1) F_{II} \quad (20)$$

$$P_{Г.,доп}^H = \frac{P_{Г.П.,доп}}{\gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d} \quad (21)$$

Численные значения коэффициентов для формулы (21) взяты из таблицы 4.

$$P_{Г.П,доп} = (0,326 - 0,0338) \cdot 56,29 = 16,45 \frac{H}{м}$$

$$P_{Г,доп}^H = \frac{16,45}{1 \cdot 1,6 \cdot 0,5} = 20,56 \frac{H}{м}$$

Вычислим предельно допустимую толщину стенки гололеда на проводе, но без учета ветрового давления:

$$b_{Г,доп} = -\frac{d_{np}}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{np}}{2}\right)^2 + \frac{P_{Г,доп}^H \cdot 10^3}{\pi \cdot \rho_c \cdot g}} \quad (22)$$

$$b_{Г,доп} = -\frac{9,6}{2} + \sqrt{\left(\frac{9,6}{2}\right)^2 + \frac{20,56 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,9 \cdot 9,81}} = 22,51 \text{ мм}$$

Определим допустимую толщину стенки гололеда на проводе с учетом ветрового давления, выразив искомую величину из выражения, указанного ниже.

$$\gamma_{доп} = \sqrt{\left(\gamma_1 + \frac{P_{Г.П,доп}}{F_{II}}\right)^2 + \left(\frac{P_{WG.П,доп}}{l_{эм} \cdot F_{II}}\right)^2} \quad (23)$$

Запишем выражения для  $\frac{P_{Г.П,доп}}{F_{II}}$  и  $\frac{P_{WG.П,доп}}{l_{эм} \cdot F_{II}}$ .

$$\frac{P_{Г.П,доп}}{F_{II}} = \frac{\pi \cdot b_{Г,доп} \cdot (d_{np} + b_{Г,доп}) \cdot \rho_{Г} \cdot g \cdot 10^{-3} \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d}{F_{II}} \quad (24)$$

$$\frac{P_{WG.П,доп}}{l_{эм} \cdot F_{II}} = \frac{\alpha_w \cdot K_l \cdot K_w \cdot C_x \cdot W_{Г} \cdot (d_{np} + 2 \cdot b_{Г,доп}) \cdot 10^{-3} \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f}{F_{II}} \quad (25)$$

Подставим известные численные значения в вышеуказанные формулы:

$$\frac{P_{Г.П,доп}}{F_{П}} = \frac{\pi \cdot b_{Г.доп} \cdot (9,6 + b_{Г.доп}) \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,6 \cdot 0,5}{56,26} = 0,394 \cdot 10^{-3} \cdot (b_{Г.доп}^2 + 9,6 \cdot b_{Г.доп})$$

$$\frac{P_{вГ.П,доп}}{l_{ем} \cdot F_{П}} = \frac{1 \cdot 1,168 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 200 \cdot (9,6 + 2 \cdot b_{Г.доп}) \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1}{56,29} = 10,96 \cdot 10^{-3} \cdot (b_{Г.доп} + 4,8)$$

Полученные выражения подставим в формулу (23):

$$0,326 = \sqrt{0,0338 + 0,394 \cdot 10^{-3} \cdot (b_{Г.доп}^2 + 9,6 \cdot b_{Г.доп})} + \sqrt{0,96 \cdot 10^{-3} \cdot (b_{Г.доп} + 4,8)}$$

Определим неизвестную величину  $b_{Г.доп}$  посредством инженерного математического программного обеспечения Mathcad. В результате предельно допустимая толщина стенки гололеда на проводе с учетом ветрового давления  $b_{Г.доп} = 16$  мм.

Проводя мероприятия по плавке гололеда, при толщине гололедной муфты на проводе меньше критической, будет обеспечиваться прочность проводника при любом ветре.

## **2.4 Методы борьбы с обледенением в сетях 6-10 кВ проходящих сельской местности**

В первой главе были рассмотрены наиболее часто применяемые методы плавки гололеда.

Исходя из особенностей сетей 6-10 кВ проходящих в сельской местности, необходимо выбрать наиболее приоритетный вариант плавки, отметая варианты, которые не могут быть использованы по тем или иным причинам.

### **1) Механический метод**

Механический метод заключается в том, что для удаления льда с проводов применяются специальные устройства. Самый простой способ механического удаления льда – это его сбивание при помощи шестов. Но

чтобы избавиться от льда данным способом, необходимо задействовать большое количество рабочих и затратить много времени. В большинстве случаев линии 6-10 кВ в сельской местности довольно таки протяжённые, длина линии может составлять десятки километров, а доступ к самой линии затруднен, из-за чего этот метод является нецелесообразным.

## 2) Физико-химический метод

Метод основан на использовании свойств специальных растворов. Данные растворы имеют более низкую температуру замерзания по сравнению с водой. При нанесении на провода эти растворы создают гидрофобный слой, который отталкивает воду, тем самым препятствуя отложению гололеда. По результатам исследований можно сделать вывод, что открыт новый метод борьбы с обледенением проводов ВЛ. Но у данного метода имеется серьезный недостаток, заключающийся в том, что срок действия таких растворов непродолжителен, а регулярно наносить раствор на линии протяженностью даже десятки километров просто непрактично.

## 3) Электротермический метод

В данный момент, очистка проводов от гололеда осуществляется преимущественно его плавкой. Она позволяет удалить гололед в течение не большого промежутка времени (40 минут – 1 час), снять дополнительную механическую нагрузку с проводов ВЛ и ликвидировать «пляску» проводов.

Плавка гололеда в электрических сетях напряжением до 110 кВ осуществляется в большинстве своем переменным током. В этом случае величина затрат на плавку гололеда будет незначительна, по причине того, что она проводится от существующей электрической сети. Ток постоянный широкого применения в таких сетях не нашел по причине необходимости использования выпрямительной установки, которая довольно-таки дорога. Плавка гололеда постоянным током применяется преимущественно для линий, имеющих большие сечения проводов и значительную длину. Поэтому рассматривать плавку постоянным током в данном случае не целесообразно.

### 3.1) Плавка по способу короткого замыкания

Плавка гололеда может проводиться путем создания искусственного:

1. Трехфазного короткого замыкания  $K^{(3)}$ ;
2. Двухфазного короткого замыкания  $K^{(2)}$ ;
3. Однофазного короткого замыкания  $K^{(1)}$ .

Первый метод является простым и удобным, так как гололед плавится сразу на всех фазах. В случае второго метода на короткое замыкание сначала включают любые две фазы, а затем, осуществляют обогрев третьей в сочетании с одним из проводов, который уже прошел процесс плавки. Последняя схема нашла применение на не протяженных линиях.

Минус в том, что при использовании данного способа необходимо отключение потребителей от сети.

### 3.2) Плавка по способу перераспределения нагрузок

В случае применения данного способа, необходимо осуществлять перераспределение нагрузки в сети для увеличения тока до величины, необходимой для проведения мероприятий по плавке гололеда. При этом линия не выводится из эксплуатации. Но зачастую не всегда представляется возможным реализовать необходимое повышение токовых нагрузок, тем более это практически не реально в сельских сетях.

Для реализации этого способа, возникает необходимость отключения других линий, для повышения передаваемой мощности по обогреваемой линии. В сельской местности, зачастую, распространены одноцепные магистральные линии, поэтому отключать воздушные линии не представляется возможным, так же для применения этого метода плавки необходимо проводить переключения в сетях низкого напряжения, для повышения нагрузки трансформаторной подстанции 6—10/0,4 кВ, питаемой от обогреваемой линии, которые также трудно реализуемы.

Наибольший эффект данный способ дает если применять его до образования гололеда, то есть производить профилактический подогрев линии.

3.3) Плавка гололеда путем создания искусственного дополнительного потока реактивной мощности

«К воздушной линии 6(10)кВ, на которой необходимо провести плавку гололеда подключается источник реактивной мощности (ИРМ) таким образом, что поток реактивной мощности, генерируемый ее, был направлен встречно потоку активной мощности по ВЛ. При таком режиме распределение напряжения вдоль линии является более равномерным при одном и том же токе, по сравнению с режимом одинакового направления активной и реактивной мощности, и позволяет проводить мероприятия по борьбе с гололедом без отключения потребителей от электроснабжения. Мощность ИРМ подбирается таким образом, чтобы ток, протекаемый по ВЛ при собранной схеме плавки гололеда, позволял проводить плавку гололеда (или осуществлять подогрев проводов ВЛ для предотвращения гололедообразования). Для реализации данного способа можно использовать как уже установленные в распределительных сетях ИРМ (батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы, статические тиристорные компенсаторы), так и новые ИРМ, в том числе перемещаемые (мобильные)» [10].

Главным преимуществом такого способа плавки является то, что плавку гололеда можно производить без отключения потребителей.

К недостаткам можно отнести, необходимость приобретения источника реактивной мощности, например, батареи конденсаторов (БК), если он вообще отсутствует, либо такой источник имеется, но его мощности не хватает для проведения мероприятий по плавке гололеда. Приоритет в данном случае отдается перемещаемому источнику, так как в процессе эксплуатации, могут происходить изменения, как в схеме сети, так и в нагрузках ее узлов, которые оказывают серьезное влияние на эффективность использования ИРМ. Тут же нужно учитывать, что для перемещения источника необходим и грузовой автотранспорт.



Другой, более серьезный недостаток заключается в том, что применение данного способа ограничено предельным значением длины линии. Это связано с допустимым уровнем напряжения. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 «положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю» [16].

В том случае, когда источник реактивной мощности устанавливается в конце линии, напряжение у потребителя увеличивается и возможно превышение допустимого значения. Для снижения напряжения до допустимого уровня необходимо проводить его регулировку в центре питания (ЦП), например, посредством РПН силового трансформатора. При этом минимальная величина напряжения в центре питания будет определяться близлежащими к нему потребителями. Отсюда следует, что для выполнения условий по допустимым отклонениям напряжения у потребителей величина максимальной потери напряжения не должна быть больше определенного значения  $\Delta U_{\text{МАХ}}$ .

«Падение напряжения зависит как от значений потоков мощности, так и от параметров воздушной линии. В связи с этим существует предельное значение длины линии, при которой будут выдержаны допустимые отклонения напряжений у потребителей в зависимости от потоков мощности по ВЛ и марки проводов, из которых она выполнена» [10].

#### 3.4) Плавка по способу наложения токов

Суть способа заключается в наложении на рабочий ток дополнительного. Этот способ нашел применение на кольцевых участках сети и параллельных линиях.

Недостаток данного способа заключается в том, при его работе будет возникать несимметрия напряжений из-за протекания дополнительного тока только в одной из трех фаз. Это повлечет за собой и изменение величин токов нагрузки во всех трех фазах. В обогреваемой фазе произойдет

уменьшение тока нагрузки, а в необогреваемых – его увеличение. Исходя из вышесказанного, а также того, что сборка схемы довольно таки сложна, данный способ не нашел большого практического применения.

### 3.5) Плавка по способу встречного включения фаз

Для проведения плавки гололеда рассматриваемым способом необходимо произвести изменение фазировки линии электропередачи (А,В,С/В,С,А(С,А,В)). В этом случае на линию будет подаваться не фазное напряжение, как при нормальном режиме работы, а линейное.

Этот метод активно используется при плавке на воздушных линиях электропередачи, которые располагаются между соседними подстанциями, в случае кольцевых и параллельных линий. Но в сетях 6-10 кВ в сельской местности применять этот способ зачастую не представляется возможным, из-за несоответствия конфигурации сети.

На сегодня не существует какого-то единственно правильного способа плавки. Каждый из рассмотренных способов имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому рассмотрев варианты плавки гололеда применительно к сетям 6-10 кВ проходящим в сельской местности, остановимся на более приемлемом варианте. То есть выберем способ плавки гололеда методом короткого замыкания.

## 2.5 Выводы по второму разделу

Обоснована необходимость в проведении мероприятий по плавке гололеда, а также определена предельная толщина гололедной муфты. Произведен выбор метода плавки гололеда.

По результатам расчета получено, что механические напряжения провода с гололедом серьезно превышают допустимые значения без него. И если вовремя не произвести удаление гололедной муфты, то возможно возникновение аварийных ситуаций и выход воздушной линии из строя.

Определена величина критической толщины гололедной муфты, которая равна 16 мм. Следовательно, необходимо производить плавку гололеда при толщинах меньше критической, тем самым снижая до минимума вероятность аварии на линии по причине ледообразования.

После анализа наиболее практикуемых способов плавки гололеда, применительно к сетям 6-10 кВ проходящим в сельской местности, выбран способ плавки гололеда токами короткого замыкания.

### **3 Плавка гололеда в сетях 6-10 кВ в сельской местности**

#### **3.1 Описание исследуемого объекта**

Объект исследования располагается в Самарской области, в Челно-Вершинском районе. Это линия электропередачи напряжением 10 кВ, выполненная проводом марки АС 50/8.0, протяженностью 16,63 км. Запитана данная линия электропередачи от понизительной подстанции 35/10 кВ «Озерки». Мощность трансформатора подстанции 6,3 МВА. Участок плавки: ПС «Озерки» - оп.Оз110/50.

#### **3.2 Плавка гололеда током короткого замыкания**

«Наибольшее распространение в электрических сетях энергосистем получил способ плавки гололеда током короткого замыкания как наиболее простой и эффективный, позволяющий максимально автоматизировать процесс сборки схемы плавки и восстановления нормальной работы электрической сети» [1, с. 99].

При проведении мероприятий по плавке гололеда линия выводится из работы. Плавка может производиться при рабочем или пониженном напряжении линии. Часто плавка производится от системы шин низшего напряжения, для чего на подстанции может монтироваться специальная ячейка плавки гололеда. Создание искусственного короткого замыкания производится закорачиванием фаз или посредством заземлений, для чего устанавливаются стационарные коммутационные аппараты. Вся аппаратура и оборудование рассчитывается с учетом возможных дополнительных перегрузок на известные токи плавки.

Плавка данным способом имеет несколько схемных вариантов исполнения, которые различаются видом создаваемого искусственного короткого замыкания.

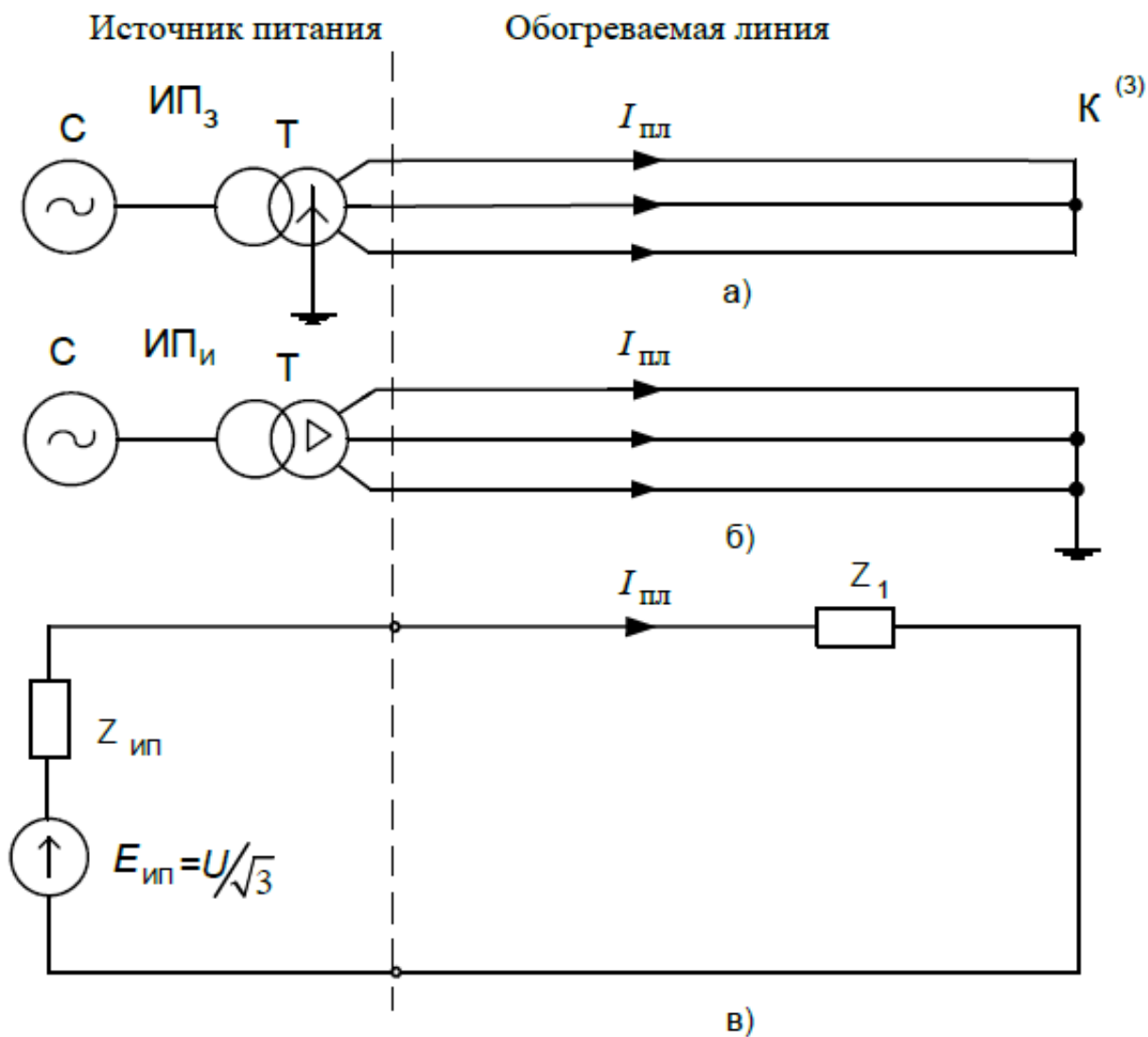


Рисунок 16 - Схемы плавки гололеда по способу трехфазного КЗ при питании от источника питания с глухозаземленной (а) и с изолированной (б) нейтралью и расчетная схема замещения (в)

Источник питания

Обогреваемая ВЛ

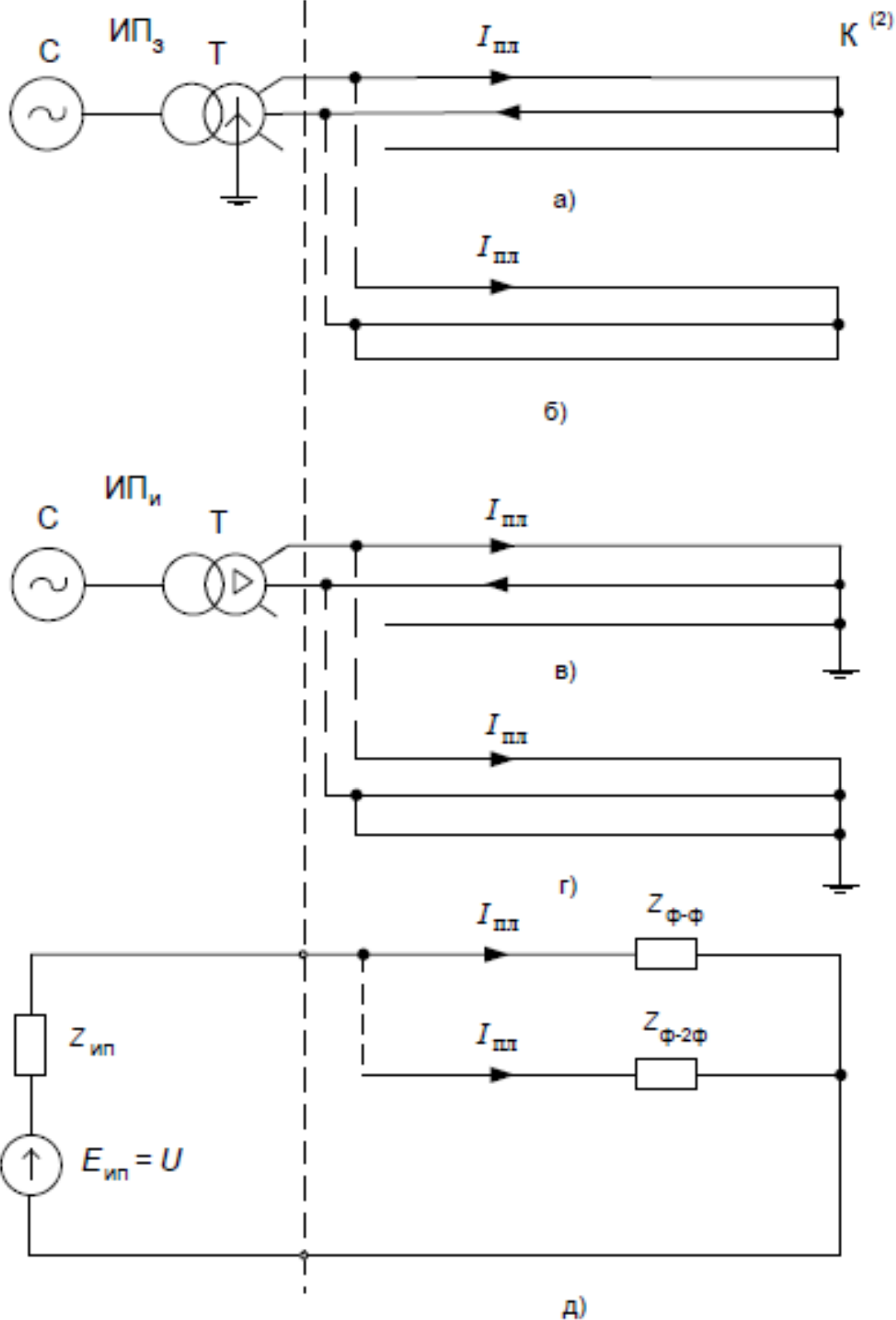


Рисунок 17 - Схемы плавки гололеда по способу двухфазного КЗ с соединением проводов воздушной линии «фаза-фаза» (а, в) и «фаза-две фазы» (б, г) при питании от источника с глухозаземленной (а, б) и с изолированной (в, г) нейтралью и расчетная схема замещения (д)

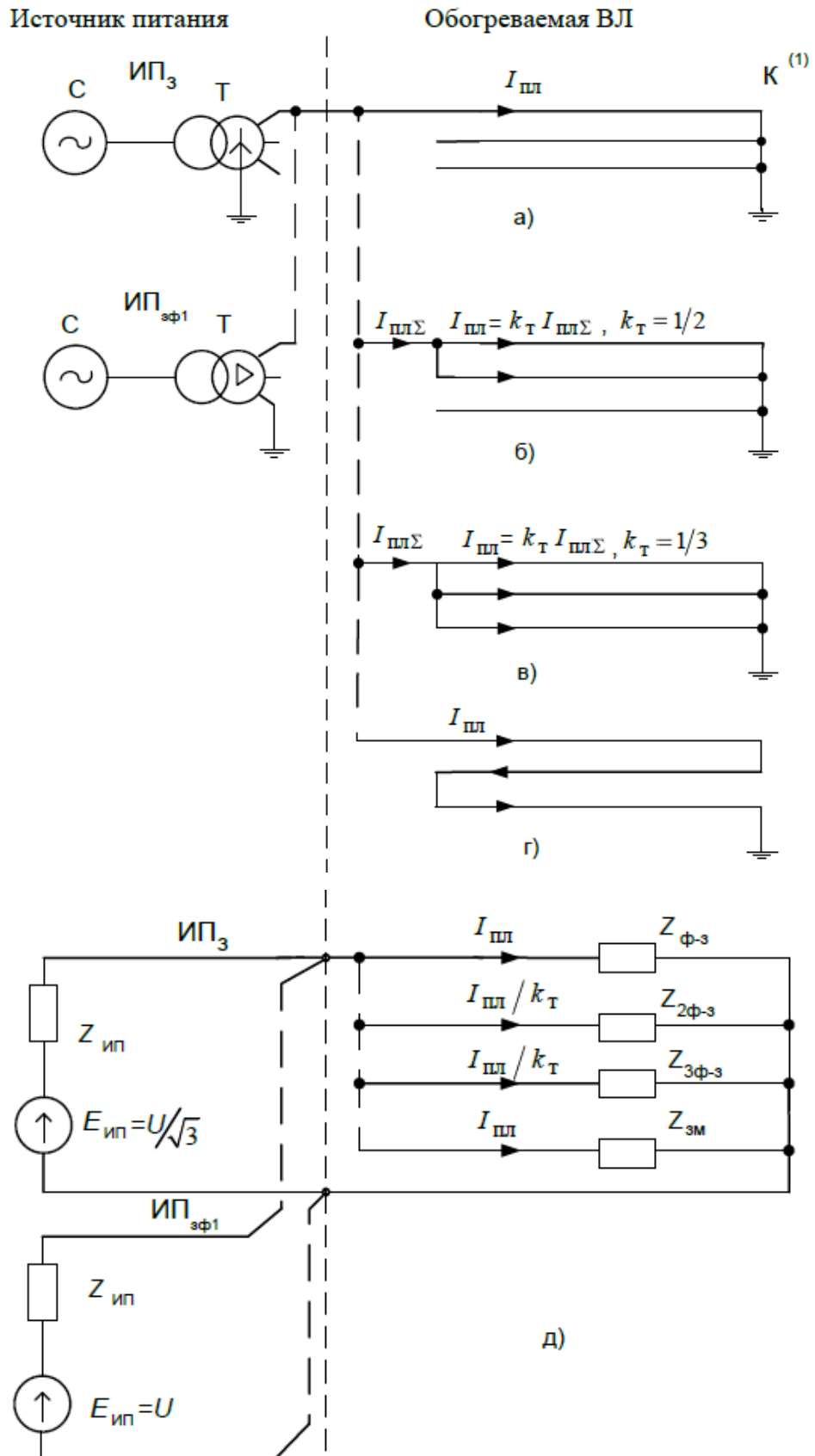


Рисунок 18 - Схемы плавки гололеда по способу однофазного КЗ с соединением проводов воздушной линии: «фаза-земля» (а), «две фазы-земля» (б), «три фазы-земля» (в), «змейка» (г) и расчетная схема замещения (д)

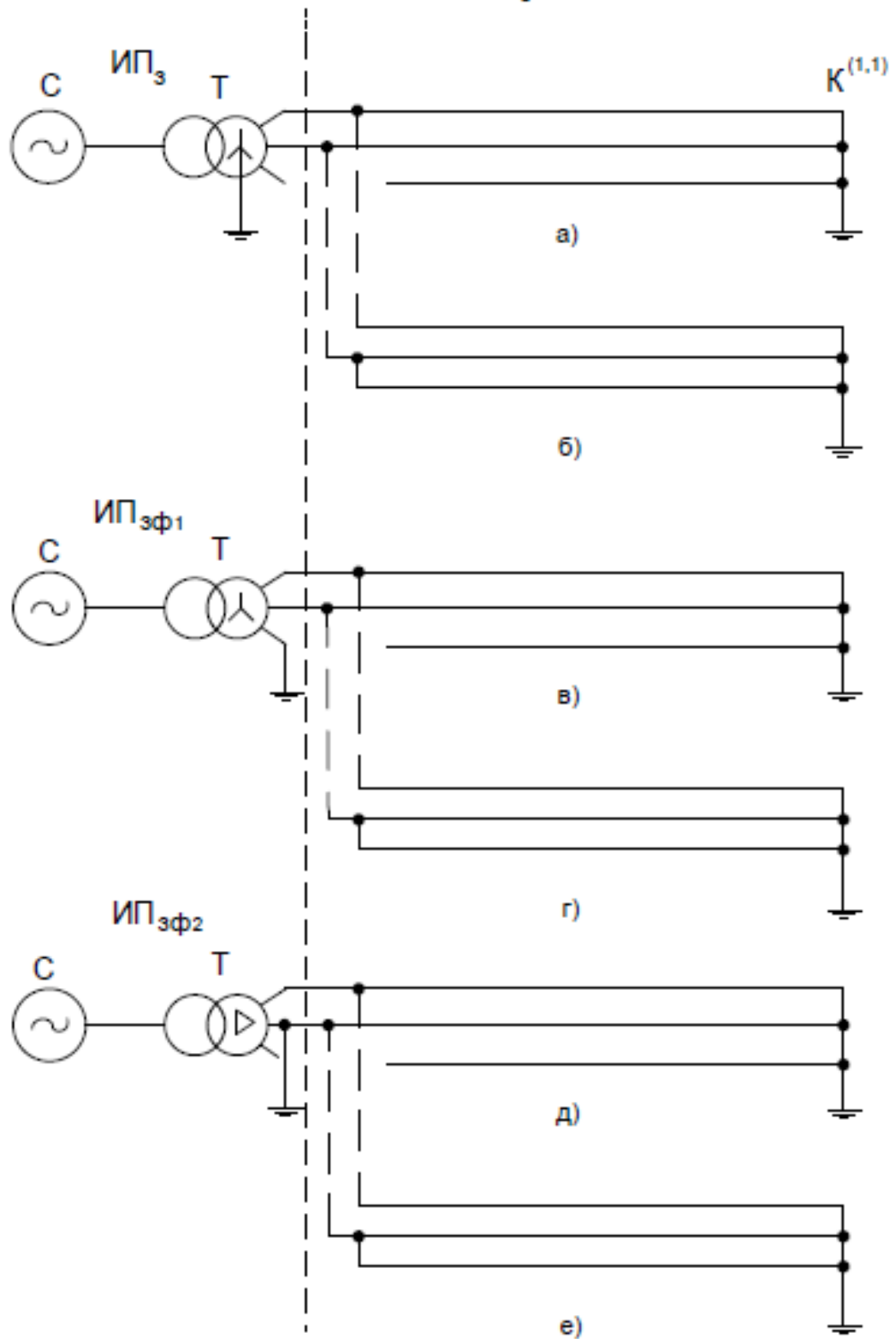


Рисунок 19 - Схемы плавки гололеда по способу двухфазного КЗ на землю с обогревом двух или трех фаз воздушной линии от источников питания: ИП<sub>3</sub> - с заземленной нейтралью (а, б); ИП<sub>3ф1</sub> - с заземленной особой фазой, отключенной от схемы плавки (в, г); ИП<sub>3ф2</sub> - с заземленной фазой, подключенной к схеме плавки (д, е)



### 3.2.1 Выбор схемы плавки гололеда

В качестве схем плавки гололеда предварительно выберем две схемы:

1. Плавка током трехфазного КЗ;
2. Плавка током однофазного КЗ – «змейка».

Данные схемы позволяют провести плавку гололеда в один цикл, что позволяет сократить время плавки.

#### 3.2.1.1 Плавка током трехфазного короткого замыкания

Для нахождения тока плавки определим необходимые для расчета параметры эквивалентного генератора и воздушной линии.

В данной схеме во вторичной обмотке силового трансформатора протекает симметричный ток прямой последовательности, поэтому независимо от схемы источника питания параметры эквивалентного генератора равны:

$$E_{III} = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

$$Z_{III} = Z_{C1} + Z_{T1} \quad (27)$$

где  $U$  – линейное напряжение вторичных обмоток силового трансформатора при отключении линии;

$Z_{C1}$ ,  $Z_{T1}$  – комплексные сопротивления прямой последовательности системы и силового трансформатора соответственно.

Данная схема плавки является симметричной. Формула комплексного сопротивления воздушной линии имеет вид:

$$Z_{ВЛ} = Z_1 = l_{ВЛ} \cdot \left( R_{np.yd} + j0,145 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r} \right) \quad (28)$$

где  $l_{ВЛ} = 16,63$  км – длина линии;

$R_{\text{пр.уд}} = 0,548 \text{ Ом/км}$  – удельное сопротивление фазного провода линии [9];

$D_{\text{ср}} = 1,5 \text{ м}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами;

$r = 0,00456 \text{ м}$  – расчетный радиус провода.

Определим величину сопротивления  $Z_{\text{ВЛ}}$  по формуле, указанной выше:

$$|Z_{\text{ВЛ}}| = \left| 16,63 \cdot \left( 0,548 + j0,145 \cdot \lg \frac{1,5}{0,00456} \right) \right| = 10,95 \text{ Ом}$$

Для тока плавки справедливо выражение:

$$I_{\text{пл}} = \frac{E_{\text{ИП}}}{Z_{\text{Э}}} = \frac{E_{\text{ИП}}}{Z_{\text{ИП}} + Z_{\text{ВЛ}}} \quad (29)$$

Определим ток плавки гололеда:

$$I_{\text{пл}} = \frac{10,5 \cdot 10^3 / \sqrt{3}}{1,414 + 10,95} = 491 \text{ А}$$

### 3.2.1.2 Плавка током однофазного короткого замыкания

Также, как и в случае с трехфазным КЗ, для нахождения тока плавки необходимо определить параметры эквивалентного генератора и воздушной линии.

Параметры эквивалентного генератора зависят от схемы соединения обмоток силового трансформатора, то есть от режима работы нейтрали. В нашем случае это схема плавки с ИП с заземленной фазой, отключенной от схемы плавки - ИП<sub>3Ф1</sub>. При определении параметров эквивалентного генератора учитывается равенство сопротивлений прямой и обратной последовательности:

$$E_{III} = U \quad (30)$$

$$Z_{III} = 2 \cdot Z_{C1} + Z_{T1} \quad (31)$$

Схема относится к классу неполнофазных схем. Формула комплексного сопротивления воздушной линии имеет вид:

$$Z_{ВЛ} = Z_{зм} = l_{ВЛ} \cdot \left( 3 \cdot R_{np.y\delta} + R_{з.y\delta} + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3 \cdot D_{cp}^2}{r^3} \right) + R_{з\Sigma} \quad (32)$$

где  $l_{ВЛ} = 16,63$  км – длина линии;

$R_{np.y\delta} = 0,548$  Ом/км – удельное сопротивление фазного провода линии [9];

$R_{з.y\delta}$  – удельное активное сопротивление земли, Ом/км;

$D_3$  – эквивалентная глубина возврата тока через землю, м;

$D_{cp} = 1,5$  м – среднегеометрическое расстояние между фазами;

$r = 0,00456$  м – расчетный радиус провода;

$R_{з\Sigma} = 4$  Ом – суммарное сопротивление заземляющих устройств (заземлителей) в контуре плавки.

Неизвестные величины  $R_{з.y\delta}$  и  $D_3$  определяются по формулам:

$$R_{з.y\delta} = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot f \quad (33)$$

$$D_3 = \frac{208,5}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-1}}} \quad (34)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$f = 50$  Гц – промышленная частота переменного тока;

$\gamma = 10^{-1}$  1/Ом·м – удельная проводимость земли.

Выполним расчет неизвестных коэффициентов, подставив данные в формулы 33 и 34:

$$R_{3, \text{y} \partial} = \frac{\pi}{4} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 = 4,935 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$D_3 = \frac{208,5}{\sqrt{50 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1}}} = 294,9 \text{ м}$$

Тогда сопротивления  $Z_{\text{ВЛ}}$  равно:

$$|Z_{\text{ВЛ}}| = \left| 16,63 \cdot \left( 3 \cdot 0,548 + 4,935 \cdot 10^{-5} + j0,145 \cdot \lg \frac{294,9 \cdot 1,5^2}{0,00456^3} \right) + 4 \right| = 39,317 \text{ Ом}$$

Величина тока плавки определяется по формуле (29) также как и в случае плавки током трехфазного короткого замыкания:

$$I_{\text{пл}} = \frac{10,5 \cdot 10^3}{2,236 + 39,317} = 253 \text{ А}$$

### 3.3 Определение параметров режима плавки гололеда

Плавка гололеда очень тесно связана с таким понятием как нагрев проводов воздушной линии электропередачи. «Этому вопросу уделяется большое внимание, так как в результате повышенного нагрева могут нарушаться нормируемые, по условиям безопасности, расстояния от проводов до поверхности земли, а также до естественных препятствий и инженерных сооружений, пересекаемых линией. В некоторых случаях изменяются физико-химические свойства материала провода, что может привести к потере проводами механической прочности. Кроме того, нагрев может привести к пережогу и обрыву провода. Поэтому нагрев рассматривается как фактор, ограничивающий токовую нагрузку проводов в режиме плавки гололеда» [2, с. 63].

Все схемы плавки, за исключением схем с применением повторно-кратковременного режима, должны удовлетворять следующим расчетным условиям:

$$I_{пл} \leq I_{мд} \text{ или } \vartheta_{пр} \leq \vartheta_{мд}$$

$$I_{пл} \leq I_{дон} \text{ или } \vartheta_{пр} \leq \vartheta_{дон}$$

$$I_{пл} \leq I_{(T)} \text{ или } t_{пл} \leq T$$

Первые два условия вводят ограничения на ток плавки по максимальному значению, последнее ограничивает ток плавки по минимальному значению.

Определение максимально допустимого и допустимого токов производится при наихудших реально возможных на трассе ВЛ условиях охлаждения проводов: при максимальной температуре воздуха и минимальной скорости ветра.

Определение значения тока Т-минутной плавки производится для наиболее тяжелого сочетания факторов: наилучшие условия охлаждения проводов (минимальная температура воздуха и максимальная скорость ветра) в сочетании с наибольшими (нормативными) для ВЛ размерами отложения и плотностью гололеда 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Температура воздуха и скорость ветра принимаются по собственным наблюдениям или наблюдениям метеорологических станций.

Таблица 7- Климатические параметры

Температура воздуха $\vartheta_{в}$ , °С	-5	0
Скорость ветра $v$ , м/с	5	2
Угол между направлением ветра и осью провода $\varphi_{в}$	90°	0°

Угол  $\varphi_B$  учитывается посредством коэффициента  $k_\varphi$ : при  $\varphi_B=90^\circ$   $k_\varphi=1$ ; при  $\varphi_B=0^\circ$   $k_\varphi=0,55$ .

### 3.3.1 Максимально допустимый ток

«По условию сохранения механической прочности провода максимально допустимый ток нагревает провод в установившемся режиме на участках без гололеда до температуры  $\vartheta_{пр}=\vartheta_{мд}$ » [1, с. 71]. Для проводов марки АС, согласно ГОСТ 839-80, величина максимально допустимой температуры провода принимается  $100^\circ\text{C}$  (в расчетах  $\vartheta_{мд}=90^\circ\text{C}$  для создания некоторого запаса).

Для определения величины  $I_{мд}$  воспользуемся уравнением теплового баланса провода в установившемся режиме.

$$I_{мд}^2 \cdot R_0 \cdot (1 + \beta \cdot \vartheta_{мд}) = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_{мд})^4 - (273 + \vartheta_г)^4 \right] \cdot s + 1,1 \cdot k_\varphi \cdot \sqrt{\nu \cdot d_{пр}} \cdot (\vartheta_{мд} - \vartheta_г) \quad (35)$$

Из уравнения теплового баланса выразим максимально допустимый ток.

$$I_{мд} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_{мд})^4 - (273 + \vartheta_г)^4 \right] \cdot s + 1,1 \cdot k_\varphi \cdot \sqrt{\nu \cdot d_{пр}} \cdot (\vartheta_{мд} - \vartheta_г)}{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot \vartheta_{мд})}} \quad (36)$$

Таблица 8 - Значения расчетных коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
Степень черноты тела $\varepsilon$	0,6	-
Коэффициент излучения АЧТ $C_0$ , Вт/(см <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	$5,67 \cdot 10^{-12}$	-
Диаметр провода $d_{пр}$ , см	0,96	Для АС 50/8,0
Сопrotивление 1м провода при температуре $0^\circ\text{C}$ , Ом/м	$0,548 \cdot 10^{-3}$	Из [9]

Продолжение таблицы 8

Температурный коэффициент сопротивления алюминиевых проволок $\beta$ , $1/^\circ\text{C}$	0,0045	-
Площадь поверхности излучения 1м провода $s$ , $\text{см}^2$	301,6	$s = \pi \cdot d_{np} \cdot 100$

Определим величину максимально допустимого тока при различных климатических условиях:

$$I_{мд} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot [(273+90)^4 - (273-5)^4] \cdot [301,6 + 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96} \cdot (90+5)]}{0,548 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,0045 \cdot 90)}} = 560 \text{ A}$$

$$I_{мд} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot [(273+90)^4 - (273+0)^4] \cdot [301,6 + 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96} \cdot (90-0)]}{0,548 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,0045 \cdot 90)}} = 337 \text{ A}$$

Так как величина тока плавки током трехфазного короткого замыкания больше величины максимально допустимого тока, то использовать данный способ плавки на данной воздушной линии нельзя. Поэтому окончательно принимаем способ плавки гололеда током однофазного короткого замыкания.

### 3.3.2 Температура провода

Температуру провода, также как и максимально допустимый ток, можно определить, используя уравнение теплового баланса провода (35), заменив  $I_{мд}$  и  $\vartheta_{мд}$  на известный ток плавки  $I_{пл}$  и неизвестное значение  $\vartheta_{пр}$  соответственно. «Относительно  $\vartheta_{пр}$  уравнение имеет четвертую степень. Учитывая относительно малое значение мощности излучения, уравнение можно решать методом итерации как уравнение первой степени» [1, с. 73].

$$\vartheta_{пр,n+1} = \frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot [(273 + \vartheta_{пр,n})^4 - (273 + \vartheta_g)^4] \cdot [s - I_{пл}^2 \cdot R_0 - 1,1 \cdot k_\varphi \cdot \sqrt{\nu \cdot d_{np}} \cdot \vartheta_g]}{I_{пл}^2 \cdot R_0 \cdot \beta - 1,1 \cdot k_\varphi \cdot \sqrt{\nu \cdot d_{np}}} \quad (37)$$

За нулевую итерацию (n=0) примем температуру провода  $\vartheta_{пр,0}=0^{\circ}\text{C}$ .

Определим температуру провода при наилучших условиях:

$$\vartheta_{пр,0} = \frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+0)^4 - (273-5)^4 \right] \cdot 301,6 - 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96} \cdot (-5)}{253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0045 - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96}} = 9,65$$

$$\vartheta_{пр,1} = \frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+9,65)^4 - (273-5)^4 \right] \cdot 301,6 - 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96} \cdot (-5)}{253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0045 - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96}} = 9,67$$

Двух итераций вполне достаточно.

Определим температуру провода при наихудших условиях:

$$\vartheta_{пр,0} = \frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+0)^4 - (273+0)^4 \right] \cdot 301,6 - 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96} \cdot 0}{253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0045 - 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96}} = 44,53$$

$$\vartheta_{пр,1} = \frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+44,53)^4 - (273+0)^4 \right] \cdot 301,6 - 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96} \cdot 0}{253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0045 - 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96}} = 44,60$$

Далее продолжать итерации нет необходимости.

### 3.3.3 Допустимый ток

По условию сохранения нормированных габаритов воздушной линии допустимый ток производит нагрев провода до температуры  $\vartheta_{пр}=\vartheta_{пр,доп}$  в установившемся режиме на участках ВЛ с отсутствующим гололедом. Допустимый ток выражается из уравнения теплового баланса провода (35), с заменой  $\vartheta_{мд}$  на  $\vartheta_{пр,доп}$ .

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_{пр,доп})^4 - (273 + \vartheta_{\varepsilon})^4 \right] \cdot s + 1,1 \cdot k_{\varphi} \cdot \sqrt{\nu \cdot d_{пр}} \cdot (\vartheta_{пр,доп} - \vartheta_{\varepsilon})}{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot \vartheta_{пр,доп})}} \quad (38)$$

Значение допустимой температуры провода равно  $50^{\circ}\text{C}$ .

Определим величину допустимого тока при различных климатических параметрах:



$$I_{oon} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+50)^4 - (273-5)^4 \right] \cdot 301,6 + 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot 0,96} \cdot (50+5)}{0,548 \cdot 10^{-3} \cdot (1+0,0045 \cdot 50)}} = 454 \text{ A}$$

$$I_{oon} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273+50)^4 - (273+0)^4 \right] \cdot 301,6 + 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,96} \cdot (50-0)}{0,548 \cdot 10^{-3} \cdot (1+0,0045 \cdot 50)}} = 266 \text{ A}$$

Ток плавки гололеда методом однофазного короткого замыкания не превышает значение допустимого тока. Схему "змейка" допускается использовать в мероприятиях плавки гололеда.

### 3.3.4 Ток плавки заданной длительности

Опыт эксплуатации показывает, что если время плавки гололеда составляет не более 40-60 минут, то эффективность плавки максимальна. При этом плавку гололеда производят при малых толщинах муфты (10-15 мм) с соблюдением всех расчетных условий.

Определение тока плавки заданной длительности  $I_{(T)}$  производится по уравнению баланса энергии в режиме непрерывной плавки неизменяющимся током.

$$0,95 \cdot I_{(T)}^2 \cdot R_0 \cdot t_{nl} = c_l \cdot G_l \cdot \frac{\vartheta_0 - \vartheta_1}{2} + c_l \cdot J_{nl} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_e) + C_{nl} \cdot J_{nl} + \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_1)^4 - (273 + \vartheta_e)^4 \right] \cdot s \cdot t_{nl} + 1,1 \cdot k_\varphi \cdot t_{nl} \cdot \sqrt{\nu \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_e) \quad (39)$$

Из уравнения баланса энергии в режиме непрерывной плавки неизменяющимся током выразим ток Т-минутной плавки.

$$I_{(T),n+1} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_{1,n})^4 - (273 + \vartheta_e)^4 \right] \cdot s \cdot t_{nl} - c_l \cdot J_{nl} \cdot \vartheta_e + C_{nl} \cdot J_{nl} - 1,1 \cdot k_\varphi \cdot t_{nl} \cdot \sqrt{\nu \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)} \cdot \vartheta_e}{0,95 \cdot R_0 \cdot t_{nl} - 0,5 \cdot c_l \cdot G_l \cdot K_{g1} + 1,1 \cdot k_\varphi \cdot t_{nl} \cdot K_{g1} \cdot \sqrt{\nu \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)}}} \quad (40)$$

где  $c_l = 2,26 \text{ Вт} \cdot \text{с} / (\text{г} \cdot ^\circ\text{С})$  – удельная теплоемкость льда;

$C_{nl} = 333 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{г}$  – теплота плавления гололеда;

$\varepsilon=0,64$  – степень черноты тела.

Значение массы цилиндрической гололедной муфты; массы расплавляемого гололеда на одном метре провода; площадь поверхности одного метра гололедной муфты определяются соответственно по формулам:

$$s = \pi \cdot (d_{np} + 2 \cdot b) \cdot 100 \quad (41)$$

$$J_{nl} = 110 \cdot \rho_z \cdot d_{np} \cdot b \quad (42)$$

$$G_{\lambda} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)^2 - d_{np}^2 \cdot \rho_z \cdot 100 \quad (43)$$

Для достижения максимальной эффективности плавка гололеда будет производиться при толщине муфты равной 10 мм. Тогда

$$s = \pi \cdot (0,96 + 2 \cdot 1) \cdot 100 = 929,9 \text{ см}^2$$

$$J_{nl} = 110 \cdot 0,9 \cdot 0,96 \cdot 1 = 95,1 \frac{\text{г}}{\text{м}}$$

$$G_{\lambda} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)^2 - 0,96^2 \cdot 0,9 \cdot 100 = 554,2 \frac{\text{г}}{\text{м}}$$

Для определения тока плавки заданной длительности необходимо предварительно определить среднюю температуру поверхности гололедного цилиндра  $\vartheta_1$ , при этом температура провода  $\vartheta_{np} = \vartheta_0 \approx 0^\circ\text{C}$ .

$$\vartheta_0 - \vartheta_1 = I_{(T)}^2 \cdot K_{\vartheta_1} \quad (44)$$

В свою очередь  $K_{\vartheta_1}$  определяется:

$$K_{\vartheta_1} = \frac{0,95 \cdot R_0}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot d_{np}^2}{(d_{np} + 2 \cdot b)^2 - d_{np}^2} \cdot \ln \frac{d_{np} + 2 \cdot b}{d_{np}} \right] \quad (45)$$

$$K_{g1} = \frac{0,95 \cdot 0,548}{4 \cdot \pi \cdot 2,25} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot 0,96^2}{(0,96 + 2 \cdot 1)^2 - 0,96^2} \cdot \ln \frac{0,96 + 2 \cdot 1}{0,96} \right] = 1,35 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{C}}{\text{A}^2}$$

где  $\lambda=2,25$  Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности льда.

Так как плавку гололеда для достижения максимальной эффективности рекомендуется проводить не более часа, то примем время равное 60 минут.

$I_{(60)}$  определяется методом итерации.

Климатические условия №1:

$$I_{(60),1} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot (273+0)^4 - (273-5)^4 \cdot 929,9 \cdot 3600 + 2,26 \cdot 95,1 \cdot 5 + 0,95 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 - 0,5 \cdot 2,26 \cdot 554,2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} + 333 \cdot 95,1 + 1,1 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot 5}{1,1 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)}}} = 234,3 \text{ A}$$

$$g_{1,1} = (-1) \cdot I_{(60),1}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 234,3^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,743 \text{ }^\circ\text{C}$$

Выполним вторую итерацию:

$$I_{(60),2} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot (273-0,743)^4 - (273-5)^4 \cdot 929,9 \cdot 3600 + 2,26 \cdot 95,1 \cdot 5 + 0,95 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 - 0,5 \cdot 2,26 \cdot 554,2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} + 333 \cdot 95,1 + 1,1 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot 5}{1,1 \cdot 1 \cdot 3600 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)}}} = 233,5 \text{ A}$$

$$g_{1,2} = (-1) \cdot I_{(60),2}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 233,5^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,738 \text{ }^\circ\text{C}$$

Двух итераций вполне достаточно.

Климатические условия №2:

$$I_{(60),1} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot (273+0)^4 - (273+0)^4 \cdot 929,9 \cdot 3600 - 2,26 \cdot 95,1 \cdot 0 + 0,95 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 - 0,5 \cdot 2,26 \cdot 554,2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} + 333 \cdot 95,1 - 1,1 \cdot 0,55 \cdot 3600 \cdot \sqrt{2 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot 0}{1,1 \cdot 0,55 \cdot 3600 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)}}} = 127,8 \text{ A}$$

$$\vartheta_{1,1} = (-1) \cdot I_{(60),1}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 127,8^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,221 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Выполним вторую итерацию:

$$I_{(60),2} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot [273 - 0,221]^4 - (273 + 0)^4 \cdot 929,9 \cdot 3600 - 2,26 \cdot 95,1 \cdot 0 + 0,95 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 - 0,5 \cdot 2,26 \cdot 554,2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} + \frac{+ 333 \cdot 95,1 - 1,1 \cdot 0,55 \cdot 3600 \cdot \sqrt{2 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot 0}{+ 1,1 \cdot 0,55 \cdot 3600 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)}}}{}} = 127,4 \text{ A}$$

$$\vartheta_{1,2} = (-1) \cdot I_{(60),2}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 127,4^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Далее продолжать итерации нет необходимости.

Ток плавки гололеда больше тока часовой плавки, значит, мероприятия по его плавке будут эффективны.

### 3.3.5 Время нагрева провода с гололедом

При отрицательных температурах воздуха  $\vartheta_{в} < 0$  необходимо учитывать время нагрева провода с гололедом до температуры  $\vartheta_{np} = \vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$ , при которой непосредственно начинается сам процесс расплавления гололедной муфты. Это время определяется по уравнению баланса энергии при неизменном токе плавки.

$$0,95 \cdot I_{nl}^2 \cdot R_0 \cdot t_n = (c_{ал} \cdot m_{ал} + c_{см} \cdot m_{см}) \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_г) + c_l \cdot G_l \cdot \left( \frac{\vartheta_0 - \vartheta_г}{2} - \vartheta_г \right) + \varepsilon \cdot C_0 \cdot [273 + \vartheta_1]^4 - (273 + \vartheta_г)^4 \cdot s \cdot t_n + 1,1 \cdot k_\varphi \cdot t_n \cdot \sqrt{\nu \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_г) \quad (46)$$

Из уравнения баланса энергии выразим время нагрева провода с гололедом.

$$t_n = \frac{(c_{ал} \cdot m_{ал} + c_{ст} \cdot m_{ст}) \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_6) + c_{л} \cdot G_{л} \cdot \left( \frac{\vartheta_0 - \vartheta_1}{2} - \vartheta_6 \right)}{0,95 \cdot I_{пл}^2 \cdot R_0 - \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + \vartheta_1)^4 - (273 + \vartheta_6)^4 \right] \cdot s - 1,1 \cdot k_{\varphi} \cdot \sqrt{\nu \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_6)} \quad (47)$$

Таблица 9 - Значения расчетных коэффициентов

Коэффициент	Значение	Примечание
Удельная теплоемкость алюминия $c_{ал}$ , Вт·с/(Г·°С)	0,92	-
Удельная теплоемкость стали $c_{ст}$ , Вт·с/(Г·°С)	0,45	-
Сечение алюминия $F_{ал}$ , см <sup>2</sup>	0,4825	-
Сечение стали $F_{ст}$ , см <sup>2</sup>	0,0804	-
Плотность алюминия $\rho_{ал}$ , г/см <sup>3</sup>	2,7	-
Плотность стали $\rho_{ст}$ , г/см <sup>3</sup>	7,9	-
Масса алюминия в проводе $m_{ал}$ , г/м	130,3	$m_{ал} = \rho_{ал} \cdot F_{ал} \cdot 100$
Масса стали в проводе $m_{ст}$ , г/м	63,5	$m_{ст} = \rho_{ст} \cdot F_{ст} \cdot 100$

По формуле (47) рассчитаем время нагрева провода с гололедом, предварительно определив среднюю температуру поверхности гололедного цилиндра  $\vartheta_в$  по формуле (44) через известный ток плавки:

$$\vartheta_1 = (-1) \cdot I_{пл}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 253^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,867 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_n = \frac{(0,92 \cdot 130,3 + 0,45 \cdot 63,5) \cdot (0 + 5) + 2,26 \cdot 554,2 \cdot \left( \frac{0 + 0,867}{2} + 5 \right)}{0,95 \cdot 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273 - 0,867)^4 - (273 - 5)^4 \right] \cdot s - 9299 - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot (-0,867 + 5)} = 512 \text{ с} = 8,5 \text{ мин}$$

### 3.3.6 Время плавки гололеда

Отсчет времени плавки ведется с достижения проводом температуры 0°С до полного расплавления гололеда и определяются по формулам (39) и (44) без итераций с заменой  $I_{(T)}$  на известный ток плавки  $I_{пл}$ .

$$-g_1 = I_{nl}^2 \cdot K_{g1} \quad (48)$$

$$t_{nl} = \frac{c_l \cdot G_l \cdot \frac{g_0 - g_1}{2} + c_l \cdot J_{nl} \cdot (g_0 - g_e) + C_{nl} \cdot J_{nl}}{0,95 \cdot I_{nl}^2 \cdot R_0 - \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ (273 + g_1)^4 - (273 + g_e)^4 \right] \cdot s - 1,1 \cdot k_\varphi \cdot \sqrt{v \cdot (d_{np} + 2 \cdot b)} \cdot (g_1 - g_e)} \quad (49)$$

Определим время плавки гололеда:

$$g_1 = (-1) \cdot I_{nl}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 253^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,867 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{nl} = \frac{2,26 \cdot 5542 \cdot \frac{0 + 0,867}{2} + 2,26 \cdot 95,1 \cdot (0 + 5) + 333 \cdot 95,1}{0,95 \cdot 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273 - 0,867)^4 - (273 - 5)^4 \right] \cdot 929,9 - 1,1 \cdot 1 \cdot \sqrt{5 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot (-0,867 + 5)} =$$

$$= 2258 \text{ c} = 37,6 \text{ мин}$$

Теперь рассчитаем общее время необходимое для проведения плавки гололеда:

$$t_\Sigma = t_n + t_{nl} \quad (50)$$

$$t_\Sigma = 8,5 + 37,6 = 46,1 \text{ мин}$$

Определим время плавки гололеда при других условиях:

$$g_1 = (-1) \cdot I_{nl}^2 \cdot K_{g1} = (-1) \cdot 253^2 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5} = -0,867 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{nl} = \frac{2,26 \cdot 5542 \cdot \frac{0 + 0,867}{2} + 2,26 \cdot 95,1 \cdot (0 - 0) + 333 \cdot 95,1}{0,95 \cdot 253^2 \cdot 0,548 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ (273 - 0,867)^4 - (273 + 0)^4 \right] \cdot 929,9 - 1,1 \cdot 0,55 \cdot \sqrt{2 \cdot (0,96 + 2 \cdot 1)} \cdot (-0,867 - 0)} =$$

$$= 924 \text{ c} = 15,4 \text{ мин}$$

### 3.3.7 Мощность плавки гололеда

Определим требуемую мощность плавки гололеда:

$$S_{nl} = \sqrt{3} \cdot I_{nl} \cdot U_{nl} \quad (51)$$

$$S_{nl} = \sqrt{3} \cdot 253 \cdot 10,5 \cdot 10^3 = 4,6 \text{ MVA}$$

Мощность силового трансформатора, от которого будет производиться плавка равна 6,3 МВА. По результатам расчета  $S_T < S_{пл}$ , трансформатор во время проведения мероприятий по плавке гололеда перегружен не будет.

### 3.4 Порядок проведения мероприятий по плавке гололеда

Полученные ранее параметры сведем в таблицу 10.

Таблица 10 – Сводная таблица с параметрами режима плавки гололеда

Марка провода	Длина линии, км	Напряжение плавки, кВ	Ток плавки, А	Мощность плавки, МВА	Толщина стенки гололеда, мм	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Угол ветра	Максимально допустимый ток, А	Допустимый ток, А	Время плавки, мин
АС 50/8,0	16,63	10,5	253	4,6	10	-5	5	90°	560	454	46,1
						0	2	0°	337	266	15,4

Для осуществления работы схемы необходимо предусмотреть следующее оборудование:

1. Смонтировать ячейку плавки гололеда, так как ячейка фидера-1 не предусмотрена для проведения мероприятия по плавке гололеда.
2. Установить коммутационные аппараты на опорах ВЛ.

На рисунке 15 приведена схема, подготовленная к плавке гололеда. Для проведения мероприятий по плавке гололеда необходимо произвести следующие переключения:

1. Вывести АВР-10
2. Отключить В-10 Ф-1
3. Отключить ЗКР-1 на опоре Оз100/1
4. Отключить КТП и отпайки ВЛ с Ф-1 ПС Озерки
5. Включить ЗКР-4
6. Включить ЗКР-2 на опоре Оз100/2
7. Включить ЗКР-3 на опоре Оз110/50
8. Включить В-10 ПГ

По окончании плавки, схема приводится в исходное нормальное состояние.

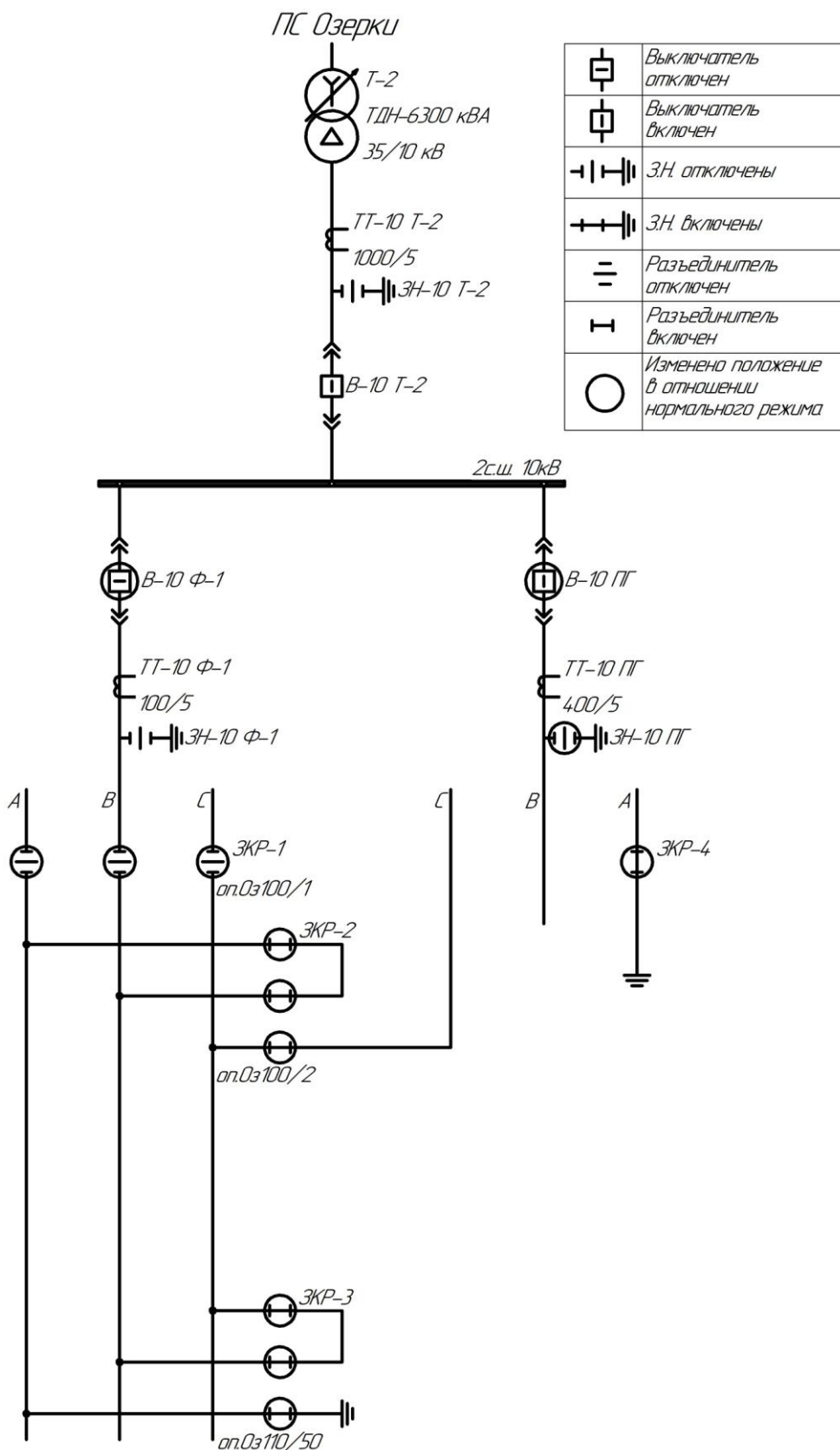


Рисунок 20 – Схема плавки гололеда на воздушной линии 10 кВ Ф-1 ПС «Озерки» током однофазного короткого замыкания по схеме «змейка»



### 3.5 Релейная защита при плавке гололеда

При проведении мероприятий по плавке гололеда имеется риск повреждения оборудования цепи плавки. Поэтому необходимо предусмотреть устройства РЗ от следующих видов повреждений:

1. Междофазные короткие замыкания;
2. Замыкание провода на землю;
3. Обрыв провода.

При плавке гололеда для защиты ВЛ от междофазных коротких замыканий и замыканий на землю используется токовая осечка без выдержки времени.

В случае обрыва провода, необходимо использовать минимальную токовую защиту. Данная защита вводится в работу после включения схемы плавки и выводится из нее до отключения схемы.

Рассчитаем токи срабатывания защит:

1. Ток срабатывания защиты от междофазных коротких замыканий:

$$I_{сз1} = \frac{k_3 \cdot I_{нл}}{k_{ТТ}} \quad (52)$$

$$I_{сз1(кл.ус1)} = \frac{1,2 \cdot 454}{80} = 6,81 \text{ А}$$

$$I_{сз1(кл.ус2)} = \frac{1,2 \cdot 266}{80} = 3,99 \text{ А}$$

2. Ток срабатывания защиты при обрыве провода:

$$I_{сз2} = \frac{\left( \frac{1}{k_3} \cdot I_{нл} \right)}{k_{ТТ}} \quad (53)$$

$$I_{сз2} = \frac{\left( \frac{1}{1,2} \cdot 248 \right)}{80} = 2,58 \text{ A}$$

Для защиты выберем микропроцессорный блок «Сириус-ДЗ-35» компании АО «РАДИУС Автоматика». Данный блок имеет все виды защит, необходимые для безопасного проведения плавки гололеда.

### **3.6 Определение места повреждения на ВЛ при плавке гололеда**

При проведении мероприятий по плавке гололеда возрастает вероятность повреждения ВЛ. Причинами повреждений могут быть:

- схлестывание фазных проводов между собой;
- тепловое разрушение места соединения провода от тока плавки;
- разрыв провода в месте соединения от гололедной нагрузки;
- разрушение опор.

Виды повреждений, которые могут возникнуть во время плавки гололеда:

1. Короткое замыкание между фазными проводами;
2. Короткое замыкание фазных проводов на землю;
3. Обрыв провода без замыкания.

Перечисленные выше повреждения могут привести к следующим последствиям:

- пережог провода электрической дугой в месте замыкания;
- разрушение опор воздушной линии и электрооборудования установок плавки гололеда;
- включение поврежденной линии после плавки гололеда под номинальное напряжение с действием, в том числе неселективным, РЗА на отключение и подачу управляющих воздействий.

Перечисленные выше последствия можно отвести, используя комплекты специальных РЗ и устройства ОМП.

Устройства дистанционного определения места повреждения позволяют определить зону повреждения и его вид. Далее к зоне повреждения отправляется ремонтная бригада, которая путем осмотра выявленной устройством ОМП зоны повреждения, точно определяет место повреждения и устраняет его.

Для ОМП выберем блок «Бреслер-0107.090.ВХ» компании ООО «НПП Бреслер».

### **3.7 Автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки**

«На ВЛ с плавкой гололеда должно быть организовано наблюдение за гололедом, при этом предпочтительно применение сигнализаторов появления гололеда и устройств контроля окончания плавки гололеда» [3].

В комплексной системе мероприятий особое место занимает информационное обеспечение, в частности, внедрение автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки (АИСКГН) на воздушных линиях электропередачи.

Система АИСКГН подразделяется на две составляющие:

- пункт контроля;
- пункт приема.

Оборудование пункта контроля устанавливается непосредственно на опоре и состоит из автономной системы бесперебойного питания, микропроцессорного линейного преобразователя, устройства передачи данных [20] и различных типов датчиков (датчик-преобразователь нагрузки, датчик температуры и влажности воздуха, датчик скорости и направления ветра, устройство контроля температуры провода). Пункт приема располагается на территории подстанции и представляет собой серверный

шкаф с установленным сервером, источником бесперебойного питания, модулем связи и другим технологическим оборудованием с установленным программным обеспечением.

От функционирования указанных элементов и их взаимосвязи зависит эффективность АИСКГН.

В качестве автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки выберем систему АИСКГН «БЛАЙС» компании ООО «Спец КБП и СА».

### **3.8 Выводы по третьему разделу**

Рассмотрены варианты исполнения схем при плавке гололеда методом короткого замыкания. В результате предварительно были выбраны две схемы: трехфазного и однофазного короткого замыкания.

Определены параметры режима плавки, исходя из которых, на данном объекте можно использовать только схему «змейка». Определено время необходимое для полного расплавления гололеда на воздушной линии.

Определен порядок проведения мероприятий по плавке гололеда.

Выбрано устройство релейной защиты на основе микропроцессорного блока «Сириус-ДЗ-35» компании АО «РАДИУС Автоматика». Рассчитаны уставки срабатывания защиты.

Выбрано устройство автоматического дистанционного определения места повреждения на основе микропроцессорного блока «Бреслер-0107.090.ВХ» компании ООО «НПП Бреслер».

Выбрана автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки АИСКГН «БЛАЙС» компании ООО «Спец КБП и СА».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проанализированы факторы, оказывающие влияние на образование отложений. К таким факторам относятся: температура воздуха, скорость ветра, параметры воздушной линии и др. Дан краткий, общий анализ методов борьбы с ледообразованием на воздушных линиях.

2) Обоснована необходимость в проведении мероприятий по плавке гололеда, а также определена предельная толщина гололедной муфты. Произведен выбор метода плавки гололеда.

По результатам расчета получено, что механические напряжения провода с гололедом серьезно превышают допустимые значения без него. И если вовремя не произвести удаление гололедной муфты, то возможно возникновение аварийных ситуаций и выход воздушной линии из строя.

Определена величина критической толщины гололедной муфты, которая равна 16 мм. Следовательно, необходимо производить плавку гололеда при толщинах меньше критической, тем самым снижая до минимума вероятность аварии на линии по причине ледообразования.

После анализа наиболее практикуемых способов плавки гололеда, применительно к сетям 6-10 кВ проходящим в сельской местности, выбран способ плавки гололеда токами короткого замыкания.

3) Рассмотрены варианты исполнения схем при плавке гололеда методом короткого замыкания. В результате предварительно были выбраны две схемы: трехфазного и однофазного короткого замыкания.

Определены параметры режима плавки, исходя из которых, на данном объекте можно использовать только схему «змейка». Определено время необходимое для полного расплавления гололеда на воздушной линии.

Определен порядок проведения мероприятий по плавке гололеда.

Выбрано устройство релейной защиты на основе микропроцессорного блока «Сириус-ДЗ-35» компании АО «РАДИУС Автоматика». Рассчитаны уставки срабатывания защиты.

Выбрано устройство автоматического дистанционного определения места повреждения на основе микропроцессорного блока «Бреслер-0107.090.ВХ» компании ООО «НПП Бреслер».

Выбрана автоматизированная информационная система контроля гололедной нагрузки АИСКГН «БЛАЙС» компании ООО «Спец КБП и СА».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левченко И. И., Засыпкин А. С., Аллилуев А. А., Сацук Е. И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах : учеб. пособие. М. : Издательский дом МЭИ, 2007. 494 с.
2. Дьяков А. Ф., Засыпкин А. С., Левченко И. И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. Пятигорск: изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000. 284 с.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=98464&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.32820407861967404#0012824982234605153> (дата обращения: 25.02.2018).
4. Никитина И. Э., Абдрахманов Н. Х., Никитина С. А. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №3. С. 794-823. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p794-823\\_NikitinaIE\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p794-823_NikitinaIE_ru.pdf) (дата обращения: 18.03.2018).
5. Кувшинов А., Хренников А., Карманов В., Ахмеджанов Н. Удаление гололедных отложений с проводов ВЛ. Преимущества современных полупроводниковых систем. // Отраслевой информационно-справочный журнал «Новости ЭлектроТехники». 2016. №4(100). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/100/07.php> (дата обращения: 29.04.2018).
6. Кувшинов А., Хренников А., Карманов В., Ахмеджанов Н. Удаление гололедных отложений с проводов ВЛ. Преимущества современных полупроводниковых систем. // Отраслевой информационно-справочный журнал «Новости ЭлектроТехники». 2016. №5(101). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2016/101/08.php> (дата обращения: 29.04.2018).

7. Способ управляемой плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи переменным током: пат. 2505897 Рос. Федерация № 2012122516/07; заявл. 31.05.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. 4 с.
8. Способ и устройство для борьбы с гололедом на линиях электропередачи: пат. 2356148 Рос. Федерация № 2008119101/09; заявл. 15.05.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. 13 с.
9. РД 34.20.511 (МУ 34-70-027-82). Методические указания по плавке гололеда переменным током. Ч.1 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200042643> (дата обращения: 13.05.2018).
10. Способ борьбы с гололедом на воздушных линиях электропередачи: пат. 2537851 Рос. Федерация № 2012123221/07; заявл. 05.06.2012; опубл. 10.12.2015, Бюл. №34. 9 с.
11. РД 34.20.511 (МУ 34-70-028-82). Методические указания по плавке гололеда постоянным током. Ч.2 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200042644> (дата обращения: 27.05.2018).
12. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей. М. : ЭНАС, 2012. 376 с.
13. Лыкин А. В. Электроэнергетические системы и сети : учебник для вузов. М. : Издательство Юрайт, 2017. 362 с.
14. Гологорский Е. Г., Кравцов А. Н., Узелков Б. М. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ. М. : ЭНАС, 2007. 560 с.
15. Афонин В. В., Набатов К. А. Электрические системы и сети. Часть 1 : учебное пособие. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 80 с.
16. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 09.12.2018).



17. Линий электропередачи, опоры ЛЭП и ВОЛС на ВЛ [Электронный ресурс]. URL: <https://linijaopory.ru> (дата обращения: 11.11.2018).

18. Федяй О.В. Проблема обледенения проводов воздушных линий и её последствия // «Студенческие Дни науки в ТГУ» : научно-практическая конференция (Тольятти, 2-27 апреля 2018 года) : сборник студенческих работ. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. С. 153-154.

19. Федяй О.В. Плавка гололеда без отключения потребителей в сельской местности // Наука. Общество. Человек. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (г. Смоленск, 30 сентября 2018 года). Смоленск : МНИЦ «Наукосфера», 2018. С. 115-117.

20. Федяй О. В. Высокочастотная связь по линиям электропередач // Современное научное знание: теория, методология, практика. Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции (г. Смоленск, 31 октября 2018 года). Смоленск : МНИЦ «Наукосфера», 2018. С. 90-91.

21. Федяй О.В. Оценка способов плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи напряжением до 110кВ // «Молодежь. Наука. Общество» : Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция (Тольятти, 5 декабря 2018 года) : электронный сборник студенческих работ. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. С. 717-718.

22. Федяй О.В. Методы плавки гололеда наиболее приемлемые для сетей 6-10 кВ, проходящих в сельской местности // Научный и человеческий капитал как движущая сила прогресса информационного общества. Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции (г. Смоленск, 6 мая 2019 года). Смоленск : МНИЦ «Наукосфера», 2019. С. 49-50.

23. Resilience in a changing energy system [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/resilience-changing-energy-system> (дата обращения: 16.09.2017).
24. Fault Protection And Control For the 21st Century Utility [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/fault-protection-and-control-21st-century-utility> (дата обращения: 16.09.2017).
25. Creating Real Opportunities With Today's Digital Substation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/creating-real-opportunities-today's-digital-substation> (дата обращения: 16.09.2017).
26. Virtual reality for Virtual Power Plant operation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/virtual-reality-virtual-power-plant-operation> (дата обращения: 16.09.2017).
27. Weather solutions – value of predictive analytics for grid reliability [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/transmission-and-distribution/article/outage-management/weather-solutions-value-predictive-analytics> (дата обращения: 16.09.2017).
28. Monitoring the low voltage grid: How AMI can help [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/monitoring-low-voltage-grid-ami-vattenfall-nes> (дата обращения: 16.09.2017).
29. Global monitoring for asset management [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/global-monitoring-asset-management> (дата обращения: 16.09.2017).
30. Smart energy for smart cities [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/smart-energy-smart-cities> (дата обращения: 16.09.2017).
31. Power line communication is ready for the smart grid today [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/power-line-communication-ready-smart-grid-today> (дата обращения: 16.09.2017).

32. Dealing with electricity losses [Электронный ресурс]. URL: <https://www.engerati.com/article/dealing-electricity-losses> (дата обращения: 16.09.2017).

33. Development of Protective Relaying Equipment in Substations [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.527.7438&rank=51&q=substation&osm=&ossid> (дата обращения: 17.09.2017).