

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 «Модернизация систем плавки гололеда Жигулевского ПО на воз-  
душных линиях 35-110-220 кВ»

Студент	<u>С.А. Никифоров</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руково- дитель	<u>В.Н. Кузнецов</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.....	4
1 Анализ гололедообразования на проводах ВЛ в Жигулевском ПО.....	5
2 Выбор метода, схемы плавки гололеда .....	13
2.1 Плавка льда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки.....	13
2.2 Плавка постоянным током и переменным током на ВЛ-35-110-200 кВ с помощью ВУПГ.....	24
2.2.1 Основные технические характеристики ВУПГ для плавки гололедно-изморозевых отложений на проводах ВЛ 35-110-220 кВ .....	29
2.2.2 Защиты, выполняемые блоком СУРЗА.....	31
2.2.3 Принципиальная схема системы плавки гололеда.....	32
2.2.4 Регулировочные характеристики преобразователя плавки гололеда.....	34
2.2.5 Схемы подключения преобразователя плавки гололеда к источникам питания на стороне переменного тока.....	37
2.2.6 Перегрузочная способность оборудования, составляющего систему плавки гололеда постоянным током .....	39
2.2.7 Ограничение токов короткого замыкания преобразователя плавки гололеда.....	40
2.3 Плавка льда переменным током на оптическом кабеле, встроенном в грозозащитный трос с использованием фазных проводов .....	41
2.3.1 Схемы плавки гололеда на ОКГТ с использованием фазных проводов.....	42

2.3.2 Схемы одновременной плавки гололеда на фазных проводах и ОКГТ.....	47
2.3.3 Диапазон длин участков ОКГТ, обогреваемых от преобразователей плавки гололеда с применением различных схем плавки .....	55
2.4 Физико-химический способ .....	57
3 Обоснование и выбор целесообразной системы.....	58
3.1 Разбор возможных возникновений аварийных ситуаций при плавке гололедных образований .....	58
3.2 Выбор метода и схемы.....	62
3.2.1 Порядок расчета режимов плавки гололеда на оптическом кабеле, встроенном в грозозащитный трос .....	62
3.2.2 Расчет допустимого тока плавки .....	65
3.2.3 Расчет времени и тока плавки гололеда для ВЛ от ПС 110/35/10 кВ «Александровка» методом итераций .....	66
3.2.4 Расчет времени и тока плавки гололеда для ВЛ от ПС 110/35/10 кВ «Шигоны» .....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	76

## ВВЕДЕНИЕ

В данной магистерской работе рассматриваются вопросы выбора наиболее эффективных способов и методов, которые используются для борьбы с гололедообразованием на ВЛ-35-110-220 кВ, а также вопросы модернизации существующих и управления оборудованием. Исследование выполнено с использованием существующих схем плавки гололеда, проведен анализ оборудования.

Актуальность темы диссертации обусловлена следующими факторами: гололедообразование и изморозь на токоведущих частях и грозозащитных тросах воздушных линий (ВЛ) может приводить к обрыву проводов и грозозащитных тросов, разрушению гирлянд изоляторов и опор; в тоже время применяемые в настоящий момент устройства для борьбы с гололедом немногочисленны, качество их работы в основном определяется применяемыми системами управления. Анализ работы ВЛ показывает, что использование существующих систем без модернизации на данном этапе не соответствует техническому состоянию оборудования и в дальнейшем может привести к аварийным ситуациям.

Цель работы: провести модернизацию систем плавки гололеда для более надежного функционирования энергосистемы Жигулевского ПО.

Поставленная цель достигается установкой дополнительного оборудования на подстанциях (ПС) и разработкой новых схем плавки гололеда, уменьшающих количество оперативных переключений и задействованного оборудования.

Задачи работы:

- 1) Проанализировать существующие методы и схемы плавки гололеда, а также возможные аварийные ситуации и методы борьбы с ними.
- 2) Провести исследование и предложить новые схемы, методы для плавки гололеда на ВЛ-35-110-220 кВ.
- 3) Обосновать модернизацию систем плавки гололеда для разных участков.

## **1 Анализ гололедообразования на проводах ВЛ в Жигулевском ПО**

Гололедообразование и изморозь на токоведущих частях и грозозащитных ВЛ может приводить к обрыву проводов и грозозащитных тросов, разрушению гирлянд изоляторов и опор. Следует отметить, что применяемые в настоящий момент устройства для борьбы с гололедом немногочисленны, качество их работы в основном определяется применяемыми системами управления, а вновь разрабатываемые системы управления могут содержать алгоритмические ошибки.

Плавка гололеда – надежный вариант противодействия гололедообразованию на проводах и грозотросах ВЛ, при котором ток большой величины, созданный в цепи ЛЭП, производит нагрев проводов, в итоге лед и снег оттаивают и опадают. Своевременное обнаружение гололедообразования обеспечивают телеметрические комплексы – современные системы мониторинга, активно внедряемые на электросетевых объектах Жигулевского ПО филиала ПАО «МРСК-Волги».

При эксплуатации ВЛ электропередач может возникнуть проблема гололедообразования на участках линии. В зимний период при внезапном перепаде температуры от плюса к минусу на участках линии происходит лавинообразное развитие ледяного покрытия, достигающего толщины от 1 до 100 миллиметров и значительно утяжеляющего провода (рисунок 1).



Рисунок 1 – Лавинообразный процесс образования ледяной корки

При этом толщина стенок гололедных образований на линиях может достигнуть 70 мм (рисунок 2), значительно увеличивающий вес проводов ЛЭП.



Рисунок 2 – Толщина стенок гололедных образований на ВЛ

Гололедные отложения приводят к аварийным ситуациям, включая разнообразные обрывы линий, грозозащитных тросов, поломку арматуры, изоляторов и иногда опор воздушных линий электропередачи (рисунок 3).



Рисунок 3 – Разрушение опоры ВЛ

Гололедные образования откладываются по участкам линии непропорционально. Метеорологи относят Самарскую область к особому району в соответствии с таблицей 1.

Экономический ущерб от данного погодного явления просто колоссальный. Таким образом, противодействие обледенению ВЛ является важнейшей задачей, актуальной для Самарской области, имеющей участки с рекордно низкими температурами, а также участки с возвышенностями и перепадами температур.

Борьба с гололедными образованиями ведется чаще всего примитивно, отбивкой гололеда и снега на участках линии, хотя в энергетике - обледенение проводов КЛ и ВЛ рассматривают в качестве одного из наиболее сложных бедствий.

Таблица 1 – Нормативная толщина стенок гололеда и нормативное ветровое давление

Район по ветру	Нормативное ветровое давление , Па (скорость ветра, м/с)	Район по гололеду	Нормативная толщина стенки гололеда, мм
I	400(25)	I	10
II	500(29)	II	15
III	650(32)	III	20
IV	800(36)	IV	25
V	1000(40)	V	30
VI	1250(45)	VI	35
VII	1500(49)	VII	40
Особый	Выше 1500(выше 49)	Особый	Выше 45

В соответствии с ПУЭ «организациям, у которых воздушные линии проходит в районах с толщиной гололедно-изморозевых отложений 40 мм и более, а также с сильными ветрами и в районах с частой и интенсивной пляской проводов, рекомендуется предусматривать различные виды борьбы с образованием наледи на проводах ВЛ» [17]. Эффективность указанных систем во многом зависит от скорости принятия решений по борьбе с гололедообразованием.

Параметры модернизируемых объектов.

1. ВЛ 110 кВ Александровка-2:

Протяженность - 120,3 км.

Марка провода - АС 300/39.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - V (толщина стенки гололеда 5 см).

2. ВЛ 110 кВ Цементная-1,2:

Протяженность - 4,66 км.



Марка провода - АС 185/29.

Район по ветру - IV.

Район по гололеду - VI (толщина стенки гололеда 4,0 см).

3. ВЛ 220 кВ Жигулевская ГЭС-Зольное:

Протяженность - 9,24 км.

Марка провода - АС 150/24.

Протяженность - 29,06 км.

Марка провода - АС 120/19.

Район по ветру – V.

Район по гололеду - VII (толщина стенки гололеда 4,5 см).

4. ВЛ 110 кВ Жигулевская-1(уч. ЖГЭС-ПС Переволоки):

Протяженность - 34,55 км.

Марка провода - АС 150/24.

Протяженность - 0,93 км.

Марка провода - АС 185/29.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - V (толщина стенки гололеда 4,0 см).

5. ВЛ 220 кВ Жигулевская-2(уч. ЖГЭС-ПС Услава):

Протяженность - 26,58 км.

Марка провода - АС 150/24.

Протяженность - 0,93 км.

Марка провода - АС 185/29.

Район по ветру - II.

Район по гололеду - III (толщина стенки гололеда 3,0 см).

6. ВЛ 110 кВ Сызрань-Шигоны:

Протяженность - 14,05 км.

Марка провода - АС 150/19.

Протяженность - 20,50 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - II.

Район по гололеду - III (толщина стенки гололеда 3,0 см).

7. ВЛ 110 кВ Правая Волга:

Протяженность - 23,20 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - II.

Район по гололеду - III (толщина стенки гололеда 3,0 см).

8. ВЛ 110 кВ Печерская-2(уч.Сызрань-Разъезд-2):

Протяженность - 21,47 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - IV (толщина стенки гололеда 3,5 см).

9. ВЛ 220 кВ Печерский Берег-Шигоны:

Протяженность - 14,07 км.

Марка провода - АС 95/16.

Протяженность - 29,20 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - IV (толщина стенки гололеда 4,5 см).

10. ВЛ 110 кВ Печерская-1 (уч. Печерский Берег-Правая Волга):

Протяженность - 19,7 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - IV (толщина стенки гололеда 2,5 см).

11. ВЛ 110 кВ Печерская-2 (уч. Печерский Берег-Разъезд-2):

Протяженность - 21,17 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III

Район по гололеду - IV (толщина стенки гололеда 2,5 см).

12. ВЛ 110 кВ Жигулевская-1 (уч. Печерский Берег-Переволоки):

Протяженность - 11,8 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - V (толщина стенки гололеда 3 см).

13. ВЛ 110 кВ Жигулевская-1 (уч. Печерский Берег-Переволоки):

Протяженность - 18,89 км.

Марка провода - АС 150/24.

Район по ветру - III.

Район по гололеду - III (толщина стенки гололеда 2 см).

На основе существующих данных видно, что использование примитивных способов борьбы с обледенением проводов не подходит для Самарской области, так как регион подвержен обледенению проводов и разрушению опор в связи с наличием участков с высокой влажностью и низкой температурой зимой. В дальнейшем будут рассмотрены способы плавки гололеда различными способами и различными схемами.

В настоящее время плавка током, физико-химический способ и электротермический способ – наиболее распространенные способы противодействия обледенению ЛЭП.

Для плавки гололеда и гололедно-изморозевых отложений на грозотро-сах линий электропередачи используют как источники постоянного тока, так и переменного тока.

Ввиду того, что ВЛ, зачастую, обладают сложной конфигурацией и проходят как в зонах с различными климатическими условиями, так и в изменяющихся климатических условиях за счет углов поворота ВЛ, в связи с невозможностью предсказать направление ветра в момент образования гололеда, а также, в связи с температурными ограничениями по нагреву волокна необходимо применение системы распределенного контроля температуры в режиме плавки гололеда.

## 2 Выбор метода, схемы плавки гололеда

### 2.1 Плавка льда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки

Согласно исследованиям «плавка гололеда эффективна, если ее длительность не превышает 40 – 60 мин.» [17]. На длительность плавки, кроме условий охлаждения ОКГТ (грозозащитный трос со встроенным оптическим кабелем – элемент ВЛ, предназначенный для защиты ВЛ от прямых ударов молнии, а также выполняющий функцию кабеля связи и передачи данных посредством оптического волокна), существенно влияет размер и плотность отложения, поэтому значение тока плавки заданной длительности вычисляют для наиболее трудного сочетания влияющих факторов, включая наилучшие условия охлаждения ОКГТ в сочетании с нормативными размерами отложения и плотностью гололеда.

Следующая формула служит для нахождения допустимого значения тока плавки  $I_{доп}$ , которое находится в соответствии с выражением (1):

$$I_{доп} = \left[ \delta \cdot \pi \cdot d \cdot E \cdot (T_{доп}^4 - T_{\epsilon}^4) + \lambda_{\epsilon} Nu \cdot T_{доп} - T_{\epsilon} \cdot \pi - Q_{сол} \right] / R_T \Bigg]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $R_T$  – электрическое сопротивление ОКГТ при температуре  $T_{доп}$ ;

$Q_{сол}$  – нагрев от солнечного излучения, Вт/м;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / \text{ м}^2 \text{ К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$d$  – диаметр ОКГТ, м;

$E$  – коэффициент излучения ОКГТ по отношению к абсолютно черному телу;

$T_{\epsilon}$  – температура окружающей среды, К;

$T_{доп}$  – максимально допустимая температура ОКГТ, К;

$\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$Nu$  – число Нуссельта, вычисляемое по выражению (2):

$$Nu = 0,65 \cdot Re^{0,2} + 0,23 \cdot Re^{0,61}, \quad (2)$$

Re – число Рейнольдса, вычисляемое по выражению (3):

$$Re = 1.644 \cdot 10^9 \cdot v \cdot d \cdot \left[ T_e + 0,5 T_{\text{доп}} - T_e \right]^{-1,78}, \quad (3)$$

v – скорость ветра, м/с.

Сопротивление  $R_t$  при температурах отличных от +20 °С рассчитывается по выражению (4):

$$R_{t_{\text{доп}}} = R_{t_1} \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot t_{\text{доп}} - t_1 \right], \quad (4)$$

где  $R_{t_1}$  – сопротивление постоянному току при температуре  $t_1 = +20^\circ\text{C}$ ;

$R_t$  – сопротивление постоянному току при температуре  $t$ , Ом/км;

$\alpha$  - температурный коэффициент электрического сопротивления ОКГТ,  $^\circ\text{C}^{-1}$ .

Из-за малого влияния солнечного излучения при климатических условиях, приводящих к образованию гололеда, величиной  $Q_{\text{сол}}$  в расчетах можно пренебречь.

Требуемый ток  $I_{\text{пл\_треб}}$ , необходимый для расплавления гололедных отложений на ОКГТ в течение заданного интервала времени, определяется для нормативной толщины стенки гололеда при наибольшей скорости ветра и температуре воздуха, характерным для условия гололедообразования в данной местности. Имеются ограничения на время плавки гололедно-изморозевых отложений. Продолжительность времени плавки должна быть меньше 60 минут. Значение требуемого тока плавки при заданной длительности интервала времени плавки гололеда или времени проведения плавки при заданном требуемом токе определяется исходя из стационарного решения задачи, принимая температуру ОКГТ равной максимально допустимой (5):

$$I_{\text{пл\_треб}}^2 \cdot R_t \cdot \Delta t + q_{\text{сол}} \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta r + q_{\text{из}} \cdot \Delta t + Q_{\text{окзм}} + Q_{\text{ьда}} + Q_{\text{пл}}, \quad (5)$$

где  $I_{\text{пл\_треб}}$  – требуемый ток для проведения плавки гололеда, А;

$\Delta t$  - время плавки гололеда, с;

$q_{\text{сол}}$  - удельный тепловой поток от солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{\text{в}}$  - мощность, отводимая за счет конвекции в воздухе, Вт/м;

$q_{\text{из}}$  – мощность, отводимая за счет излучения, Вт/м;

$Q_{\text{окгт}}$  – тепло затрачиваемое на нагрев ОКГТ, Дж/м;

$Q_{\text{льда}}$  – тепло затрачиваемое на нагрев льда, Дж/м;

$Q_{\text{пл}}$  – тепло затрачиваемое на плавление льда (изморози), Дж/м.

Из-за малого влияния солнечного излучения при климатических условиях, приводящих к образованию гололеда, величиной  $q_{\text{сол}}$  в расчетах можно пренебречь.

Расчет мощности, отводимой за счет конвекции в воздухе (6):

$$q_{\text{в}} = - \frac{1}{\frac{1}{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{льда}}} \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \pi \cdot t_{\text{в}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$d$  – диаметр ОКГТ, м;

$D$  – диаметр ледяной муфты, м;

$t_{\text{в}}$  – температура окружающего воздуха, С;

$Nu$  – число Нуссельта (7):

$$Nu = c Re_{\text{в}}^n Pr_{\text{в}}^m, \quad (7)$$

$Pr_{\text{в}}^m$  – число Прандтля (8):

$$Pr_{\text{в}}^m = \frac{\mu C_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}, \quad (8)$$

Где  $C_{\text{в}}$  - теплоемкость воздуха, Дж/(м·К);

$Re$  – число Рейнольдса (9):

$$Re = \frac{\rho_{\text{в}} v d}{\mu} \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость воздуха, м/с;

$d$  – диаметр ОКГТ, м;

$\mu$  - коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Коэффициенты **c**, **n** и **m** для разных диапазонов чисел Рейнольдса приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов **c**, **n** и **m**

№	Re	c	n	m
1	$5 \div 10^3$	0,5	0,5	0,38
2	$10^{3 \div 5} \cdot 2 \cdot 10^5$	0,25	0,6	0,43
3	$2 \cdot 10^{5 \div 7} \cdot 2 \cdot 10^6$	0,023	0,8	0,37

Расчет мощности, отводимой за счет излучения (10):

$$q_{из} = \pi D \varepsilon \cdot \delta \cdot \left[ (T_{ст2})^4 - (T_в)^4 \right], \quad (10)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / \text{ м}^2 \text{ К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана;

D – диаметр ледяной муфты, м;

$\varepsilon$  - коэффициент черноты поверхности льда;

$T_{ст2} = t_{ст2} + 273$  – температура внешней поверхности льда, К;

$T_в = t_в + 273$  – температура воздуха, К.

Расчет тепла, затрачиваемого на нагрев ОКГТ (11):

$$Q_{окгт} = (t_{окгт} - t_в) \sum_{i=1}^n C_i \rho_i S_i, \text{ Дж} / \text{ м}, \quad (11)$$

где  $t_{окгт}$  – температура ОКГТ, С;

$t_в$  – температура окружающего воздуха, С;

$C_i$  – теплоемкость компонентов материала ОКГТ;

$\rho_i$  – плотность компоненты материала ОКГТ, кг/м<sup>3</sup>;

$S_i$  – площадь одного из компонентов ОКГТ, м<sup>2</sup>.

Расчет тепла затрачиваемого на плавление льда (изморози) (12):

$$Q_{пл} = 1,1 \cdot Fr_{пл} \rho_{льда}, \text{ Дж} / \text{ кг}, \quad (12)$$

где  $r_{пл}$  – удельная теплота плавления льда, Дж/кг;

$\rho_{льда}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;



$F$  – площадь плавки льда,  $\text{м}^2$ .

Схема для расчета гололедообразования на ВЛ приведена на рисунке 4.

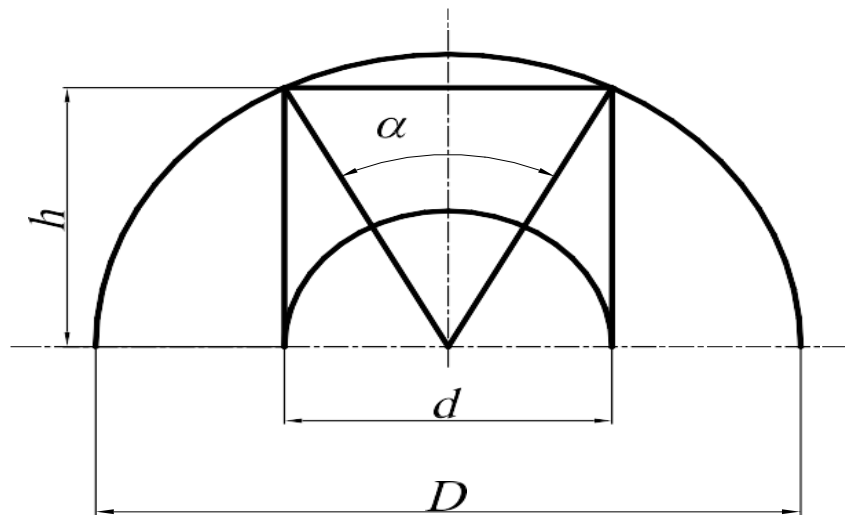


Рисунок 4 – Схема расчета гололедообразования на проводе ВЛ

Площадь плавки льда рассчитывается по формуле (13; 13.1; 13.2):

$$F = \frac{hd}{2} - \frac{\pi d^2}{8} + \frac{\pi D^2}{4} \frac{\alpha}{360}; \quad (13)$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}; \quad (13.1)$$

$$\alpha = 2 \arctg\left(\frac{d}{2h}\right). \quad (13.2)$$

Расчет тепла, затрачиваемого на нагрев льда (14):

$$Q_{\text{льда}} = \frac{\pi}{2} \rho_{\text{льда}} C_{\text{льда}} \left[ t_{\text{см2}} \left( \frac{D^2}{2} - \frac{D^2}{4 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} + \frac{d^2}{4 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \right) + t_{\text{г}} \left( \frac{d^2}{2} - \frac{D^2}{2} \right) \right], \text{Дж} / \text{м}, (14)$$

где  $C_{\text{льда}}$  – теплоемкость льда,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Теплоемкость льда (изморози) вычисляется по средней температуре ледяной муфты. Средняя температура ледяной муфты вычисляется по формуле (15):

$$t_{cp} = (t_{cm2} + t_{\epsilon}) / 2, \quad (15)$$

Температура внутренней поверхности стенки ледяной муфты принимается равной 0 С.

Температура внешней поверхности стенки льда –  $t_{ct2}$ , определяется по выражению:

$$t_{cp2} = - \left[ \frac{1}{\left( \frac{Nu \cdot \lambda_{\epsilon}}{D} + \epsilon \cdot \delta \cdot [T_{cm2}^4 - T_{\epsilon}^4] - \frac{q_{con}}{t_{cm2} - t_{\epsilon}} \right) D} + \frac{1}{2\lambda_{льда}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right]^{-1} \cdot \frac{1}{2\lambda_{льда}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) t_{\epsilon}, \quad (16)$$

В качестве дополнительной проверки, можно провести расчет температуры ОКГТ покрытого гололедом с необходимым шагом по времени, начиная с момента начала плавки гололеда и заканчивая временем выбранной длительности плавки. Данный расчет поможет приблизительно оценить динамику нагрева ОКГТ в течение интервала времени проведения плавки гололеда.

Примерные данные по теплофизическим свойствам льда, изморози, стали и алюминия приведены в таблице 3. Теплофизические зависимости, приведенные для воздуха, вполне коррелируют с данными отечественных авторов. Все используемые зависимости приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Теплофизические данные изморози, льда, стали, алюминия, стали плакированной алюминием

№	Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент излучения
1	Изморозь (снег)	-	$(2,1+42 \cdot 10^3 \cdot \rho+216 \cdot 10^{-9} \rho^3) \cdot 10^{-2}$	$2120 \cdot (10,0037 \cdot t)$	0,3
2	лед	920	2,27	2260	0,64
3	сталь	7900	45	462	0,82
4	алюминий	2670	204	920	0,19
5	Сталь плакированная алюминием	20 SA	45	518	0,2-0,9*
		27 SA		551	
		30 SA		566	
		40 SA		630	

Таблица 4 – Расчетные зависимости теплофизических параметров для воздуха

№	Величина	Формула
1	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)	$2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} t - 4,407 \cdot 10^{-9} t^2$
2	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} H + 6,379 \cdot 10^{-9} H^2}{1 + 0,00367 t}$
3	Динамическая вязкость, $\mu$ , Па·с	$\frac{1,458 \cdot 10^{-6} (t + 273)^{1,5}}{t + 383,4}$
4	Теплоемкость, $C_p$ , Дж/(кг·К)	$1006,0101 + 4,546 \cdot 10^{-3} \cdot e + 5,19 \cdot 10^{-4} t^2$

Скорость ветра, также, как и температура воздуха, изменяется в процессе обледенения. Реальная температура образования гололеда может изменяться в пределах от 0 °С до минус 10 °С. За расчетную скорость ветра при гололеде, если не имеется фактических данных по трассе, рекомендуется принимать величину, равную 0,5 нормативной скорости ветра при отсутствии гололеда.

«Нормативные условия по гололеду и ветровому давлению определяются на основании карт районирования территории РФ» [17], как на рисунке 5.

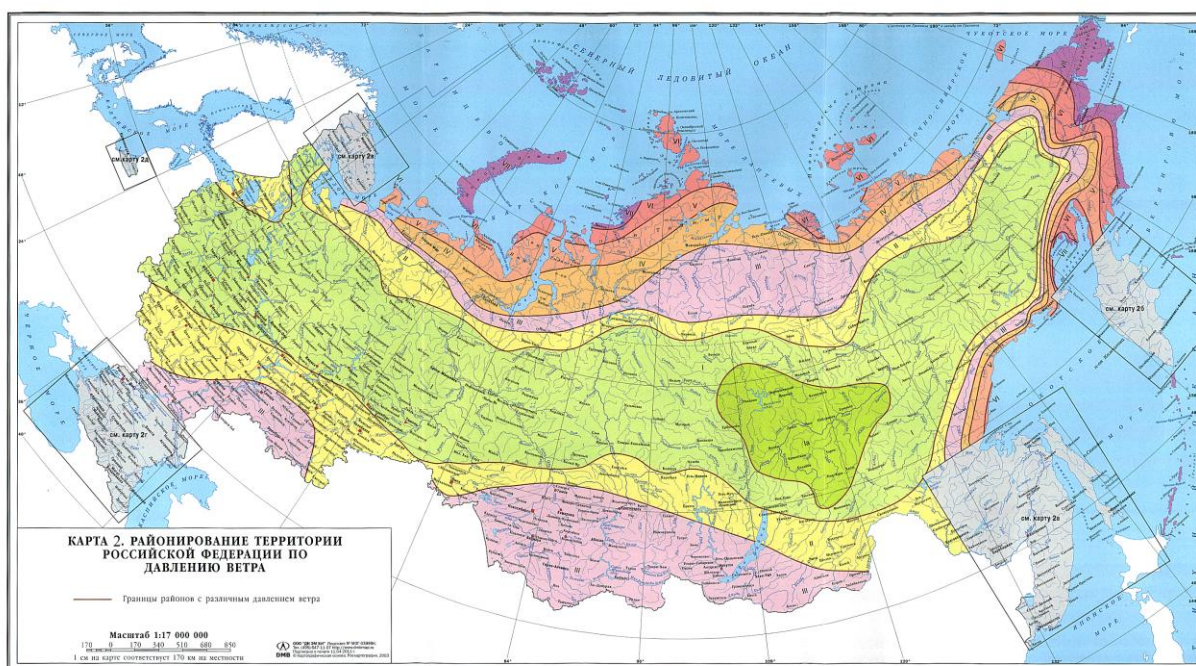


Рисунок 5 – Карта районирования территории РФ по давлению ветра

Для выбора схем плавки, определения длины участка плавки и диапазона регулировки тока плавки гололеда принимается диапазон тока «плавки, как интервал от значения допустимого тока плавки  $I_{доп}$ , рассчитанного по формуле и умноженного на коэффициент 0,95, до значения требуемого тока плавки  $I_{пл\_треб}$ , умноженного на коэффициент 1,15» [17]. Снижение на 5 % начального тока плавки  $I_{доп}$  по отношению к рассчитанному дает дополнительный запас в случае если ток  $I_{доп}$  приведет к нагреву ОКГТ до критиче-

ской температуры. Увеличение тока  $I_{пл\_треб}$  на 15 % дает возможность выбрать параметры установки плавки гололеда таким образом, что при отличии в худшую сторону реальных условий гололедообразования от расчетных, установка плавки позволит создать в ОКГТ увеличенный ток плавки.

Гарантируя надежной работы ОКГТ является измерение температуры ОВ по всей длине ОКГТ во время проведения плавки. В общем случае измерительный модуль (см. рисунок 6,7) может состоять из:

- измерителя температуры ОВ, который одновременно позволяет определять его длину и затухание;
- блока связи с ПК РМО;
- блока коммутации ОВ, если модуль должен измерять температуру нескольких О].

Для проведения измерений измерительный модуль через кроссовую панель подключается к измеряемому ОВ.

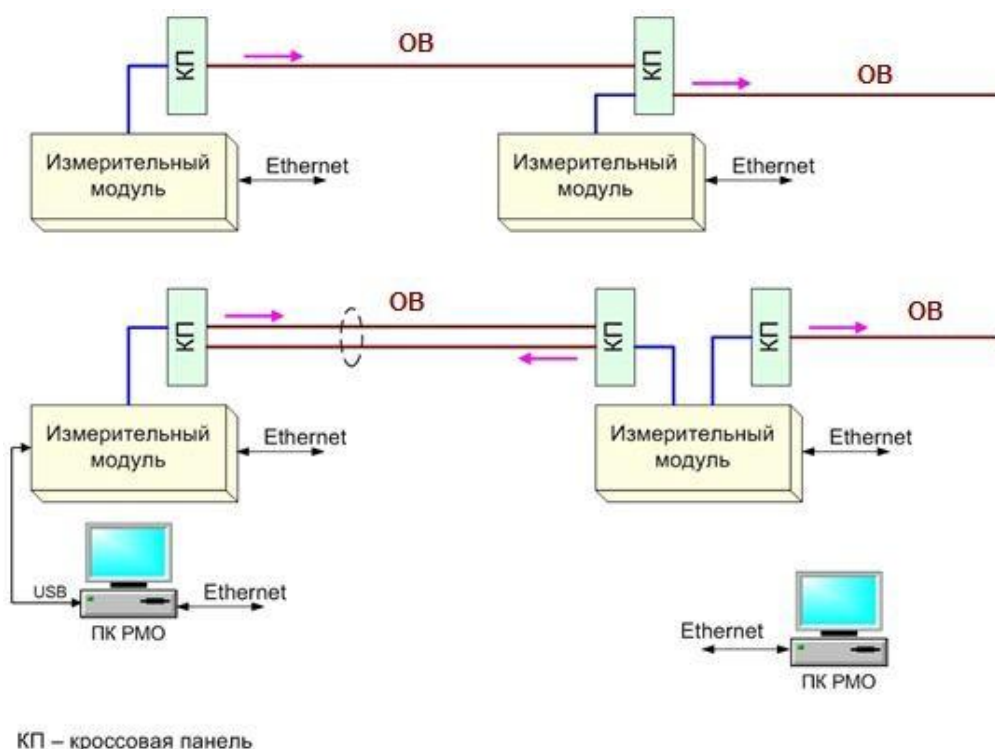


Рисунок 6 – Составные части СРКТ

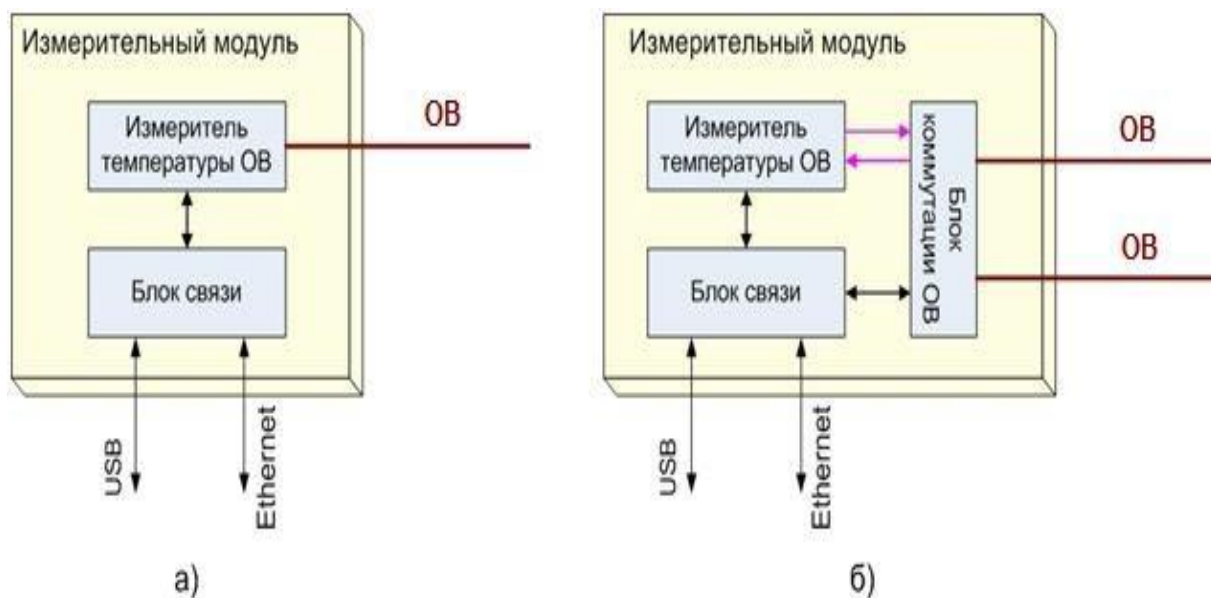


Рисунок 7 – Измерительный модуль СРКТ

Для каждого конкретного случая, когда на одной или нескольких ВЛ планируется установка СРКТ, должен быть разработан индивидуальный проект размещения оборудования, входящего в состав СРКТ. При составлении схемы учитываются не только количество измерительных модулей и параметры ВЛ.

Управление измерительным оборудованием должно осуществляться с помощью программного обеспечения, установленного на персональном компьютере рабочего места оператора (ПК РМО). При этом должна быть обеспечена возможность локального (через порты USB или Ethernet) и удаленного (через Ethernet) управления.

Результатом должен являться график распределения температуры ОВ по его длине, пример которого приведен на рисунке 8.



Рисунок 8 – График распределения температуры по его длине ВЛ

Программное обеспечение должно позволять оператору СРКТ выбрать до начала измерений, какие именно функции будут выполняться в автоматическом режиме.

Погрешность измерения температуры должна быть не более указанных значений в таблице 5.

Таблица 5 – Допускаемая погрешность измерения температуры

Максимальное расстояние при измерении температуры, км	Время измерения, мин	Разрешающая способность по расстоянию, м	Погрешность измерения температуры, С
5	1	30	2
20	3	50	3
50	5	100	5
90	10	1000	10



## 2.2 Плавка постоянным током и переменным током на ВЛ-35-110-200 кВ с помощью ВУПГ

Для плавки гололеда постоянным или переменным током используются нерегулируемые выпрямительные блоки, а также регулируемые (ВУПГ).

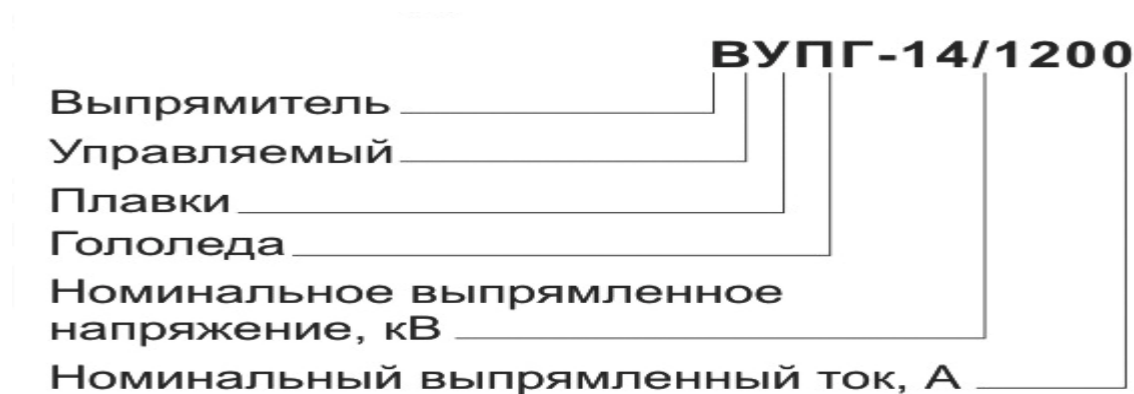


Рисунок 9 – Расшифровка аббревиатуры ВУПГ

Далее показаны различные технические характеристики используемого в сетях Жигулевского ПО. Для увеличения мощности ВУПГ подключить как последовательно, так и параллельно. Наделение ВУПГ свойств регулирования выходных параметров гарантирует увеличение энергоэффективности процесса плавки. Процесс устранения гололеда с проводов осуществляется от стационарной или от передвижной мобильной системы.

Наиболее универсальным вариантом установки является ВУПГ-14/1200, которая обеспечивает необходимый ток плавки для проводов ВЛ классов 35-110-220 кВ в районах с интенсивным гололедообразованием. Вышеуказанным районами в сетях Жигулевского ПО филиала ПАО «МРСК Волги» является – Сызранский РЭС, Жигулевский РЭС. В Сызранском районе электросетей установлены две мобильные установки ВУПГ-14/1200, так как данный район является наиболее подверженным обледенению линий электропередач. В данный момент планируется в сетях Жигулевского ПО установка еще нескольких ВУПГ в других районах, для обеспечения без-



опасности вовремя ОЗП и для повышения энергоэффективности процесса плавки гололеда.



Рисунок 10 – Схема установки ВУПГ на ПС 35/10 Троицкая

Плавку гололеда на ОКГТ следует выполнять постоянным током с помощью управляемых выпрямителей. Преимущества плавки постоянным током:

- возможность плавного, а не ступенчатого регулирования напряжения, а, следовательно, и тока плавки;
- высокое быстродействие системы регулирования постоянного тока плавки;
- возможность регулирования напряжения и тока плавки в широких пределах, в том числе и по сигналам от системы контроля гололедообразования.

Для этой цели могут использоваться, выпрямители управляемые плавки гололеда типа ВУПГ-14/1200 на номинальный выпрямленный ток 1200 А соответственно. Преобразователи предусмотрены для работы от шин напряжением 10 кВ (номинальное выпрямленное напряжение  $U_d \text{ ном} = 14 \text{ кВ}$ ),

возможно их подключение и к шинам 6 кВ (номинальное выпрямленное напряжение  $U_d \text{ ном} = 9 \text{ кВ}$ ).

В зависимости от параметров схемы плавки, может быть применено последовательное и (или) параллельное соединение двух преобразователей. Преобразователи выполняются на тиристорах по трехфазной мостовой схеме. За счет изменения угла управления тиристорами ВУПГ выпрямленное напряжение может изменяться в пределах от 1 кВ до  $U_d \text{ ном}$ .

Обычно в состав основного оборудования системы плавки гололеда постоянным током входят:

- выпрямитель управляемый плавки гололеда, который состоит из мостового выпрямителя (МВ) с системой управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА);

- источник переменного трехфазного напряжения 10 кВ, 50 Гц для питания МВ;

- источник напряжения питания собственных нужд (СН) 380 В, 50 Гц;

- токоограничивающий реактор (при необходимости);

- коммутационная аппаратура (разъединители);

- кабели связи (управления) между МВ и СУРЗА, СУРЗА и подстанцией;

- силовая ошиновка (силовые кабели);

- комплектное распределительное устройство наружной установки (КРУН);

- заземлитель средней точки двух МВ (при необходимости);

- заземлители на приемных концах ВЛ (при необходимости).

Краткое описание системы управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА) выпрямителя управляемого плавки гололеда (ВУПГ) ВУПГ состоит из двух функциональных блоков:

- мост выпрямительный (МВ);

- система управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА).

Функциональная схема ВУПГ приведена на рисунке 11.

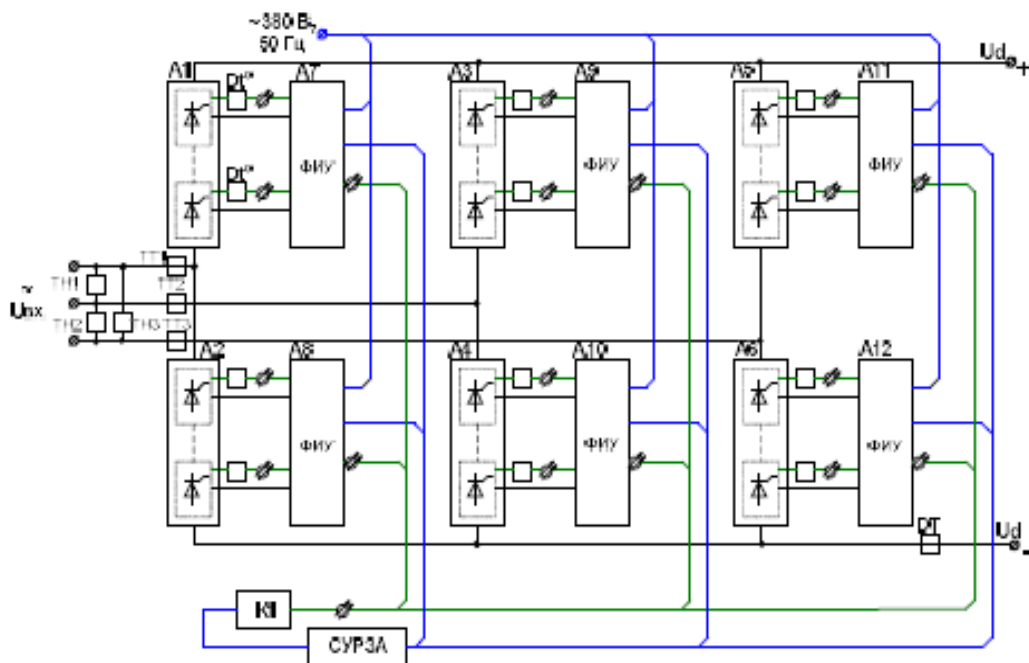


Рисунок 11 – Функциональная схема ВУПГ

СУРЗА предназначена для управления, регулирования и защиты ВУПГ при проведении плавки гололеда, не допускает возможности ошибочного изменения последовательности операций при пуске ВУПГ, поддерживает заданный ток плавки гололеда и производит отключение ВУПГ при возникновении аварийных ситуаций.

СУРЗА обеспечивает:

а) выполнение операций:

- включение и отключение выпрямителя в режиме плавки;
- измерение выходного тока;
- регулирование выходного тока;
- обеспечение выполнения действий защит;
- отключение выпрямителя внешними «сухими» контактами
- выдача сигнала на отключение высоковольтного выключателя в цепи

питания 10 кВ, 50 Гц.

б) световую индикацию:

- о наличии питания собственных нужд СУРЗА;
- о наличии входного силового напряжения 10 кВ,

- о текущем состоянии выпрямителя;
- в) индицирование измеренных значений выходного тока на панели оператора;
- г) тестирование оборудования СУРЗА и выпрямителя при включении питания;
- д) задание значения уставки выходного тока с электронной панели оператора или другого ведущего устройства;

Для управления и контроля работой выпрямителя в СУРЗА поступают сигналы:

- входных напряжения и тока, которые снимаются с проходных измерительных трансформаторов тока и измерительных трансформаторов напряжения;
- выходного тока с датчика LEM.

СУРЗА обеспечивает возможность мониторинга состояния ВУПГ по интерфейсу RS-485 протокол Modbus RTU. СУРЗА регулирует угол открытия тиристорov MB, тем самым, регулируя выходное напряжение, и как следствие, ток в контуре плавки. Поэтому параметром, задающим угол открытия тиристорov, является ток в контуре плавки. Данные о текущей величине выходного тока воспринимаются СУРЗА с датчика тока, установленного на одном из выводов постоянного тока MB. Структурная схема связи MB и СУРЗА приведена на рисунке 12.

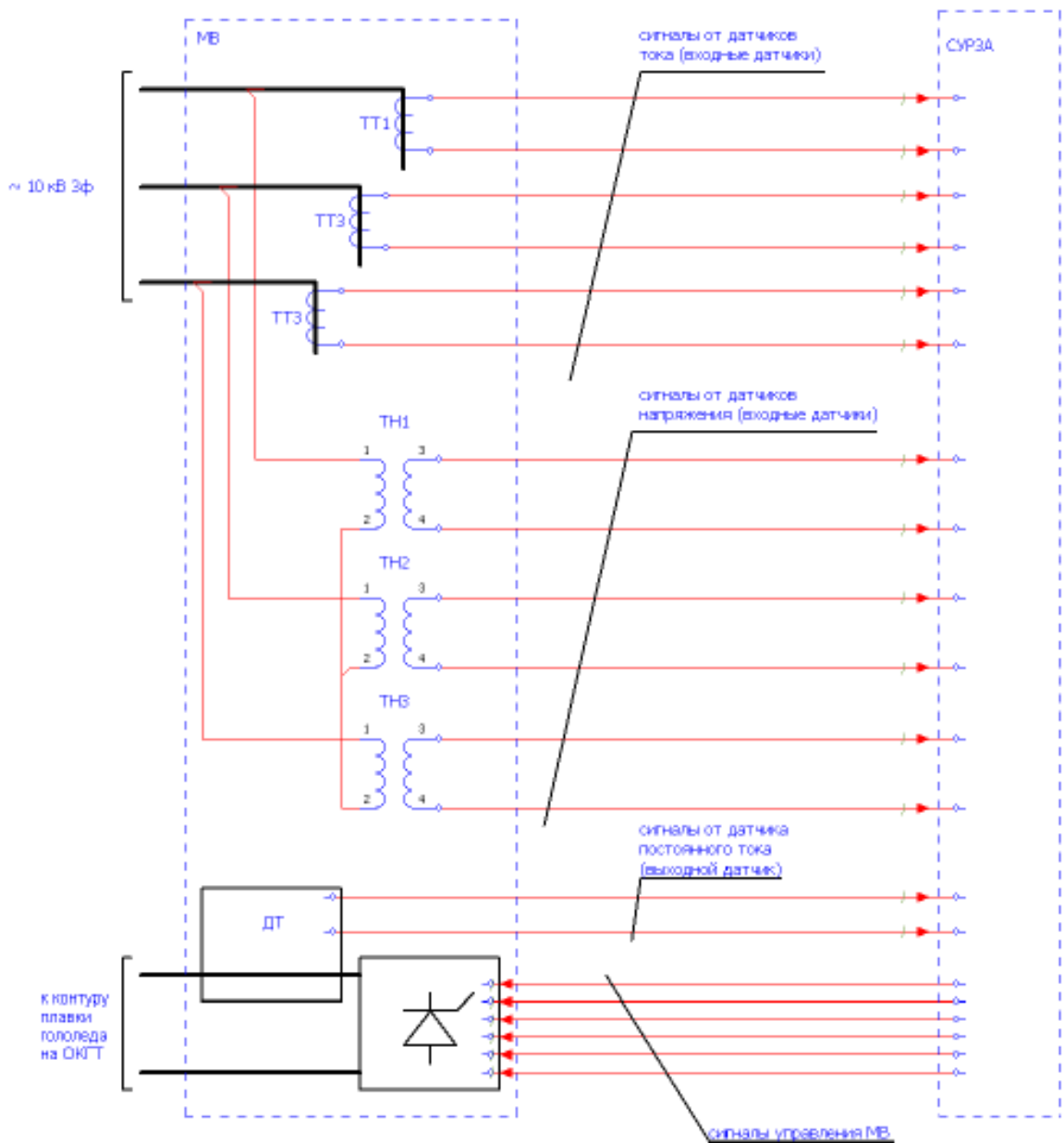


Рисунок 12 – Структурная схема связи МВ и СУРЗА

### 2.2.1 Основные технические характеристики ВУПГ для плавки гололеда на проводах ВЛ 35-110-220 кВ

Основные электрические параметры МВ и блока СУРЗА приведены в таблицы 6 и 7.

Таблица 6 – Основные электрические параметры МВ

Наименование параметра	Значение
Номинальное входное напряжение, кВ	6;10
Номинальное выпрямленное напряжение, кВ	до 9; 14
Номинальная мощность, МВт	10,8; 16,8
Номинальный выпрямленный ток, А	1200
Максимально допустимый выпрямленный ток, А	1400
Диапазон изменения выпрямленного тока, А	100 ÷ 1400
Напряжение питания собственных нужд, В	~380, 3 фазы

Таблица 7 – Основные электрические параметры блока СУРЗА

Наименование параметра	Значение
Входные параметры	
Номинальное напряжение питания, В	~380, 3 фазы
Номинальная частота напряжения питания собственных нужд, Гц	50
Мощность потребляемая собственными нуждами, не более, Вт	500
Параметры входного дискретного сигнала типа «сухой контакт»:	
- напряжение (постоянное) не более, В	24
- потребляемый ток, не более, мА	10
Выходные параметры	
Параметры выходного дискретного сигнала типа «сухой контакт»:	
- напряжение (постоянное) не более, В	24
- потребляемый ток, не более, мА	100

## 2.2.2 Защиты, выполняемые блоком СУРЗА

При превышении входного напряжения значения 12 кВ СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов. После восстановления напряжения подача импульсов возобновляется.

При снижении питающего напряжения относительно номинального значения 10 кВ более чем на 20 %, СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов. На ГЩУ (АСУ ТП ПС) подается сигнал «Авария».

При возникновении в любой из фаз сверхтоков кратностью более двух номинальных значений СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов и формирует сигнал на отключение быстродействующего высоковольтного выключателя для снятия высокого напряжения с ВУПГ; одновременно на ГЩУ (АСУ ТП ПС) выдается сигнал «Авария».

При превышении выходного тока более чем на 20 % по отношению к уставке тока, СУРЗА прекращает выдачу управляющих импульсов с последующим двойным автоматическим повторным включением (АПВ). Длительность паузы АПВ уточняется в процессе привязки ВУПГ к конкретной ПС. В случае если оба АПВ неудачны, СУРЗА формирует сигнал «Авария» на ГЩУ (АСУ ТП ПС) подстанции.

При нарушении порядка чередования коммутаций вентилей СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов с последующим АПВ. В случае неуспешного АПВ СУРЗА формирует сигнал «Авария» на ГЩУ (АСУ ТП ПС).

При перегреве любого из корпусов силовых тиристоров СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов с последующим АПВ через 5 минут после получения сигнала о перегреве (уставка по времени по данной аварии уточняется в процессе наладки). После АПВ СУРЗА управляет работой МВ в заданном режиме до завершения процесса плавки. Число циклов АПВ не ограничено.

При пропадании питания вентиляторов хотя бы одного из вентилях СУРЗА прекращает подачу управляющих импульсов. При этом на ГЩУ (АСУ ТП ПС) выдается сигнал «Авария».

При срабатывании защит ВУПГ на ГЩУ (АСУ ТП ПС) поступает сигнал «Авария». Расшифровка вида аварии высвечивается на лицевой панели СУРЗА.

СУРЗА прекращает выдачу управляющих импульсов при поступлении соответствующего сигнала от ПС (АСУ ТП ПС).

### **2.2.3 Принципиальная схема системы плавки гололеда**

Принципиальная схема системы плавки гололеда на ОКГТ приведена на рисунке 13.1 и 13.2. На ней показаны схемы устройств подключения преобразователя плавки гололеда к источнику питания и подвода постоянного напряжения плавки к объекту плавки. Представленная схема подвода постоянного напряжения плавки к объекту плавки позволяет также осуществлять плавку гололеда на фазных проводах ВЛ.

КРУН на соответствующий класс напряжения может устанавливаться как на стороне высокого напряжения перед трансформатором плавки гололеда (рисунок 13.1), так и на стороне 10 кВ после трансформатора плавки гололеда (рисунок 13.2). Коммутационные аппараты, не приведенные на рисунках, определяются схемой конкретной подстанции.



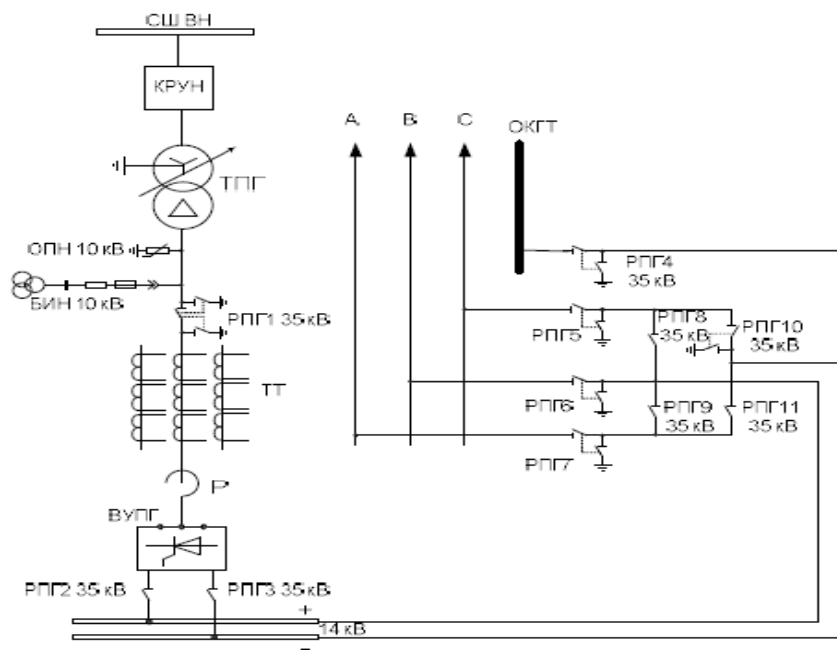


Рисунок 13.1 – Схема подключения перед ТПГ на стороне ВН

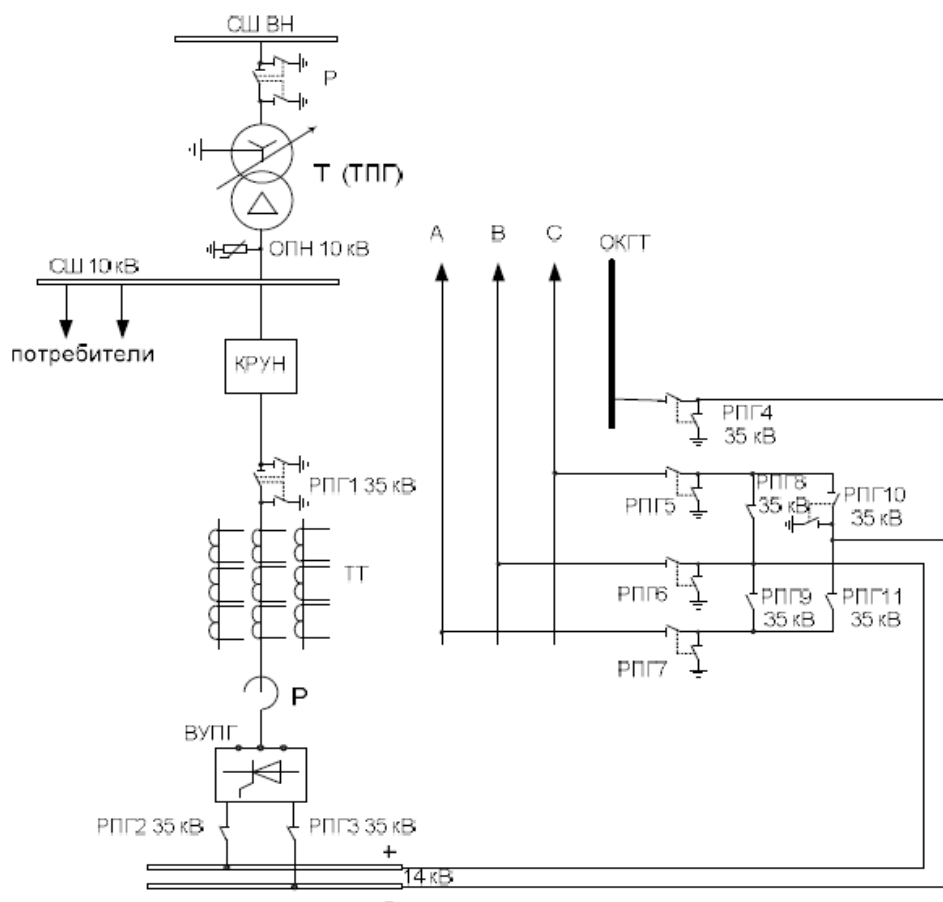


Рисунок 13.2 – Схема подключения на стороне 10 кВ после ТПГ

## 2.2.4 Регулировочные характеристики преобразователя плавки гололеда

Связь между параметрами номинального режима на сторонах постоянного и переменного напряжений преобразователя плавки гололеда определяется следующими соотношениям (17,18,19):

$$I_{\phi} = 0,817I_d, \quad (17)$$

$$U_d = I_d R_d, \quad (18)$$

$$S = \sqrt{3}U_n I_{\phi}, \quad (19)$$

где  $I_{\phi}, I_d$  - переменный фазный ток преобразователя и постоянный ток плавки соответственно; А;

$U_n, U_d$  - действующее значение линейного напряжения на стороне переменного тока и выпрямленное напряжение, В;

$R_d$  - сопротивление контура плавки, Ом;

$S$  – полная мощность плавки, МВА.

При изменении угла управления  $\alpha$  тиристорами МВ в диапазоне от нуля до 60 градусов форма кривой напряжения  $U_d$  и его среднее значение следует считать одинаковыми как при активной, так и при активно – индуктивной нагрузке (20):

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}U_n}{\pi} \cos \alpha, \quad (20)$$

При  $\alpha > 60$  градусов вид кривой  $U_d$  зависит от характера нагрузки. При активной нагрузке значение выпрямленного напряжения определяется по выражению (21)

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}U_n}{\pi} (1 + \cos 60 + \alpha), \quad (21)$$

Регулировочные характеристики выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке (кривая 1) и при чисто активной нагрузке (кривая 2)

без учета коммутационных процессов в тиристорах преобразователя приведены на рисунок 14.

Заштрихованная область соответствует семейству регулировочных характеристик в режимах с прерывистым током при различных значениях отношения (22):

$$\frac{\omega L_d}{R_d}, \quad (22)$$

где  $L_d$  - индуктивность контура плавки,  $\omega = 2\pi\gamma$ ,  $\gamma = 300$  Гц.

Расчет тока плавки гололеда при активно-индуктивной нагрузке с  $0 \leq \alpha \leq 90$  и при активной нагрузке с  $0 \leq \alpha \leq 60$  должен проводиться по следующему выражению (23):

$$I_d = \frac{1.35U_n \cos \alpha}{\frac{3}{\pi} X_\gamma + R_d}, \quad (23)$$

где  $X_\gamma$  - индуктивное сопротивление контура коммутации выпрямительного моста, Ом.

При активной нагрузке,  $60 \leq \alpha \leq 120$  расчет тока плавки производится по выражению (24):

$$I_d = \frac{1.35U_n (1 + \cos 60 + \alpha)}{\frac{3}{\pi} X_\gamma + R_d}, \quad (24)$$

При питании преобразователя от одиночного автотрансформатора сопротивление  $X_y$  определяется выражением (25):

$$X_y = X_p + X_{m.HH} + X_{m.BH} + X_{c.BH}. \quad (25)$$

При питании от одиночного трансформатора выражением (26):

$$X_y = X_p + X_m + X_{c.BH}, \quad (26)$$

где  $X_T$  - индуктивное сопротивление трансформатора, Ом.

При питании двух преобразователей от трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения сопротивление  $X_\gamma$  каждого преобразователя определяется (27):

$$X_\gamma = X_p + X_{m.HH} + 2 X_{m.BH} + X_{c.BH} . \quad (27)$$

При питании двух преобразователей от двух обмоток разных автотрансформаторов сопротивление  $X_\gamma$  каждого ВМ определяется (28):

$$X_\gamma = X_p + X_{m.HH} + X_{m.BH} + 2X_{c.BH} , \quad (28)$$

При питании от двух трансформаторов определяется (29):

$$X_\gamma = X_p + X_m + 2X_{c.BH} . \quad (29)$$

Все сопротивления должны быть приведены к стороне НН.

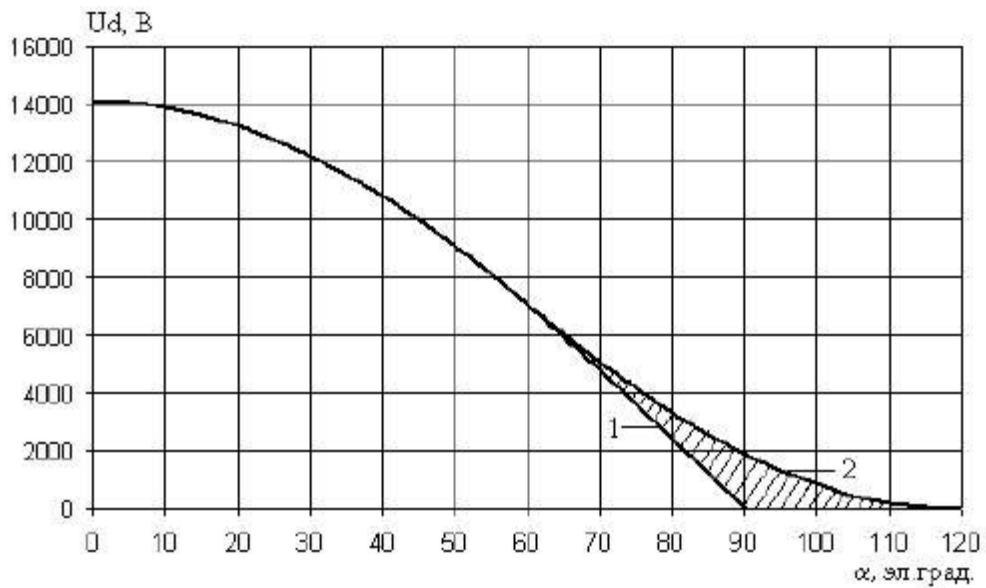


Рисунок 14 – Регулировочная характеристика преобразователя плавки гололеда с  $U_{\text{ном}} = 14\text{кВ}$ : 1 – при активно-индуктивной нагрузке с  $\omega L_d \rightarrow \infty$

;

2 – при активной нагрузке

## 2.2.5 Схемы подключения преобразователя плавки гололеда к источникам питания на стороне переменного тока

Источником переменного напряжения 10 кВ может служить преобразовательный трансформатор, автотрансформатор, ячейка с ПС.

Ниже приведены схемы подключения преобразователя плавки гололеда к источнику питания на подстанции приведены на рисунках 15-18.

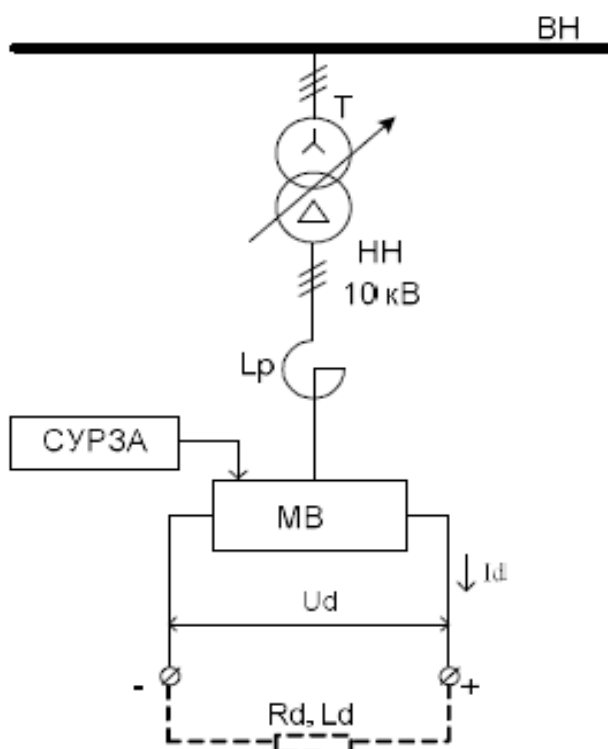


Рисунок 15 – Схема подключения одного преобразователя к трансформатору плавки гололеда с одной обмоткой НН

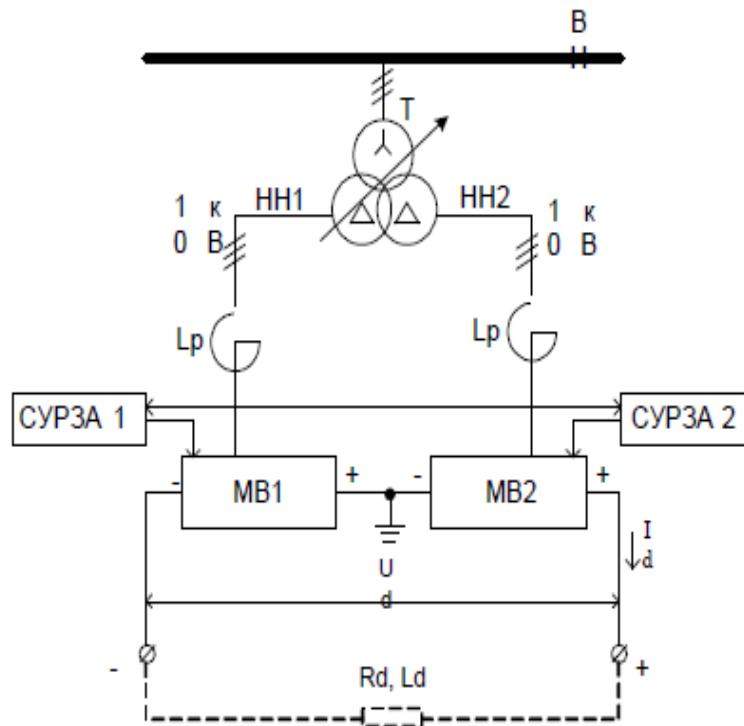


Рисунок 16 – Схема подключения двух преобразователей к трансформатору плавки гололеда с расщепленной обмоткой НН

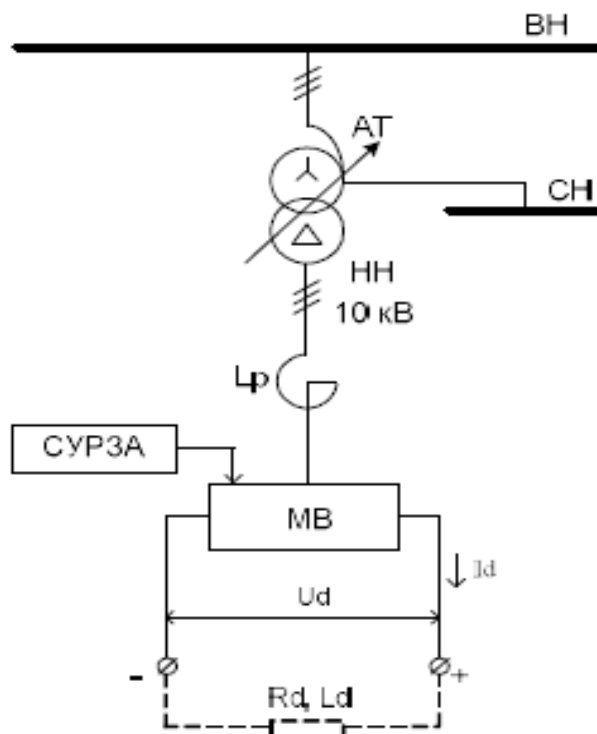


Рисунок 17 – Схема подключения одного преобразователя к автотрансформатору

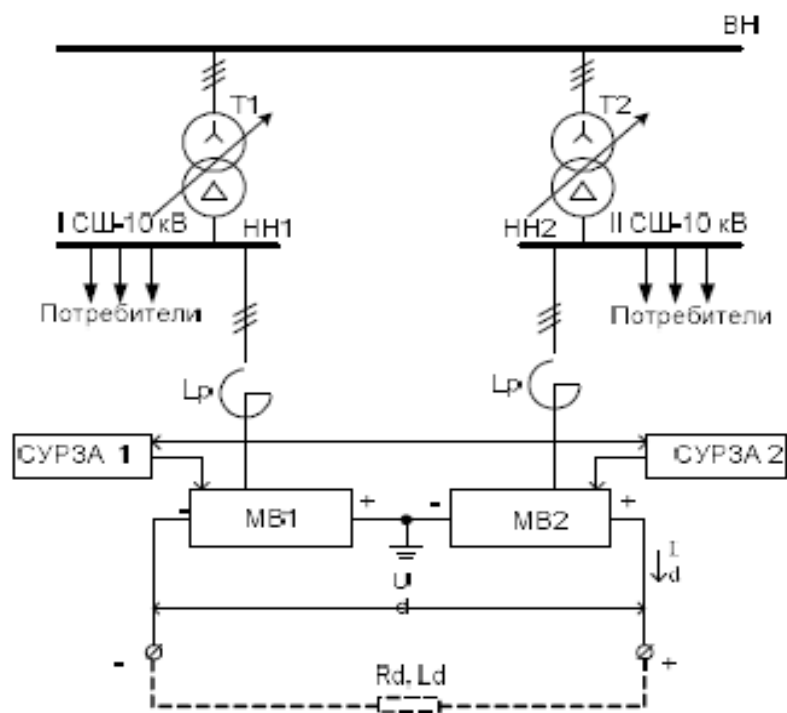


Рисунок 18 – Схема подключения двух преобразователей к обмоткам НН двух трансформаторов

### 2.2.6 Перегрузочная способность оборудования, составляющего систему плавки гололеда постоянным током

Мощность трансформатора, питающего преобразователь плавки гололеда, определяется из выражения (30):

$$S_{mp} = 0,817\sqrt{3}I_d U_d. \quad (30)$$

«В аварийных режимах допускается перегрузка трансформаторов (автотрансформаторов) сверх номинального тока при всех системах охлаждения независимо от длительности и значения предшествующей нагрузки и температуры охлаждающей среды в пределах, указанных» [17] в таблице 8.

Таблица 8 – Допустимые перегрузки трансформатора

Перегрузка по току, %	30	45	60	75	100
Длительность перегрузки, мин	120	80	45	20	10

«Все элементы электрической схемы плавки гололеда должны быть рассчитаны на токи плавки с учетом допустимых перегрузок. Элементы оборудования, перегрузка которых превышает допустимую, должны быть заменены или зашунтированы на период плавки. Трансформаторы тока, контакты выключателей и разъединителей на период плавки гололеда допускают перегрузку на 20 %, высокочастотные заградители на 50 %.» [17].

### 2.2.7 Ограничение токов короткого замыкания преобразователя плавки гололеда

Для ограничения аварийных токов короткого замыкания преобразователей плавки гололеда следует применять токоограничивающие реакторы.

Расчетным путем для ВУПГ-14/1200 получено, что необходимое ограничение аварийного тока происходит при значении индуктивного сопротивления контура коммутации  $X_y$  свыше 0,6 Ом – обычно в пределах от 0,6 до 1 Ом.

Зависимость сопротивления реактора от мощности трехфазного короткого замыкания  $S_{кз}$  на шинах 10 кВ источника питания преобразователя для  $X_y = 0,8$  Ом приведенный на рисунке 19.

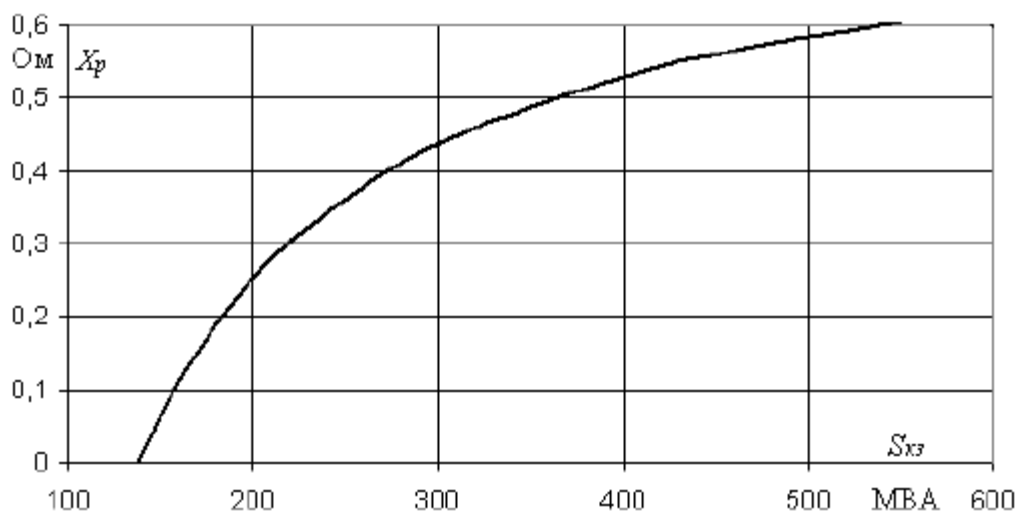


Рисунок 19 – Сопротивление токоограничивающего реактора на шинах 10 кВ



Значение  $X_y$  на стороне 10 кВ также можно оценить по выражению (31):

$$X_{y(10)} = \frac{U_{л(10)}}{\sqrt{3}I_{кз(10)}} = \frac{U_{л(10)}^2}{S_{кз(10)}}. \quad (31)$$

### **2.3 Плавка льда переменным током на оптическом кабеле, встроенном в грозозащитный трос с использованием фазных проводов**

Ток плавки при выборе схемы плавки рассчитывается по закону Ома для участка цепи (32):

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}. \quad (32)$$

Не допускается собирать схемы плавки через «землю» с использованием двух преобразователей, включенных последовательно на одной подстанции, поскольку средняя точка этих преобразователей должна иметь потенциал «земли» и схема плавки через «землю» приводит к короткому замыканию на выходе одного из преобразователей. При использовании «земли» в качестве проводника контур тока плавки гололеда на ОКГТ (ОКГТ или два ОКГТ параллельно) замыкается через заземляющее устройство источника плавки, землю, заземляющее устройство другой подстанции или заземляющее устройство на ВЛ, если конец участка плавки находится на трассе ВЛ. «Величина сопротивления заземляющего устройства ОКГТ должна быть, по возможности, минимальной, чтобы обеспечить на нем минимальное падение напряжения протекания тока плавки. Поэтому рекомендуется усиливать контур заземления опоры, на которой устанавливается закоротка, до значений, не превышающих 4 Ом. При использовании схем плавки через «землю» полюс преобразователя плавки гололеда присоединяется к рабочему заземлителю системы плавки гололеда. Появляющееся на нем постоянное напряжение

может приводить к протеканию части постоянного тока через глухозаземленные нейтрали и обмотки трансформаторов, установленных на подстанциях, связанных гальванически сетью. Это приводит к некоторому увеличению тока холостого хода и потерь в стали трансформаторов. Расчет постоянного тока в нейтрали трансформаторов выполняется по схеме замещения с использованием активных сопротивлений параллельно включенных для постоянного тока фаз сети и обмоток ВН трансформаторов с заземленными нейтралью, а также сопротивлений заземляющих устройств постоянному току в осенне-зимний период» [17].

Если значения постоянных токов, протекающих через глухозаземленные нейтрали трансформаторов, превышают допустимые, то для борьбы с данным явлением известен способ использования специальных устройств заземления нейтрали (УЗН). Однако УЗН не является серийно выпускаемым оборудованием и его установка в заземленные нейтрали трансформаторов снижает - их надежность.

Другим способом снижения постоянных токов в нейтрали трансформаторов может стать применение в схемах плавки гололеда постоянным током выносных заземлителей.

### **2.3.1 Схемы плавки гололеда на ОКГТ с использованием фазных проводов**

Схемы плавки гололеда на ОКГТ с использованием фазных проводов приведены на рис. 19–26. В схемах плавки от четырех преобразователей (рис. 23 и 26) для исключения возможности протекания значительных токов через землю, посередине ВЛ устанавливается закорачивающий пункт. В этом случае получаются два отдельных контура плавки. Плавка гололеда в таком случае проводится поочередно по каждому контуру.

Сопротивления контуров плавки рассчитываем по выражением:

- схема «ОКГТ – три фазы параллельно» (33)

$$R_d = R_{ОКГТ} + \frac{R_{np}}{3m_{np}} = \left( R_{ОКГТ_{y\delta}} + \frac{R_{np.y\delta}}{3m_{np}} \right) \cdot l_{ВЛ}, \quad (33)$$

- схема «два ОКГТ параллельно – три фазы параллельно» (34)

$$R_d = \frac{R_{ОКГТ}}{2} + \frac{R_{np}}{3m_{np}} = \left( \frac{R_{ОКГТ_{y\delta}}}{2} + \frac{R_{np.y\delta}}{3m_{np}} \right) \cdot l_{ВЛ}, \quad (34)$$

Где  $R_{ОКГТ}$  - сопротивление ОКГТ постоянному току, Ом;

$R_{np}$  - сопротивление провода фазы постоянному току, Ом;

$R_{ОКГТ_{y\delta}}$  - удельное сопротивление ОКГТ постоянному току при +20С, Ом/км;

$R_{np.y\delta}$  - удельное сопротивление ОКГТ постоянному току +20С, Ом/км;

$l_{ВЛ}$  - длина ВЛ, км;

$m_{np}$  - количество проводов в фазе, шт.

Аналогично могут использоваться и схемы плавки «ОКГТ – фаза», «два ОКГТ параллельно – фаза», но тогда уменьшится максимальная длина ОКГТ, на которой возможно проплавить гололед.

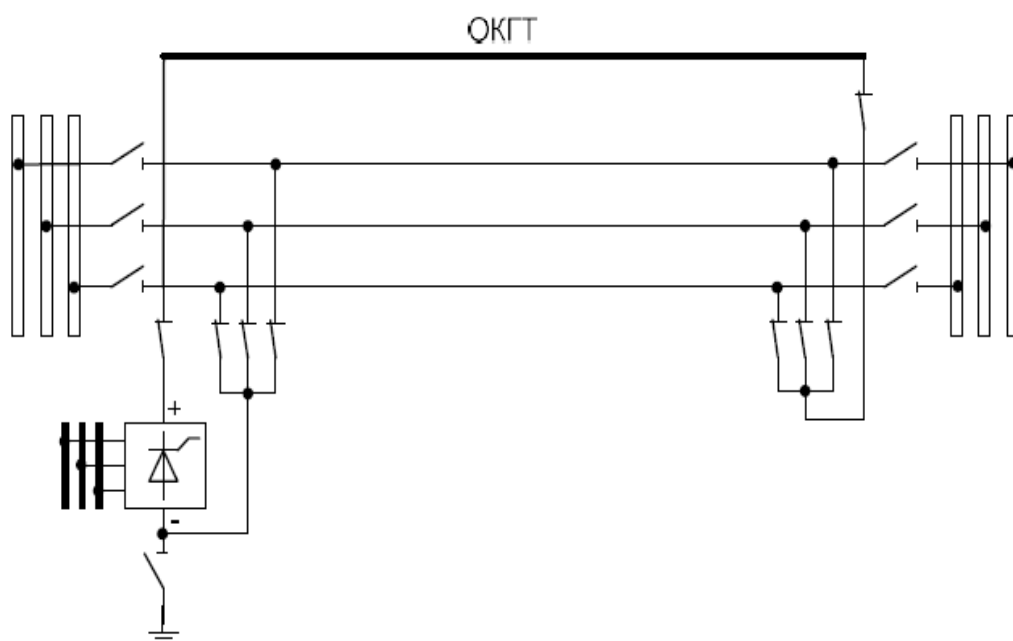


Рисунок 19 – Схема плавки «ОКГТ – три фазы» от одного преобразователя

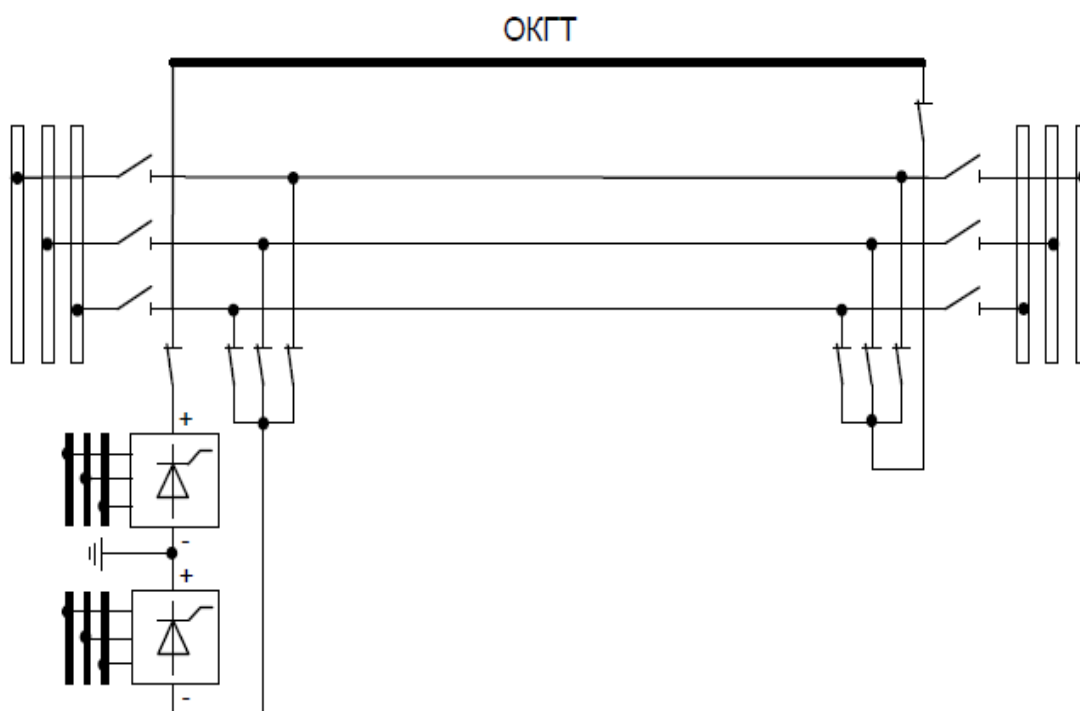


Рисунок 20 – Схема плавки «ОКГТ – три фазы» от двух преобразователей с одной подстанции

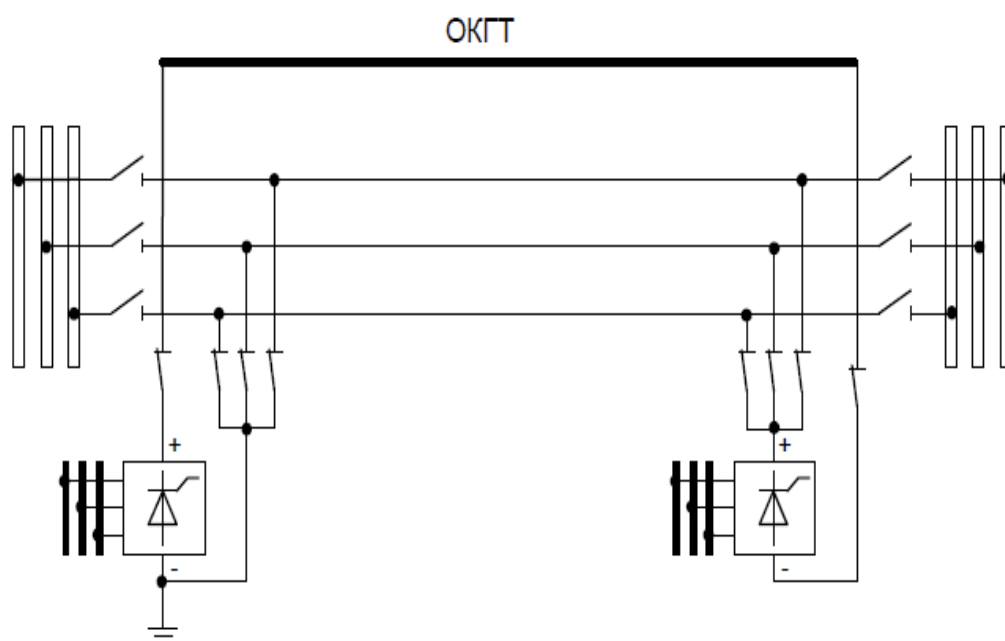


Рисунок 21 – Схема плавки «ОКГТ – три фазы» от двух преобразователей с окончных подстанций

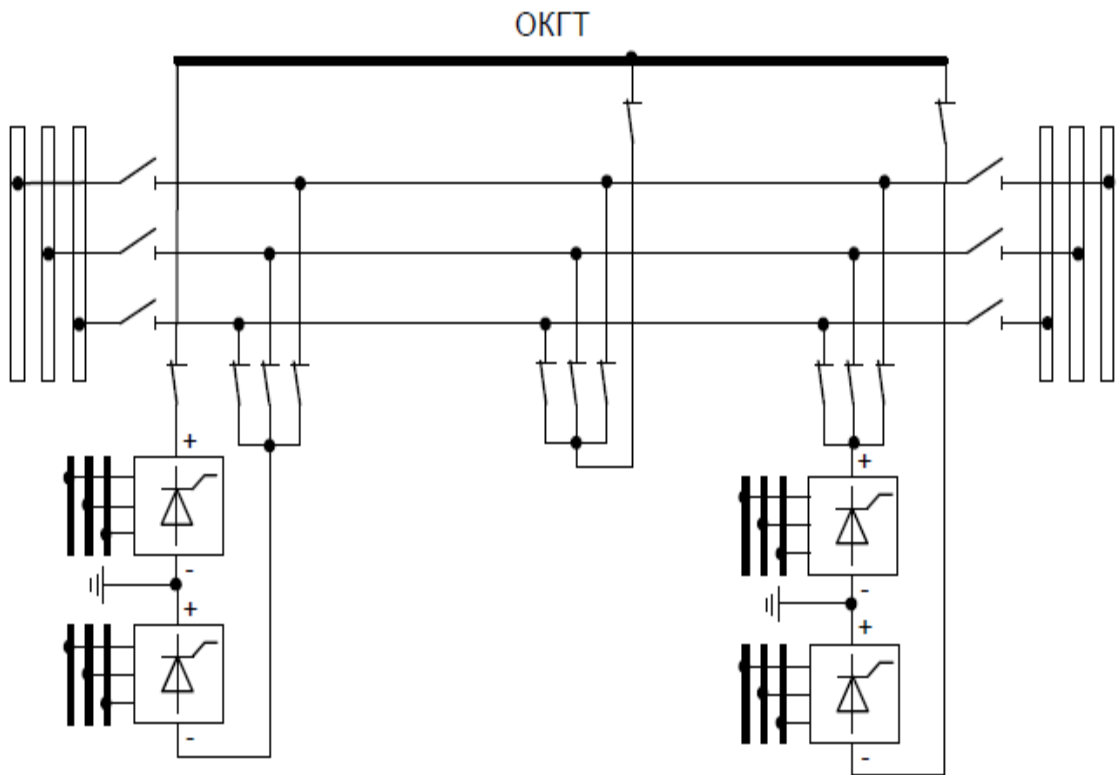


Рисунок 22 – Схема плавки «ОКГТ – три фазы» от четырех преобразователей с конечных подстанций

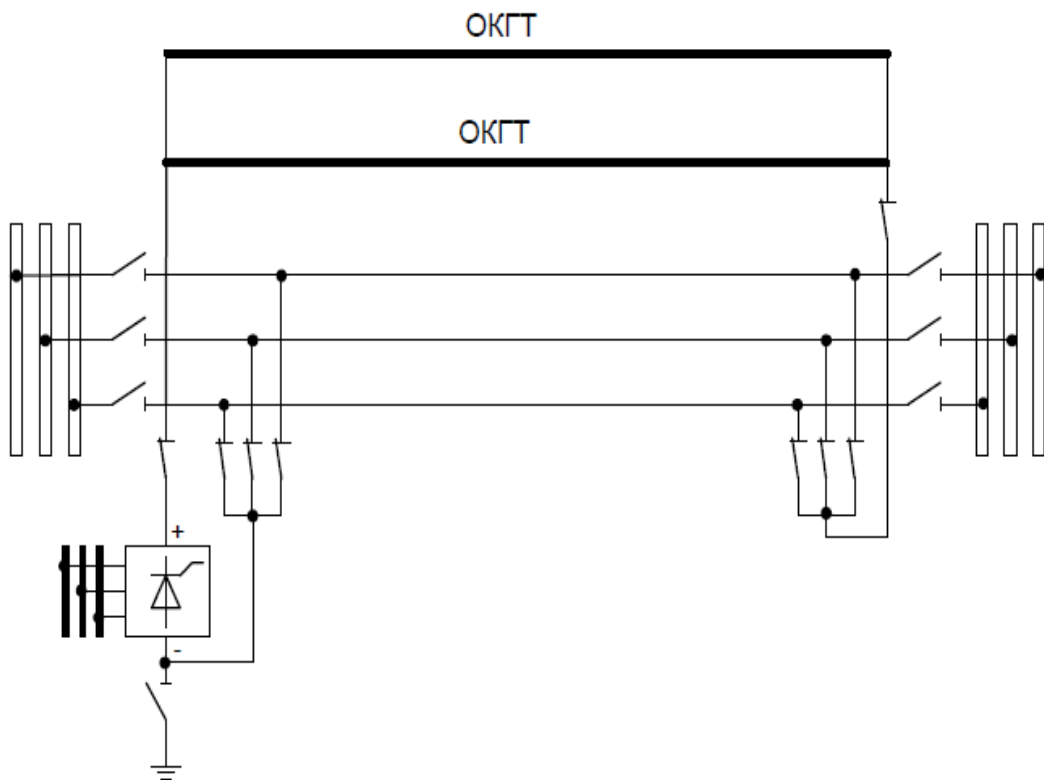


Рисунок 23 – Схема плавки «два ОКГТ – три фазы» от одного

преобразователя

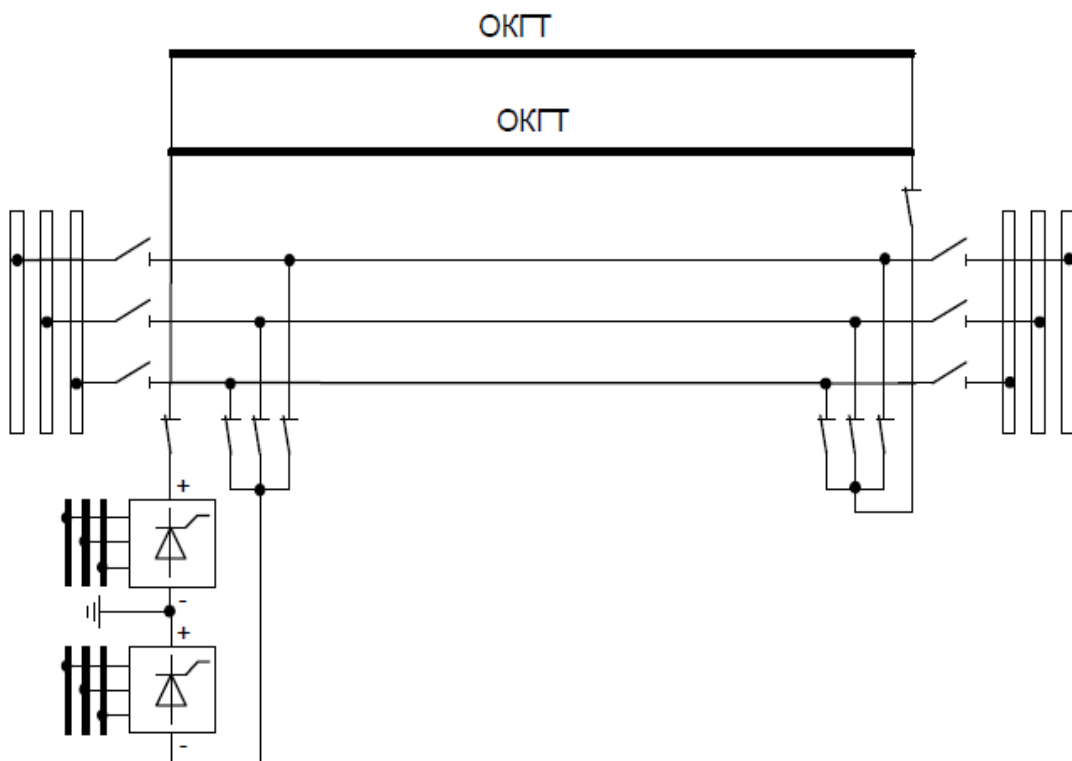


Рисунок 24 – Схема плавки «два ОКГТ – три фазы» от двух преобразователей с одной подстанции

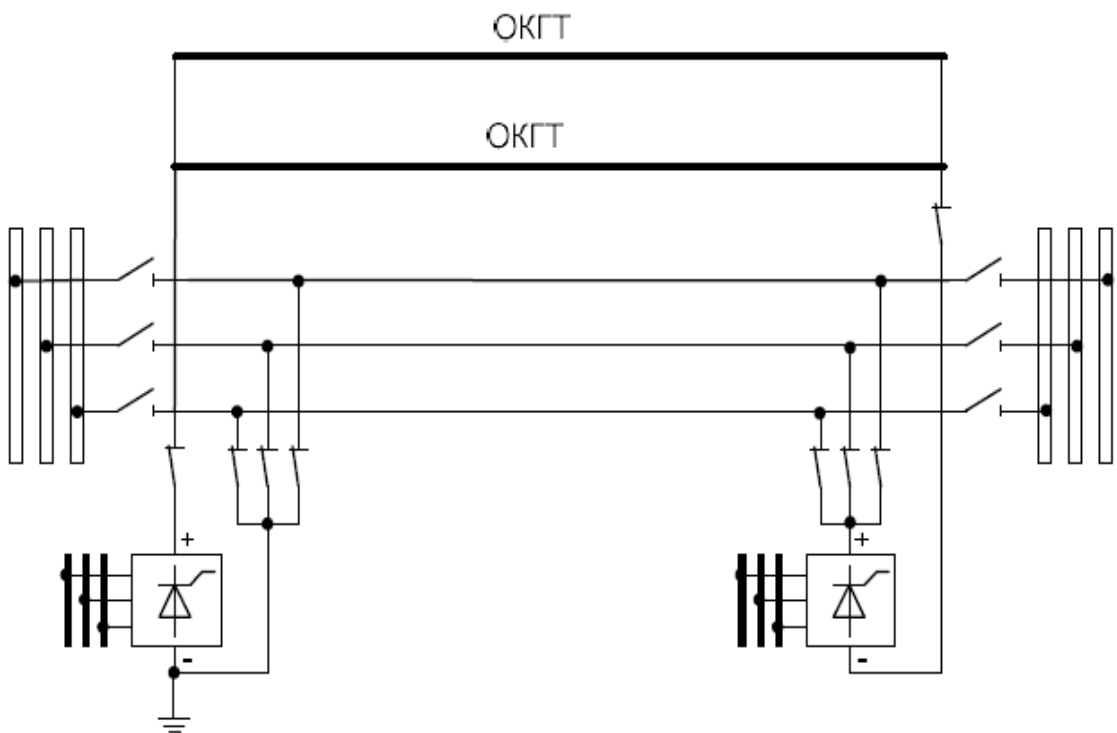


Рисунок 25 – Схема плавки «два ОКГТ – три фазы» от двух преобразователей с двух подстанций

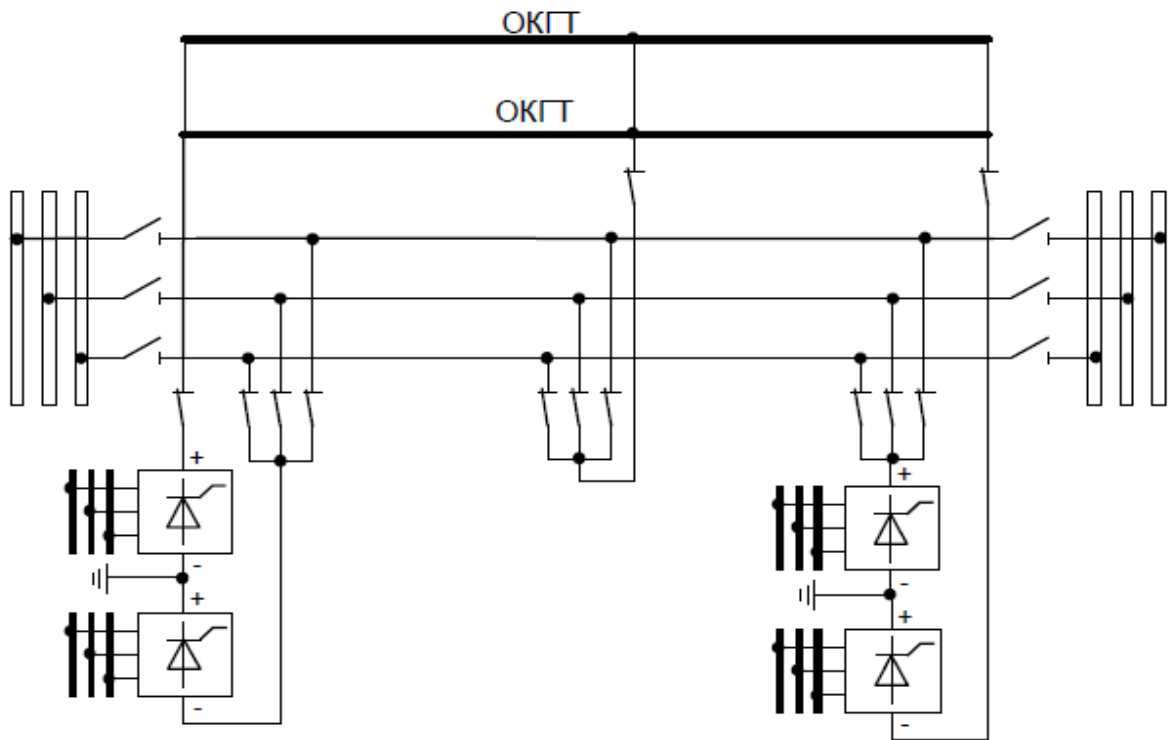


Рисунок 26 – Схема плавки «два ОКГТ – три фазы» от двух преобразователей с двух подстанций

### 2.3.2 Схемы одновременной плавки гололеда на фазных проводах и ОКГТ

Используя одновременную плавку гололеда на фазных проводах и ОКГТ можно уменьшить полное время плавки и сократить количество оперативных переключений при ее проведении. Схемы одновременной плавки гололеда на фазных проводах и ОКГТ показаны на рисунках 27–39.

В двухконтурных схемах для плавки гололеда на ОКГТ создается отдельный контур, подключаемый одновременно с контуром плавки для фазных проводов непосредственно к общему преобразователю плавки гололеда. При этом возможны следующие схемы соединения ОКГТ, которые могут применяться при одновременной плавке: «ОКГТ – ОКГТ», «ОКГТ – земля», «два ОКГТ – земля», «ОКГТ – фаза». Для фазных проводов используются наиболее распространенные схемы «фаза – фаза», «фаза – две фазы».

Суммарное сопротивление контура плавки рассчитывается по выражению (35):

$$R_{dE} = \frac{R_{dOKIT} R_{dnp}}{R_{dOKIT} + R_{dnp}}, \quad (35)$$

$R_{dOKIT}$  - сопротивление контура плавки для ОКГТ, Ом

$R_{dnp}$  - сопротивление контура плавки для фазных проводов, Ом.

Сопротивления контуров плавки для фазных проводов рассчитываются по следующим выражениям:

– схема «фаза – фаза» (36)

$$R_{dnp} = \frac{2R_{np}}{m_{np}} = \frac{2R_{np.уд}}{m_{np}} \cdot l_{ВЛ}, \quad (36)$$

– схема «фаза – две фазы» (37)

$$R_{dф} = \frac{1,5R_{np}}{m_{np}} = \frac{1,5R_{np.уд}}{m_{np}} \cdot l_{ВЛ}, \quad (37)$$

Произвести оценку соотношения токов плавки гололеда на ОКГТ и фазных проводах ВЛ можно по выражению (38):

$$I_{dnp} = I_{dOKIT} \frac{R_{dOKIT}}{R_{dnp}}. \quad (38)$$

Выпрямленный ток при одновременной плавке определяется выражением (39):

$$I_d = I_{dOKIT} + I_{dnp} = \frac{1,35U_{л} \cos \alpha}{\frac{3}{\pi} X_{\gamma} + \frac{R_{dOKIT} R_{dnp}}{R_{dOKIT} + R_{dnp}}}. \quad (39)$$

Также в случае, если суммарный ток плавки превышает номинальный рабочий ток преобразователя плавки гололеда ( $I_d > I_{ном}$ ), то требуется установка преобразователей в параллель.



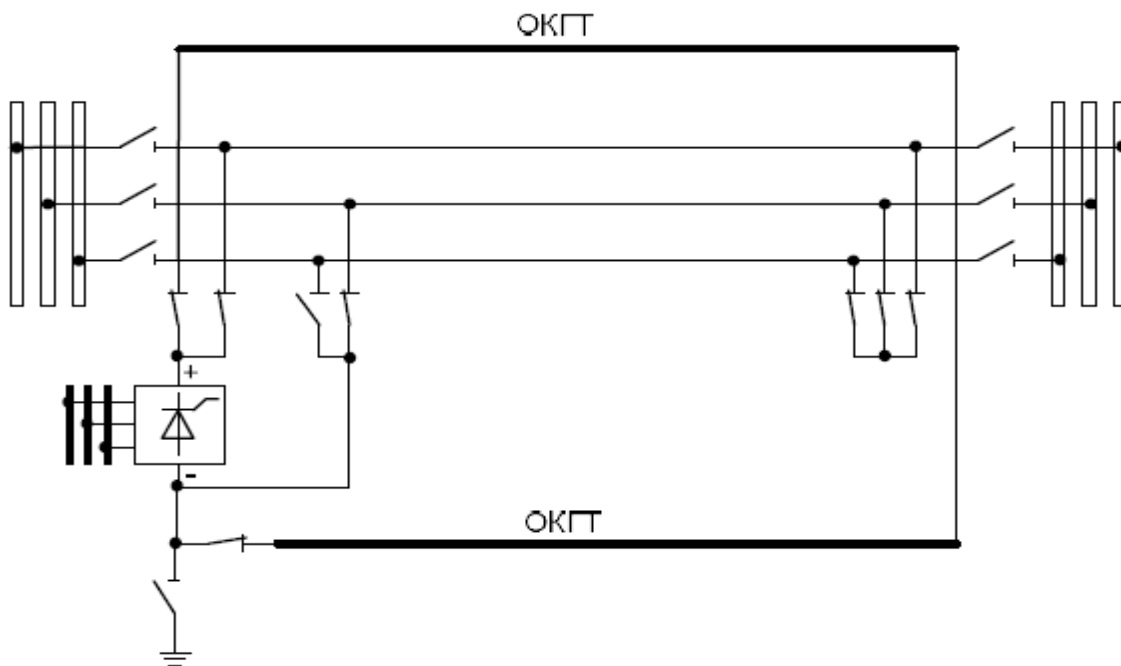


Рисунок 27 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – ОКГТ» от одного преобразователя

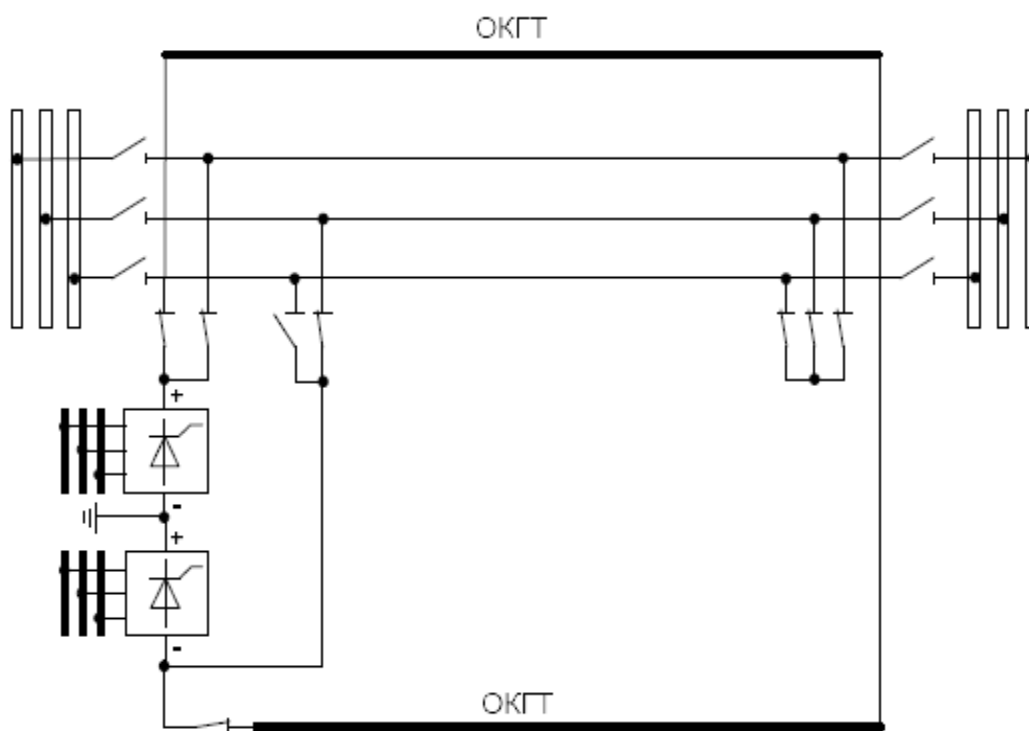


Рисунок 28 – Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – ОКГТ» от двух преобразователей

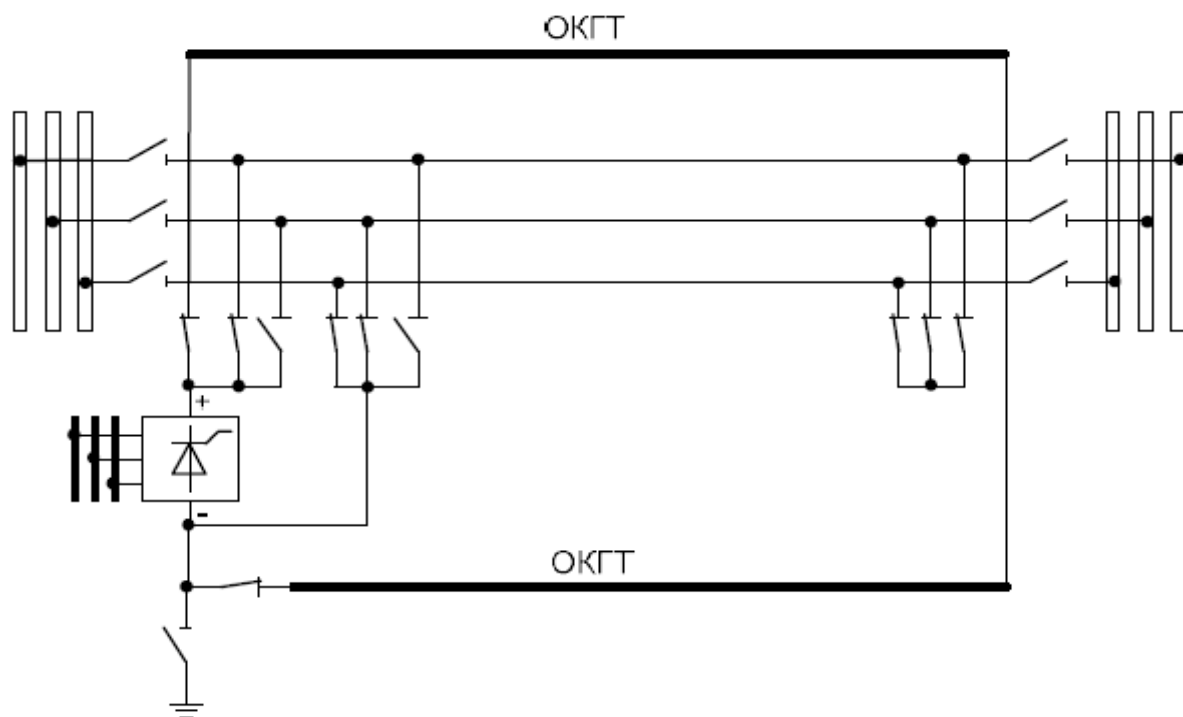


Рисунок 29 – Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – две фазы» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – ОКГТ» от одного преобразователя

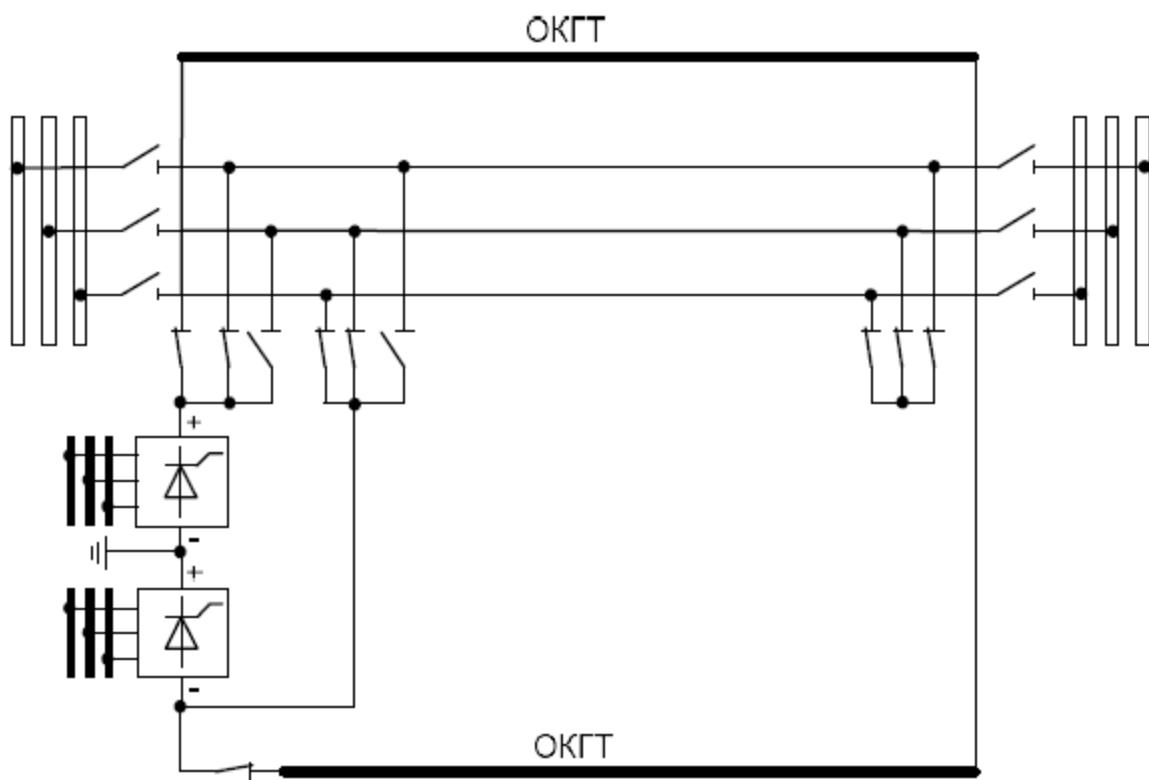


Рисунок 30 – Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – две фазы» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – ОКГТ» от двух преобразователей

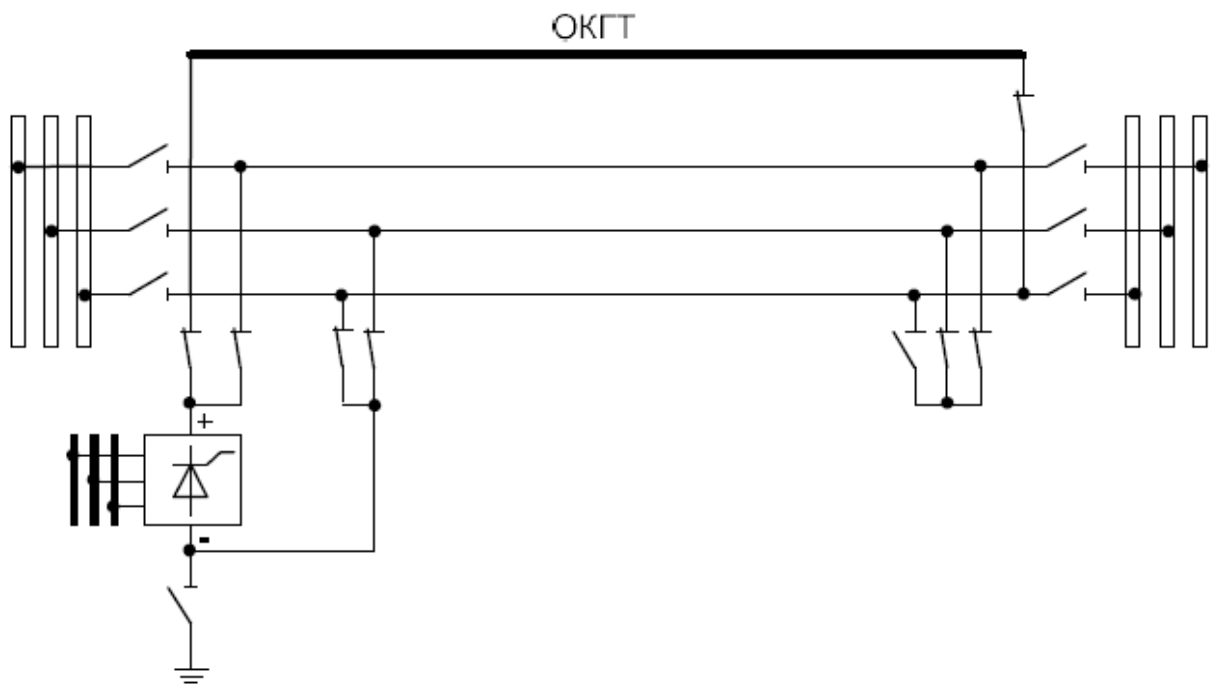


Рисунок 31 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – фаза» от одного преобразователя

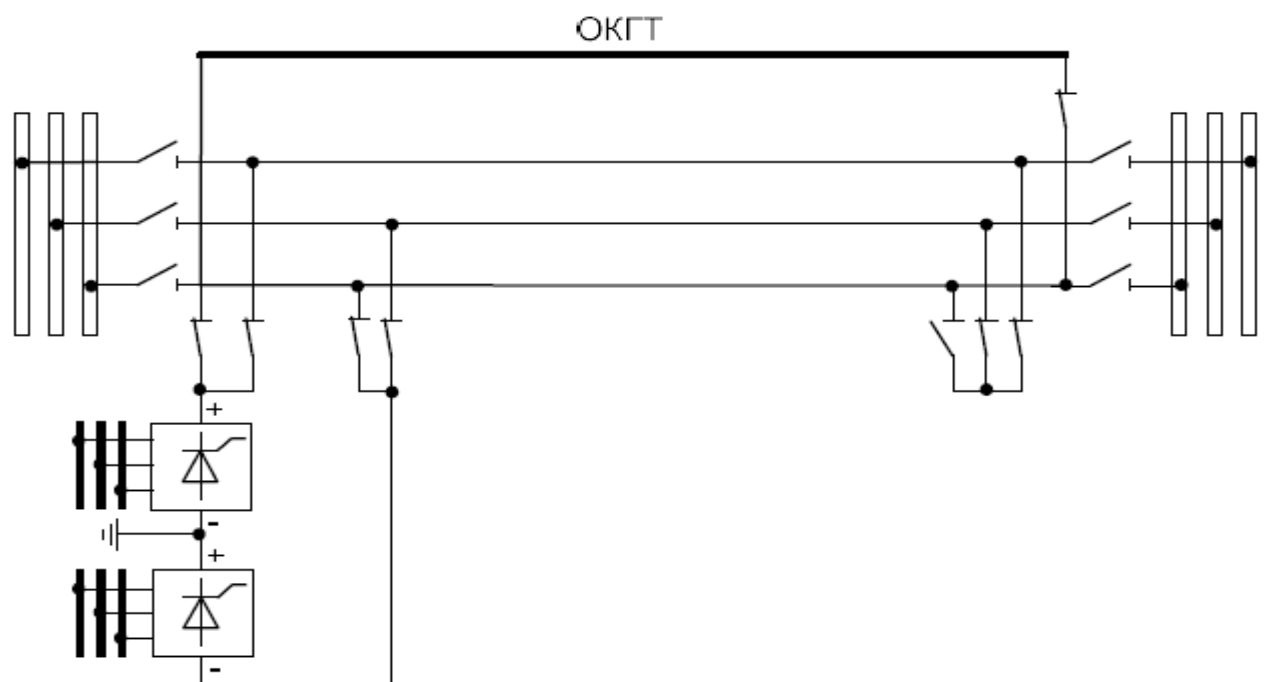


Рисунок 32 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – фаза» от двух преобразователей

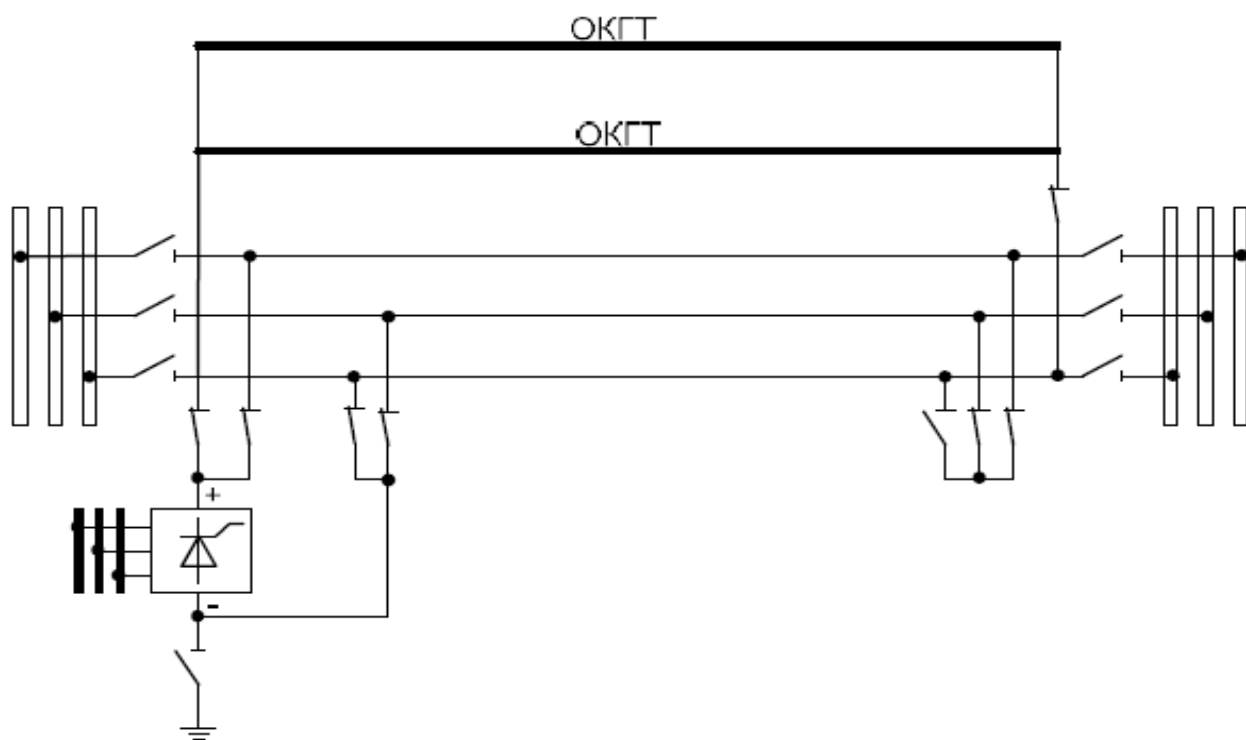


Рисунок 33 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «два ОКГТ – фаза» от одного преобразователя

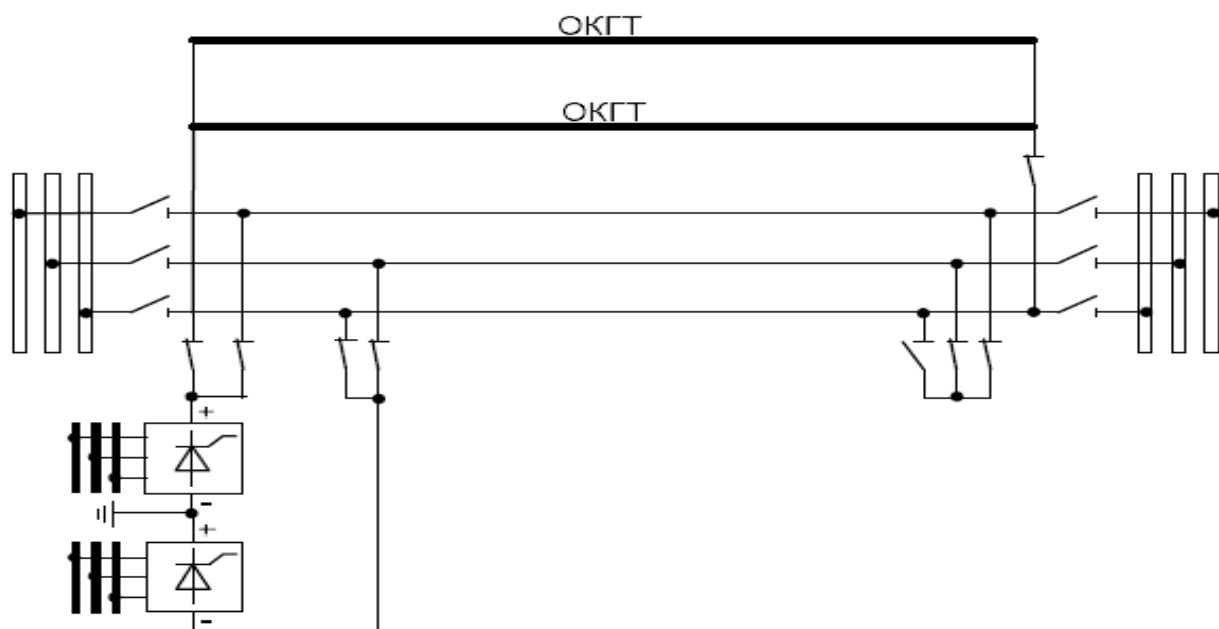


Рисунок 34 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «два ОКГТ – фаза» от двух преобразователей

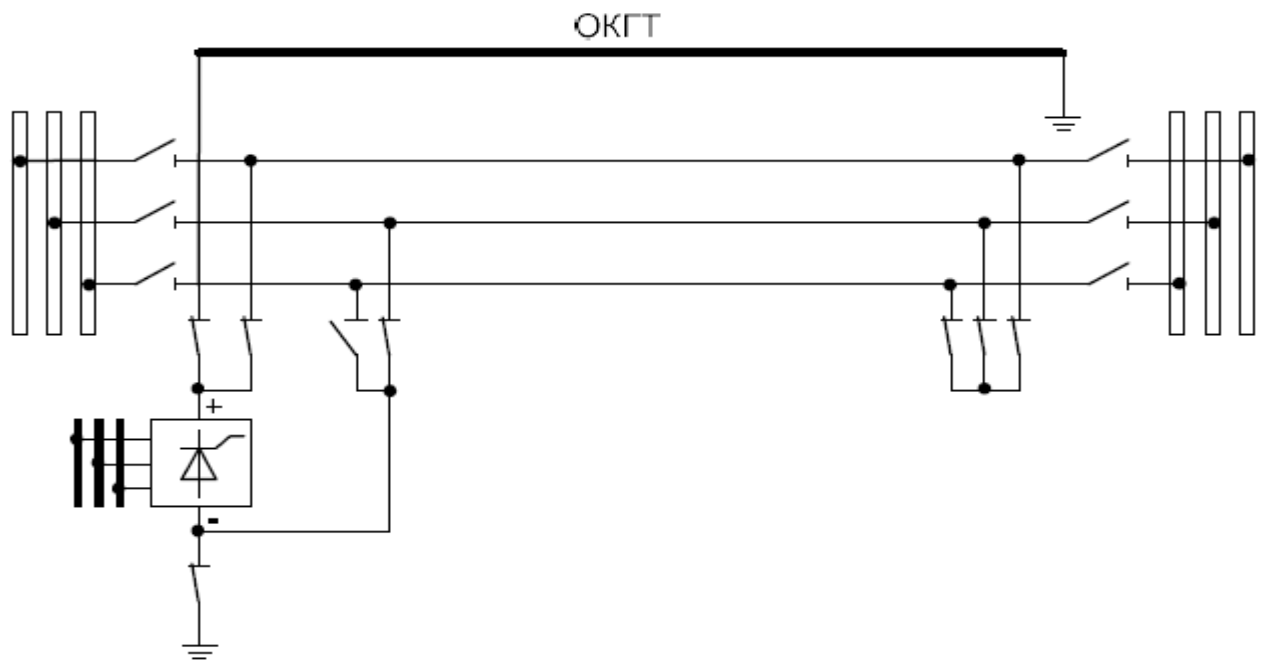


Рисунок 35 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – земля» от одного преобразователя

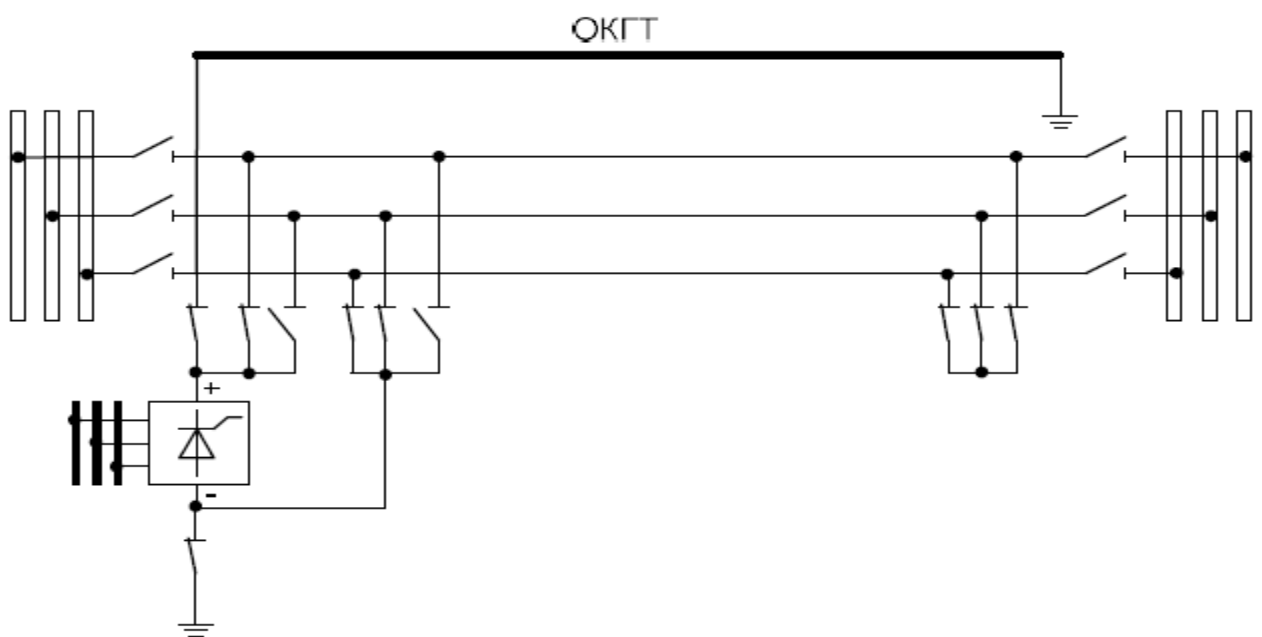


Рисунок 36 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – две фазы» и ОКГТ по схеме «ОКГТ – земля» от одного преобразователя

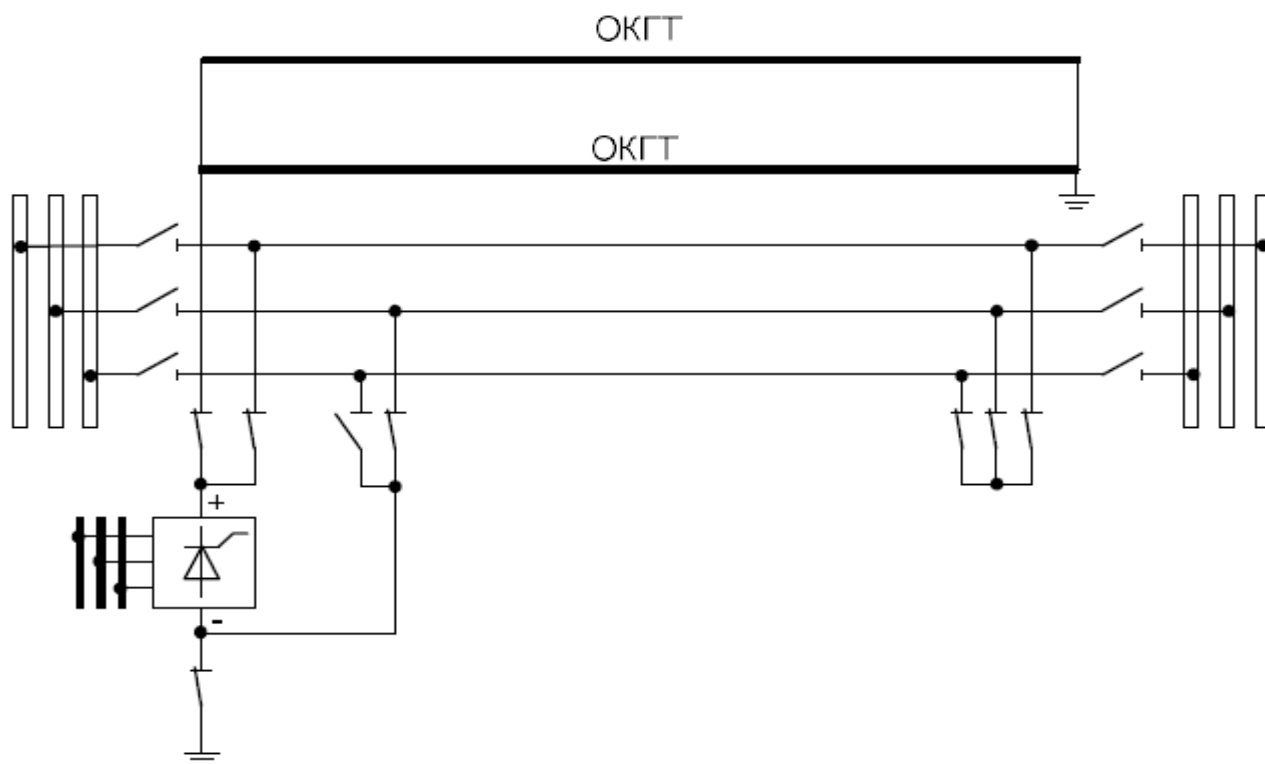


Рисунок 37 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – фаза» и ОКГТ по схеме «два ОКГТ – земля» от одного преобразователя

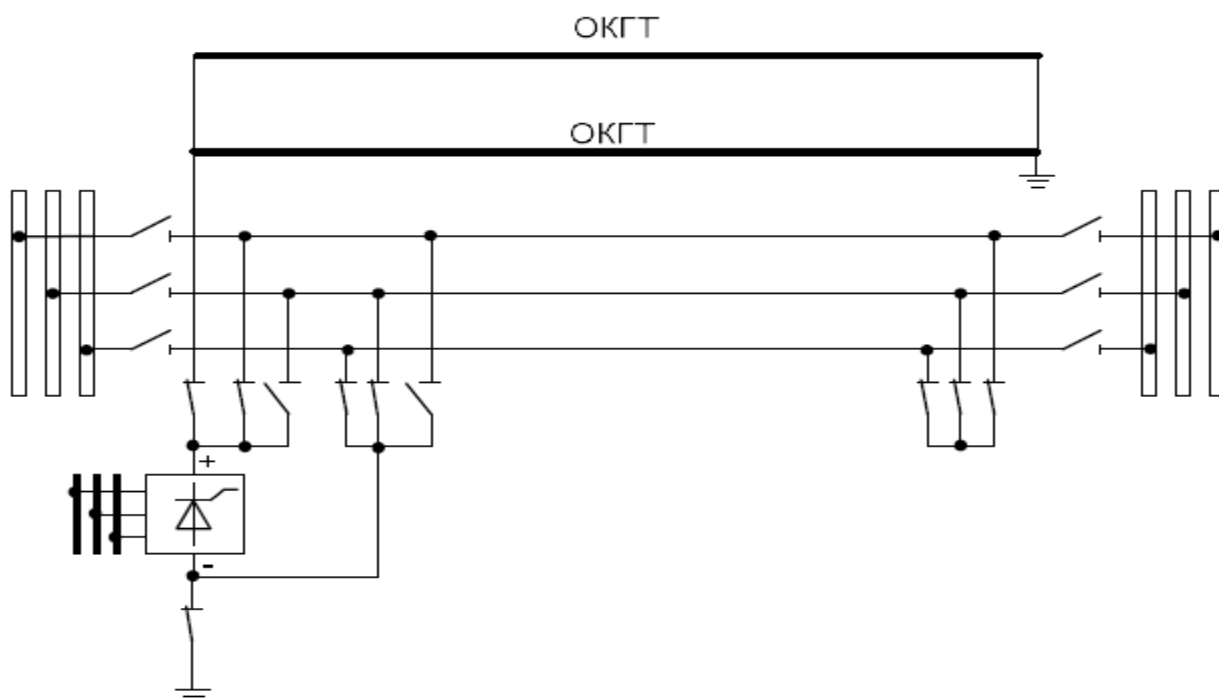


Рисунок 38 - Схема одновременной плавки гололеда на фазных проводах по схеме «фаза – две фазы» и ОКГТ по схеме «два ОКГТ – земля» от одного преобразователя

### 2.3.3 Диапазон длин участков ОКГТ, обогреваемых от преобразователей плавки гололеда с применением различных схем плавки

Длина участка ОКГТ, которой можно обогреть требуемым током плавки гололеда при конкретном выпрямленном напряжении, определяется следующим выражением:

- для схемы плавки «ОКГТ – три фазы» (40)

$$I_{ВЛ} = \frac{U_d}{I_d \left( R_{ОКГТ\ у\delta} + \frac{R_{нр.\ у\delta}}{3m_{нр}} \right)}, \quad (40)$$

- для схемы плавки «два ОКГТ – три фазы» (41)

$$I_{ВЛ} = \frac{U_d}{I_d \left( \frac{R_{ОКГТ\ у\delta}}{2} + \frac{R_{нр.\ у\delta}}{3m_{нр}} \right)}. \quad (41)$$

Для схем плавки, где ОКГТ соединяются параллельно, в качестве  $I_d$  принимается удвоенный ток плавки гололеда одного ОКГТ.

Таким образом примерный диапазон обогреваемых участков ОКГТ от одного преобразователя плавки гололеда с  $U_{дном} = 14$  кВ при применении различных схем плавки приведен в таблицах 9, 9.1. Минимальное возможное значение длины участка определяется нижней границей диапазона изменения выпрямленного напряжения – 1 кВ.

В качестве тока плавки принят максимально допустимый ток по условиям нагрева ОКГТ при 0 С, скорости ветра 2 м/с и направлении ветра параллельно ОКГТ. Суммарное сопротивление заземлений – 5 Ом. Величина удельного сопротивления провода фазы – 0,15 Ом/км.

Таблица 9 – Диапазон длин обогреваемых участков ОКГТ при плавке гололеда с использованием одного преобразователя с изменением напряжения от 1 кВ до 14 кВ (последовательно)

Диаметр, мм	Сопротивление при +20 С, Ом/км	Ток плавки, А	Длина ОКГТ, км
			ОКГТ – три фазы
11,5	0,649	275	от 5,2 до 73
13,1	0,906	242	от 4,3 до 60
13,1	0,507	324	от 5,5 до 77
14,2	0,356	396	от 6,2 до 87
15	0,315	428	от 6,4 до 90
18,7	0,200	577	от 6,9 до 97

Таблица 9.1 – Диапазон длин обогреваемых участков ОКГТ при плавке гололеда с использованием одного преобразователя с изменением напряжения от 1 кВ до 14 кВ (параллельно).

Диаметр, мм	Сопротивление при +20 С, Ом/км	Ток плавки, А	Длина ОКГТ, км
			Два ОКГТ – трифазы
11,5	0,649	275x2	от 4,9 до 68
13,1	0,906	242x2	от 4,1 до 57
13,1	0,507	324x2	от 5,1 до 71
14,2	0,356	396x2	от 5,5 до 77
15	0,315	428x2	от 5,6 до 79
18,7	0,200	577x2	от 5,8 до 81



## 2.4 Физико-химический способ

Для предотвращения появления изморози и оседания гололедных масс в последнее время повсеместно применяются физико-химические методы. Данный метод заключается в нанесении на ВЛ растворов специализированных веществ, которые препятствуют оседанию изморози на ВЛ. Данные растворы называются супергидрофобными покрытиями.

Раствор изменяет особенности нанорельефа после электрохимической обработки поверхности алюминиевого провода.

Данный раствор использовался в электросетях Жигулевского ПО и показал свою эффективность в районах с неинтенсивным гололедообразованием, так является только сдерживающей мерой, с еще не образовавшимся гололедом. На участках с более интенсивным гололедообразованием данный метод способствует более раннему обнаружению скопления изморози на стенках ВЛ.

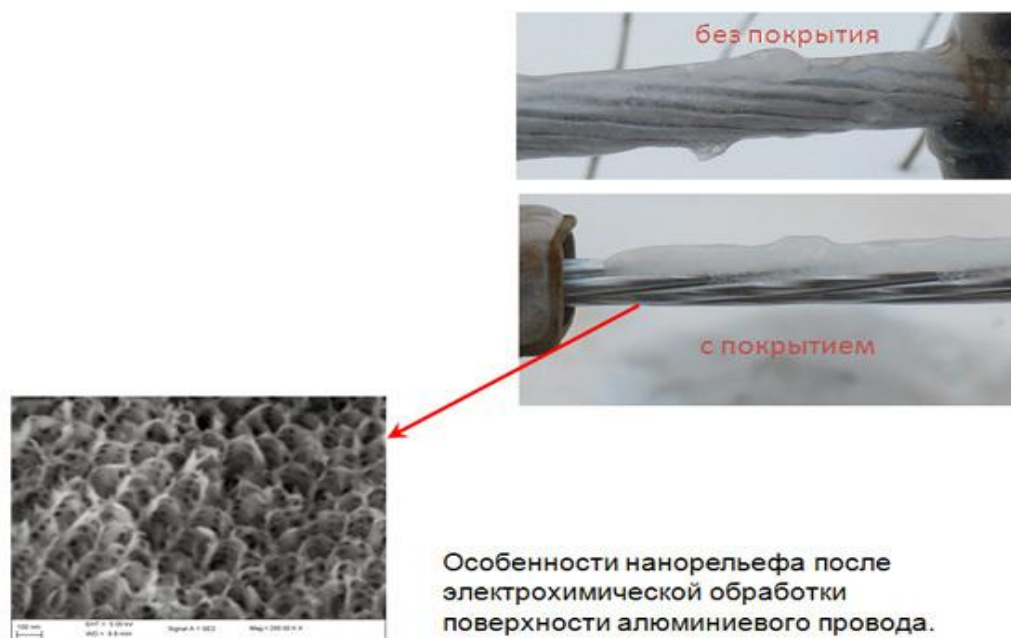


Рисунок 39 – Результат нанесения раствора с супергидрофобным покрытием

### **3 Обоснование и выбор целесообразной системы**

#### **3.1 Разбор возможных возникновений аварийных ситуаций при плавке гололедных образований**

На ВОЛС-ВЛ возможно возникновение следующих аварийных ситуаций:

Механический обрыв ОКГТ, который может произойти вследствие возникновения сверхнормативных климатических нагрузок на ОКГТ или может быть вызван падением деревьев на ВЛ под тяжестью гололедно-изморезевых отложений и действием ветра.

Обрыв ОВ в ОКГТ без разрыва внешних металлических элементов ОКГТ, вследствие возникновения сверхнормативных климатических нагрузок на ОКГТ.

Механическое разрушение элементов натяжных и поддерживающих креплений ОКГТ к опорам ВЛ вследствие возникновения сверхнормативных климатических нагрузок. Может сопровождаться обрывом ОКГТ.

В случае плавки гололеда переменным током, возможно локальное разрушение ОКГТ в результате термического воздействия тока плавки, величина которого превышает максимально допустимое значение тока плавки. Причиной такого превышения может служить замыкание ОКГТ на землю в случае разрушения изолированного крепления ОКГТ или его спусков на опорах ВЛ или вследствие нарушений при строительстве или ремонтах ОКГТ и его креплений на опорах ВЛ. Данное повреждение может явиться причиной обрыва ОКГТ. При плавке гололеда постоянным током в случае обрыва ОКГТ, происходит автоматическое отключение ВУПГ, локальное термическое разрушение ОКГТ невозможно.

В случае обрыва ОКГТ данное повреждение регистрируется системой СРКТ как в режиме мониторинга состояния ОВ, так и в режиме измерения температуры ОВ. Место повреждения может быть определено с точностью, соответствующей разрешающей способности системы СРКТ. Во время голо-

ледного периода, для обеспечения плавки гололеда на ОКГТ с целью недопущения возникновения сверхнормативных климатических нагрузок необходимо в кратчайшие сроки восстановить контур плавки гололеда согласно принятой для данной ВЛ схеме.

При необходимости восстановления контура плавки могут быть проведены следующие мероприятия:

- Восстановление натяжных и поддерживающих креплений ОКГТ с использованием арматуры из аварийного резерва

- Устранение обрыва ОКГТ при помощи соединения оборванного ОКГТ путем установки соединительного зажима

- Вставка дополнительного отрезка ОКГТ или АС – провода, соединяющего при помощи соединительных зажимов концы оборванного ОКГТ. Получившаяся избыточная длина ОКГТ со вставкой должна размещаться на быстровозводимых и демонтируемых временных опорах аварийного резерва или опорных изоляторах, например, типа ШОП на соответствующее напряжение плавки, установленных на землю на специальных подставках.

В качестве примера на рисунке 40 схематично приведен вариант восстановления контура плавки через дополнительный отрезок ОКГТ (грозотроса, АС провода) и каналов связи через временную вставку из диэлектрического ОК.

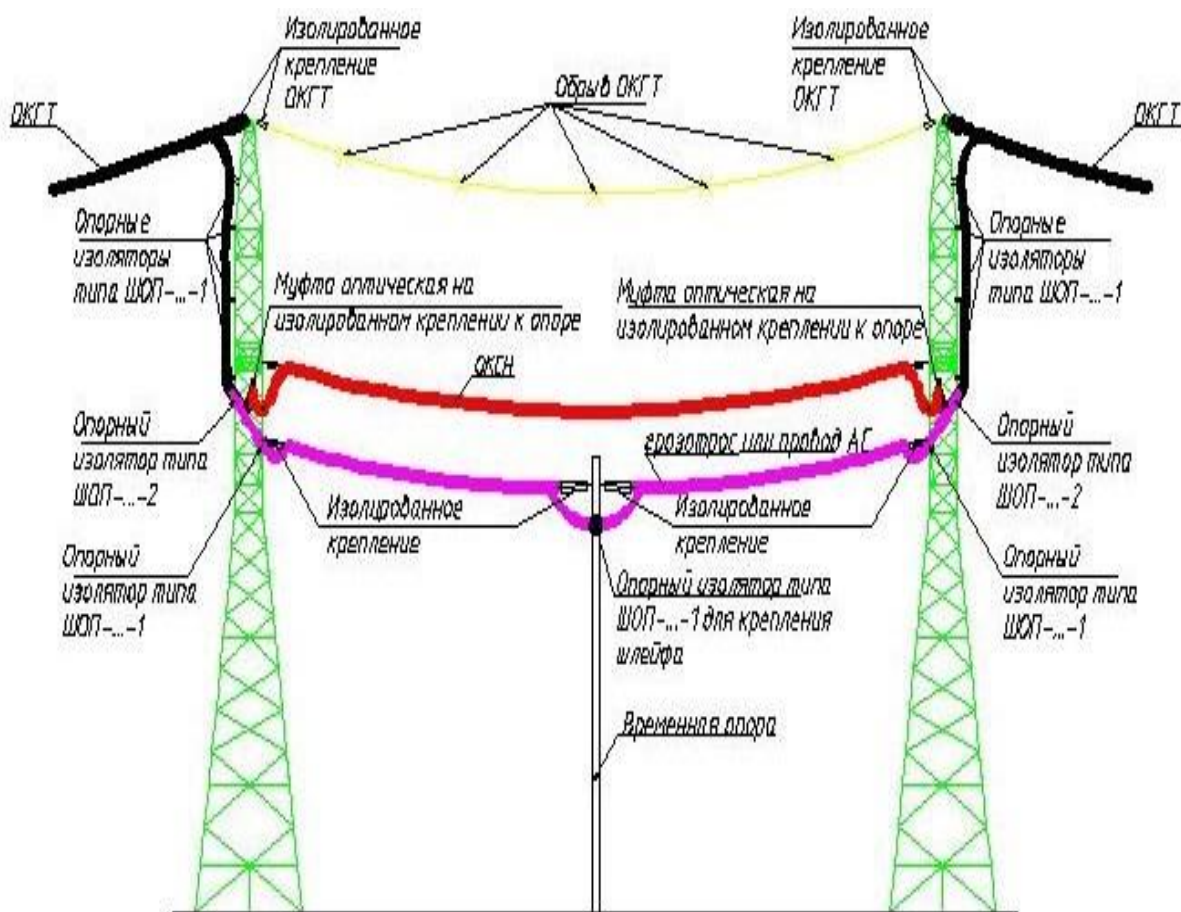


Рисунок 40 - Восстановление контура плавки гололеда и каналов связи

При повреждениях, приводящих к обрыву ОВ (аварийные ситуации согласно), при сохранении целостности металлической части ОКГТ автоматического отключения ВУПГ не происходит. Данное повреждение регистрируется системой СРКТ и место повреждения может быть определено с точностью, соответствующей разрешающей способности системы СРКТ. Для недопущения дальнейшего повреждения ОКГТ из-за увеличения толщины гололедно-изморезевых образований, плавка гололеда на ОКГТ должна быть продолжена, восстановление контура плавки не требуется. До окончания плавки необходимо проводить измерения температуры ОВ на участках, остающихся в пределах досягаемости измерительных модулей СРКТ. После завершения плавки гололеда необходимо провести контрольное измерение затухания сигнала в ОВ по всей длине ВЛ. Для ВЛ, где измерительные модули СРКТ установлены с двух сторон, контрольное измерение возможно про-

вести до восстановления оборванных ОВ. Для этого необходимо на наиболее удаленном от места обрыва ОВ измерительном модуле СРКТ в режиме ручного измерения задать новые параметры времени усреднения и длительности измеряющего импульса, зависящие от удаленности точки обрыва ОВ, и провести измерения. Для ВЛ, где измерительный модуль СРКТ установлен с одной стороны, контрольное измерение возможно провести только после устранения обрыва ОВ и восстановления связи на временной или постоянной основе. При обнаружении на оставшемся без контроля на время проведения плавки участке ОКГТ мест с увеличенным затуханием сигнала в ОВ больше допустимого значения, необходимо провести замену всей длины ОКГТ.

Аварийно-восстановительные работы на ВЛ с плавкого гололеда проводятся в соответствии с требованиями, описанными с учетом следующих дополнительных требований:

Для обеспечения возможности проведения плавки гололеда, изоляция ОКГТ должна быть восстановлена в полном объеме. Подвеска нового ОКГТ взамен поврежденного без изоляторов недопустима. При замене поврежденного ОКГТ должна быть проведена проверка целостности изоляторов в поддерживающих и натяжных креплениях. В случае повреждения изоляторы должны быть заменены. При установке дополнительных муфт, последние, как и спуски ОКГТ к ним, должны быть в обязательном порядке изолированы от тела опоры.

В период вероятных гололедно - изморозевых отложений, проведение работ по восстановлению ВЛ по временной схеме с применением вставки из диэлектрического ОК допускается только в случае целостности контура плавки.

Для предотвращения возникновения сверхнормативных климатических нагрузок на ОКГТ необходимо проводить контроль гололедно - изморозевых отложений, а также проводить контроль направления и скорости ветра. Решение о плавки гололеда должно приниматься с учетом скорости образования гололедно - изморозевых отложений и скорости ветра из условия недо-

пущения сверхнормативных климатических нагрузок и обеспечения оптимального времени плавки. Как правило, толщина стенки гололеда на ОКГТ не должна превышать 20 мм.

В случае плавки гололеда на ОКГТ с применением ВУПГ при подготовке к зимнему периоду необходимо осуществить пробный запуск ВУПГ с целью выяснения нарушений в изоляционных креплениях ОКГТ и его спусков. Если нарушения будут иметь место, произойдет автоматическое отключение ВУПГ. Необходимо провести осмотр ВЛ с целью выявления нарушений в изоляционных креплениях ОКГТ и его спусков и принять меры по их устранению.

В случае плавки гололеда на ОКГТ переменным током пробный запуск установки плавки гололеда недопустим без осуществления контроля состояния изоляционных креплений ОКГТ и его спусков. При подготовке к зимнему периоду необходимо проводить тщательный осмотр ВЛ с целью выявления нарушений в изоляционных креплениях ОКГТ и его спусков.

## **3.2 Выбор метода и схемы**

### **3.2.1 Порядок расчета режимов плавки гололеда на оптическом кабеле, встроенном в грозозащитный трос**

Расчет режима плавки гололеда для ВЛ 110 кВ Александровка-2, параметры ВЛ и единицы измерения указаны в таблице 10.

Исходные данные:

- мощность трехфазного короткого замыкания на стороне 10 кВ:

$$S_{кз} = 275 \text{ МВА} \quad I_{кз} = 15 \text{ кА} ;$$

- длина ВЛ  $l_{ВЛ} = 120 \text{ км}$ ;

- ОКГТ: диаметр 11.5 мм;  $R_{ОКГТ\_уд} = 0,649 \text{ Ом/км}$ ;  $m_{ОКГТ} = 1$ ;

Таблица 10 – Исходные данные для расчета режимов плавки гололеда

Группа параметров	Название параметра	Обозначение	Единица измерения
Параметры питающей сети	Мощность трехфазного КЗ (ток трехфазного КЗ) в точке подключения МВ	$S_{кз} (I_{кз})$	В · А (А)
Параметры ВЛ	Длина ВЛ	$l_{ВЛ}$	км
	Длина ОКГТ	$l_{ОКГТ}$	км
	Марка провода	–	–
	Марка ОКГТ	–	–
	Количество проводов в фазе	$m_{пр}$	шт.
	Количество ОКГТ на ВЛ	$m_{ОКГТ}$	шт.
	Удельное активное сопротивление провода при +20 С	$R_{пр. уд}$	Ом/км
Параметры ВЛ	Удельное активное сопротивление ОКГТ при +20С	$R_{ОКГТ\_уд}$	Ом/км

- провод фазы: АС 300/39  $R_{пр\_уд} = 0,96 \text{ Ом} / \text{ км} ; m_{пр} = 1;$

- ток плавки:  $I_d = 275 \text{ А}$

Выберем схему плавки гололеда «ОКГТ – три фазы параллельно»

Сопротивление контура плавки (42):

$$R_d = \left( R_{ОКГТ\_уд} + \frac{R_{пр\_уд}}{3m_{пр}} \right) \cdot I_{ВЛ} = \left( 0,649 = \frac{0,096}{3 \cdot 1} \right) \cdot 120 = 81,72, \quad (42)$$

Требуемое выпрямленное напряжение (43):

$$U_d = I_d R_d = 275 \cdot 81,72 = 22,5 \text{ кВ}, \quad (43)$$

Оценим необходимое кол-во преобразователей плавки гололеда с

$$U_{d\text{ном}} = 14 \text{ кВ} \text{ и } I_{d\text{ном}} = 1200 \text{ А}:$$

- подключаемых последовательно (44):

$$n_{\text{посл}} \approx \frac{U_d}{U_{d\text{ном}}} = \frac{22,5}{14} = 1,6 \approx 2 \text{шт.}, \quad (44)$$

- подключаемых параллельно (45)

$$n_{\text{парал}} \approx \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} = \frac{275}{1200} = 0,23 \approx 1 \text{шт.}. \quad (45)$$

То есть всего требуется два преобразователя последовательно на суммарное номинальное напряжение 28 кВ.

Принятая схема плавки обеспечивает требуемый ток плавки  $I_d$  при угле управления  $\alpha \approx 36 \text{эл.град}$ . Пусть питание преобразователей осуществляется от трансформатора с расщепленной обмоткой НН 10,5 кВ.

Индуктивное сопротивление контура коммутации по заданной  $S_{\text{кз}}$  (46):

$$X_{\text{нач}} = \frac{U_d^2}{S_{\text{кз}}} = \frac{10,5 \cdot 10^3^2}{275 \cdot 10^6} = 0,4 \text{Ом}, \quad (46)$$

Возьмем токоограничивающий реактор с  $X_p = 0,4 \text{Ом}$ , тогда суммарное сопротивление  $X_\gamma = X_{\text{нач}} + X_p = 0,8 \text{Ом}$ .

Активная мощность, потребляемая каждым преобразователем (47):

$$P = I_d^2 R_d \cdot 0,5 = 275^2 \cdot 81,72 \cdot 0,5 = 3,09 \text{МВт}, \quad (47)$$

значение (у учетом коммутации) угла управления  $\alpha$  (48):

$$\cos \alpha = \left( \frac{\pi}{3} \cdot \frac{R_d}{2} + X_\gamma \right) \cdot \frac{I_d}{\sqrt{2} U_n} = \left( \frac{\pi}{3} \cdot \frac{81,72}{2} + 0,8 \right) \cdot \frac{275}{\sqrt{2} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 0,8092 \quad (48)$$

$$\alpha = \arccos(\cos \alpha) = 36 \text{эл.град}.$$

Поскольку имеем два преобразователя, подключенных последовательно, то в формуле для  $\cos \alpha$  подставляем половину сопротивления  $R_d$ .

Находим угол коммутации  $\gamma$ :



$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2X_{\gamma} I_d}{\sqrt{2} U_{л}} = 0,8092 - \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 275}{\sqrt{2} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 0,779486, \quad (49)$$

$$\alpha + \gamma = \arccos(\cos(\alpha + \gamma)) = 38,8 \text{ эл.град.}; \quad \gamma = 38,8 - 36 = 2,8 \text{ эл.град.}$$

Реактивная мощность, потребляемая каждым преобразователем:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) = 3,09 \cdot 10^6 \cdot \operatorname{tg} 36 + 1,4 = 2,36 \cdot 10^6 \text{ ВАр} = 2,36 \text{ МВАр}, \quad (50)$$

Полная мощность, потребляемая каждым преобразователем:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3,09^2 + 2,36^2} = 3,89 \text{ МВА}. \quad (51)$$

Таким образом в результате расчета получаем следующие параметры, характеризующие режим плавки при конкретных климатических параметрах:

- требуемый ток плавки  $I_{нл\_треб}$  для заданных характеристик ОКГТ, климатических условий гололедообразования и параметров гололедной муфты;
- максимально допустимый ток плавки  $I_{дон}$ ;
- схема плавки;
- выпрямленное напряжение (напряжение плавки);
- активная, реактивная и полная мощность, потребляемая преобразователем плавки гололеда.

### 3.2.2 Расчет допустимого тока плавки

Исходные данные:

Диаметр ОКГТ  $d=13,5$  мм, температура воздуха  $t_e=-5$  С, допустимая температура нагрева ОКГТ, сопротивление ОКГТ при температуре  $t_1 = 20$ С ,  $R_{11} = 0,3 \text{ Ом} / \text{км}$  , скорость ветра  $v = 1 \text{ м} / \text{с}$  , температура коэффициент электрического сопротивления ОКГТ  $\alpha = 0,0036 \text{ С}^{-1}$  .

Рассчитывается сопротивление ОКГТ при температуре  $t_{дон} = 80$ С (52):

$$R_{1дон} = 0,3 \cdot \left[ 1 + 0,0036 \cdot 80 - t(-5) \right] = 0,392 \text{ Ом} / \text{км}, \quad (52)$$

Вычисляем число Рейнольдса (53):

$$Re = 1.644 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 0,0135 \cdot \left[ 268 + 0,5 \cdot 353 - 268 \right]^{-1,78} = 813,5, \quad (53)$$

Вычисляем число Нуссельта (54):

$$Nu = 0,65 \cdot 813,05^{0,2} + 0,23 \cdot 813,5^{0,61} = 16,2, \quad (54)$$

Далее рассчитываем значение допустимого тока плавки  $I_{доп}$  (55):

$$I_{доп} = \left[ \left( 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,0135 \cdot 0,5 \cdot 353^4 - 268^4 + 0,02585 \cdot 16,2 \cdot 353 - 268 \cdot 3,14 \right) / 0,00392 \right]^{1/2} = 563 A \quad (55)$$

### 3.2.3 Расчет времени и тока плавки гололеда для ВЛ от ПС 110/35/10 кВ «Александровка» методом итераций

Возьмем диаметр изморозевой муфты  $D=0,2$  м, плотность изморози  $\rho=150 \text{ кг} / \text{м}^3$ , ток плавки  $I=350 A$ , температура воздуха  $t_g = -7C$ , скорость ветра  $v=1 \text{ м} / \text{с}$ . На рисунке 41 изображен грозотрос ОКГТ установленный на ВЛ, плавка которых осуществлена от ПС 110/35/10 «Александровка», в также в таблице 11 указаны основные характеристики грозотроса ОКГТ.

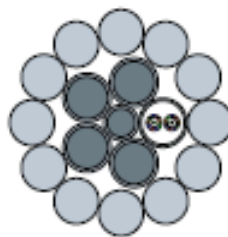


Рисунок 42- Грозотрос ОКГТ в разрезе

Таблица 11 – Основные характеристики грозотроса ОКГТ

Диаметр провода, мм	Сечение алюминий/сталь, мм <sup>2</sup>	Диаметр стального сердечника, мм	Диаметр 1 повива, мм	Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при 20 С, Ом/км
13,3	68,71/31,6	2,8	8,6	0,416

Принимаем  $t_{cm2} = 0 \text{ C}$ .

Рассчитываем число Рейнольдса (56):

$$Re_{D,\epsilon} = \frac{1 \cdot 1,328 \cdot 0,2}{1,68 \cdot 10^{-5}} = 15807,4, \quad (56)$$

Число Нуссельта (57):

$$Nu = 0,25 \cdot 15807,4^{0,6} \cdot 0,712^{0,43} \left( \frac{0,712}{0,712} \right)^{0,25} = 71,4. \quad (57)$$

Коэффициент теплопроводности изморози с плотностью  $\rho = 150 \text{ кг} / \text{м}^3$

$$\lambda_{\text{льда}} = 9,13 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м/К.}$$

Рассчитываем новое значение  $t_{cm2}$  (58):

$$t_{cm2} = \left( \frac{1}{\left( \frac{71,4 \cdot 0,237}{0,2} + 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ -0 + 273^4 \right] \right) 0,2 + \frac{1}{2 \cdot 9,13 \cdot 10^{-2}} \ln \left( \frac{0,2}{0,0133} \right)} \right)^{-1} = -6,87 \text{ C} \quad (58)$$

Уточняем число Рейнольдса (59):

$$Re_{D,\epsilon} = \frac{1 \cdot 1,328 \cdot 0,2}{1,68 \cdot 10^{-5}} = 15807,4, \quad (59)$$

Уточняем число Нуссельта (60):

$$Nu = 0,25 \cdot 15807,4^{0,6} \cdot 0,712^{0,43} \left( \frac{0,713}{0,713} \right)^{0,25} = 71,5, \quad (60)$$

Далее рассчитываем новое значение  $t_{cm2}$  (61):

$$t_{cm2} = \left( \frac{1}{\left( \frac{71,5 \cdot 0,237}{0,2} + 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ -6,87 + 273^4 \right] \right) 0,2 + \frac{1}{2 \cdot 9,13 \cdot 10^{-2}} \ln \left( \frac{0,2}{0,0133} \right)} \right)^{-1} = -6,74C \quad (61)$$

Средняя температура (62):

$$t_{cp} = \frac{-6,74 + -7}{2} = 6,86. \quad (62)$$

В таблице 12 представлены расчеты всех теплофизических параметров воздуха для трех температур: при температуре  $t_{cm2}$ , температуре воздуха  $t_e$ , средней температуре  $t_{cp}$ .

Таблица 12 – Расчеты теплофизических параметров воздуха

№	Температура	$C_p$ , Дж/кг/К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м/К	$\mu$ , Па·с	Pr
1	$t_e$	1006	1,328	0,0237	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,713
2	$t_{cm2}$	1006	1,328	0,0237	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,712
3	$t_{cp}$	1006	1,328	0,0237	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,713

Коэффициент теплоотдачи конвекцией (63):

$$\alpha = 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ -6,74 + 273^4 - -7 + 273^4 \right] = 0,33 \text{ Вт} / \text{м}^2 / \text{К}, \quad (63)$$

Ток плавки принимаем  $I = 350A$ , рассчитываем необходимое время плавки, примем температуру провода равной  $t_{np} = t_{дон} = 80C$ :

Мощность, выделяемая за счет электричества (подводимое тепло) (64):

$$q_{nl} = 350^2 \cdot 0,416 \cdot 10^{-3} = 50,96 \text{ Вт/м}, \quad (64)$$

Мощность, отводимая за счет конвекции в воздухе, Вт/м (65):

$$q_s = \frac{1}{\frac{1}{8,47 \cdot 0,2} + \frac{1}{2 \cdot 9,13 \cdot 10^{-2} \ln\left(\frac{0,2}{0,0133}\right)}} 3,14 \cdot 0 + 7 = 1,42, \quad (65)$$

Мощность, отводимая за счет излучения, Вт/м (66):

$$q_{из} = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ -6,74 + 273^4 - -7 + 273^4 \right] = 0,21, \quad (66)$$

Тепло, затрачиваемое на нагрев провода (67):

$$Q_{окгт} = (80 + 7) \cdot 462 \cdot 7900 \cdot 3,16 \cdot 10^{-5} + 920 \cdot 2670 \cdot 6,871 \cdot 10^{-5} = 24717,8 \text{ Дж/м} \quad (67)$$

Тепло, затрачиваемое на плавление льда (изморози) (68):

$$Q_{nl} = 1,1 \cdot 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 334000 \cdot 150 = 69416,0 \text{ Дж/м}. \quad (68)$$

Площадь плавки равна  $F = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , удельная теплота плавления льда  $r_{nl} = 33400 \text{ Дж/кг}$ .

Тепло, затрачиваемое на нагрев льда (69):

$$Q_{льда} = \frac{3,14}{2} \cdot 150 \cdot 2092,5 \cdot \left[ -6,74 \cdot \left( \frac{0,2^2}{2} - \frac{0,2^2}{4 \ln\left(\frac{0,2}{0,0133}\right)} + \frac{0,0133^2}{4 \ln\left(\frac{0,2}{0,0133}\right)} \right) - 7 \cdot \left( \frac{0,0133^2}{2} - \frac{0,2^2}{2} \right) \right] = 14481,4 \text{ Дж/м} \quad (69)$$

Теплоемкость льда (изморози) принята  $C_{льда} = 2092,5 \text{ Дж/кг/К}$ .

По расчетам выходит, что время плавки составляет:  $t = 2202,2 \text{ с}$  (38 минут).

Среднеинтегральная плотность провода:

$$\rho_{np} = 4317,6 \text{ кг} / \text{м}^3 .$$

Эквивалентная теплопроводность:

$$\lambda = 73,2 \text{ м} / \text{м} / \text{К}$$

Коэффициент температуропроводности (70):

$$\alpha_{np} = \frac{73,2}{656,0 \cdot 4317,6} = 2,58 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (70)$$

Критерий Померанцева (71):

$$Po = \frac{350^2 \cdot 0,416 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 73,2} = 0,221. \quad (71)$$

Критерий Кирпичева:  $Ki = 0,085$

Данные расчеты проведены с помощью программы, написанной на языке Фортран – Гололед 3.0.

Результаты представлены на рисунке 43, 44.

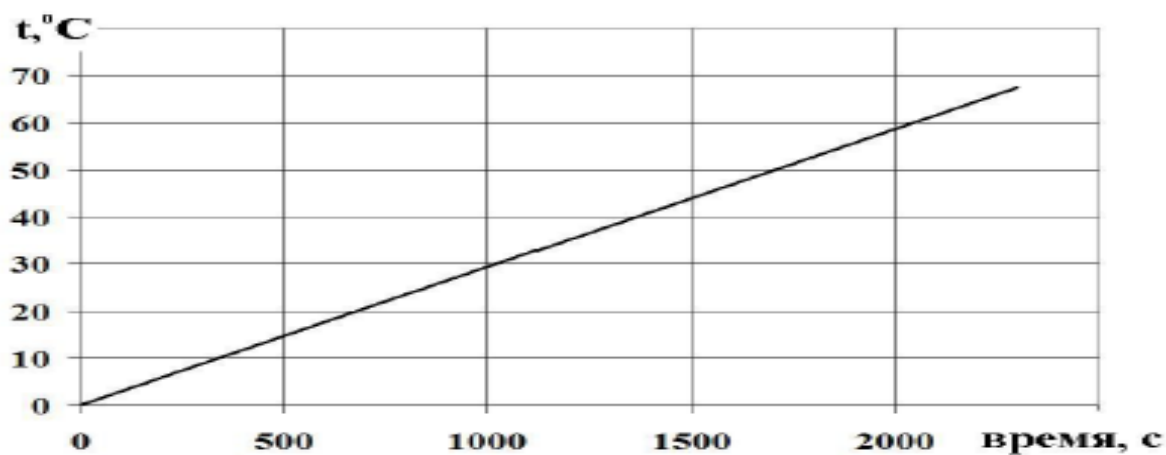


Рисунок 43 – Изменение температуры по времени

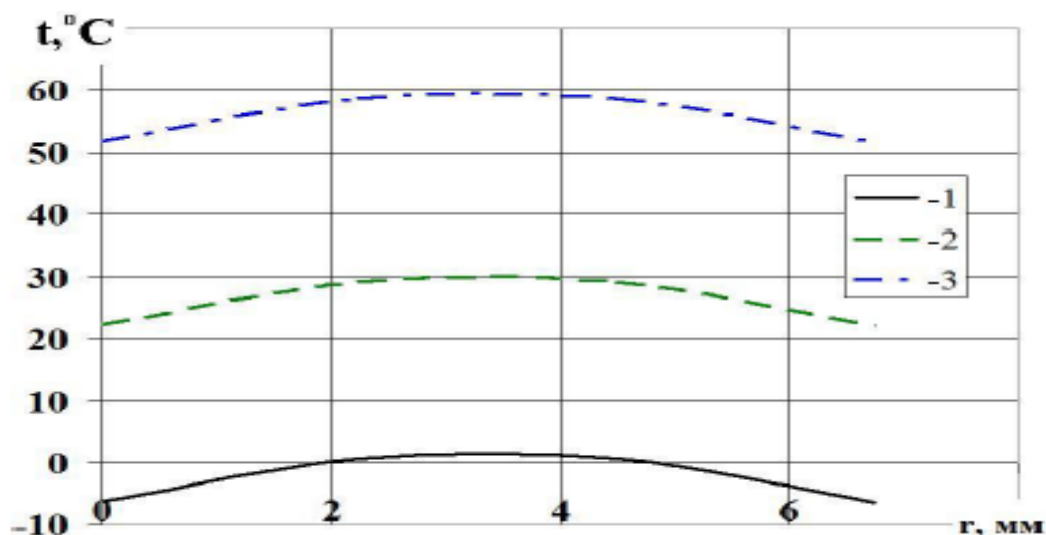


Рисунок 44 – Изменение для разных промежутков времени в зависимости от радиуса голодно-изморозевых отложений

### 3.2.4 Расчет времени и тока плавки гололеда для ВЛ от ПС 110/35/10 кВ «Шигоны»

ОКГТ диаметром 13,3мм, диаметр ледяной муфты  $D=0,05$  м, ток плавки  $I = 400A$ , температура воздуха  $t_g = -3C$ , скорость ветра  $v = 3,5 м / с$ .

Определяется температура стенки наружной поверхности ледяной муфты  $t_{cm2} = -1,1C$ .

Средняя температура (72):

$$t_{cp} = \frac{-1,1 + -3}{2} = -2,05C. \quad (72)$$

В таблице 13 представлены расчеты всех теплофизических параметров воздуха для трех температур: при температуре  $t_{cm2}$ , температуре воздуха  $t_g$ , средней температуре  $t_{cp}$ .

Таблица 13 – Расчеты теплофизических параметров воздуха

№	Температура	$C_p$ , Дж/кг/К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м/К	$\mu$ , Па·с	Pr
1	$t_g$	1006	1,31	0,024	$1,70 \cdot 10^{-5}$	0,712
2	$t_{cm2}$	1006	1,30	0,024	$1,70 \cdot 10^{-5}$	0,712
3	$t_{cp}$	1006	1,30	0,024	$1,70 \cdot 10^{-5}$	0,712

Рассчитываем число Рейнольдса (73):

$$Re_{D, \theta} = \frac{1 \cdot 1,31 \cdot 0,05}{1,70 \cdot 10^{-5}} = 13459,7, \quad (73)$$

Число Нуссельта (74):

$$Nu = 0,25 \cdot 13459,7^{0,6} \cdot 0,712^{0,43} \left( \frac{0,712}{0,712} \right)^{0,25} = 64,9. \quad (74)$$

Коэффициент теплопроводности льда:  $\lambda_{\text{льда}} = 2,27$  Вт/м/К.

Температура наружной стенки ледяной муфты (75):

$$t_{cm2} = \left( \frac{1}{\left( \frac{64,9 \cdot 0,24}{0,05} + 0,64 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ -1,04 + 273^4 - -3 + 273^4 \right] \right) 0,05} + \frac{1}{2 \cdot 2,27 \cdot 10^{-2} \ln \left( \frac{0,05}{0,0133} \right)} \right)^{-1} = -1,04C \quad (75)$$

Ток плавки принимаем  $I = 400A$ , рассчитываем необходимое время плавки, примем температуру ОКГТ равной  $t_{\text{ОКГТ}} = +80C$ :

Теплоемкость льда принята:  $C_{\text{льда}} = 2260,0$  Дж / кг / К .

По расчетам выходит, что время плавки составляет:  $t = 2155,5$  с (36 минут).

Среднеинтегральная теплоемкость ОКГТ:  $C_{\text{ОКГТ}} = 656,0$  Дж / кг / К .



Среднеинтегральная плотность ОКГТ:  $\rho_{np} = 4317,6 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

Эквивалентная теплопроводность:  $\lambda = 73,2 \text{ м} / \text{м} / \text{К}$ .

Коэффициент температуропроводности (76):

$$\alpha_{np} = \frac{73,2}{656,0 \cdot 4317,6} = 2,58 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (76)$$

Критерий Померанцева (77):

$$Po = \frac{400^2 \cdot 0,416 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 73,2} = 0,289, \quad (77)$$

Критерий Кирпичева:  $Ki = 0,097$ .

Расчетная температура на радиусе  $r = 2,21$  мм (что соответствует радиусу расположения оптоволоконного модуля) при решении нестационарного нагрева ОКГТ спустя 36 мин. составила  $t_{окгт} = 120$  °С. Данное превышение температуры обусловлено тем, что значение теплопроводности льда больше, чем теплопроводность изморози, а это приводит к большим потерям теплоты при процессе плавки, и, как следствие, начало плавки льда необходимо начинать с толщины ледяной муфты  $D = 0,03$  м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации были модернизированы существующие методы борьбы с гололедообразованием на ВЛ 35-110-220 кВ в виду того, что существующие схемы плавки и методы устарели, так как не могут обеспечивать надежное функционирование системы и не соответствуют мировым стандартам противодействия гололедно-изморозевым отложениям.

После проведенных анализа, расчетов и выбора метода и схем следует, что для возможного использования модернизируемых методов и схем плавки голодно-изморозевых отложений на проводах ВЛ 35-110-220 кВ необходимо произвести:

Источником плавки гололеда для ВЛ 220 кВ Александровка-2, ВЛ 110 кВ Жигулевская ГЭС-Цементная-1, ВЛ 110 кВ Жигулевская ГЭС-Цементная-2, ВЛ 110кВ Жигулевская ГЭС-Зольное, ВЛ 110 кВ Жигулевская ГЭС-Переволоки тяговая с отпайкой на ПС Отвага тяговая, ВЛ 110 кВ Жигулевская ГЭС-Услава тяговая с отпайкой на ПС Отвага тяговая принимается ПС 110/35/10 кВ «Александровка», так данная ПС требует наименьших вложений для модернизации схем, а также минимизирует оперативные переключения для вышеуказанных линий.

Для организации плавки на ПС 110/35/10 кВ «Александровка» потребуется установка одной дополнительной ячейки плавки гололеда 10 кВ, одной ячейки плавки гололеда 35 кВ, разъединителей 110 кВ для подключения ячеек 35 и 10 кВ к спускам ВЛ 110 кВ Александровка-2, замена трансформатора Т-1 с 16 МВА на 40 МВА., а также установка закорачивающих разъединителей на ПС 110 кВ: Переволоки, Услава, Зольное, Цементная.

Источником плавки гололеда для ВЛ 110 кВ Переволоки тяговая-Печерский берег тяговая, ВЛ 110 кВ Услава тяговая-Печерский берег тяговая, ВЛ 110 кВ Печерский берег тяговая-Правая Волга тяговая, ВЛ 110 кВ Печерский берег тяговая-Разъезд-2 тяговая, ВЛ 110 кВ Сызрань-Разъезд-2 тя-

говая с отпайкой на ПС Дружба, ВЛ 110 кВ Сызрань-Правая Волга тяговая с отпайкой на ПС Дружба, ВЛ 110 кВ Сызрань-Шигоны, ВЛ 110 кВ Печерский берег-Шигоны принимается ПС 110/35/10 кВ «Шигоны» так как подходит по техническим характеристикам и наиболее удобна для плавки гололеда на вышеуказанных линиях.

Для организации плавки на ПС 110/35/10 кВ «Шигоны» потребуется установка одной дополнительной ячейки плавки гололеда 35 кВ, разъединителей 110 кВ для подключения к спускам ВЛ 110 кВ Сызрань-Шигоны и ВЛ 110 кВ Печерский берег-Шигоны, замена трансформатора с 16 МВА на 40 МВА, а также установка закорачивающих разъединителей на тяговых ПС 110 кВ: Переволоки, Услава, Правая Волга, Разъезд-2.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вахнина, В.В. Некоторые особенности режимов работы электрических сетей с изолированной нейтралью // Энергетика и энергоэффективные технологии: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ЛГТУ. Липецк: ЛГТУ, 2006. С. 24–27.

2. Вахнина, В.В. Анализ особенностей электрических сетей с изолированной нейтралью методами математического моделирования // Энергетика и энергоэффективные технологии: сборник докладов II Международной научно-технической конференции. Липецк : ЛГТУ, 2007. С. 57–58.

3. Вахнина, В.В. Влияние грозových перенапряжений на возникновение системных аварий в Самарской электроэнергетической системе // Энергосбережение на предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: труды Всероссийского научно-практического семинара. Салават, 2010. С. 59–61

4. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Электроустановки для профилактического антигололедного обогрева проводов воздушных линий электропередачи: Учебное пособие Южно-Российского государственного технического университета. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. 26 с.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 N 6 (ред. от 13.09.2018) "Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей". Зарегистрировано в Минюсте России 22.01.2003 N 4145. 2003.

6. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 448 с.

7. Богданова О.И., Гринштейн М.Л., Механошин Б.И., Родионов В.Н., Рожков А.А. Система распределенного контроля температуры оптических волокон // Энергетик. 2010. №10. С. 34-41.

8. Постановление Правительства РФ от 24 февраля 2009 г. N 160. О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12165555/> (дата обращения 15.01.19).

9. Никифоров С.А., Рыбцов В.А., Осипенко Р.А., Фомичева Н.Н. Способы борьбы с гололедно-изморозевыми отложениями на проводах воздушных линий 35-110 кв в Самарской области // Экономика и социум. №3(58). 2019. С. 38-42.

10. Рыбцов В.А., Никифоров С.А., Фомичева Н.Н. Концепция развития интеллектуально-энергетических сетей в России // Экономика и социум. №10(53). 2018. С. 72-76.

11. Никифоров С.А., Шибяев И.С. Анализ и причины возникновения гололедных образований на воздушных линиях // Теория и практика приоритетных научных исследований. Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции (30 апреля 2018 года, г. Смоленск). Международный научно-информационный центр «Наукосфера». Смоленск, 2018. С. 51-54.

12. Анчарова Т.В., Рашевская М.А., Стебунова Е.Д. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений // Учебник. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2012. 416 с.

13. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2008. 256 с.

14. Фролов Ю. М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. М.: Лань, 2012. 480 с.

15. Хорольский. В. Я., М.А. Таранов Надежность электроснабжения. М.: Форум, Инфра-М, 2013. 128 с.

16. Титов Д.Е., Угаров Г.Г. Термодинамический способ мониторинга гололедных отложений на проводах // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №4. С. 37-44.

17. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: Ростехнадзор, 2010. 411 с.
18. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования. М.: ИЦ Академия, 2013. 352 с.
19. Бойнович Л.Б., Емельянов А.М. Методы борьбы с обледенением ЛЭП: перспективы и преимущества новых супергидрофобных покрытий // Электро. 2011. №6. С. 72-98.
20. Никитина И.Э., Абдархамонов Н.Х. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи // Нефтегазовое дело. 2015. №3. С. 625-744.
21. СТО 5646433-29.646.44.132-2012. Стандарт организации. Методические указания по применению сигнализаторов гололеда (СГ) и прогнозированию гололедноопасной обстановки. Введ. 27.01.2012. – Красноярск: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. 26 с.
22. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 125 с.
23. СТО 4.2-07-2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению и оформлению документов учебной и научной деятельности. Текстовые материалы и иллюстрации. М.: Энергоатомиздат, 2014. 60 с.
24. Мустафин Р.Г., Хакимзянов Э.Ф., Писковацкий Ю.В., Ведерников С.Г., Лукин Э.И. Пат. 2479084. Российская Федерация, МК H02G7/16/. Способ обнаружения гололедных образований на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи. Казанский государственный энергетический университет: заявл. 19.07.2011; опубл. 10.04.2013. 5 с.
25. Landry M., Beauchemin R., Venne A. De-icing EHV Overhead Transmission Lines by Short circuit Currents [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/882806> (дата обращения 15.01.19).
26. Sullivan C.R., Petrenko C.F., McCurdy J.D., Kozliouk V. Breaking the ice: de-icing power transmission lines with high-frequency, high-voltage excitation // IEEE Industry Applications Magazine. 2003. Vol. 9. №. 5. P. 49–54.

27. Volat C., Farzaneh M. De-icing/Anti-icing Techniques for Power Lines: Current Methods and Future Direction [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235783169\\_De-icingAnti-icing-Techniques\\_for\\_Power\\_Lines\\_Current\\_Methods\\_and\\_Future\\_Direction](https://www.researchgate.net/publication/235783169_De-icingAnti-icing-Techniques_for_Power_Lines_Current_Methods_and_Future_Direction) (дата обращения 21.02.19).

28. Volat C., Farzaneh M. Anti-icing and De-icing Techniques for Overhead Lines [Электронный ресурс]. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8531-4\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8531-4_6) (дата обращения 23.10.18).

29. Goel A. Design of Transmission Lines for Atmospheric Icing [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/290006439\\_Design\\_of\\_Transmission\\_Lines\\_for\\_Atmospheric\\_Icing](https://www.researchgate.net/publication/290006439_Design_of_Transmission_Lines_for_Atmospheric_Icing) (дата обращения 21.02.19).

30. MODBUS application protocol specification v1.1b. URL: [http://www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf) (дата обращения 21.02.19).