

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

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

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка системы мониторинга воздушных линий электропередачи на напряжение 110 кВ»

|                      |   |                        |
|----------------------|---|------------------------|
| Студент              | <u>Р.И. Сайрутдинов</u><br>(И.О. Фамилия) | _____ (личная подпись) |
| Научный руководитель | <u>А.А. Кувшинов</u><br>(И.О. Фамилия)    | _____ (личная подпись) |

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_ (личная подпись)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 3  |
| Глава 1 – Воздушная линия электропередач как объект диагностирования .....                                | 5  |
| 1.1 Опоры .....   | 5  |
| 1.1.1 Надежность опор и фундаментов ВЛ .....  | 9  |
| 1.1.2 Зависимость отказов от материала опоры.....   | 13 |
| 1.2 Надежность проводов и грозозащитных тросов.....   | 16 |
| 1.3 Арматура .....  | 20 |
| 1.4 Изоляторы .....   | 21 |
| Глава 2 Методы мониторинга воздушных линий.....   | 25 |
| 2.1 Обслуживание ВЛ выездной бригадой.....  | 25 |
| 2.1.1 Визуальное обследование .....   | 27 |
| 2.1.2 Провода и грозозащитные тросы .....   | 34 |
| 2.1.3 Изоляторы.....  | 35 |
| 2.1.4 Линейная арматура .....   | 40 |
| 2.2 Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования<br>воздушных линий электропередачи..... | 40 |
| Глава 3 Гололедообразование на проводах ЛЭП.....  | 46 |
| 3.1 Влияние гололеда на надежность ЛЭП .....  | 46 |
| 3.3 Выбор метода обнаружения гололеда .....   | 64 |
| 3.3.1. Механические методы.....   | 65 |
| 3.3.2. Физические методы .....  | 66 |
| 3.3.3. Локационный метод.....   | 68 |
| 3.3.4 Термическое воздействие переменным током промышленной частоты.<br>.....                             | 73 |
| 3.3.5 Термическое воздействие постоянным током .....  | 77 |
| 3.3.6 Термическое воздействие током ультранизкой частоты .....  | 82 |
| 3.3.7 Термическое воздействие током высокой частоты.....  | 83 |
| 3.3.8 Термодинамическое воздействие.....  | 84 |
| Заключение .....  | 87 |
| Список использованных источников .....  | 89 |

## Введение

Настоящая работа посвящается разработке системы мониторинга воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) с целью повышения надежности и долгосрочности.

**Актуальность темы.** На сегодняшний день, появившиеся рыночные отношения между потребителем и производителем электрической энергии, обязывают производителя к бесперебойному и качественному электроснабжению. Но к сожалению, нынешнее, используемое оборудование в России, морально и физически устарело. ВЛЭП, находящиеся на большой территории, являются не очень надежными элементами современной энергетической системы.

Значительной частью повреждения ВЛ, являются обрывы проводов (в частности из-за атмосферных давлений) и короткие замыкания. При всем этом, чтобы определить место повреждения и локализовать его, требуется затратить большое количество средств и времени.

В данной ситуации рассмотрение вопросов диагностики старого электрического оборудования и предупредительные меры по пресечению возможных аварий, так же и на ВЛ становятся очень актуальными. Кража частей конструкции анкерных опор, дефекты в изоляторах (трещины, сколы), еще к этим мерам можно отнести метод обнаружения гололеда на проводах ЛЭП. Из-за тяжести гололедных отложений могут случаться обрывы проводов и выход из строя опор ЛЭП. Также, при появлении гололеда, ухудшается высокочастотная связь по электрическим линиям, которая применяется для передачи сигналов релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики, и технологической информации.

Аварии из-за гололеда на ВЛ являются самыми тяжелыми и трудно устраняются из-за того, что зимой грунт промерзший, дороги не расчищены и образование гололеда происходит не в одном месте, а разбросано по линии. Аварии из-за гололеда на ВЛ, чаще всего проявляются массово и требуют

больших экономических вложений. Заблаговременное обнаружение гололеда и преждевременное его устранение на ВЛ путем плавки, являются основными задачами организаций, занимающихся энергоснабжением.

**Цель и задачи работы.** Целью данной работы является повышение надежности и снижение аварийности на воздушных линиях 110 кВ.

Чтобы достичь данной цели, необходимо решить следующие задачи:

- 1) Рассмотреть воздушную линию электропередач как объект диагностирования.
- 2) Проанализировать методы мониторинга воздушных линий
- 3) Рассмотреть гололедные образования на проводах линий электропередачи и выбрать наиболее надежный и эффективный метод плавки гололеда.

## **Глава 1 – Воздушная линия электропередач как объект диагностирования**

В самом начале рассмотрим воздушную линию электропередач (ВЛЭП) как объект исследования. Воздушная линия (ВЛ) состоит из основных конструктивных элементов:

- опоры
- провода
- арматура
- изоляторы

### **1.1 Опоры**

Опоры – это основной элемент ВЛ, они служат для поддержки электрических проводов. Опоры можно квалифицировать по разным признакам: по назначению, по материалу, по конструкции, по количеству цепей передачи электроэнергии.

По назначению опоры подразделяются на промежуточные и анкерные (рисунок 1.1).

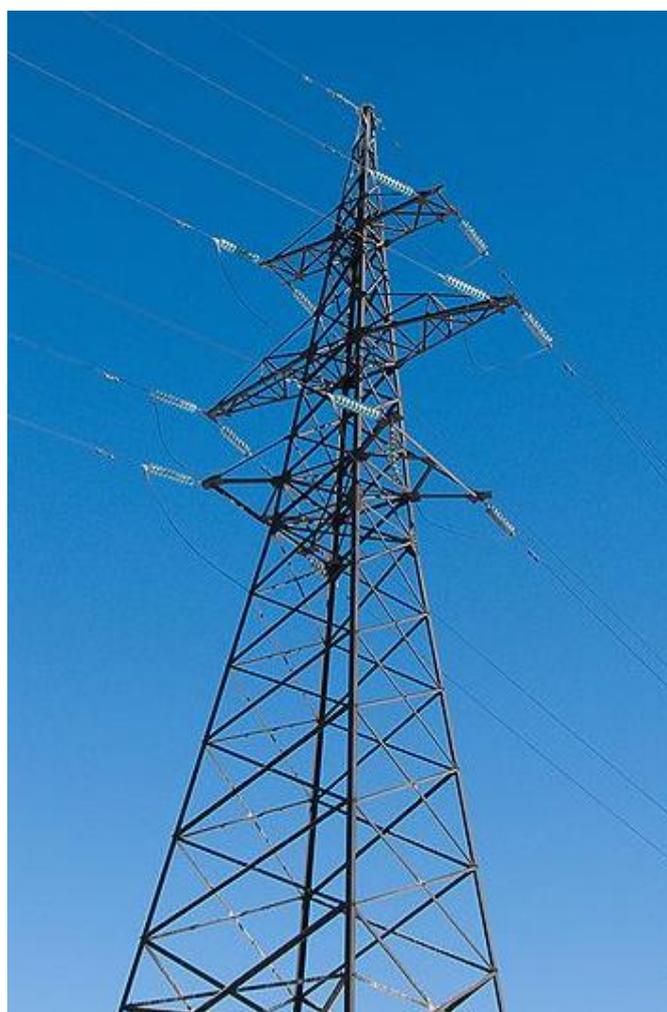
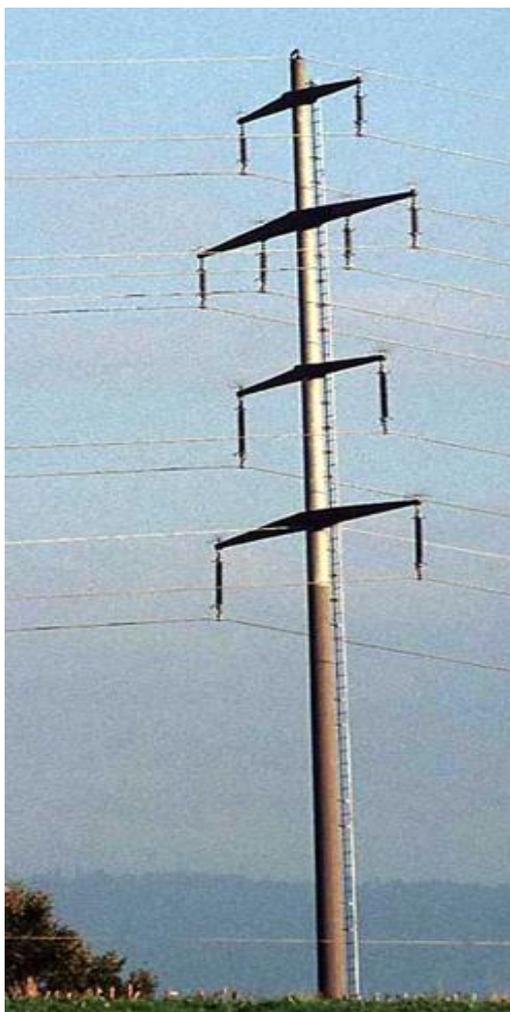


Рисунок 1.1 – Промежуточная и анкерная опора

Анкерные в свою очередь подразделяются на:

- концевые, монтируются в начале или конце воздушной линии
- переходные, монтируются в местах препятствий (реки, озера, автомобильные дороги и т.п.)
- угловые, монтируются на поворотах трассы
- ответвительные, монтируются для выполнения ответвлений
- перекрестные, монтируются в месте пересечения воздушных линий
- транспозиционные, монтируются на протяжении трассы для изменения расположения фаз вдоль линии

По материалу опоры бывают:

- деревянные
- металлические

- железобетонные

Конструкция опор зависит от назначения воздушной линии, ее напряжения, количества проводов и тросов, их расположения, климатических и других условий. Наиболее часто встречающиеся типы опор:

- V-образная
- дельтавидная
- «тренога»
- пирамидная
- порталная
- одностоечная
- АП - образная
- Y - образная
- А - образная
- Т - образная

В настоящее время в эксплуатации присутствуют около 500 тыс. км линий 35–500 кВ на металлических, железобетонных и деревянных опорах. Основная масса ВЛ была построена в 1960–1970 годах. При проектировании исходили из срока службы 30 лет. Долговременная защита от коррозий, изнашиваемость из-за знакопеременных нагрузок, изнашивание различных материалов были рассчитаны на эти же годы. Доля линий со сроком эксплуатации более 30 лет растет, так как новое строительство и реконструкция ВЛ с 1991 года проводятся в малых объемах.

Длина воздушных линий на железобетонных опорах составляет - 59% на металлических - 23% и на деревянных опорах - 18% от общей длины линий. Длина воздушных линий 35–500 кВ по количеству цепей и напряжению приведена в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Протяженность ВЛ 35-500кВ по напряжениям и количеству цепей

| Напряжение, кВ | Всего по трассе, тыс. км | Одноцепные ВЛ на опорах |        |      | Двухцепные ВЛ на опорах |        |      |
|----------------|--------------------------|-------------------------|--------|------|-------------------------|--------|------|
|                |                          | Металл.                 | Ж/бет. | Дер. | Металл.                 | Ж/бет. | Дер. |
| 500            | 30,0                     | 26,0                    | 4,0    | -    | -                       | -      | -    |
| 330            | 9,0                      | 3,5                     | 4,7    | -    | 0,7                     | 0,1    | -    |
| 220            | 74,0                     | 26,2                    | 29,6   | 2,8  | 13,8                    | 1,6    | -    |
| 110            | 203,0                    | 16,3                    | 89,3   | 36,5 | 24,4                    | 36,5   | -    |
| 35             | 184,0                    | 5,6                     | 111,2  | 51,2 | 3,7                     | 11,0   | -    |
| Всего          | 500,                     | 77,6                    | 238,8  | 90,5 | 42,6                    | 49,2   |      |

Средний срок службы воздушной линии на различных опорах (годы):

- из металла – 41,6;
- из железобетона – 30,1;
- из дерева – 41,4.

Данные о сроке службы свидетельствуют о крупномасштабном старении высоковольтных линий, что приводит к недопустимому износу.

Так, например, в соответствии с данными института «Энергосетьпроект», износ воздушной линии составляет 36%, что привело к увеличению числа отказов в течение последних 10 лет в 1,6 раза.

Фирма ОРГРЭС с 50-х годов анализирует причины технологических нарушений в энергетической системе, который дал возможность классифицировать отказы ВЛ, и в частности аварии, вызванные нарушением работоспособности отдельных элементов ВЛ. Этот анализ показывает, что значительное число отказов ВЛ является следствием повреждения проводов, изоляторов, а также отключений из-за грозových перенапряжений. Опоры воздушной линии являются весьма надежным элементом ЛЭП, однако если опора разрушается, это приводит к весьма серьезным последствиям и не маленьким затратам, связанных с восстановлением воздушных линий и

недоотпуском электрической энергии. Распределение отказов по элементам ВЛ приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Распределение отказов по элементам ВЛ

| Элементы ВЛ     | Поток отказов в процентах от общего числа |                                   |
|-----------------|---|-----------------------------------|
|                 | Без учета грозových перенапряжений        | С учетом грозových перенапряжений |
| Опоры           | 9   | 13                                |
| Арматура        | 3   | 4                                 |
| Провода и тросы | 37  | 52                                |
| Изоляторы       | 23  | 31                                |

### 1.1.1 Надежность опор и фундаментов ВЛ

Анализ причин отказов ВЛ, проведенный исследовательскими учреждениями, показывает, что интенсивность отказов зависит от срока службы ВЛ.

Например, эта зависимость для ВЛ 35–330 кВ на металлических опорах, которые в основном были сооружены в 60–70 годы в южной части СССР, иллюстрируется графиком на рисунке 1.2.

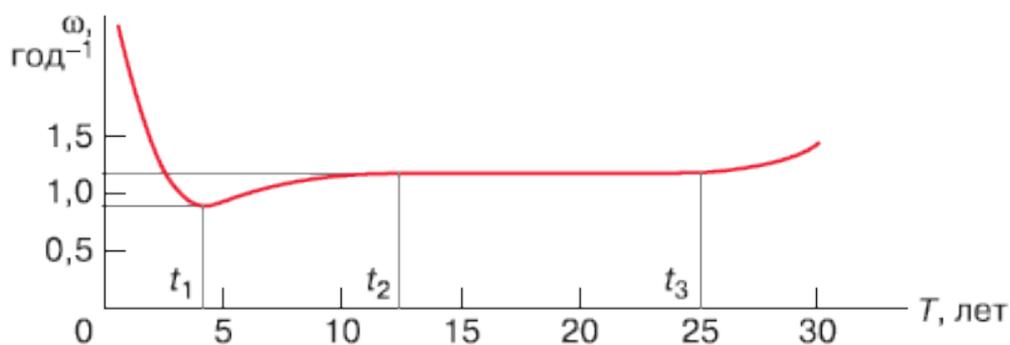


Рисунок 1.2 – Изменение потока отказов во времени для ВЛ на металлических опорах

Опоры ВЛ этого периода характеризуются тем, что конструкции опор выполнялись в основном сварными из кипящей стали, имеющей повышенную склонность к трещинообразованию и хрупкому разрушению при отрицательной температуре. Имелся и ряд других недостатков: например, стыки между сварными секциями закрывались односторонними накладками, защита от коррозии выполнялась только лакокрасочными покрытиями.

Параметр потока отказов для таких конструкций за первые 4 года эксплуатации снижался, а между 4–12 годами повышался (период приработки конструкций ВЛ), а затем между 12 – 25 годами стабилизировался. В дальнейшем параметр потока отказов из-за износа и старения элементов ВЛ возрастал вплоть до момента проведения капитального ремонта или реконструкции ВЛ.

После введения СНиП 11-В, 3-62 (в настоящее время отменен) и унификации опор их конструкция была пересмотрена. Начали применяться стали повышенного качества (спокойной плавки), оцинкованные детали, изменилась конструкция стыка (двойные накладки) и т. д.

Интересны цифры потока отказов ВЛ с 1958 по 2000 года. По статистическим данным, с 1958 по 1976 год прошлого столетия средний срок эксплуатации не превышал 25 лет, и поэтому в этом интервале не наблюдалось характерное повышение потока отказов. В период с 1976 по 1982 год поток отказов резко понижается. Эти годы характеризуются массовым вводом в эксплуатацию новых линий (до 15 тыс. км в год против 1,5–2,0 тыс. км в год в прежние годы). Затем с 1982 по 1992 год аварийность вновь повышается до уровня 1976 года и продолжает постепенно расти вплоть до нынешнего века. С 2000 года поток отказов начал стабилизироваться, так как с этого времени оживился процесс ремонта и реконструкции ВЛ.

Параметр потока отказов в последнее время для металлических опор составляет 0,0129, для опор из железобетона - 0,0108, для деревянных опор – 0,11. Сейчас можно сделать следующие выводы:

- повреждаемость опор носит износный характер, ее величина определяется нормами проектирования, материалом, из которого изготовлены опоры, уровнем обслуживания при эксплуатации, качеством оценки технического состояния и проведения необходимых ремонтов;

- период до капитального ремонта металлических опор, запроектированных по действующим СНиП и ПУЭ, составляет порядка 30–35 лет;

- уровень отказов опор еще не стабилизировался и превышает установившийся уровень 60–70 годов в 1,9–2,0 раза.

Характерные разрушения опор, представлены на рисунках 1.3, 1.4, 1.5.



Рисунок 1.3 – Характерные разрушения металлических опор



Рисунок 1.4 – Характерные разрушения фундаментов металлических опор



Рисунок 1.5 – Характерные разрушения железобетонных опор

В этом случае утверждение о высокой несущей способности опор, производимых в Западной Европе, США, Канаде, по сравнению с отечественным, предназначенными для таких же климатических условий, не

состоятельны. Опоры и порталы ВЛ, сделанные за рубежом, имеют значительно меньше металла, из чего следует, что они менее прочны (даже если учитывать тот факт, что они применяют высокопрочную сталь). Высокая надежность приобретается за счет использования достаточно мощной антикоррозийной защите, такой как цинкование, и конечно же строго соблюдения всех технологических норм на каждой стадии производства и эксплуатации.

Эксплуатацией часто выражают предложение о создании опор воздушных линий, которые смогли бы выдерживать повышенную нагрузку даже при выходе из строя нескольких элементов. Тем не менее, задача проектировщика заключается в разработке наиболее экономичной конструкции при соблюдении требований действующих нормативных документов, то есть для достижения требуемой прочностью, применено минимум затрат. Неоднократное резервирование и включение дополнительных элементов только лишь для обеспечения надежности конструкции при несанкционированном вмешательстве в ее работу, будут только увеличивать стоимость воздушной линии и вряд ли предотвратят несчастные случаи и сбои.

### **1.1.2 Зависимость отказов от материала опоры**

Следует отметить, что в начальный период эксплуатации повреждение опор из металла в 1.6 раза ниже, чем у опор из железобетона. Но если железобетонные опоры в течении 15-20 лет после обкатки конструкций находятся в стабильном состоянии, а их повреждение находятся приблизительно на том же самом уровне, то металлические опоры к этому времени находятся под воздействием износ-фактор. В результате сравнивается их повреждаемость.

Основной причиной значительного первоначального различия в повреждении металлических и железобетонных опор является сильная зависимость несущей способности последних от качества их уплотнения в грунте.

Зачастую у железобетонных опор проявляется крен под действием сторонних нагрузок, что дополнительно увеличивает наклон, обоснованный внушительной массой самой конструкции, что способствует увеличению крена. Исходя из этого, несущая способность опор падает, что ведет за собой их разрушение. Весомая часть изгибающего момента достигается в гололедных районах 35%, а при слабом закреплении опор в грунте 50% и более. У железобетонных опор отказы из-за гололеда превышает те же самые значения для металлических опор в 1,9 раза. В эксплуатации мало внимания уделяется данному фактору.

Другой причиной снижения надежности железобетонных опор в период обкатки является большое количество скрытых дефектов. К таким дефектам в первую очередь относятся поломка арматуры, отклонение от проектного армирования, несоответствие классов бетона и стали, пустоты в теле бетона и т.д. Отказы по данным причинам выходят около 35,5%.

В настоящее время наличие трещин в стойках опор не влияет на надежность, так как коррозия арматуры в большинстве случаев не достигает своего критического значения. Судя по опыту применения железобетонных опор в Калининградской области (с 1932 года), влияние коррозии арматуры начинает сказываться после 50–60 лет эксплуатации. Поэтому ремонт по закрытию трещин является актуальным, так как в дальнейшем это скажется на надежности опор.

Наклон металлических конструкций из-за не надежной фиксации в почве очень редок. Главная причина разрушений металлических опор – это превышение настоящих нагрузок и воздействий, и значительное влияние коррозии на элементы при длительной эксплуатации. К вышеперечисленному следует добавить, что при очень высоких нагрузках чаще всего это отказы износогового характера. Это доказывает тот факт, что в случаях, когда следствием отказов был только ураган, металлические опоры имели срок службы 10-15 лет, а отказ конструкций, эксплуатируемых меньше 10 лет, не переходили за 15% от всего числа отказов.

К большому числу отказов ВЛ 110 кВ при расчете на 100 км пути приводит к повреждению деревянных опор. При одних и тех же воздействиях, повреждаемость воздушных линий на деревянных опорах обусловлена тем, что у них низкий срок службы (7-15 лет). Из-за того, что опоры загнивают, а своевременно устранять загнивание нет возможности.

В таблице 1.3 приведено распределение отказов ВЛ в зависимости от вида опор. Эти недостатки опор и других элементов воздушной линии могут быть предотвращены основываясь только на современной диагностике их технического состояния.

Таблица 1.3 – Распределение отказов в зависимости от типа опор

| Причина отказов \ Вид опор                         | Металлические | Железобетонные | Деревянные |
|--|---------------|----------------|------------|
| Нагрузки и воздействия:                            |               |                |            |
| - ветер выше расчетного                            | 33,7          | 21,7           | 52,2       |
| - ветер и гололед выше расчетного                  | 13,2          | 24,8           | 5,0        |
| Итого:   | 46,9          | 46,5           | 57,2       |
| Качество проектирования, строительства и установки | 9,2           | 35,5           | 1,5        |
| Качество использования                             | 26,9          | 18,0           | 41,0       |
| Разбор конструкций посторонними лицами             | 16,9          | -              | 0,3        |

Система диагностики является неотъемлемой частью технического перевооружения. Существующая система состояния оборудования электросетей не эффективна, что связано с отсутствием технических средств на объектах электросети, и с нехваткой нормативно-методической базы по всем возможным системам диагностики.

## 1.2 Надежность проводов и грозозащитных тросов

Как показывает распределение отказов по элементам ВЛ, выход из строя проводов и грозозащитных тросов составляет от 40 до 55% от общего количества всех нарушений.

Основные причины повреждения проводов и грозотроса – превышение уровня гололеда, износ от вибрации, пляски проводов и коррозии. Отказы, связанные с потерей несущей способности проводов, носят износочный характер и увеличиваются примерно на 3–5% в год. С 1955 года их количество возросло в 2,8 раза. Исключение составляют 70–80-е годы, когда количество отказов несколько снизилось из-за массового ввода в эксплуатацию новых линий, на которых износочный фактор не успел сказаться.

Применение в расчетах повышенного среднеэксплуатационного тяжения в проводах (30% от разрывного усилия в проводе вместо 25%, принятых в зарубежной практике), а также использование проводов и грозозащитных тросов с повышенной несущей способностью потребовало проектирования усиленной вибрационной защиты с применением гасителей вибрации нового поколения и протекторов, устанавливаемых на проводах в местах подвески. Такие мероприятия при проектировании ВЛ с повышенным тяжением не были предусмотрены, что привело к большим потерям при эксплуатации.

Рассмотрим наиболее характерные повреждения и отказы проводов и грозозащитных тросов на линиях электропередачи России. Наиболее часто повреждаются провода на переходах ВЛ через водные преграды в местах установки в роликовых подвесах. Защита от вибрации на переходах выполняется в виде двух гасителей Стокбриджа и защитных муфт, устанавливаемых с зазорами между проводом и внутренней полостью 2–3 мм.

Работа такой конструкции оказалась совершенно неэффективной, и она спровоцировала интенсивный износ провода и самих муфт (рисунок 1.6).

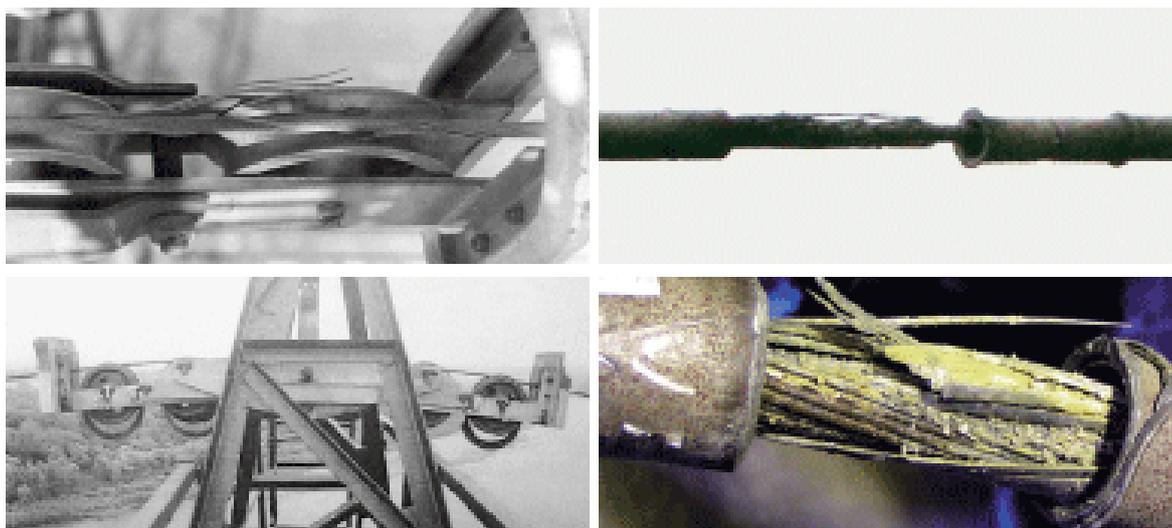


Рисунок 1.6 – Характерные повреждения роликовых подвесов и грозозащитных тросов, проводов в роликовых подвесах

На тридцати обследованных переходах ВЛ использование этих устройств приводило к разрушению провода и самих муфт после 8–10 лет эксплуатации, а в северных районах – после 3–5 лет.

В настоящее время разработан поддерживающий зажим типа ПОН – глухая лодочка, оборудованная ограничителем выхода провода из зажима при аварийных ситуациях за счет шпоночного устройства, работающего на срез. Данное устройство защищает опору от разрушения из-за нагрузок аварийного режима (рисунок 1.7).

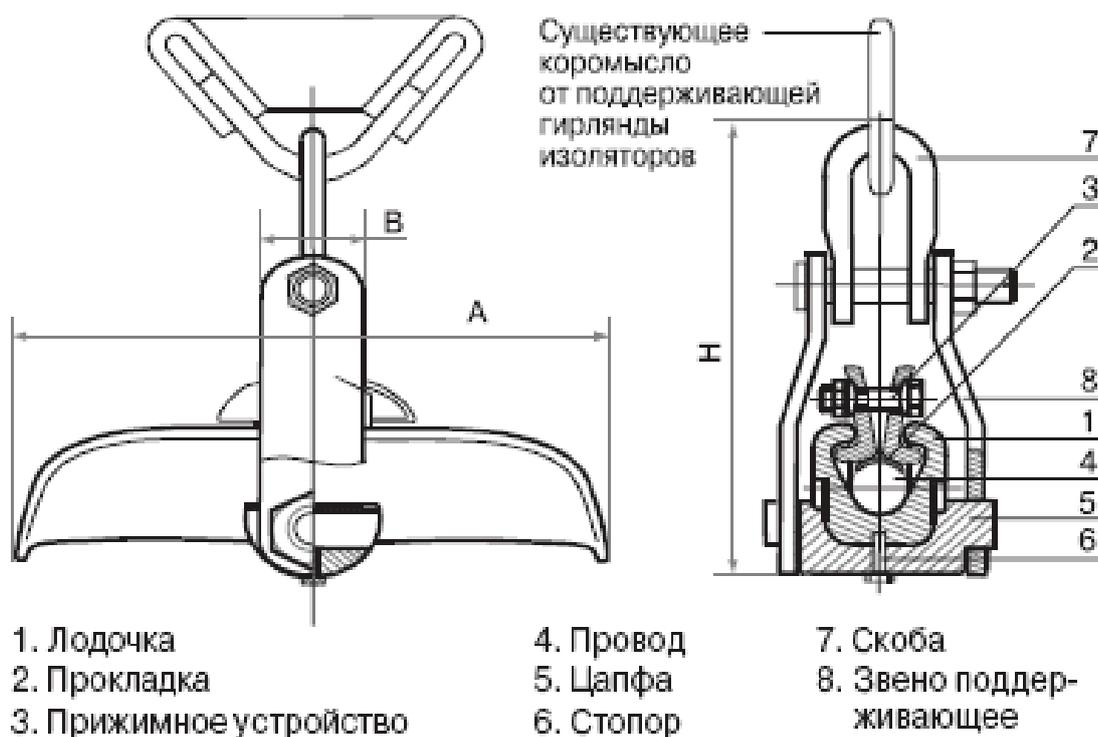


Рисунок 1.7 – Поддерживающий зажим типа ПОН

Глухое крепление провода в лодочке прошло опытную проверку на нескольких переходах, где показало высокую эффективность.

Критическая ситуация сложилась с надежностью ВЛ в северных районах России. Например, за зиму 1998–1999 годов в Северной сети «Тюменьэнерго» имело место нарушение электропитания (примерно 60 нарушений) из-за обрыва проводов, причем большее число аварийных ситуаций было зафиксировано при пониженной температуре - 40 ° С и соответственно при большем тяжении. Осмотры показали, что абсолютно все обрывы произошли в местах, где провод был уже ослаблен усталостными разрушениями от вибрации, причем как в алюминиевых, так и в стальных повивах. Все разрушения имели место вблизи поддерживающих зажимов, гасителей вибрации, а иногда в точках выхода провода из соединительных зажимов. Именно в этих местах знакопеременные механические напряжения от вибрации имеют наибольшую величину.

Аналогичная картина складывается на проводах и тросах, эксплуатируемых в более благоприятных климатических условиях, например, на проводах с повышенной несущей способностью типа АЖС и стальных

тросах, которые, как правило, смонтированы с повышенным тяжением (рисунок 1.8).

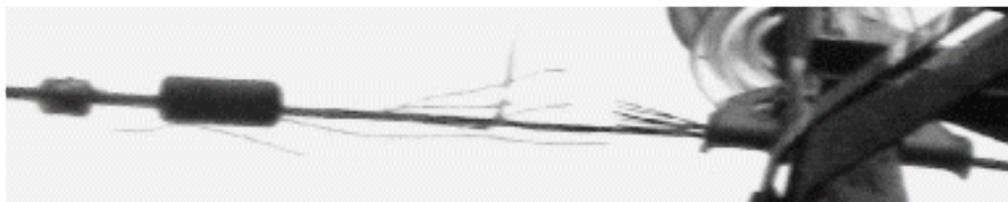


Рисунок 1.8 – Разрушение провода АЖС

Большой опасностью для ВЛ является отложение на проводах гололеда, мокрого снега и изморози, как со стороны статических нагрузок, так и динамических – представленные в виде колебаний разных типов. Гололед и сверхрасчетные нагрузки, обычно образуются во время атмосферного процесса, действуя одновременно на территории от одной до 3-х энергетических систем. Аварии при гололеде и ветре, чаще всего парализуют систему энергоснабжения потребителей в нескольких районах из-за массовых обрывов проводов, изоляции, разрушения арматуры и поломок опор. При отложениях гололеда меньше нормативных большая вероятность возникновения колебания, в том числе пляска если отложение гололеда скопилось на одной стороне и низкочастотная вибрация при цилиндрической форме изморози (рисунок 1.9, 1.10).

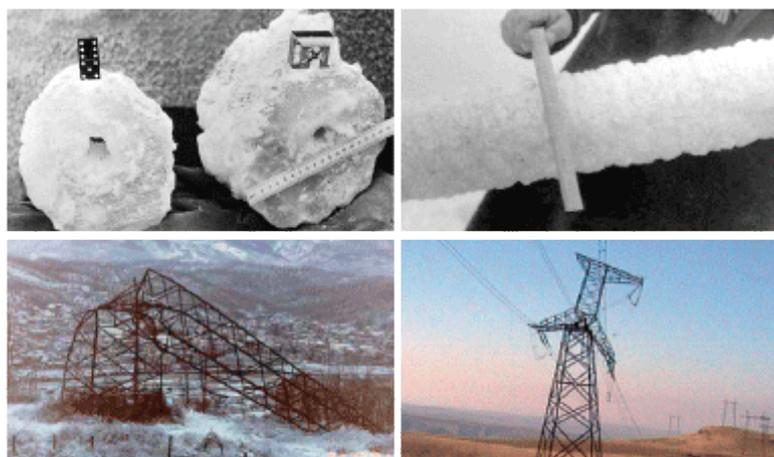


Рисунок 1.9 – Гололед и его последствия на ВЛ



Рисунок 1.10 – Разрушение элементов ВЛ от пляски проводов

### 1.3 Арматура

Основные причины отказов арматуры можно разделить на четыре группы: дефекты изготовления, сборки, ремонта и пр.; атмосферные явления, превышающие их расчетные значения; знакопеременные нагрузки на провод (вибрация, «пляска», большие температурные перепады); прочие посторонние воздействия.

Основная причина нарушения работы арматуры, являются дефекты при изготовлении, установки и обслуживания (ремонта), составляющие 50 % от общего количества всех повреждений. На втором месте идут повреждения линейной арматуры от знакопеременной нагрузки – 33,4 %. С первой причиной необходимо бороться посредством повышения контроля при изготовлении, монтаже и эксплуатации линейной арматуры.

Повреждения от действия знакопеременных нагрузок носят усталостный характер, который учесть расчетом не представляется возможным. Основные факторы, приводящие к повреждениям из-за износа линейной арматуры, является вибрация и «пляска» проводов.

Пример повреждения линейной арматуры на действующих ВЛ, вызванные вибрационными нагрузками: ВЛ 110 кВ – переходы через реки Северная Двина и Волга. Из-за вибрации разрушаются реборды роликов подвесного зажима, защитные муфты и происходит истирание самого провода. При «пляске» проводов происходит истирание приливов и возникают трещины усталостного характера, излом цапф привел к падению провода.

Для предупреждения данных нарушений в настоящее время разрабатываются предложения по методике испытаний линейной арматуры на воздействие вибрации и малоцикловых нагрузок, которые возникают при пляске проводов, в соответствии с зарубежными нормами, и в частности с нормами СИГРЭ. Арматура, создаваемая в странах Западной Европы, США, Канады, по сравнению с отечественной, запроектированной для аналогичных расчетных условий, значительно менее металлоемка, а по прочности и износоустойчивости имеет показатели значительно выше и, следовательно, более надежна (нормированная прочность зарубежной арматуры составляет 95% от разрывной прочности провода, а отечественной – 90%). Достаточная надежность обеспечивается за счет технологических стандартов на всех этапах строительства и эксплуатации.

#### **1.4 Изоляторы**

Дефект изоляции на ВЛ составляет 23–31% от общего числа нарушений. Основными причинами повреждения изоляции являются атмосферные перенапряжения – около 60% от всех отказов, связанных с повреждением изоляции. Начиная с 1969 г. повреждаемость изоляции не меняется, что достигнуто за счет технического перевооружения, а именно перехода на стеклянные изоляторы, а также применения современной защиты от

знакопеременных нагрузок. Однако в целом уровень повреждения изоляторов высок и вызван отсутствием в гирлянде изоляторов защитной арматуры по распределению напряжений, защиты от внутренних и грозовых перенапряжений, низким качеством изоляторов.

Гирлянда состоит из отдельных изоляторов, вокруг которых образуются емкости. Благодаря наличию емкостей токи, проходящие через собственную емкость изолятора, вызовут разное падение напряжения и будут на столько меньше, на сколько дальше находится от провода изолятор. Аналогичная картина наблюдается на изоляторах, находящихся у заземленного конца гирлянды изоляторов.

Падение напряжения будет меньше на тех изоляторах, которые находятся дальше всего от заземляемого конца гирлянды изоляторов. Емкость на землю имеет большую величину, чем емкость по отношению к проводу, и это оказывает влияние на распределение напряжения изоляторов. Максимальное напряжение падает на изолятор около провода, минимальное – на изоляторы по середине гирлянды и не много повышенное у заземленного конца. Распределение напряжений в гирляндах изоляторов при контроле измерительной штангой представлено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Распределение напряжений в гирляндах изоляторов

| Напряжение, кВ | Число изоляторов | Напряжение, кВ, на изолятор от конструкции опор |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                |                  | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 500            | 20               | 330   | 15 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 19 | 21 | 24 |
| 330            | 16               | 12  |    |    | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 10 | 11 | 13 | 14 | 17 | 19 | 22 |    |    |    |    |
| 220            | 13               | 10  | 8  | 8  | 8  | 7  | 7  | 7  | 8  | 8  | 10 | 12 | 14 | 20 |    |    |    |    |    |    |    |
| 110            | 6                | 10  | 8  | 7  | 9  | 11 | 19 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 35             | 3                | 6   | 5  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Видно, что неравномерность распределения напряжений возрастает с увеличением длины гирлянды, так как это увеличивает общую емкость гирлянды по отношению к земле. Это приводит к тому, что на ближайших к

проводу изоляторах уже при рабочем напряжении может возникнуть корона, создающая радиопомехи и приводящая к интенсивной коррозии. Корона на изоляторах появляется при напряжении порядка 20–25 кВ. На первый изолятор от провода всегда приходится около 20% полного напряжения. Это значит, что при напряжении 150 кВ и выше возникают условия для появления короны. В таких условиях необходимо применять защитную арматуру: металлические кольца, восьмерки или овалы, укрепляемые на конце гирлянды со стороны провода. На рисунке 1.11 приведены кривые распределения напряжений без арматуры и с арматурой в виде колец и восьмерок.

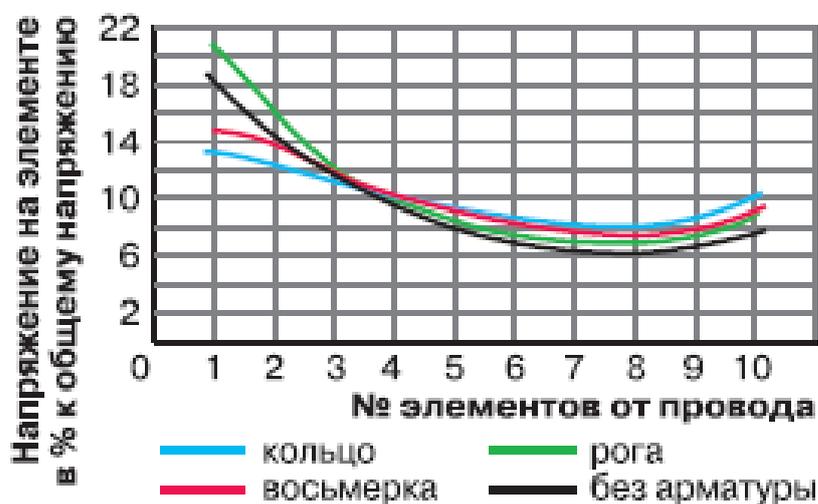


Рисунок 1.11 – Кривые распределения напряжения

Основной причиной, вызывающей резкое увеличение повреждаемости высоковольтных линий, является старение материала конструкции опор, проводов, арматуры и изоляторов.

Линии электропередачи подвержены старению и износу от коррозии и знакопеременных нагрузок, количество отказов растет, и рост их составляет от 3 до 5% в год.

## **Выводы**

По количеству причин отказов ВЛ первое место занимают провода (53% при перенапряжении от грозы и 36% без учета грозы), изоляторы идут на втором месте - (соответственно 30 и 24%), на третьем месте стоят опоры (14 и 8%), на последнем (четвертом) месте идет арматура (5 и 2%).

По тяжести отказов, приводящие к неблагоприятным последствиям для ЛЭП (высокая стоимость восстановления и недоотпуск электрической энергии), в первую очередь это опоры, затем провода, арматура, изоляция.

В настоящее время российские энергетические системы работают с большим количеством воздушных линий, у которых нормативный срок уже истек и они требуют модернизации, либо реконструкции или замены. Изношенность оборудования приводит к снижению надежности и увеличению количества аварий, так же и под влиянием гололеда.

## **Глава 2 Методы мониторинга воздушных линий**

### **2.1 Обслуживание ВЛ выездной бригадой**

При техническом обслуживании ВЛ в соответствии с эксплуатационным персоналом с определенной периодичностью выполняются обследования ВЛ - осмотры, измерения, профилактические осмотры, работы по предохранению элементов ВЛ от преждевременного износа путем устранения повреждений и неисправностей, выявленных при осмотрах, проверках и измерениях.

Поскольку в энергосистемах более 40% ВЛ эксплуатируется 25 лет и более, актуальными становятся вопросы о проведении работ по техническому перевооружению, реконструкции и модернизации ВЛ. В этом случае информация, предоставляемая в ведомостях неисправности при техническом обслуживании ВЛ, оказывается недостаточной, и приходится выполнять более детальные (инструментальные) обследования ВЛ.

На основе проведенных обследований проводится оценка технического состояния ВЛ и определяется остаточный ресурс компонентов ВЛ для планирования необходимых восстановительных работ или принятия решения по экономической целесообразности реконструкции или технического перевооружения ВЛ. Определение остаточного ресурса компонентов ВЛ производится на основе построения математических моделей их прочности, учитывающих темпы старения этих компонентов за предшествующий период эксплуатации ВЛ. Темпы старения компонентов ВЛ определяются на основе обследования этих компонентов, оценки технического состояния, определения величины износа от начала эксплуатации до момента проведения обследований.

При проведении обследований, оценка технического состояния ВЛ, обеспечивает получение достаточно точных и надежных данных, пригодных для анализа фактической остаточной прочности основной массы компонентов ВЛ.

Методы и средства, используемые при оценке технического состояния ВЛ должны обладать достаточной точностью и информативностью. Чтобы

надежно оценить потери прочности элемента воздушной линии в течение длительного периода работы, целесообразно провести обследование по двум или более методам, основанных на разных принципах.

Следующие методы позволяют прогнозировать остаточный ресурс компонентов ВЛ:

- математическое моделирование опор воздушных линий, проводов и тросов грозозащиты;
- лабораторные испытания образцов компонентов ВЛ (провода, грозозащитные тросы, изоляторы и линейная арматура);
- статистическая оценка потоков отказов отдельных компонентов (изоляторов и др.).

Амортизационный период ВЛ по действующим нормам составляет 40-50 лет. Для поддержания этих линий в исправном состоянии необходимо своевременное проведение требуемых профилактических мероприятий.

Воздушные линии электропередачи могут подвергаться воздействиям внешних климатических нагрузок, величина которых с определённой вероятностью может превышать расчётные, положенные в основу проекта ВЛ. Возможны также повреждения ВЛ, связанные с техногенными факторами (наезды на опоры транспортных средств, взрывы, пожары и т.д.).

Наряду с повреждениями отдельных элементов ВЛ в процессе эксплуатации, связанных с браком производителей или повреждениями во время сборки, устаревают компоненты ВЛ, находящиеся в исправном (рабочем) состоянии.

Старение основной массы исправных компонентов ВЛ вызвано в первую очередь коррозионными процессами металлических деталей опор, повреждениями фундаментов под действием климатических факторов, старением проводов, изоляторов, линейной арматуры, тросов грозозащиты, железобетонных стоек, связанным с воздействием изгибающих нагрузок в сочетании с климатическими воздействиями увлажнений, атмосферных загрязнений и отрицательных температур.

Задача осмотра ВЛ, это получение количественных показателей о скорости потери прочности (механической) компонентов ВЛ, без случайных повреждений и производственных дефектов, на основе которых выполняется анализ технического состояния воздушной линии в момент осмотра и оценку остаточной прочности компонентов.

Чтобы оценить надежность воздушной линии, в зависимости от срока ее службы, следует использовать информацию об отказе (количество отказов на 100км линии в год). Зависимость параметров отказов от времени, позволяет условно разделить на четыре вида основных периодов эксплуатации:

- первый период характеризует период приработки воздушной линии, это устранение различных дефектов, после чего количество отказов падает;
- второй период – поток отказов ВЛ нарастает;
- третий период – поток отказов ВЛ стабилизируется по середине, и входит в режим нормальной эксплуатации;
- четвёртый период эксплуатации ВЛ наступает после времени, когда ВЛ эксплуатируется в режиме прогрессирующего старения.

### **2.1.1 Визуальное обследование**

При проведении визуальных обследований для подтверждения результатов используется фотографирование объектов и отдельных фрагментов с наличием даты и времени.

Косвенная оценка наличия дефектов ВЛ, в частности, обнаружение мест перекрытия, повреждения гирлянд изоляторов, проводов, арматуры и др. может быть произведена по интенсивности короны или поверхностных частичных разрядов. Для определения интенсивности короны следует применять оптический способ регистрации разрядных процессов, который наиболее чувствительный и помехоустойчивый.

Для визуальных осмотров целесообразно использовать следующие приборы:

- универсальные средства измерения (штангенциркули, линейки, глубиномеры, микрометры и др.);
- бинокли;
- тепловизоры;
- толщиномеры;
- высотомеры для измерения высоты от земли до провода;
- средства для измерения твёрдости (прочности) бетона.

### **Металлические опоры**

При оценке технического состояния опор необходимо выявить и зафиксировать местонахождение деформированных (смолковка, размолковка) и отсутствующих элементов опоры, в том числе болтов гаек и шайб. По технической документации (проект, паспорт) следует установить вид антикоррозионного покрытия. Следует оценить состояние антикоррозионного покрытия - остаточную толщину, целостность, адгезию к основному металлу. Следует оценить потенциальную опасность угрожающих факторов, близость, интенсивность развития: оврагов, оползней, отдельных деревьев, угрожающих падением на провода и пр. Проверить наличие и определить техническое состояние специальных защитных конструкций, предусмотренных проектом: защит от ледохода и корчехода, шпунтовых ограждений и пр. Необходимо обследовать опорные узлы на предмет выявления щелевой коррозии.

### **Коррозия элементов опоры**

Снижение прочности металлических опор должна оцениваться по износу коррозии, определяется на сколько уменьшилась толщина стальных элементов, из которых произведена ферменная составляющая опоры. Измерения коррозии стальных опор и различных компонентов ВЛ целесообразно выполнять выборочно.

Наиболее целесообразно для измерения коррозионных потерь стальных элементов использовать ультразвуковые толщиномеры. Остаточная толщина

обследуемых элементов может быть определена с помощью микрометров или индикаторов перемещения часового типа универсального назначения. Измерения толщины стенки стального элемента должно производиться на очищенных с двух сторон от продуктов коррозии участках этого элемента (рисунок 2.1)

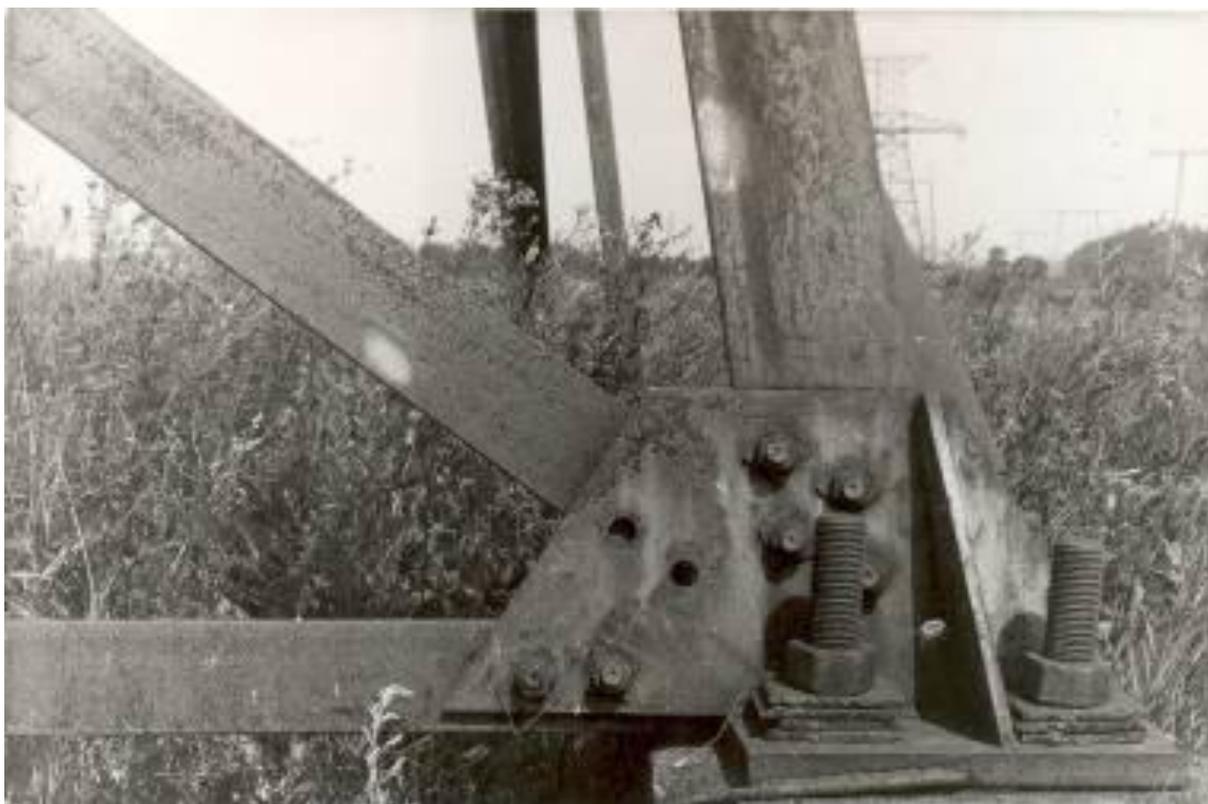


Рисунок 2.1 – Зачищенное пятно для измерений коррозионных потерь  
толщины

На зачищенном участке должно производиться 8-10 измерений толщины стенки элемента при общей коррозии и 20-30 измерений при наличии язвенной коррозии. При получении первых результатов обследований, первым делом нужно обработать величины, полученные методом измерений, коррозионных потерь стальных конструкций и выяснить характер коррозии (общей, язвенной или той и другой).

Результаты полевых измерений коррозионных потерь должны оперативно обрабатываться, чтобы убедиться в представительности

полученных результатов и пригодности их для дальнейшей статистической обработки и использования при математическом моделировании потерь прочности опор.

### Фундамент опор

Самой популярной конструкцией фундаментов для воздушных линий, как анкерных, так и промежуточных, являются грибообразные фундаменты (рисунок 2.2). В ряде случаев на ВЛ применяются фундаменты из монолитного бетона или железобетона, а также свайные фундаменты из железобетонных свай и, наконец, стальные фундаменты сварной конструкции или из стальных свай.

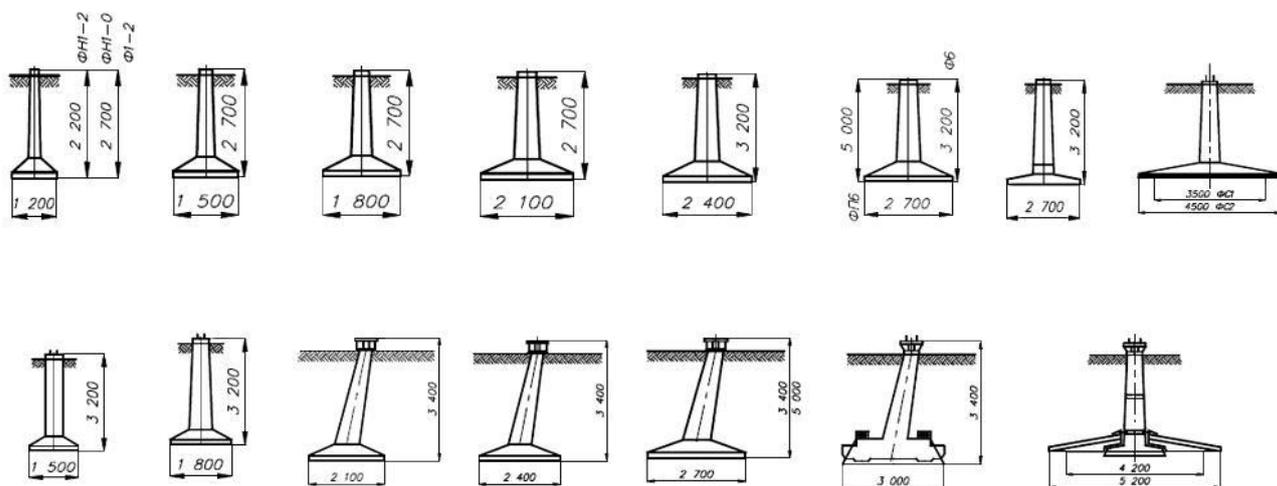


Рисунок 2.2 – Грибообразные железобетонные фундаменты для опор ВЛ 35-500 кВ

Коррозии, эрозии и механические повреждения в большей степени подвержены части фундамента, выступающие над поверхностью земли. Повреждение фундаментов в виде трещин связано с воздействием влаги и температурных изменений в переходные осенне-зимние, зимне-весенние периоды и со случайным механическим повреждением во время монтажа опор. Чаще всего данные повреждения выявляются при визуальном обследовании

ВЛ. Но полное обследование всех фундаментов, которые находятся в эксплуатации, очень затруднено.

При определении состояния забивных свай следует выявить и зафиксировать трещины, сколы, разрушения вследствие эрозии, выпучивание, проверить сохранность предусмотренного проектом антикоррозийного покрытия.

В ходе осмотров металлических фундаментов необходимо оценить степень и интенсивность коррозионного разрушения конструкции, проверить сохранность предусмотренного проектом антикоррозийного покрытия, отсутствие трещин в сварных швах.

Из-за плохого качества бетона (низкой плотности), происходит износ монолитных фундаментов (железобетонных). Исходя из этого, влага попадает сквозь бетон до самой арматуры. При коррозии арматуры образуется ржавчина (окись железа), объем которой приводит к разрыву бетона, из-за того, что объем ржавчины в несколько раз превышает объем самой стали (арматуры).

Повреждения железобетонных опор с обнажением продольной и поперечной арматуры происходят, как правило, при строительстве ВЛ. Все повреждения фундаментов опор должны устраняться службами эксплуатации ВЛ при капитальных ремонтах. Дефекты фундаментов, как правило происходят из-за несоблюдения правил производства работ, различных ошибок, допущенных при изготовлении и установке конструкций, ошибок проектирования, низкого качества материалов, не соответствия марки бетона по прочности, водонепроницаемости и морозостойкости условиям эксплуатации, неправильный выбор вида антикоррозийной защиты.

Самыми распространенными дефектами, оказывающие влияние на работоспособность и эксплуатационную пригодность конструкции железобетонных фундаментов всех типов являются:

- отклонения от проектного положения конструкций и их элементов;
- отсутствие предусмотренных проектом элементов фундаментов (ригели, пригрузочные плиты);

- отклонение геометрических размеров от проектных;
- трещины, сколы, повреждения бетона при погружении свай;
- неточная подгонка элементов в узлах сопряжений, расцентровка фундаментов с опорой;
- отсутствие отдельных крепежных элементов;
- дефекты антикоррозионной защиты;
- дефекты технологии изготовления подножников.

Процессы коррозионного разрушения и потери несущей способности фундаментов ВЛ практически невозможно спрогнозировать и смоделировать.

При оценке технического состояния фундаментов опор необходимо проводить полное обследование фундаментов всех опор вдоль трассы ВЛ. Также коррозионному износу подвергаются анкерные плиты с металлическими U-образными проушинами, к которым крепятся удлиненные U-образные болты, устанавливаемые в копаные котлованы для крепления оттяжек опор. Для оценки технического состояния металлических U-образных болтов применяется трудоемкий метод осмотра с выборочным открытием котлованов. На сегодняшний день не разработано достоверных методов дистанционного контроля таких дефектов. Следует принимать во внимание то, что для отдельных опор могут возникать локальные ситуации, когда подземная коррозия активно прогрессирует под действием неблагоприятных факторов: средняя и высокая агрессивность грунтов к стали, наличие плавки гололеда и блуждающие токи. Количество обследованных деталей анкерных плит и U-образных болтов опор, вскрытых на разных участках ВЛ, должно быть не менее трех на каждые 100 км ВЛ.

### **Тросовые оттяжки металлических опор**

При обследовании технического состояния стальных канатов оттяжек необходимо оценивать их остаточную прочность и их натяжение. Оценочные данные о состоянии тросов оттяжек следует получать путем лабораторных испытаний образцов длиной 0,5 м, взятых из выпусков тросов из клиновых

зажимов. Для получения полноценных данных о темпах снижения механической прочности тросов оттяжек опор необходимо провести механические испытания на разрыв образцов оттяжек, полностью демонтированных с опоры. При однородной атмосфере вдоль трассы ВЛ достаточно провести лабораторные испытания одного троса оттяжки.

### **Железобетонные опоры**

Измерение коррозии металлических составляющих железобетонных опор нужно проводить по методике, описанной выше.

Заключение состояния железобетонных опор, как правило оценивает по выбранным опорам, которые нужно выбрать при визуальном осмотре. Для обследования по меньшей мере 3% опор исследуемого типа, смонтированных на ВЛ.

При осмотре опор выявляются дефектные стойки, имеющие различные трещины, сколы бетона до самой арматуры, сквозные отверстия, стойки с недопустимым продольным (поперечным) отклонением), отсутствующими или повреждёнными (деформированными) элементами конструкций.

При осмотре опор выявляются дефектные стойки, имеющие различные трещины, сколы бетона до самой арматуры, сквозные отверстия,

Основной способ записи и документирование дефектов железобетонных опор в виде локальных повреждений, поперечного и продольных трещин бетонных стоек, нужно применять фотосъемку. Дополнительно к этому, рядом с осматриваемой стойкой необходимо установить рейку с делениями для измерения. Это позволяет определить размер дефектов стоек и опор компьютерной обработкой фотографий. Вместе с инвентаризацией бетонных стоек с их характерными дефектами, для проверки механических характеристик бетона использовать один из известных способов. Если же число стоек с трещинами имеет свыше 30%, то выбор обследуемых опор следует увеличить до 10%. Если же в свою очередь, из выбранных опор (10%) количество дефектных стоек составит более 10%, то необходимо провести 100%-ое

обследование. При соблюдении таких правил, полученные результаты будут надежными для математического моделирования старения опор.

### **2.1.2 Провода и грозозащитные тросы**

Провода фаз ВЛ и грозозащитные тросы подвержены механическому и коррозионному износу, статическим и динамическим нагрузкам. В процессе полевых обследований должны уточняться места, где следует демонтировать с ВЛ образцы проводов и грозозащитных тросов для проведения лабораторных испытаний. Анализ технического состояния проводов и грозотросов, проведенный по результатам прямых испытаний образцов, демонтированных с ВЛ после длительного периода эксплуатации, даёт с высокой точностью объективные данные, которые невозможно получить путём инструментальных измерений коррозионных потерь.

Должны проводиться два вида лабораторных испытаний проводов на растяжение до разрыва:

- на относительно коротких образцах провода (троса) длиной около 0,5 м;
- на длинных образцах длиной не менее 10 м.

Образцы целесообразно взять из шлейфа анкерной опоры, восстановив соединение полушлейфов спиральным зажимом. Если в шлейфе образец достаточной длины взять не удастся, то для определения остаточного сечения проводов и тросов следует использовать неразрушающие методы. При испытаниях коротких образцов (длиной около 0,5 м) провода (троса) должен разбираться на отдельные проволоки по повивам и каждая проволока должна испытываться на растяжение до разрыва.

Если трасса ВЛ проходит в районах с локальными промышленными или природными загрязнениями атмосферы (солончаки), то образцы провода и грозозащитного троса должны быть получены с каждого из локальных участков ВЛ. По результатам обследования должны быть получены точные данные о процессах потери механической прочности проводов (тросов).

Состояние соединительных и шлейфовых зажимов контролируется с помощью тепловизионной техники. ВЛ должна быть нагружена до 50% номинального тока для провода данного сечения.

### **2.1.3 Изоляторы**

Оценка технического состояния гирлянд изоляторов на обследуемой линии должна осуществляться на основании сведений о ежегодном потоке отказов подвесных изоляторов, как в поддерживающих, так и в натяжных гирляндах изоляторов. Такие данные должны содержаться в эксплуатационной документации. При отсутствии такой информации необходимо провести полное обследование состояния изоляции ВЛ на данный момент. Систематический анализ данных об отказах подвесных изоляторов на ВЛ позволяет получить достоверную информацию о темпах и закономерностях снижения прочности и отказах подвесных изоляторов в период эксплуатации ВЛ. Надежность подвесных изоляторов снижается при увеличении на них среднеэксплуатационных длительно действующих нагрузок.

Надежность работы подвесных линейных изоляторов следует оценивать на основе «кривой жизни», характеризуемой кривой с двумя изломами. По изломам на кривой жизни определяются характерные периоды жизненного цикла изолятора. Для изоляторов кривая жизни характеризуется тремя периодами (рисунок 2.3)

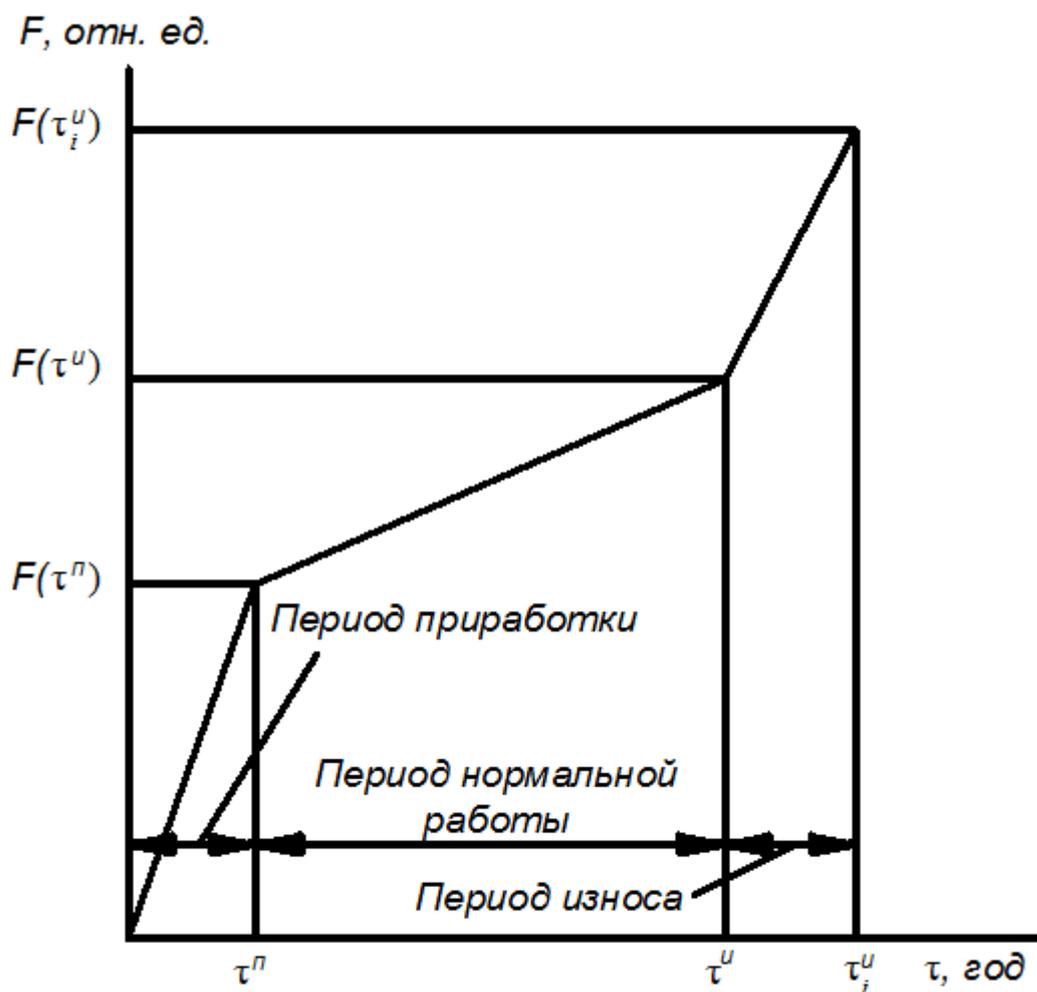


Рисунок 2.3 – Вероятность отказов изоляторов от срока эксплуатации (кривая жизни)

- период приработки – уровни отказов изоляторов во времени снижаются;
- период нормальной работы – уровни отказов изоляторов остаются постоянными во времени;
- период износа – уровни отказов изоляторов возрастают во времени.

Наряду с процессами старения подвесных изоляторов, характеризующихся снижением механической прочности и повышенным выходом из строя по диэлектрическим показателям, известны случаи усталостного разрушения стержней изоляторов. Для усталостного разрушения стержня изоляторов в гирляндах характерно начало разрушения поперечного сечения стержня и образования микротрещины в месте концентрации напряжения в переходном

сечении от стержня к пестику изолятора. При длительном воздействии знакопеременных нагрузок (рисунок 2.4,2.5) процесс разрушения распространяется от края сечения (верхняя часть) к центру. Такие нагрузки в стержне возникают при колебаниях гирлянды изоляторов. Верхняя часть сечения разрушается в течение длительного периода времени, о чем свидетельствует образующаяся ржавчина. Нижняя часть сечения стержня, разрушенного под действием растягивающих нагрузок является остаточным сечением стержня. Это сечение имеет обычно вид свежего излома и не имеет следов наклепа.

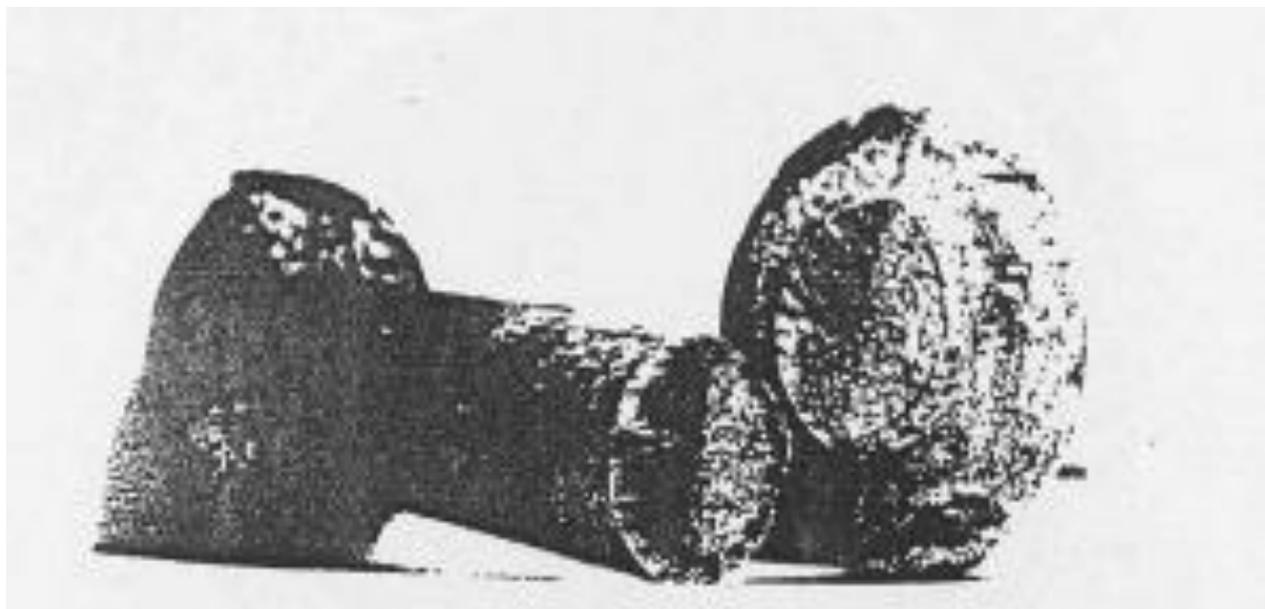


Рисунок 2.4 – Стержень изолятора ПС6-А, разрушенный при воздействии колебаний

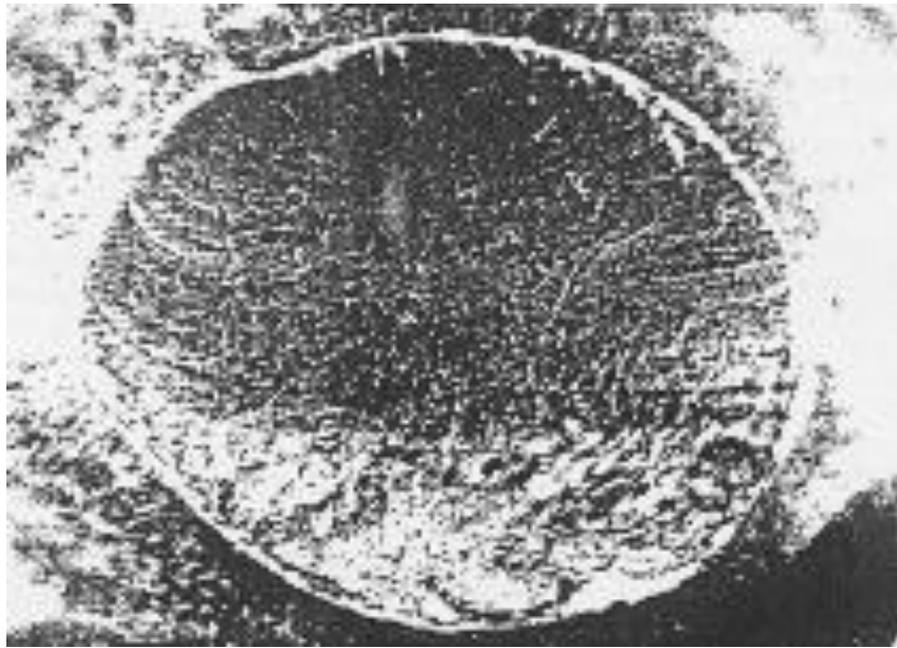


Рисунок 2.5 – Характерная картина усталостного излома стержня изолятора

Для получения необходимой информации о возможном снижении прочности гирлянд изоляторов, длительно эксплуатировавшихся на ВЛ, необходимо проведение лабораторных испытаний изоляторов (из натяжных и подвесных гирлянд изоляторов). Обследования гирлянд изоляторов проводятся с выделением групп изоляторов – фарфоровых, стеклянных и полимерных.

### **Фарфоровые изоляторы**

Обследование подвесных фарфоровых изоляторов должно включать:

- измерение величины падения напряжения на изоляторах в гирлянде с помощью диэлектрической штанги - выявление “нулевых” изоляторов. Выявление “нулевых” изоляторов в гирляндах необходимо выполнить на не менее чем 10% гирлянд изоляторов, установленных на ВЛ;

- лабораторные испытания на остаточную механическую и электрическую прочность демонтированных с ВЛ гирлянд изоляторов.

Величина выборки демонтированных гирлянд изоляторов должна составлять:

- одна поддерживающая гирлянда на 10 км ВЛ;

- одна натяжная гирлянда на 20 км ВЛ;
- осмотр на наличие замков.

### **Стеклянные изоляторы**

Обследование стеклянных подвесных изоляторов должно включать:

- осмотр всех гирлянд изоляторов на ВЛ;
- регистрацию числа осыпавшихся тарельчатых изоляторов в натяжных и поддерживающих гирляндах.

- лабораторные испытания на остаточную механическую и электрическую прочность демонтированных с ВЛ стеклянных тарельчатых изоляторов из натяжных и поддерживающих гирлянд. Величина выборки демонтированных стеклянных гирлянд изоляторов должна составлять:

- одна поддерживающая гирлянда на 10 км ВЛ;
- одна натяжная гирлянда на 20 км ВЛ;
- осмотр на наличие замков.

При тотальном обследовании опор ВЛ с проведением фоторегистрации может быть выполнен подсчет количества осыпавшихся стеклянных тарельчатых изоляторов гирлянды.

### **Полимерные изоляторы**

Техническое состояние полимерных изоляторов может быть оценено при их дистанционном обследовании на действующей линии с помощью тепловизоров, электронно-оптических приборов, а также путем фоторегистрации. Полимерные изоляторы должны быть осмотрены на наличие следов дуги (на кремнийорганических юбках и защитных экранах), для оценки состояния поверхности изолятора (загрязнения) и антикоррозионного покрытия металлических частей. Надежные данные о техническом состоянии полимерных изоляторов могут быть получены путем проведения лабораторных нагрузочно-разгрузочных испытаний изоляторов, демонтированных с ВЛ.

#### **2.1.4 Линейная арматура**

Как правило, повреждения сцепной арматуры связаны с вибрацией и пляской. Усталостные повреждения линейной арматуры в процессе эксплуатации ВЛ могут носить накопительный характер и проявляться после достаточно длительной эксплуатации ВЛ. В некоторых случаях процессы износа элементов линейной арматуры могут протекать интенсивно и становятся постоянным источником отказов ВЛ. Обследования линейной арматуры следует производить в лабораторных условиях на демонтированных с ВЛ в полном комплекте поддерживающих и натяжных гирляндах изоляторов, выборка которых должна включать:

- одну поддерживающую гирлянду с арматурой на 10 км ВЛ;
- одну натяжную гирлянду с арматурой на 20 км ВЛ. При оценке состояния линейной арматуры следует убедиться в отсутствии трещин, истираний, раковин, повреждения антикоррозионного покрытия.

#### **2.2 Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи.**

Для своевременного устранения неисправностей и принятия превентивных мер, на ВЛ выполняются ежегодные осмотры ВЛ, диагностика элементов, мониторинг в пожароопасный, грозовой и в период ледообразования.

При отключениях ВЛ, как с успешным АПВ, так и с неуспешным, выполняются осмотры ВЛ, при которых определяется место и объемы повреждений. Одним из решающих факторов осмотра является время обнаружения. Замена части внеочередных осмотров, в том числе, после аварийных отключений ВЛ, на осмотр с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволят сократить время обнаружения причин отключения ВЛ с помощью определения и оценки совокупности данных, полученных от фото-, видео-, тепловизионной техники, установленной на

БПЛА, в связи с чем, мониторинг воздушных линий средствами БПЛА является актуальной задачей.

Выполняемые задачи по мониторингу ВЛ являются:

а) проведение ежегодных периодических осмотров состояния трасс ВЛ, с целью выявления следующих видов нарушений:

- наличие в охранной зоне ВЛ складированных материалов;
- пожары;
- наличие на просеки деревьев, создающие опасность падения или разрастание на ВЛ;
- маленькая ширина просеки по ВЛ;
- наличие под линией растительности выше 4 м;
- наличие кустарников или деревьев на земле, предназначенной для опоры;
- выполнение несогласованных работ в охранной зоне ВЛ;
- несогласованное строительство и обустройство различных объектов;
- неисправное состояние или вовсе, отсутствие защиты основания опоры от различных факторов (размывания, ледохода, песковыдувания);
- неисправные дороги, мостки и т.п.;
- отсутствие, неисправность заградительных огней в местах пересечения с автомобильными дорогами;
- отсутствие или неисправность отбойных тумб;
- отсутствие лестниц для подъема на фундамент переходных опор ВЛ, через водные преграды;
- отсутствие деталей на металлических опорах;
- подтопление в охранной зоне ВЛ;
- наличие на опорах посторонних предметов (птичьих гнезд);
- наличие обрывов, набросов фазных проводов или грозозащитного троса;
- наличие оплавления или вспучивания верхнего повива, перегоревших проволок, перекрытия - изменение стрел провеса, расстояния между фазами до недопустимых значений;

- полное разрушение изолятора;
- коррозия проводов и тросов;
- скол части тарелок изолятора;
- повреждения проводов и тросов у зажимов, и др. арматуре;
- следы перекрытия гирлянд и отдельных изоляторов;
- отсутствие гасителей вибрации или их смещение от места установки;
- не правильная установка зажимов или соединений, следы перегревания контактов зажима;
- приближение петли к элементам опор, значительная изогнутость петли;
- отсутствие скоб, прикрепляющих заземляющие спуски к опоре;
- неправильная установка разрядника или смещение разрядника от проектного положения;
- прочие дефекты трубчатых разрядников, вызывающие повышенный нагрев.

б) выполнение внеочередных осмотров при отключениях ВЛ (в том числе, с успешным АПВ) для оперативного определения мест и объемов повреждений. Помимо планового ежегодного осмотра, организовывается дополнительный мониторинг в пожароопасный период, грозовой период и в период ледообразования. Учитывая высокую протяженность трасс ВЛ, проходящих в труднодоступных местах, применение Комплексов БПЛА является вполне эффективным.

Анализ мировых трендов свидетельствует о том, что область применения БПЛА для выполнения функций воздушного мониторинга в различных областях хозяйства постоянно расширяется. В том числе, на рынке начинают формироваться предложения по обследованию линейной части воздушных ЛЭП при помощи Комплексов БПЛА различных типов. Для обследования воздушных ЛЭП применяются БПЛА самолетного типа и мультироторные БПЛА вертолетного типа (Коптеры). БПЛА самолетного типа работают в диапазоне скоростей от 60 до 120 км/ч и могут оснащаться электрическими двигателями (ЭД), а также двигателями внутреннего сгорания (ДВС). ЭД

обеспечивают более высокую отказоустойчивость, чем ДВС, но при этом, БПЛА с ЭД имеют меньшую продолжительность полета:

- БПЛА самолетного типа с ЭД, работает 2 – 6 ч,
- БПЛА самолетного типа с ДВС, работает 6 – 12 ч.

Но высокая продолжительность полета БПЛА с ДВС не всегда может быть эффективно использована, так как существуют проблемы с дальностью радиосвязи с бортом БПЛА (80 - 90 км в условиях прямой радиовидимости). Безопасная высота полета БПЛА самолетного типа составляет 250 м над уровнем поверхности.

БПЛА вертолетного типа (Коптеры) могут работать в режиме зависания и приближаться к объекту обследования ближе, чем самолеты (некоторые виды съемки в ручном режиме управления могут быть выполнены с расстояния 5 м). Главный недостаток Коптера - это невысокая продолжительность полета, которая составляет не более 1 часа. Горизонтальное перемещение Коптера на скоростях более 15 км/ч приводит к дополнительным затратам энергии и существенно уменьшает продолжительность полета. Таким образом, радиус применения Коптеров находится в пределах 15 км. Эффективное применение возможно в радиусе не более 1 км, поскольку необходимо иметь достаточный запас времени, для выполнения съемки удаленного объекта.

Основной предпосылкой для применения БПЛА любых типов, в качестве средства воздушного мониторинга ЛЭП – является возможность интегрировать с БПЛА различные виды аппаратуры полезной нагрузки (ПН), к которым относятся:

- гиросtabilизированные видеокамеры с возможностью передачи изображения в режиме онлайн (позволяют получать информацию с высокой оперативностью, но обладают недостаточной разрешающей способностью, для дешифрирования большинства нарушений, имеют ограниченный радиус применения (30 км в условиях прямой радиовидимости));

- фотоаппараты для выполнения аэрофотосъемки (имеют разрешающую способность, как минимум на порядок выше, чем у видеокамер, могут быть

использованы для дешифрирования большинства нарушений элементов воздушных ЛЭП (кроме дефектов, которые в принципе не могут быть обнаружены в видимой части спектрального диапазона), информация записывается на борту и может быть просмотрена только после посадки БПЛА);

- тепловизоры (позволяют получать данные о температуре обследуемых объектов и могут быть использованы для выявления мест повышенного нагрева, свидетельствующего о неисправности оборудования). Все применяемые на БПЛА тепловизоры обладают хорошими показателями чувствительности, но, при этом, имеют невысокое разрешение матрицы, что делает невозможным их применение для дешифрирования большинства нарушений при использовании на БПЛА самолетного типа;

- ультрафиолетовые камеры (позволяют получать данные о наличии поверхностной разрядной активности или коронных разрядов, свидетельствующих о нарушении целостности или загрязнении изоляторов, повреждении грозозащитного троса и т.п.). На сегодняшний день, не существует ультрафиолетовых камер для установки на БПЛА самолетного типа. Обследование УФ камерами при помощи Коптеров могут быть эффективны в редких случаях.

Электрические двигательные установки (ЭД) менее прихотливы, не требуют специального обслуживания и гораздо более надежны, чем установки с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Главным достоинством БПЛА оборудованного ДВС, является высокая продолжительность полета и большой вес перевозимой полезной нагрузки. Но следует учитывать, что увеличение продолжительности полета при использовании стандартных каналов связи с БПЛА не даст положительного эффекта. Максимальное удаление будет ограничено максимальной дальностью прямой радиосвязи с бортом БПЛА. Дальность прямой радиосвязи зависит от особенностей рельефа местности и не превышает 80-90 км. Это значит, что с одной точки старта может быть обследовано не более 180 км (по 90 км в каждую сторону от точки старта).

БПЛА с ЭД, настроенный под полет с крейсерской скоростью 100 км/ч сможет выполнить такой облет менее чем за 4 часа. Эффективное использование возможностей БПЛА с ДВС возможно при использовании GSM модемов в зонах работ с покрытием сотовой связью или с использованием спутниковых линий связи для передачи команд и телеметрии (дорогостоящее решение).

## **Глава 3 Гололедообразование на проводах ЛЭП**

### **3.1 Влияние гололеда на надежность ЛЭП**

Используемое на сегодняшний день в России оборудование, достаточно сильно устарело, как физически, так и морально. Оно является почти таким же как и у зарубежных странах, только с отставанием на 20-30 лет. После появившихся рыночных отношений между потребителями и производителями электрической энергии проблемы устаревание и износа электрооборудования весьма актуально.

Наименее надежными элементами энергетической системы являются воздушные линии электропередачи, которые обеспечивают доставку электрической энергии не посредственно до потребителя, и имеют очень большую протяженность. Ежегодное число повреждений в средних сетях исчисляется сотнями, в питающих от нее абонентских сетях – тысячами. Обрывы проводов и короткие замыкания, являются основной частью повреждений ВЛ. Повреждения могут быть самые разнообразные, одни обусловлены причинами искусственного характера, другие, естественного характера. Это может быть фактор человека, воздействие атмосферных явлений и земные катаклизмы. При всем при этом, определение мест повреждения (ОМП) и восстановление участков после повреждений ЛЭП являются самыми длительными и сложными технологическими операциями.

В настоящее время в электросетях используется большое число ВЛ напряжение на 110кВ, у которых уже истек нормативный срок и необходима модернизация, либо замена.

Износ оборудования, атмосферные воздействия и др. причины провоцируют аварийные отключения ВЛ.

В последнее время из-за глобального потепления на Земле видно, что погодные условия нестабильны, в том числе и в зоне средней полосы России. Резкие изменения температуры в различное время года не хорошо сказываются на состоянии воздушной линии.

Гололедные отложения, появившиеся на проводах, оказывают существенную механическую нагрузку на опоры и провода, это создает вероятность завала линии и опасности для людей. Исходя из этого при проектировании электросетей очень важно учитывать влияние гололедных отложений на прочность элементов электрической сети.

Аварии из-за гололеда являются весьма тяжелыми и трудно устраняются. Ликвидация такого рода аварий затруднена из-за промерзшего грунта, зимнего бездорожья, и территориальная разбросанность по всей линии. Как правило, аварии из-за гололеда происходят массово и наносят очень большой ущерб. На территории России такие аварии занимают приблизительно 25% от всех повреждений на ВЛ, а их продолжительность – приблизительно 40% от всего времени отключений из-за аварии.

При гололеде ниже нормы в результате ветра возникает пляска проводов (колебания) при отложении гололеда с одной стороны или вибрации за счет цилиндрической формы гололедообразования.

Гололедообразование на проводах, в том числе и превышающие норму, как правило образуются сразу в нескольких энергосистемах. Случившиеся из-за этого аварийные случаи (обрывы проводов в большом количестве (рисунок 3.1)), разрушение изоляции, арматуры, поломки опор ВЛ (рисунок 3.2), практически полностью парализуют систему энергоснабжения в нескольких областях.



Рисунок 3.1 - Обрыв проводов ЛЭП

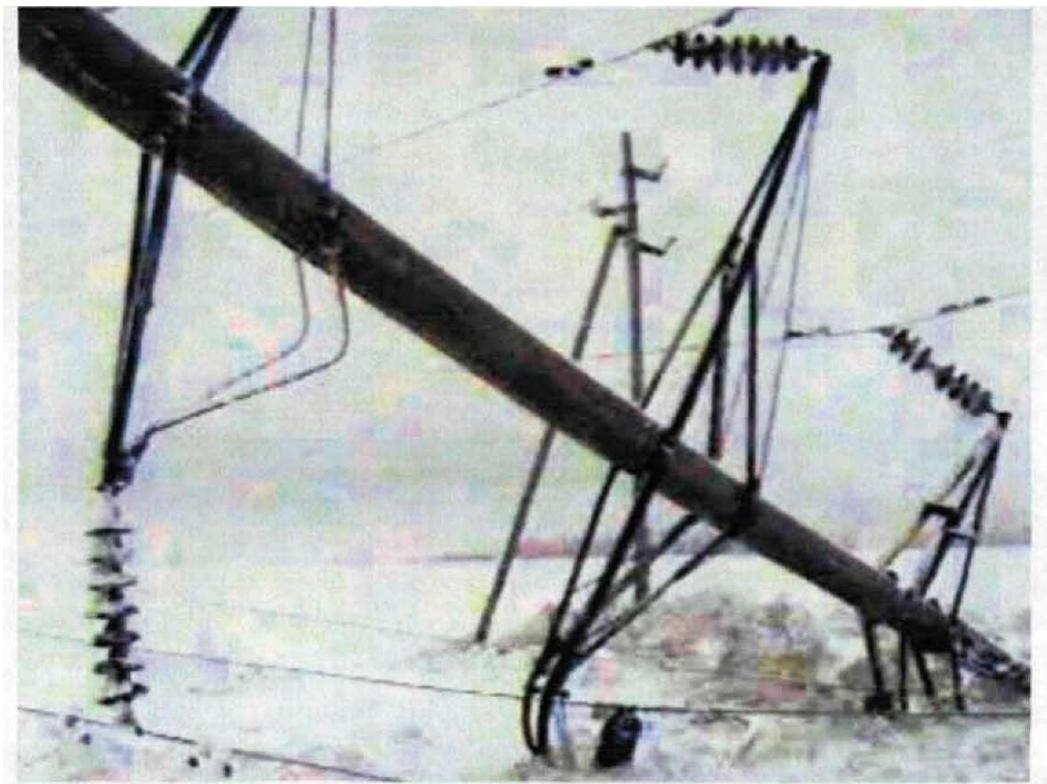


Рисунок 3.2 – Поломка опоры ЛЭП

Количественные аварии продемонстрировали, что оптимально спроектировать ВЛ без применения разных способов и устройств, которое бы ограничивало атмосферное влияние на нее, не является возможным. При возникновении большой массы гололедообразования необходимо применять:

- комплексные устройства, для замедления скорости гололедообразования;
- плавку гололеда.

В борьбе с гололедообразованием имеется два основных направления, одно связано с увеличением механической прочности ВЛ. Но с учетом маленького времени существования больших гололедных нагрузок (0,04-0,5% от целого срока эксплуатации ВЛ) более выгодное (с экономической стороны) считается второе направление, это плавка гололеда повышенным электрическим током. Эффективность плавки заключается в том, чтобы своевременно начать плавку. Если же слишком поздно начать применение плавки гололеда, это может не дать ожидаемых результатов и поспособствовать развитию аварии.

Кроме того, высокочастотные сигналы, которые передаются по ВЛЭП затухают из-за образования гололеда. А затухает из-за того, что в слое ледяного покрытия создаются диэлектрические потери. И в следствии этого, электромагнитная волна распространяется в несовершенном диэлектрике и на нагрев гололеда уходит часть энергии.

Кроме того, гололед замедляет скорость распространения высокочастотных сигналов из-за того, что лед наростив вокруг провода, является диэлектриком. За счет этого проявляется запаздывание импульсных сигналов, проходящих по проводам ВЛ, и чем больше образовалось гололеда, тем больше запаздывание.

Высокочастотная связь по ЛЭП стала распространенной за счет того, что ВЛ охватывают большие территории и направление ВЛ совпадает с направлением каналов связи, и нет необходимости строить линию проводной

связи. Еще следует добавить, что ЛЭП намного надежнее воздушных линий связи.

Еще один плюс прохождения высокочастотной связи по ВЛЭП то, что на ЛЭН гололед образует гораздо в меньшей степени, чем на линии связи. Обусловлено это тем, что по линии электропередач протекают токи промышленной частоты, что соответственно создает нагрев провода. Нагрев провода в свою очередь достаточно сильно затрудняет гололедообразование, например, если температура провода повысится хотя бы на 1-2 °С, то гололед уже не будет образовываться на проводах. Исходя из этого, воздушные линии, находящиеся под большой нагрузкой меньше всего подвержены гололедообразованию, нежели чем слабонагруженные и тем более линии находящиеся вообще без нагрузки (выключенные).

### **3.2 Факторы возникновения гололедообразования на ЛЭП**

**Температура воздуха** оказывает влияние не только на вид гололеда, но и влияет на продолжительность обледенения, что является очень значимым. Если в процессе обледенения температура окружающего воздуха понизиться, то это способствует долговременному сохранению льда, в результате этого, присутствие ветра может вызвать вибрацию и пляску провода, встречаются случаи обрыва проводов.

Температура воздуха имеет очень большое влияние на плотность отложений. Время замерзания капель воды, создающие гололед на проводах, определяются температурой поверхности провода, а также температурой воздуха. Исходя из этого можно сказать, что вышеперечисленные факторы влияют на структуру и плотность гололедных отложений.

**Ветер** занимает важное место в формировании структуры отложения. За счет ветра, при определенных условиях могут образовываться крупные капли состоящие множества маленьких капель, помогая каплям растекаться по проводам.

Образование гололеда примерно (приблизительно 30%) начинается при скорости ветра от 2 до 4 м/с. При скорости ветра от 1 до 8 м/с чаще всего образуется зернистая изморозь. При затишье чаще всего образуется кристаллическая изморозь и мокрый снег, а сложные отложение, такие как лед, чаще всего образуются при скорости ветра от 2 до 4 м/с. В самом начале гололедообразования самая максимальная скорость ветра может достигать 15 м/с. Очень большое влияние на гололедно-изморозевые отложения оказывает место нахождения ЛЭП по отношению к гололедному потоку.

Территория Российской Федерации имеет самые разнообразные условия погоды, поэтому территория была разделена на 7 районов, что можно увидеть в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Максимальные значения скоростных напоров  $W$  (Па) и скорости самого ветра  $V$  (м/с), напряжением 110 кВ на высоте 15м.

| Район по ветру | $W$ (Па)/ $V$ (м/с) |
|----------------|---------------------|
| I              | 400/(25)            |
| II             | 400/(25)            |
| III            | 500/(29)            |
| IV             | 650/(32)            |
| V              | 800/(36)            |
| VI             | 1000/(40)           |
| VII            | 1250/(45)           |

Обобщенные характеристики метеорологических условий гололедообразования иллюстрируются в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Метрологические условия гололедообразования

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

Из таблицы 3.2 видно, что для мокрого снега и гололеда температурный диапазон очень мал, но нужно помнить, что появившиеся отложения могут еще долгое время сохраняться при температурах менее низких. Минимум расчетной температуры, создающей опасность для ВЛ гололеда при использовании на них устройств для плавки гололеда можно принимать -20 °С.

**Высота подвески проводов** имеет большое значение на массу и характер гололедообразования. Данные опытов демонстрируют, что при увеличении высоты подвеса проводов ВЛ от 2 до 20 м, практически в 3 раза увеличиваются масса отложений гололеда на проводе. Для примера в таблице 3.3 приведены данные. Здесь  $k_h$  – это коэффициент зависимости массы отложений от высоты подвеса провода, учитывая, что базовая высота 10 метров.

Таблица 3.3 – Зависимость массы отложений от высоты провода  $h$

|                |     |      |         |     |           |          |         |
|----------------|-----|------|---------|-----|-----------|----------|---------|
| Высота $h$ , м | 2   | 4    | 8       | 10  | 12        | 16       | 23      |
| $k_h$          | 0,6 | 0,75 | 0,8-0,9 | 1,0 | 1,05-1,25 | 1,25-1,5 | 1,6-2,0 |

### **Закручивание проводов**

Следующий фактор, определяющий характер отложений обусловлен их жесткостью. Во время осадков с одной стороны, осадок на жестких стержнях обваливается из-за большой собственной массы и влияния ветра, не доходя до предельных значений. А на одиночном проводе из-за закручивания появляется устойчивая муфта, которое со временем только увеличивается. В следствии закручивания проводов происходит не только сохранение устойчивой муфты, а также достаточно сильно увеличивается стадия сохранения осадков. При протяженности процесса есть вероятность отложения льда на предыдущий слой.

На закручивающихся проводах отложения гололеда могут копиться очень большое время (от пары дней до месяца) и достигать весьма большой массы 10-20 кг/м. На жестких стержнях образуется множество отложений из льда, чаще всего они составляют 0,5 кг/м. Можно сказать, что закручивание проводов достаточно сильно влияет на массу и форму проводов.

### **Диаметр провода**

Также на образование гололеда влияет и диаметр провода. Чем больше диаметр провода, в зависимости от ветровой скорости масса отложений изначально возрастает (максимум при 3-8см), а потом уменьшается. Чем больше скорость ветра, тем сильнее возрастает гололедообразование. Усредненные коэффициенты видно в таблице 3.4, в ней показана зависимость диаметра провода от массы осадка.

Таблица 3.4 – Коэффициент зависимости  $k_d$  от  $d_{np}$ , при разных  $V$ .

| $d_{np}$ , см |              | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 | 7,0 |
|---------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $k_d$         | $V < 10$ м/с | 1,0 | 1,4 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 1,9 |
|               | $V > 10$ м/с | 1,0 | 1,7 | 2,3 | 2,8 | 3,2 | 4,0 |

$k_d$  – масса гололедного осадка

$d_{np}$ , - диаметр провода

$V$  – скорость ветра

При увеличении диаметра провода возрастает плотность осадков – примерно на 60% при изменении проводов  $d=0,5$  см к  $d=4$  см.

**Действие электрического поля**, которое возникает вокруг провода ЛЭП, сводится к тому, что капли дождя попадаю в действие этого поля, получают заряд, из-за чего притягиваются к заряженной поверхности.

**Протекание нагрузочного тока** по ЛЭП в силу своих свойств, вызывает выделение тепла. Образование гололеда при температуре провода свыше  $+1$  °С не осуществляется.

При появлении гололедной муфты, от нее избавляются путем нагревания провода повышенным током.

**Зернистая изморозь** состоит из снеговидного рыхлого льда, который образовался из капель тумана – при температуре от  $-3$  до  $-8$  °С; плотность изморози по объему  $0,15-0,23$  г/см<sup>3</sup>, для равнинной части России –  $0,13$  г/см<sup>3</sup>, для возвышенной –  $0,2-0,3$  г/см<sup>3</sup>. Зернистая изморозь представлена на рисунке 3.5



Рисунок 3.5 – Зернистая изморозь на ЛЭП

Гололед изображенный на рисунке 3.6-3.9 – появившийся в следствии намерзания капель, мороси и тумана при  $t$  равной от 0 до  $-6$  °С, плотный слой льда. Плотность гололеда –  $0,5-0,8$  г/см<sup>3</sup>.

В штилевую погоду по всей длине провода появляется плотный прозрачный лед, показанный на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Гололед в виде прозрачного льда

А при ветреной погоде поверхность гололедных отложений становятся бугристыми, что продемонстрировано на рисунке 3.7.

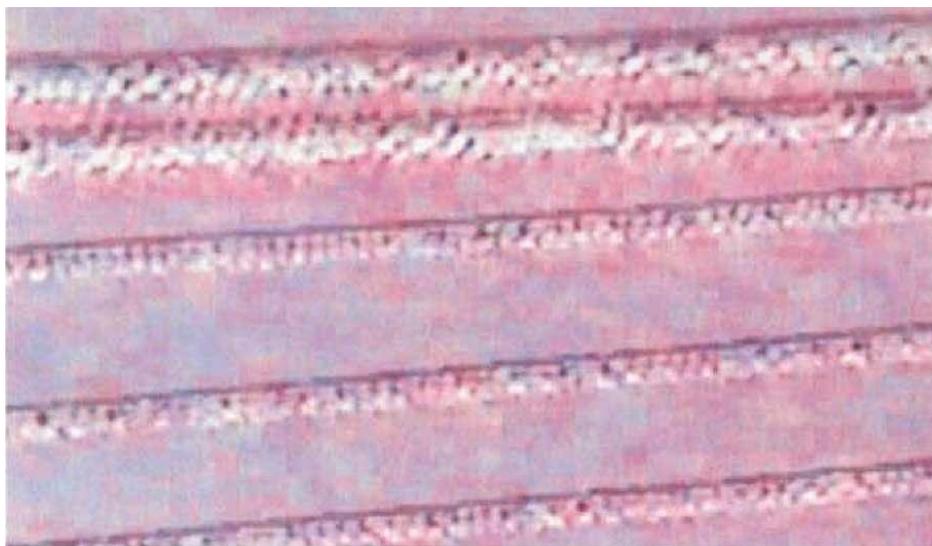


Рисунок 3.7 - Гололед с бугристой поверхностью

Во время дождя, капли охлаждаются и это способствует образованию на проводах натеки льда в виде сосулек, это видно на рисунке 3.8-3.9.

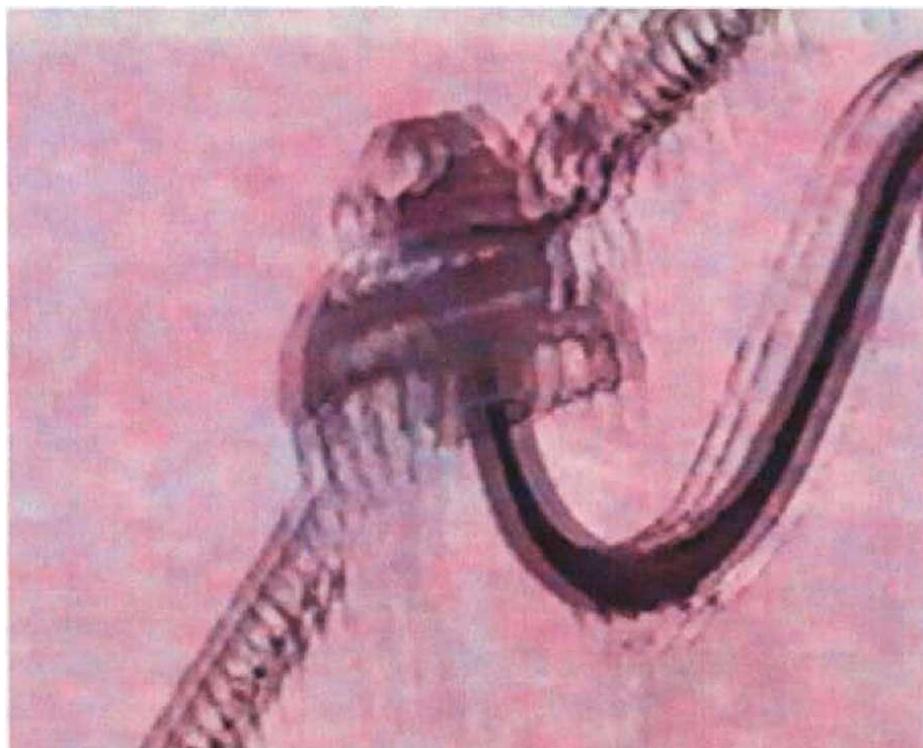


Рисунок 3.8 - Образование натеки льда на опорах ЛЭП



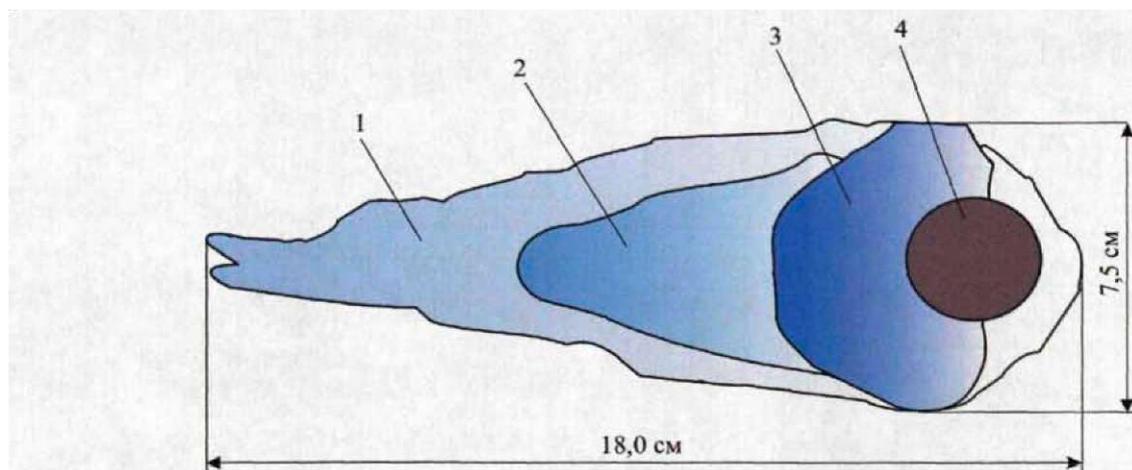
Рисунок 3.9 - Согнутая опора под нагрузкой гололеда

На рисунке 3.9 видно, что под тяжестью гололедных образований, опоры ЛЭП могут сгибаться (концевая конструкция опоры согнулась).

**Смешанные отложения** состоят из изморози и наслоения льда, плотность для таких отложений составляет:

- для равнинных районов  $0,15-0,25 \text{ г/см}^3$ ;
- для горных и предгорных районов  $0,3-0,4 \text{ г/см}^3$ .

Такие отложения образуются при температуре от 0 до минус 10 °С. На рисунке виден пример такого сложного образования.



- 1 - зернистая изморозь ( $0,1-0,2 \text{ г/см}^3$ ); 2 - пластинчатая зернистая изморозь ( $0,3-0,4 \text{ г/см}^3$ ); 3 - гребнеобразный гололед ( $0,8-0,92 \text{ г/см}^3$ );  
4 – провод

Рисунок 3.10 – Сложное гололедообразование

Наращение гололеда первоначально происходит со стороны ветра. При очень жестком проводе (достигается через специальные компенсаторы), отложения получают вытянутой формы в сторону аэродинамического потока. При плюсовой температуре провода отложения осыпаются, при увеличении нарастания льда или перестают увеличиваться за счет отличной обтекаемости.

При не большой жесткости провода, он начинает закручиваться (за счет ветра и массы гололеда), тем самым подставляю чистую поверхность для образования гололеда. Накопленный вес меняет центр тяжести гололедообразования, и это провоцирует провод к закручиванию. Так продолжается пока лед на проводе не достигнет цилиндрической формы – так называемой муфты, которая достигает массы в 1,5-2 раза выше массы одностороннего образования.

Как уже было сказано выше, провода линий электропередач, которые находятся под достаточной нагрузкой, могут нагреваться и выделять тепло. Перегрев провода всего на  $1-2 \text{ }^\circ\text{C}$  хватает для того, чтобы гололедные отложения не образовывались. Данную ситуацию видно на рисунке 3.11. Провода линий электропередач на напряжение 500 кВ не покрыты гололедом, а

провода на которых нагрузка на много ниже, линии электропередач на 0,4 кВ (находящиеся поперек рисунка) были покрыты изморозью.



Рисунок 3.11 – ЛЭП на 500 кВ и 0,4 кВ (изображены поперек рисунка)

Под надежностью ВЛ подразумевают вероятность появления на проводах ЛЭП гололеда. У каждой области страны есть свои допустимые нормы отложений. Всего существует четыре гололедных района, каждый из них отличается географическим нахождением и метео-условиями. В первом районе образуется самый слабый гололед, а в четвертом – наиболее слабый. Даже в пределах не большой территории, интенсивность гололеда может достаточно сильно отличаться. Она очень сильно возрастает в возвышенных местах (над уровнем моря). Еще есть особые гололедные районы, а которых гололед образуется очень интенсивно, например, в отдельных районах Кавказа.

Нормативная толщина стенки гололеда  $b$ , приведенная к высоте 10 м от земли и к диаметру провода 1,0 см, при повторяемости 1 раз в 5 и 10 лет определяется по таблице 3.12 в соответствии с районированием территории России по гололеду

Таблица 3.12 – Нормативная толщина стенки гололеда

| Район по гололеду | Нормативная толщина стенки гололеда $b$ , см |
|-------------------|--|
| I                 | 1,0  |
| II                | 1,5  |
| III               | 2,0  |
| IV                | 2,5  |
| V                 | 3,0  |
| VI                | 3,5  |
| VII               | 4,0  |
| Особый            | Выше 4,0                                     |

Рисунок 3.13 показывает вероятность возникновения обледенения и отложения изморози в зависимости от их толщины стенки  $b$  для ВЛ, расположенных во II и III районах по гололеду. Чтобы построить график были использованы наблюдения метеостанций за много лет, которые располагались вдоль трассы. Данные были получены с помощью гололедного станка, который включал в себя, провод  $d=0,5$  см, подвешенный на высоте 2м.

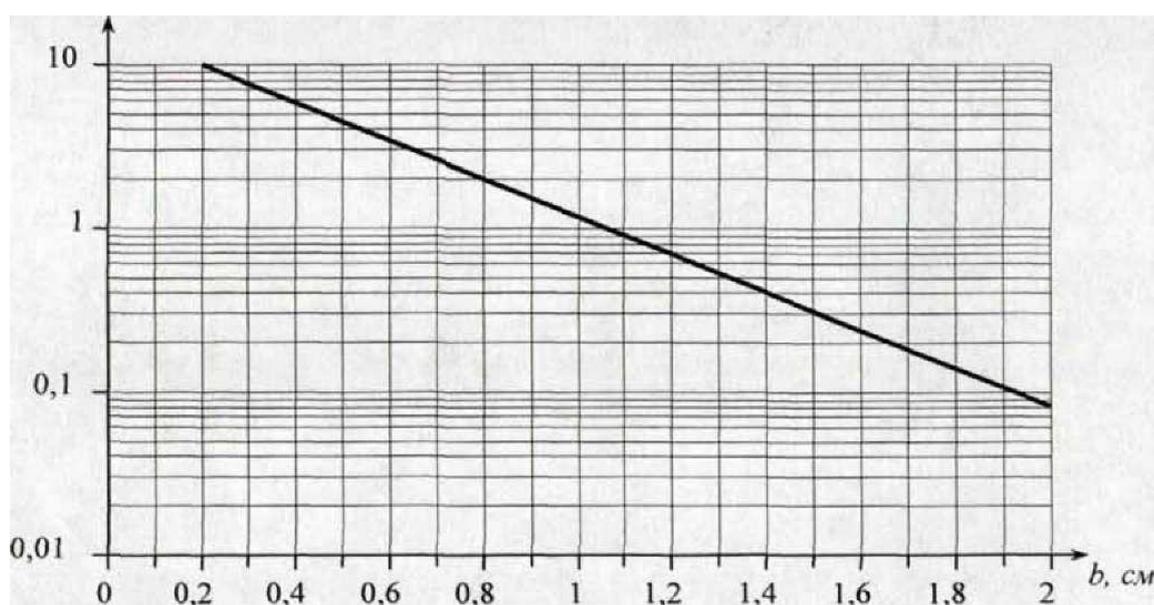


Рисунок 3.13 - Распределение вероятностей появления гололеда

Гололедное отложение – это диэлектрик, он является смесью льда и воздуха.

Расчетные кривые и результаты измерений диэлектрических параметров  $\epsilon'$  и  $\text{tg } \delta$  льда при температуре  $-1^\circ\text{C}$  в зависимости от частоты передаваемого сигнала  $f$  приведены на рисунке 3.14.

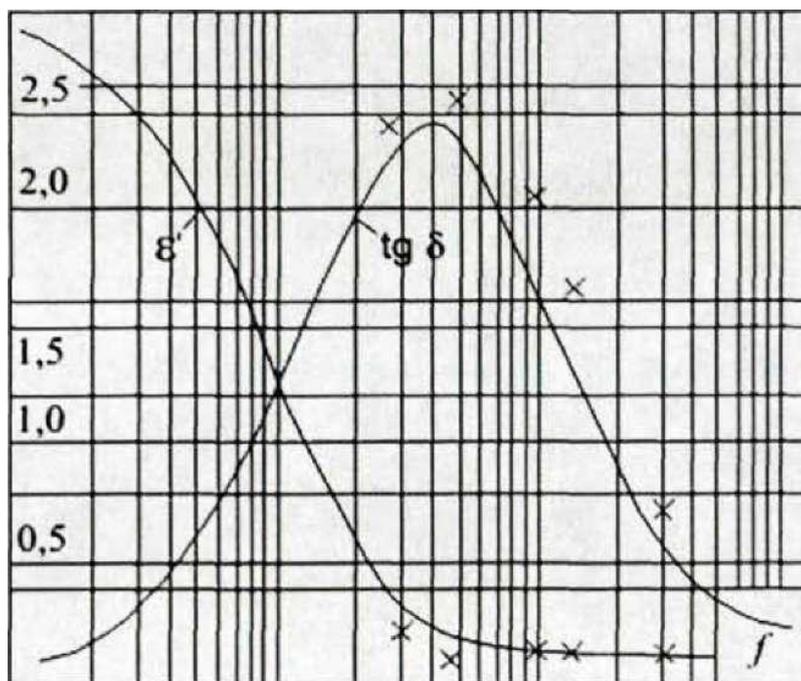


Рисунок 3.14 –Значения диэлектрических параметров

Анализ статистический данных метеорологических станций, расположенных во II и III районах по льду, показывает, что:

- возможность появления кристаллической изморози составляет 0,1% (при трассе длиной 100 км) и 0,2% (при трассе длиной 200 км);
- возможность появления зернистой изморози составляет 0,3% (при трассе длиной 100 км) и 0,1% (при трассе длиной 200 км).

В настоящее время данные об обледенение и нагрузкам по ветру приведены в виде карт, основанных на климатических районах России. Эти данные используются для проектирования и строительства новых воздушных линий. Основные требования к проектам и строительству новых ВЛ,

находящихся в экстремальных районах по гололеду и ветровым нагрузкам, должны быть таковыми:

- применение проводов АС с отношением сечения алюминия к стали 1.4;
- замена опор на опоры более высокого класса напряжения;
- установка распорок-демпферов на внутрифазовые провода;
- установка распорок между фазами;
- уменьшение длины пролета путем монтажа дополнительных опор;
- использование гирлянды изоляторов повышенной прочности

При проектировании ВЛ, следует правильно выбирать климатические условия по району.

Для линий, работающих в тяжелых условиях (большие нагрузки ветра и гололеда) без реконструкции, следует:

- незамедлительно обеспечить передачу информации о гололеде;
- повысить качество плавки гололеда.

Плавка эффективнее всего справляется с освобождением провода от гололеда. Для нагрева проводов используют токи повышенного значения. Для этого либо поднимают нагрузку, либо подают ток от установки предназначенной для плавки гололеда. Под этими действиями провода нагреваются. За счет этого в гололедной муфте образуется канавка, размером чуть больше провода, и гололедное обледенение падает с провода, под действием собственной тяжести (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 - Проплавление гололедной муфты. Слева - начало плавки; справа - окончанием плавки

Слежение за динамикой образования гололеда локационным способом позволит оптимально определить момент его плавки, предотвратить обрыв проводов электролиний и обусловленный этим недоотпуск электроэнергии потребителям. В то же время в некоторых ситуациях можно будет избежать плавки гололеда, если вес отложений будет меньше нормативной величины. При этом будет исключен недоотпуск электроэнергии потребителям из-за отключения линии на время плавки гололеда и сэкономлена электроэнергия, которая была бы израсходована для его плавки.

Таким образом, своевременное обнаружение появления гололедно-изморозевых отложений является весьма актуальной проблемой для электроэнергетики нашей страны.

### **Выводы**

1. Гололедные отложения, которые образовались на воздушных линиях электропередач, оказывают достаточно большое механическое воздействие (нагрузку) на провода и опоры. Это создает риск обрушения ВЛ, и может повлечь за собой тяжелые последствия (опасность для жизни людей и тд.). Аварии из-за гололеда на ВЛ, чаще всего проявляются массово и требуют больших экономических затрат.

2. На образование гололеда на ЛЭП оказывают влияние: диаметр проводов, скорость ветра, температура воздуха, закручивание проводов, протекание нагрузочного тока по проводам, высота подвеса проводов, действие возникающего при этом электрического поля.

3. Гололедное отложение – это диэлектрик, он является смесью льда и воздуха. Различают: смешанные отложения, зернистую изморозь, кристаллическую изморозь, гололед.

4. Для воздушных линий, которые подвергаются высоким гололедным и ветровым нагрузкам, следует обеспечивать преждевременное обнаружение появления гололеда и оперативность передачи диспетчеру информации, для своевременного плавок гололеда.

### **3.3 Выбор метода обнаружения гололеда**

При обледенении меняется целый ряд физических, геометрических и других параметров воздушных линий, что позволяет создавать датчики гололеда, основанные на различных способах определения появления или наличия гололеда на проводе.

Датчики реагируют на изменение:

- веса проводов;
- натяжения проводов;
- физических свойств среды, окружающей провода;
- электрических характеристик проводов;
- условий распространения высокочастотных и импульсных сигналов.

Известно, что нарастание гололеда до аварийных пределов может произойти за считанные часы. Подготовка к действию устройства для плавки гололеда требует времени от одного часа и более (зависит от схемы плавки, потребителя, протяженности ЛЭП и т.д.). Поэтому для эффективной борьбы с гололедом важны два фактора:

- фиксация начала процесса гололедообразования;

- достоверная и надежная регистрация динамики процесса гололедообразования.

Несвоевременная и недостоверная информация о гололедообразовании ведет к авариям и громадным убыткам.

### **3.3.1. Механические методы**

Измерение массы нескольких или одного пролетов провода ВЛ, является наиболее объективным способом измерения нагрузки гололеда. Величина натяжения провода для каждой линии электропередач определяется индивидуально, нагрузками от ветра, гололеда и температурой окружающей среды. Для сравнения «настоящего» натяжения провода и максимально допустимым, целесообразно использовать контроль натяжения провода. Также информация, полученная от сигнализатора, чаще всего используется для включения плавки гололеда. Исходя из этого, датчики, которые измеряют вес провода, можно использовать для автоматизированной системы плавки гололеда.

При наличии гололедных отложений на воздушных линиях возникают ложные срабатывания из-за кратковременных нагрузок, происходящие из-за порыва ветра, пляски провода и т.п. Отстройку от таких срабатываний можно исполнить с помощью механического демпфера в датчике, или же выдержкой времени в электрической части сигнализатора.

Конструкция механических датчиков гололеда, которые для анализа используют вес проводов, похожи друг на друга. Они основаны на преобразовании взаимного перемещения деталей датчика в сигнал, который передается на диспетчерский пункт.

Механически датчики имеют несколько недостатков: не большая надежность и сложное конструктивное исполнение. Не большая надежность вызвана большим числом механических деталей, контактных узлов и уплотнений подвижных узлов, которые стираются в процессе использования.

Исходя из этого, более надежными считаются бесконтактные датчики, которые попросту не имеют перемещающихся механических элементов.

В состав механического датчика входит преобразователь, который представляет собой чувствительный элемент, заключенный в герметичный корпус. Этот элемент реагирует на гололедную нагрузку, воздействующую на подвеску провода контролируемого участка электролинии. Но вес провода с гололедными отложениями измеряется на одном пролете воздушной линии, в то время как гололед может образоваться и на других, неконтролируемых, пролетах электролинии, где он не будет обнаружен.

Существующие на сегодняшний день механические датчики гололедных нагрузок в основном рассчитаны на обнаружение уже имеющихся на контролируемом участке электролинии гололедных отложений, величина которых стала превышать критическое значение. Момент начала гололедообразования при этом не фиксируется, и это является недостатком механических датчиков.

Еще один недостаток таких датчиков заключается в том, что они не универсальные. Поэтому не получится их использовать без дополнительной настройки для любого типа ВЛЭП, которые могут иметь разные параметры. Например, в зависимости от мощности самой линии (диаметр и количество проводов в фазе, длина пролета между опорами, количество и габариты изоляторов). Но, несмотря на это, на практике применяют различные типы механических датчиков определения гололеда.

### **3.3.2. Физические методы**

Рассмотрим в качестве примера несколько датчиков, реализующих физические методы обнаружения гололедных образований.

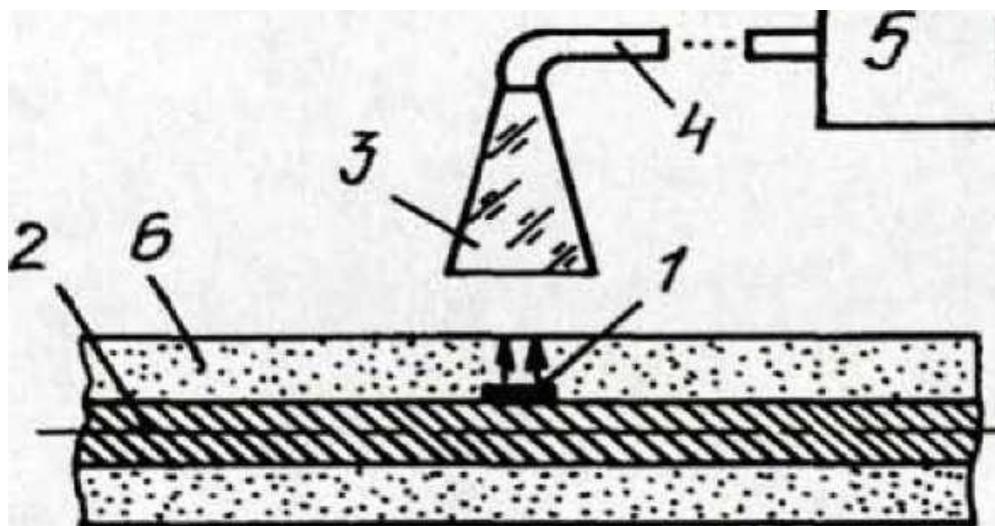
**Оптический датчик.** Датчик выполнен в виде трубки из прозрачного материала, например, стекла, на поверхность которой нанесено полупрозрачное зеркальное металлизированное покрытие. Внутри этой трубки запаиваются излучатель света и фотоприемник.

При появлении гололедных отложений на поверхности трубки отражающая способность внутренней поверхности трубки возрастает, что приводит к увеличению освещенности фотоприемника, увеличению сигнала на выходе фотоприемника и усилителя. Блок отображения информации оповещает о начале гололедообразования.

Размещение излучателя света и фото приемника внутри прозрачной трубки с полупрозрачным металлизированным покрытием позволяет обеспечить их герметизацию и исключить влияние посторонних факторов на работу устройства, что повышает надежность обнаружения гололедных отложений.

Недостатки оптического датчика: сложность конструкции, возможность ложного срабатывания при запылен и и поверхности трубки, необходимость системы телемеханики для передачи информации с датчика диспетчеру.

**Радиоактивный датчик.** Схема датчика представлена на рисунке 3.16.



1 - источник радиоактивного излучения; 2 - провод; 3 - сцинтиллятор;  
4 - оптоволоконный светопровод; 5 - фотоприемный блок; 6 - гололедное  
отложение

Рисунок 3.16 - Устройство для контроля массы гололедных отложений:

Датчик позволяет определять массу гололедных отложений по степени поглощения радиоактивного излучения. Источник радиоактивного излучения 1, закрепляемый на высоковольтном проводе, просвечивает слой гололедных отложений 6 на проводе 2. Поток радиоактивного излучения воспринимается сцинтиллятором 3. Световые вспышки, возникающие в материале сцинтиллятора, количество которых пропорционально количеству воздействующих на него радиоактивных частиц, поступают в оптоволоконный светопровод 4 и воспринимаются с помощью фотоприемного блока 5, регистрирующего среднюю частоту следования световых вспышек.

Недостатками датчика являются: наличие источника радиоактивного излучения.

### **3.3.3. Локационный метод**

Локационный метод зондирования заключается в подаче импульсного сигнала в контролируемую линию и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлении после отражения от конца линии либо ВЧ заградителя. Метод позволяет определить наличие гололедных образований на проводах электролиний и их величину путем сравнения времени распространения сигналов (или амплитуд отраженных сигналов) при наличии и при отсутствии гололедных образований.

Гололедные образования на проводах представляют собой неоднородный диэлектрик, который уменьшает скорость распространения сигнала вдоль линии и вызывает его дополнительное затухание. Затухания обусловлены диэлектрическими потерями энергии электромагнитной волны, которая расходуется на нагрев слоя гололедного покрытия. При увеличении длины гололедного отложения на линии и толщины его стенки скорость распространения импульса еще больше снижается, а его затухание еще больше увеличивается, ухудшая качество передаваемых сигналов. Но надо учитывать,

что затухание сигнала в электролинии несколько увеличивается и при дожде, тумане и снегопаде.

Итак, существуют два параметра, по изменению которых можно судить о наличии гололедных образований на проводах, — это снижение скорости и уменьшение амплитуды передаваемого сигнала. По этой причине различают два варианта обнаружения гололеда локационным зондированием: по появлению дополнительной задержки отраженного сигнала и по появлению дополнительного затухания этого сигнала. Эти варианты локационного обнаружения гололеда реализуются различными способами.

Важнейшим преимуществом локационных способов обнаружения гололеда является то, что вся аппаратура расположена на подстанциях и нет необходимости устанавливать на воздушных линиях какие-либо устройства.

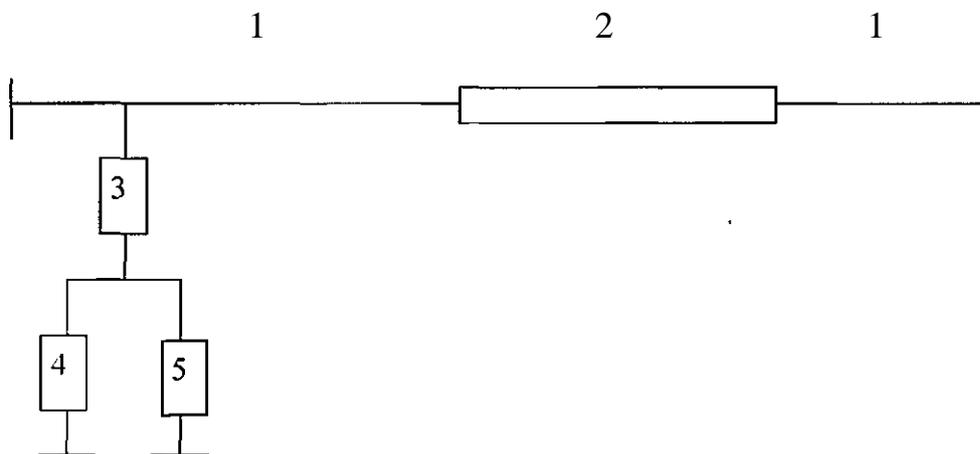
Это преимущество позволяет ожидать активной разработки и внедрения в практику локационных способов обнаружения гололеда.

Недостатком локационного метода является невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололедного образования на большой длине воздушной линии от опасной концентрации льда в отдельных ее пролетах.

При гололеде с толщиной стенки 10 см волновое сопротивление воздушной линии с проводом АС-120 снижается примерно с 460 до 300 Ом. Это изменение волнового сопротивления линии вызывает частичное отражение импульсного сигнала от границ обледенения, что может быть зафиксировано соответствующей аппаратурой. Поэтому предлагаются устройства, в которых фиксируются импульсы, отраженные от ближней границы зоны обледенения. Но фиксация таких отраженных импульсов существенно затруднена или даже невозможна при плавном изменении размеров отложения вдоль воздушной линии, а также в том случае, когда воздушная линия равномерно покрыта гололедом по всей длине.

Рассмотрим конструкции нескольких датчиков, использующих локационный принцип обнаружения гололеда.

**Датчик с контрольным участком.** Линия, как показано на рисунке 3.17, содержит фазный провод 1 с контрольным участком 2, выполненным проводом с удельным погонным сопротивлением, превышающим удельное сопротивление провода 1.



1 - фазный провод; 2 - контрольный участок; 3 - фильтр присоединения;  
4 - генератор импульсов; 5 - анализатор отраженных импульсов

Рисунок 3.17 - ЛЭП с устройством контроля гололедной нагрузки

При начале гололедообразования провод 1 начнет покрываться гололедом, что приведет к изменению его высокочастотных (импульсных) характеристик. На участке 2 за счет большего подогрева рабочим током линии электропередачи гололед образовываться не будет, и его высокочастотные характеристики останутся практически неизменными. Наличие разницы высокочастотных характеристик провода электролинии на участках 1 и 2 может быть определено при ее локации импульсами от генератора 4 через фильтр присоединения 3 с помощью анализатора отраженных импульсов 5.

Недостаток этого датчика — необходимость введения в конструкцию линии провода с высоким удельным погонным сопротивлением, который к тому же вызывает дополнительные потери электроэнергии.

### **Датчик разности затухания в междуфазных и внутрифазном каналах.**

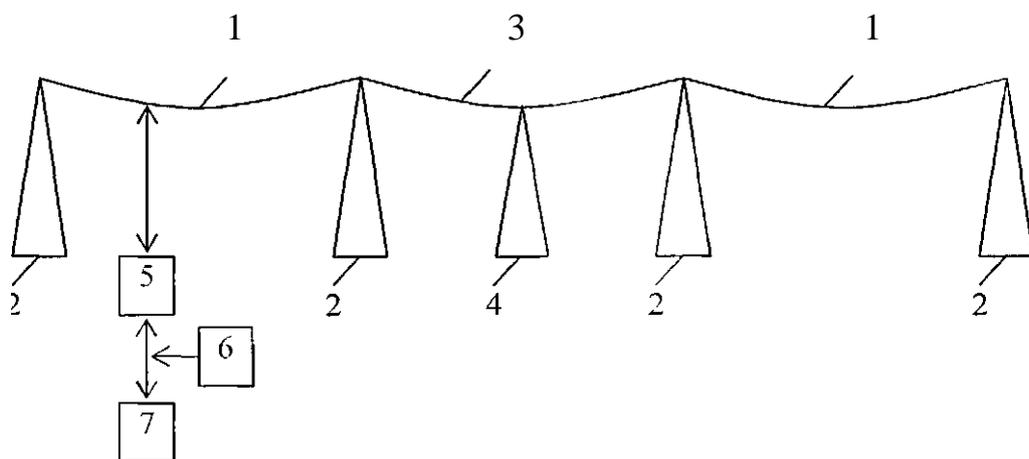
Устройство для контроля уровня гололедной нагрузки на проводах линий электропередачи присоединяется непосредственно через высокочастотную аппаратуру к междуфазным и к внутрифазному высокочастотным каналам.

Поскольку приращение затухания, вызванное образованием гололеда во внутрифазном канале, значительно превосходит приращение затухания в междуфазном канале, а длина гололедных покрытий одинакова, то отношение изменения затухания импульсов при пробеге их вдоль высоковольтной линии по между- и внутрифазному каналам характеризует толщину стенки гололеда.

Блок сравнения, измеряя отношение уровней отраженных импульсов, приходящих от конца высоковольтной линии, будет оценивать толщину покрытия гололеда. Превышение этим отношением заданной величины означает необходимость начать плавку гололеда.

Предложенное устройство позволяет осуществлять контроль за уровнем гололеда на всем протяжении высоковольтных линий электропередачи, имеющих изолированные группы проводов в расщепленных фазах, и не требует установки на линии каких-либо датчиков или изменения ее конструкции. Оно может использоваться и для контроля процесса плавки гололеда. Но, к сожалению, не все линии электропередачи имеют расщепленные фазы, поэтому область применения этого датчика ограничена.

**Датчик стрелы провеса.** Индикация гололеда на ЛЭП производится путем сравнения по амплитуде и фазе высокочастотных импульсов, отраженных от заградителей, установленных по концам контролируемого участка. Линия электропередачи, изображенная на рисунке 3.18, состоит из фазных проводов 1, закрепленных на опорах 2. В гололедоопасной зоне выбран пролет 3, в котором или установлена дополнительная промежуточная опора 4, к которой прикреплен по крайней мере один из фазных проводов, или один из фазных проводов выполнен с повышенной механической прочностью.

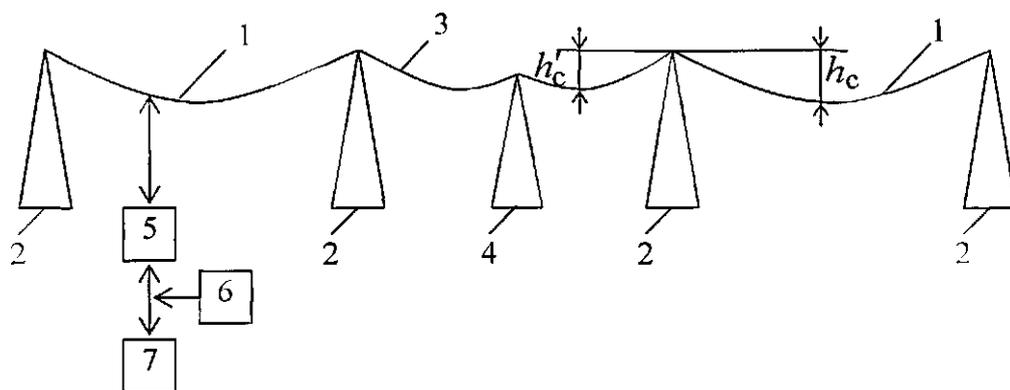


- 1 - провод; 2 - опора; 3 - пролет в гололедоопасной зоне;  
 4 - дополнительная промежуточная опора; 5 - система присоединения;  
 6 - генератор зондирующих импульсов; 7 — анализатор импульсов

Рисунок 3.18 - ЛЭП с датчиком стрелы провеса

Через систему присоединения 5, служащую для согласования выходного сопротивления генератора зондирующих импульсов 6 и самой линии, генератор 6 посылает зондирующие импульсы в линию электропередачи 1. Эти импульсы распространяются вдоль линии, отражаются от неоднородностей и конца линии, затем поступают в анализатор импульсов 7.

При отсутствии гололедной нагрузки волновое сопротивление пролета 3 не отличается от волнового сопротивления остальных пролетов линии. При наличии гололеда (рисунок 3.19) на выбранном пролете 3 стрела провеса  $h'_c$  за счет установки дополнительной опоры 4 у фазных проводов (по крайней мере одного) будет меньше на заданную заранее рассчитанную величину, чем стрела провеса проводов  $h_c$  остальных пролетов линии. Также уменьшенная стрела провеса  $h'_c$  в пролете 3 при наличии гололедной нагрузки получится и при выполнении по крайней мере одного из фазных проводов указанного пролета с повышенной механической прочностью.



- 1 - провод; 2 - опора; 3 - пролет в гололедоопасной зоне;  
 4 - дополнительная промежуточная опора; 5 - система присоединения;  
 6 - генератор зондирующих импульсов; 7 - анализатор импульсов

Рисунок – 3.19 - ЛЭП с датчиком стрелы провеса

Чем больше гололедная нагрузка, тем больше отличаются стрелы провеса на остальных пролетах линии от стрелы провеса на укрепленных пролетах.

Отраженные от неоднородности волнового сопротивления зондирующие импульсы возвращаются к началу линии и через систему 5 присоединения поступают в анализатор 7 импульсов и, следовательно, можно точно судить о наличии гололедообразования именно на этом выделенном участке линии электропередачи.

Недостатком способа является сложность конструктивного исполнения дополнительных опор таким образом, чтобы стрела провеса провода на контрольном участке линии при отсутствии гололеда соответствовала стреле провеса соседних пролетов, так как длина провода линии электропередачи в большой степени зависит от его температуры.

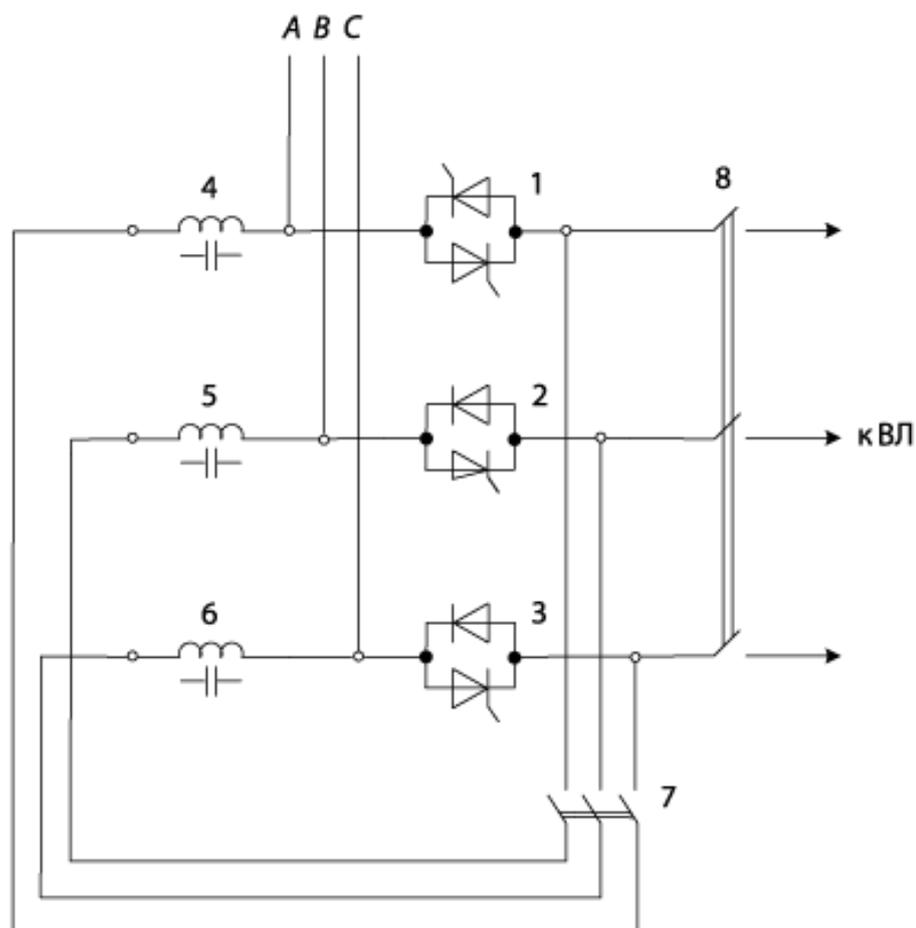
### 3.3.4 Термическое воздействие переменным током промышленной частоты.

Источником питания как правило является либо шины 10 кВ, либо отдельный трансформатор. Схема плавки гололеда выбирается так, чтобы ток протекающий по проводам ВЛ составлял в 1.5-2 раза больше длительно допустимого тока. Такое превышение не страшно, введу того, что процесс

является кратковременным, примерно 1 час. Для стандартных проводов АС сечением 50-185 мм<sup>2</sup> примерный ток составляет в пределах 270-600А, а тока, предупреждающего образование гололеда, - в пределах 160-375А.

Выбора схемы плавки гололеда не достаточно для выбора величины тока КЗ. Слишком большой ток может привести к отжигу проводов, что в дальнейшем скажется на прочности провода. А слишком маленького тока может не хватить, и потребуются повторный пуск, что дополнительно утяжеляет последствия.

Избежать негативных последствий позволяет использование тиристорного регулятора переменного напряжения, схема которого на рисунке 3.20. В режим плавки гололеда выключатель 7 выключен, выключатель 8 включен. Возможные способы регулирования тока плавки – импульсно-фазовый путем изменения углов включения силовых тиристоров 1, 2, 3 или широтно-импульсный путем изменения количества периодов подачи напряжения.



1, 2, 3 – силовые тиристоры; 4, 5, 6 – реакторы; 7, 8 – выключатели

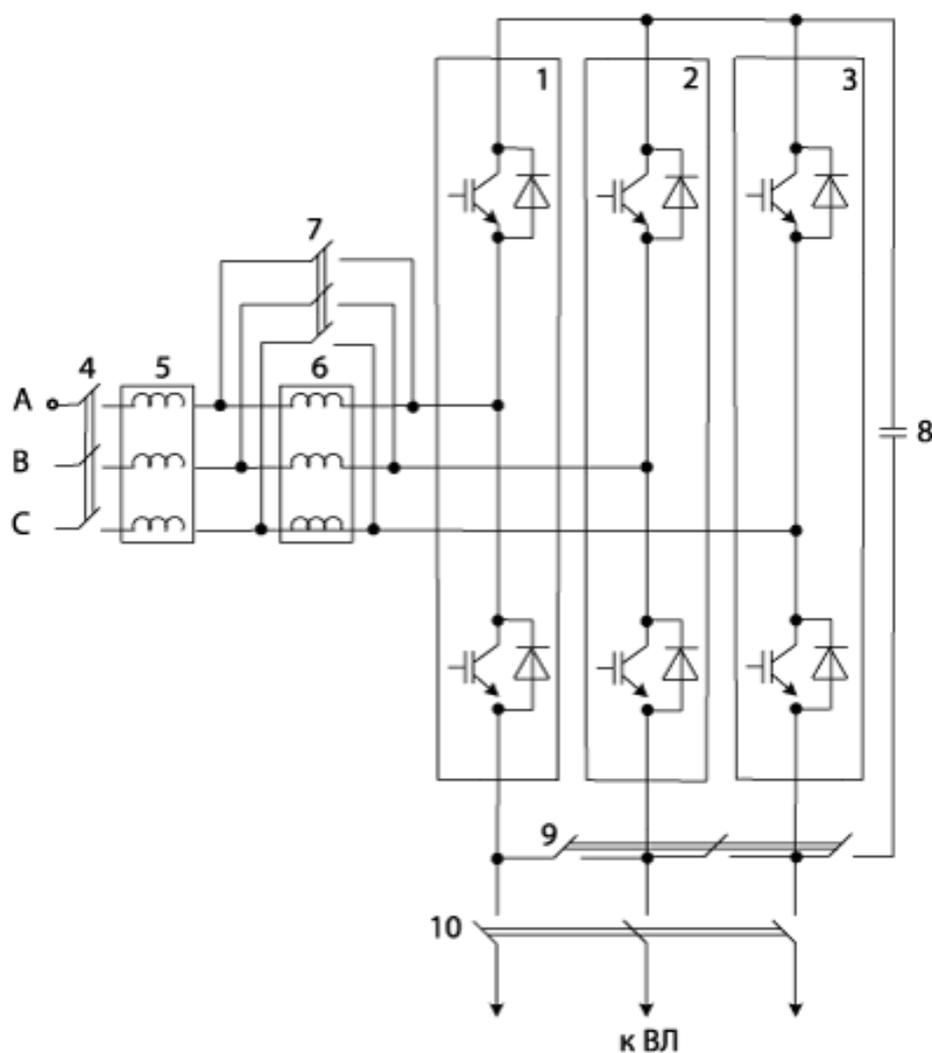
Рисунок 3.20 – Установка для компенсации реактивной мощности плавки гололеда

В режиме компенсации реактивной мощности выключатель 7 включен, а выключатель 8 выключен. В этом случае силовые тиристоры 1, 2, 3 и реакторы 4, 5, 6 образуют тиристорно–реакторную группу, соединенную в треугольник, которая является элементом статического тиристорного компенсатора. Также допускают возможность использования конденсаторов вместо реакторов. В этом случае компенсация реактивной мощности будет осуществляться с помощью регулируемой конденсаторной батареи.

Однако плавка гололеда осуществляется переменным током промышленно частоты, независимо от способа регулирования и требует значительной мощности источника питания (десятки МВА), поскольку активное сопротивление проводов ВЛ значительно меньше индуктивного.

Полная мощность источника увеличивается за счет большой и бесполезной для плавки гололеда реактивной нагрузки. Повысить эффективность плавки можно путем продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления в случае использования конденсаторов в составе предлагаемой установки.

Заслуживает внимания комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда, схема которой представлена на рисунке 3.21.



1, 2, 3 – транзисторные модули; 4, 7, 9, 10 – выключатели;  
5, 6 – реакторы; 8 – конденсаторная батарея

Рисунок 3.21 - Комбинированная установка для компенсации реактивной мощности и плавки гололеда

В режиме плавки гололеда выключатель 7 включен, шунтируя реактор 6, выключатель 9 отключает конденсаторную батарею 8, а выключатель 10 включен. При этом возможна плавка на всех проводах ВЛ одновременно.

В режиме компенсации реактивной мощности выключатели 7 и 10 отключены, а выключатель 9 включен. В результате образуется типовая схема статического компенсатора на базе транзисторных модулей 1, 2 и 3, реакторов 5, 6 на стороне переменного тока и конденсаторной батареи 8 на стороне постоянного тока. Такая структура может работать как в режиме генерации, так и в режиме потребления реактивной мощности.

Существенным недостатком установки, изображенной на рисунке 3.22, является неполное использование вентильной части в режиме плавки. Это объясняется тем, что ток плавки протекает только через «нижние» ключи фаз 1, 2 и 3-го преобразовательного моста. Для преобразования мостовой схемы в три ключа переменного тока потребуется дополнительное коммутационное оборудование и существенное усложнение силовой схемы.

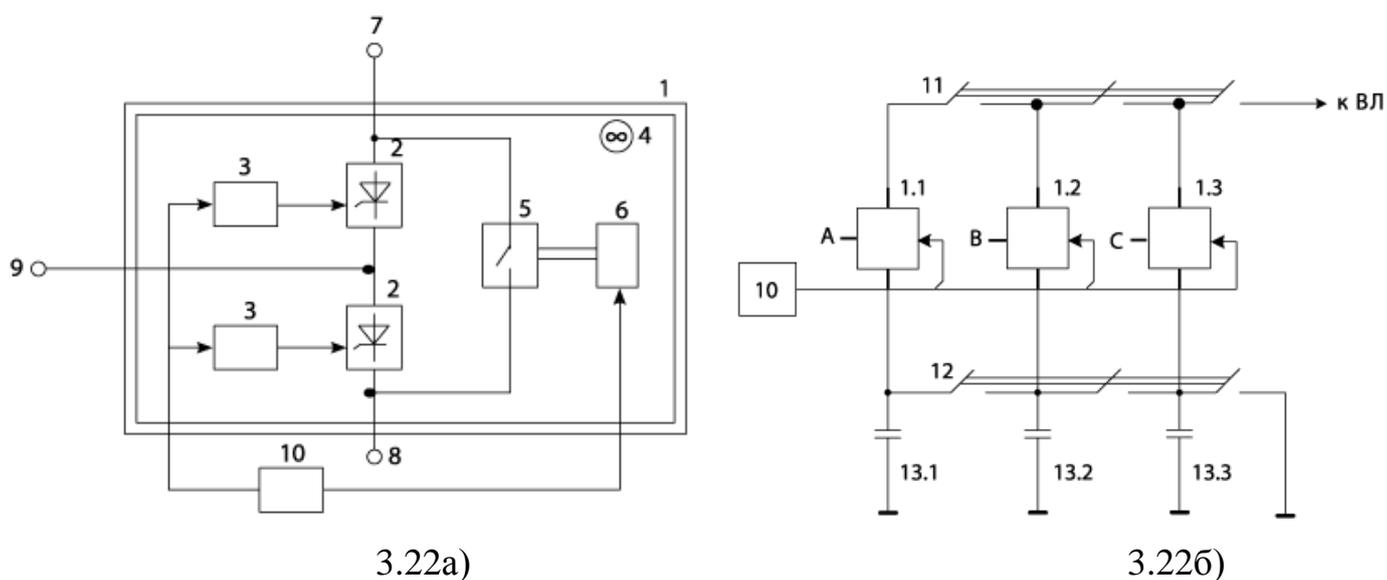
### **3.3.5 Термическое воздействие постоянным током**

Основные недостатки заключаются в том, что ВЛ необходимо отключать, а выпрямительный блок большую часть календарного года не используется, поскольку необходимость в плавке гололеда возникает только в зимний период.

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

В этой связи вполне оправданы попытки расширения функциональных возможностей путем совмещения в одной установке выпрямительного блока для плавки гололеда и устройства для компенсации реактивной мощности. Это открывает возможность круглогодичной эксплуатации установки, что существенно повышает ее экономическую эффективность.

Преобразовательное устройство контейнерного типа для комбинированной установки для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности (рисунок 3.22).



- 1 – транспортные контейнеры; 2, 3 – тиристорные модули с блоками управления; 4 – система принудительного воздушного охлаждения; 5, 6, 11, 12 – разъединители с электромеханическим приводом; 7, 8, 9 – выходы преобразовательного моста: анодный, катодный и фазный соответственно;
- 10 – система управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА);
- 13 – конденсаторные батареи.

Рисунок 3.22а, 3.22б - Схема преобразовательного устройства контейнерного типа (а) и комбинированной установки (б) для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности

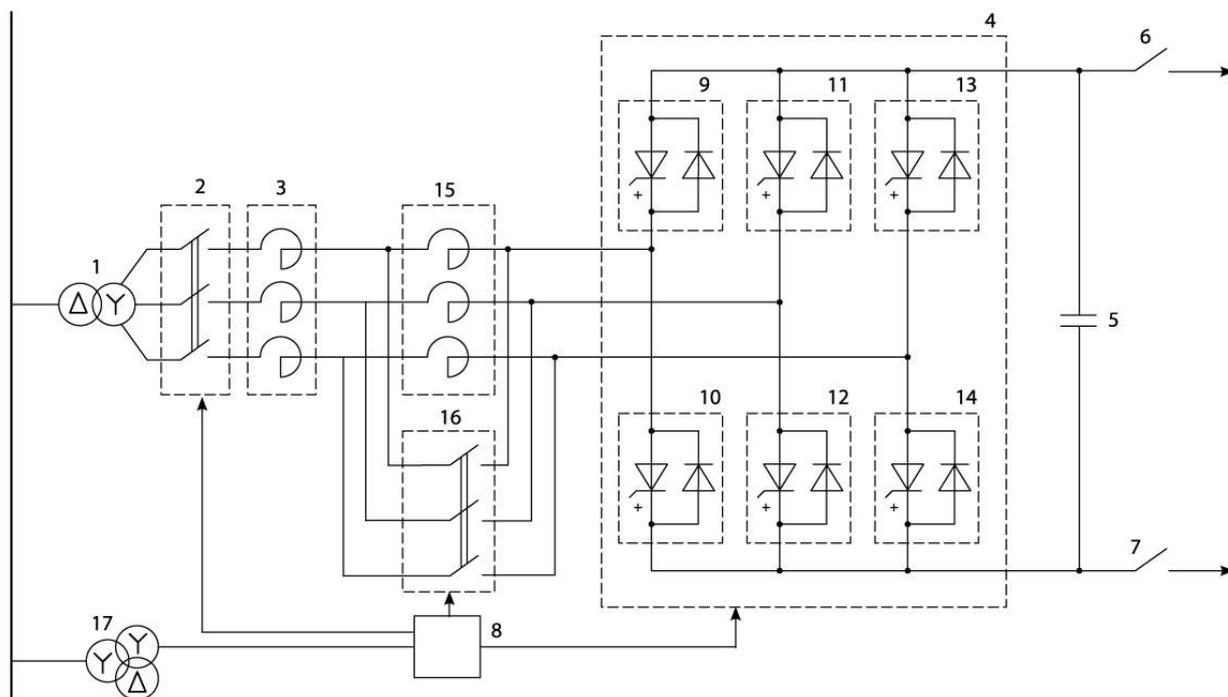
Силовое оборудование предназначено для использования в районах УХЛ1 (с умеренным и холодным климатом) и находится в закрытом стальном

контейнере, устанавливаемом на фундаменте на открытой части подстанции. Силовое питание осуществляется от обмотки 10 кВ выделенного трансформатора. Из преобразовательных устройств, изображенных на рис. 3.22а, собирается комбинированная установка, схема которой показана на рис. 3.22б.

В режиме плавки гололеда разъединители 11, 12 замкнуты (рисунок 3.22б), разъединители 5 (рисунок 3.22а) разомкнуты. Собирается схема трехфазного мостового выпрямителя, который обеспечивает номинальное выпрямленное напряжение 14 кВ, номинальный ток плавки 1400 А и регулирование тока плавки в диапазоне 200–1400 А.

В режиме компенсации реактивной мощности разъединители 11, 12 разомкнуты, а разъединители 5 замкнуты. Собирается схема конденсаторных батарей 13, управляемых встречно-параллельно соединенными тиристорными модулями 2. Однако в режиме компенсации возможно только ступенчатое регулирование реактивной мощности.

Последнего недостатка удастся избежать в комбинированной установке для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности, схема которой представлена на рисунке 3.23



1 – питающий трансформатор; 2, 16 – трехфазные разъединители;  
 3, 15 – трехфазные реакторы; 4 – высоковольтный мостовой преобразователь; 5 – конденсаторная батарея постоянного тока; 6, 7 – однофазные разъединители; 8 – система управления; 9–14 – сборки полностью управляемых приборов с обратными диодами; 17 – резонансный трансформатор.

Рисунок 3.23 - Комбинированная установка для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности

В режиме плавки гололеда разъединители 6, 7 и 16 включены. Плавка осуществляется постоянным током. Регулирование тока плавки осуществляется способом высокочастотной ШИМ. Например, при прохождении тока нагрузки через диоды сборок 13 и 10 полностью управляемый прибор из сборки 9 или 14 подключается в режиме ШИМ. При этом кратковременно образуется контур двухфазного КЗ 9–10 или 13–14. Нагрузка шунтируется, и ток плавки регулируется. Скорость нарастания тока КЗ ограничивается реактором 3. За счет выбора частоты и коэффициента модуляции ШИМ запираение тиристора происходит раньше увеличения тока КЗ до опасного уровня. При этом интервал проводимости тиристора меньше, чем в режиме компенсации реактивной

мощности. В режиме компенсации реактивной мощности разъединители 6, 7 и 16 выключены. Высоковольтный мостовой преобразователь 4 работает в режиме «СТАТКОМ».

По мнению ряда авторов, которые опираются на собственный опыт работы, только от 7 до 30% длины нагреваемого провода во время плавки действительно покрыто гололедом. Это объясняется тем, что отдельные участки ВЛ за счет углов поворота и невозможности предсказать направление ветра в момент образования гололеда оказываются в различных климатических условиях. Соответственно значительная часть электроэнергии расходуется впустую. В связи с этим предложена передвижная мобильная установка, которая позволяет выезжать на те участки ВЛ, где обнаружено обледенение проводов.

Мобильный генератор для плавки гололеда на проводах ВЛ [12] выполняется на автомобильной платформе, питание (0,4 кВ) трехфазного выпрямительного моста осуществляется от двух дизель-генераторов ADV320 по 320 кВт каждый. Предусмотрены проводники с клеммами для подключения к проводам ВЛ и электрические шины для соединения проводов на пролете между опорами по схеме плавки гололеда. Рассмотренное техническое решение обеспечивает плавку гололеда на длине двух пролетов ВЛ на фазных проводах и грозозащитном тросе.

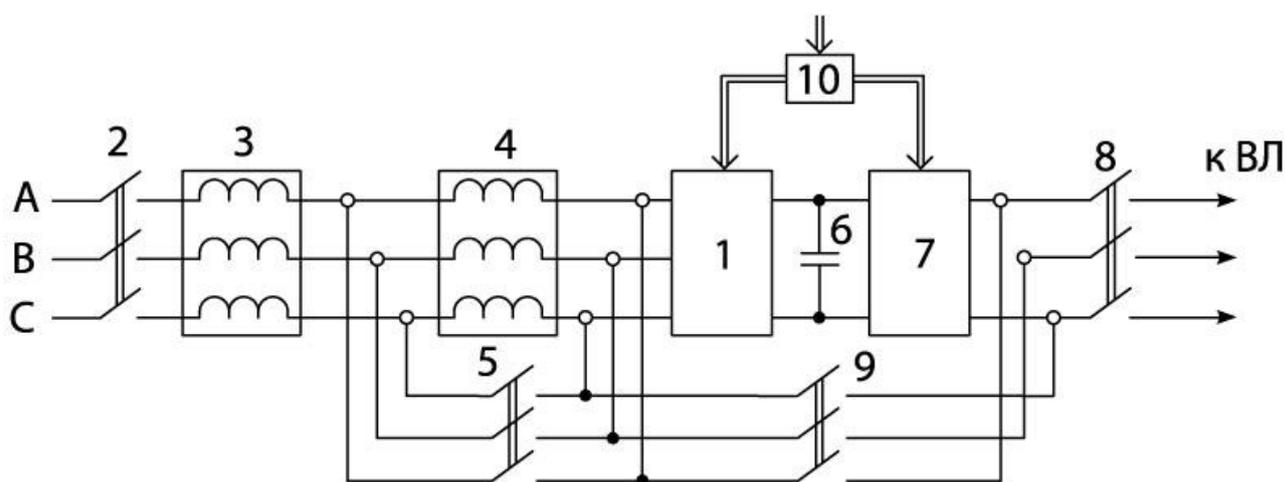
Общим недостатком всех устройств, реализующих термическое воздействие постоянным током, является необходимость применения схемы плавки гололеда «провод – провод» или «провод – два провода». В любом случае увеличивается время плавки и соответственно затраты электроэнергии. Для уменьшения времени плавки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

### 3.3.6 Термическое воздействие током ультранизкой частоты

Данный вид воздействия заключается в том, что плавку производят током низкой частоты, формируемым трехфазным автономным инвертором напряжения, а эффективное значение тока плавки задают и поддерживают на требуемом уровне изменением величины напряжения питания.

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 организации плавки, сокращается продолжительность процесса плавки гололеда, уменьшается количество дополнительного коммутационного оборудования.

Схема комбинированной установки для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности, реализующей предложенный способ, представлена на рисунке 3.24.



1, 7 – трехфазные мостовые преобразователи на полностью управляемых полупроводниковых ключах; 2, 5, 8, 9 – трехполюсные выключатели;  
3, 4 – трехфазные дроссели; 6 – конденсаторная батарея; 10 – система управления.

Рисунок 3.24 - Комбинированная установка для плавки гололеда и компенсации реактивной мощности

В режиме плавки гололеда выключатели 5 и 8 включены, а выключатель 9 отключен. Мостовой преобразователь 1 работает в режиме управляемого выпрямителя, а мостовой преобразователь 7 работает в режиме трехфазного автономного инвертора напряжения. Плавка осуществляется одновременно на трех проводах воздушной линии.

В режиме компенсации реактивной мощности выключатели 5 и 8 выключены, а выключатель 9 включен. Мостовые преобразователи 1 и 7 работают параллельно.

Угол включения  $\alpha$  выбирается несколько меньше  $180$  эл. гр. Из сети потребляется небольшая активная мощность, необходимая для поддержания напряжения на конденсаторной батарее 6. На стороне переменного тока мостовых преобразователей 1, 7 формируется переменное напряжение, первая гармоника которого сдвинута по отношению к фазным напряжениям источника питания на угол  $\beta = 180 - \alpha$ .

Если амплитуда первой гармоники формируемого напряжения превышает амплитуду напряжения источника питания, то мостовые преобразователи 1, 7 генерируют реактивную мощность, а если меньше – то потребляют реактивную мощность. Изменением коэффициента модуляции высокочастотной ШИМ регулируют амплитуду первой гармоники формируемого напряжения, а, следовательно, величину и направление реактивной мощности.

### **3.3.7 Термическое воздействие током высокой частоты**

Воздействие заключается в том, что без отключения ВЛ на фазные провода через согласующее устройство и высоковольтные конденсаторы связи подается высокочастотный (ВЧ) ток от генератора (от 50 до 500 МГц).

В однородном проводнике переменный ток концентрируется в поверхностном слое, утончение которого с ростом частоты приводит к возрастанию сопротивления той части проводника, по которой протекает электрический ток. Это значит, что при одной и той же величине тока,

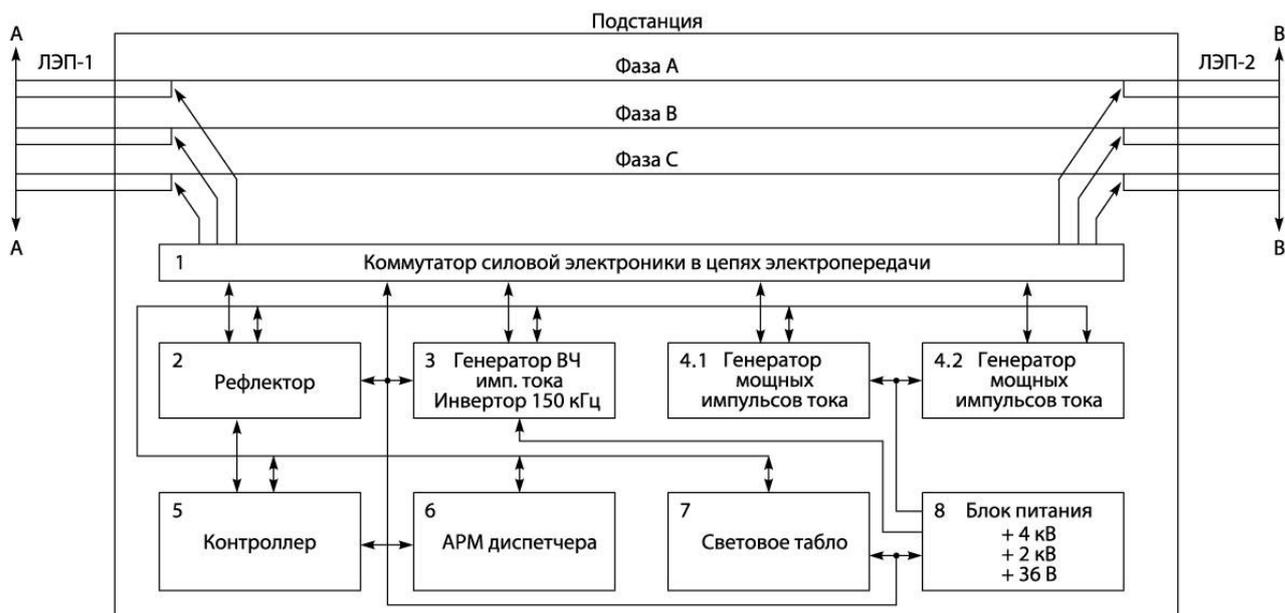
протекающего по проводу, чем выше значение частоты сигнала, тем выше рассеиваемая на проводнике тепловая мощность. Например, при  $f \geq 100$  МГц сопротивление алюминиевых проводов возрастает в 600 раз и более.

Мощности ВЧ-генератора в несколько десятков кВт достаточно для нагрева провода на 10–20 °С, что должно предотвратить образование гололедных отложений. Для устранения уже образовавшейся ледяной шубы потребуется нагрев не на 10–20 °С, а до температуры 100–180 °С, необходимой для плавки гололеда. Соответственно потребуются значительно большие затраты электроэнергии и более длительная процедура.

Поэтому данный способ наиболее целесообразно применять в профилактических целях для предотвращения гололедообразования, поскольку он реализуется без отключения потребителей. Однако использование генераторов с диапазоном частот 87,5–108 МГц чревато опасностью создания интенсивных радиопомех в УКВ-диапазоне.

### **3.3.8 Термодинамическое воздействие**

Подогрев провода током высокой частоты может не только препятствовать образованию гололедных отложений, но и использоваться для облегчения процедуры удаления уже образовавшейся гололедной муфты. Это, в частности, использовано в устройстве, схема которого представлена на рисунке 3.25



1 – коммутатор силовой электроники; 2 – рефлектор; 3 – генератор ВЧ-импульсов тока, инвертор 150 кГц; 4.1, 4.2 – генераторы мощных импульсов тока; 5 – контроллер; 6 – АРМ диспетчера; 7 – световое табло; 8 – блок питания.

Рисунок 3.25 - Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередачи

Импульсный рефлектометр 2 осуществляет непрерывное зондирование ЛЭП-1 и ЛЭП-2 по величине суммарного времени распространения импульсного сигнала в обратном и прямом направлении после отражения от конца линии. Время распространения зависит от наличия и параметров гололедной муфты.

Генератор ВЧ-импульсов тока 3 осуществляет предварительное разогревание и формирование подтопленной прослойки между проводом и ледяной муфтой. Последующее воздействие мощного импульса тока генератора 4 формирует термодинамический удар, который в совокупности с предварительно подогретой прослойкой осуществляет сброс гололедных образований с проводов ЛЭП.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера 6 и контроллер 5 обеспечивают бесперебойную работу подстанции с отображением оперативной информации на световом табло 7.

## **Вывод**

Доминирующий тренд в области разработки новых средств борьбы с гололедными отложениями на проводах ВЛ состоит в использовании комбинированных преобразовательных установок, способных осуществлять при возникновении необходимости плавку гололеда, а всё остальное время – компенсацию реактивной мощности.

Наиболее перспективным следует признать способ плавки гололеда током ультранизкой частоты, который сочетает достоинства плавки переменным током промышленной частоты (на трех проводах одновременно) и плавки постоянным током (ограничен только активным сопротивлением, отличается плавным регулированием тока плавки). Дополнительное преимущество данной технологии заключается в том, что установка плавки гололеда током ультранизкой частоты легко трансформируется в статический компенсатор реактивной мощности. Это позволяет эксплуатировать дорогостоящее преобразовательное оборудование в течение календарного года. Тем не менее сохраняется такой недостаток, как необходимость отключения ВЛ для проведения очистки.

## Заключение

Используемое на сегодняшний день в России оборудование, достаточно сильно устарело, как физически, так и морально. Оно является почти таким же как и у зарубежных странах, только с отставанием на 20-30 лет. После появившихся рыночных отношений между потребителями и производителями электрической энергии проблемы устаревание и износа электрооборудования весьма актуально.

Аварии из-за гололеда на ВЛ являются самыми тяжелыми и трудно устраняются из-за того, что зимой грунт промерзший, дороги не расчищены и образование гололеда происходит не в одном месте, а разбросано по линии. Аварии из-за гололеда на ВЛ, чаще всего проявляются массово и требуют больших экономических вложений

На процесс появления гололеда на ЛЭП оказывают влияние:

- высота подвеса провода;
- скорость ветра;
- температура воздуха;
- диаметр проводов;
- действие электромагнитного поля;
- закручивание проводов;
- протекание тока нагрузки по проводам;

Гололедно-изморозевое отложение является диэлектриком, который в свою очередь является хаотичной смесью воздуха и льда. Различают: смешанные отложения, зернистую изморозь, гололед, кристаллическую изморозь

Для воздушных линий, которые подвергаются высоким гололедным и ветровым нагрузкам, следует обеспечивать преждевременное обнаружение появления гололеда и оперативность передачи диспетчеру информации для своевременной плавки гололеда.

Доминирующий тренд в области разработки новых средств борьбы с гололедными отложениями на проводах ВЛ состоит в использовании

комбинированных преобразовательных установок, способных осуществлять при возникновении необходимости плавку гололеда, а всё остальное время – компенсацию реактивной мощности.

Наиболее перспективным следует признать способ плавки гололеда током ультранизкой частоты, который сочетает достоинства плавки переменным током промышленной частоты (на трех проводах одновременно) и плавки постоянным током (ограничен только активным сопротивлением, отличается плавным регулированием тока плавки). Дополнительное преимущество данной технологии заключается в том, что установка для плавки гололеда током ультранизкой частоты легко трансформируется в статический компенсатор реактивной мощности. Это позволяет эксплуатировать дорогостоящее преобразовательное оборудование в течение календарного года. Тем не менее сохраняется такой недостаток, как необходимость отключения ВЛ для проведения очистки.

## Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы 6-го и 7-го изд. с изм. и доп. по сост. на 1 января 2010 г. - М. : КноРус, 2010. - 290 с
2. Правила устройств электроустановок (ПУЭ). 7 издание. - С.-Пб.: Энергоатомиздат, 2009. -289 с.
3. Яковлев, Л.В. Комплексные методы и устройства для защиты проводов и грозозащитных тросов воздушных линий от вибрации, «пляски» и гололедообразования / Л.В. Яковлев // Энергетик. 2004. № 3. С. 15-17.
4. Minullin R.G., Fardiev I.Sh., Gubaev D.F., Lukin E.I. Specific Features of the Connection of a Reflectometer to Power Transmission Lines for Location Probing/ Minullin R.G., Fardiev I.Sh., Gubaev D.F., Lukin E.I. // Russian Electrical Engineering. New York: Allerton Press, Inc., Vol. 79 (№ 2).2008. P. 84-91.
5. Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh. Sounding of Air Power Transmission Lines by the Location Method/ Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh // Russian Electrical Engineering. New York: Allerton Press, Inc., Vol. 79 (№ 7). 2008. P. 389-396.
6. Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I., Lukina G.V. Ways to Detect Single - Line - to - Ground Faults in Electricity Transmission Lines using the Location Method/ Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I., Lukina G.V. // Russian Electrical Engineering. New York: Allerton Press, Inc., Vol. 79 (№ 12). 2008. P. 655-663.
7. Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I. Detection of Disconnection Faults and Double - Phase Short Circuits in the Wires of Overhead Transmission Lines by the Location Method/ Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I. // Russian Electrical Engineering. New York: Allerton Press, Inc., Vol. 80(№2). 2009.P.91-101.
8. Справочник энергетика. Учебник./В.И. Григорьев – М.: Колос, 2006.

9. Алексеев, Б.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок/ Б.А. Алексеев // ЭЛЕКТРО. 2009. № 3. С. 17-21
10. Кузнецов, П.А. Способ и устройство обнаружения предвестника пляски провода на воздушной линии электропередачи/ П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2006. С. 47-49.
11. Кузнецов, П.А. Влияние формы отложений на проводе воздушной линии электропередачи на его состояние в ветровом потоке/ П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич// Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2006. С. 5055.
12. Кузнецов, П.А. Распознавание вида отложений на проводах при мониторинге воздушных линий электропередачи/ П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич// Прогрессивные технологии в обучении и производстве: Материалы IV Всерос. конфер. Камышин: КТИ, 2006.
13. Боровицкий, В.Г. Отключения отпаечных линий ВЛ 110 кВ. Влияние высокочастотных перенапряжений/ В.Г. Боровицкий, А.Г. Овсянников// Новости ЭлектроТехники. 2012. № 6(78).
14. Research provides insight into unexplained line outages // INMR. 2011. Vol. 19. № 4. P. 78–86.
15. Пак, Б.И. Устойчивость энергосистем / Б.И. Пак. – М.: ЭНАС, 2016.
16. Блок, В.М. Электрические сети и системы / В.М. Блок. - М.: Высшая школа, 2007.
17. Шеховцов, В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению. - М.: Инфра-М, 2014. - 136 с.
18. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учебник для сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004 – 448 с.
19. Грунтович, Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. Учебное пособие. / Н.В. Грунтович. - М.: Инфра-М, 2015. - 271 с.

20. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети / А.В. Лыкин. – М.: Логос, 2008. - 258 с.
21. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под ред. И.Н. Орлова и др. - М.: МЭИ, 2004.
22. Кузнецов, П.А. Анализ динамических воздействий гололедно-ветровых нагрузок на элементы промежуточной опоры ВЛ-110 кВ / П.А. Кузнецов, С.В. Аверьянов, Г.Г. Угаров // Межвузовский научный сборник «Проблемы электроэнергетики». Саратов, 2005. — С. 36-40.
23. Соловьев, А.В. Способы и устройства питания периферийных устройств систем мониторинга воздушных линий электропередачи / А.В. Соловьев, С.В. Аверьянов, П.А. Кузнецов // Межвузовский научный сборник «Проблемы электроэнергетики». Саратов, 2005. С. 41-45.
24. Кузнецов, П.А. Способ и устройство обнаружения предвестника пляски провода на воздушной линии электропередачи / П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич, Г.Г. Угаров // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2006. С. 47-49.
25. Кузнецов, П.А. Влияние формы отложений на проводе воздушной линии электропередачи на его состояние в ветровом потоке / П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич // Проблемы электроэнергетики: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2006. С. 50-55.
26. Кузнецов П.А. Распознавание вида отложений на проводах при мониторинге воздушных линий электропередачи / П.А. Кузнецов, В.Я. Башкевич // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: Материалы IV Всерос. конфер. Камышин: КТИ, 2006.
27. S. K. Padhan, C. Nahak Journal of Control Science and Engineering [Text] / S. K. Padhan, C. Nahak // Hindawi Publishing Corporation. – Egypt, 2016. – PP. 45-61.
28. Левченко, И.И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи / И.И. Левченко, Е.И. Сацук // Новое в Российской электроэнергетике. -2006.-№11 .— С.29-37.

- 29.Хорольский, В.Я. Надежность электроснабжения / В.Я. Хорольский, М.А.Таранов. - М.: Форум, 2013. - 128 с.
- 30.Новости энергетики: [Электронный ресурс]. М., 2014. URL: <http://novostienergetiki.ru/>. (Дата обращения 01.12.2016).